

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**ŘÍZENÍ KVALITY VZDUCHU V BUDOVÁCH (KONCENTRACE CO<sub>2</sub>)**

Bc. Aleš Bárta

Diplomová práce  
2018

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Aleš Bárta**  
Osobní číslo: **I16183**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Název tématu: **Řízení kvality vzduchu v budovách (koncentrace CO<sub>2</sub>)**  
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

#### Cíl:

V prostředí Merbon IDE vytvořit program pro měření a řízení kvality vzduchu v budově. Vytvořit model objektu z pohledu koncentrace CO<sub>2</sub> a ze změřených dat provést identifikaci neznámých parametrů modelu. Na základě modelu navrhnout řízení pro udržení doporučených koncentrací v závislosti na prostředí. Provést simulační ověření navržené strategie.

#### Obsah teoretické části:

Vzduchotechnika budov, popis principů měření CO<sub>2</sub>, modelování a identifikace, řízení.

#### Obsah implementační části:

Model objektu popisující koncentraci CO<sub>2</sub>, identifikace neznámých parametrů z naměřených dat, návrh řízení, simulační ověření strategie, program pro měření a řízení kvality vzduchu v budově v prostředí Merbon IDE.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.**

**NOVÁK, Petr. Modelování a řízení obsahu CO2 ve vzduchu v obytných budovách. Praha, 2008. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Horáček, CSc.**

**Regulace větrání podle kvality vnitřního vzduchu [online]. In: KOUDELKOVÁ, Daniela. 2011 [cit. 2017-10-18]. ISSN 1801-4399. Dostupné z:**

**<http://vetrani.tzb-info.cz/regulace-vetrani-klimatizace/7602-regulace-vetrani-podle-kvality-vnitriho-vzduchu> Domat Control System [online]. Pardubice:**

**Domat Control System, 2013 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z:**

**<http://domat-int.com/>**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Daniel Honc, Ph.D.**

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **18. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. listopadu 2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2018

Bc. Aleš Bárta

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Danielu Honcovi, Ph.D, za pomoc při vypracování praktické části. Také děkuji firmě Domat Control System za zapůjčení měřicí techniky a praktickým radám k měření.

V Pardubicích dne 18. 5. 2018

Bc. Aleš Bárta

## **ANOTACE**

*Práce se zabývá kvalitou vzduchu v budovách. Kvalitu vyhodnocuji z pohledu koncentrace oxidu uhličitého. Porovnávám principy měření CO<sub>2</sub> a příklady měřících přístrojů na trhu. Jsou zde uvedeny doporučení pro zajištění správné kvality vzduchu v budovách. V praktické části na základě měření bude vytvořena strategie pro udržení správné koncentrace CO<sub>2</sub>. Strategie bude ověřena pomocí simulace v Matlab & Simulink.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*Kvalita vzduchu, regulace CO<sub>2</sub>, Matlab & Simulink, Identifikace a modelování*

## **TITLE**

*AIR QUALITY CONTROL IN BUILDINGS (CO<sub>2</sub> CONCENTRATION)*

## **ANNOTATION**

*The thesis deals air quality in buildings. The quality of the air is measured as concentration of carbon dioxide. There are compared the principles of measurements and measuring devices of CO<sub>2</sub> available on the market. There is recommendation of securing the correct air quality in buildings is included. In practical part is created the strategy for controlling the correct concentration of CO<sub>2</sub> based on the results of measurements. The strategy is verified by simulation in Matlab & Simulink.*

## **KEYWORDS**

*Air quality, Control CO<sub>2</sub>, Matlab & Simulink, Identification and modeling*

## OBSAH

Seznam zkratk a značek.....	9
Seznam symbolů proměnných a funkcí.....	10
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	12
ÚVOD.....	13
1 OXID UHLIČITÝ .....	14
1.1 Vznik CO <sub>2</sub> .....	14
1.2 Vliv oxidu uhličitého na člověka.....	14
1.3 Vyjádření koncentrace oxidu uhličitého.....	15
1.4 Oxid uhličitý v atmosféře .....	15
1.5 Využití oxidu uhličitého .....	16
1.6 Kvalita vnitřního prostředí .....	17
1.7 Legislativa v ČR .....	18
2 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE .....	21
3 VZDUCHOTECHNIKA BUDOV .....	24
3.1 Ohřívání.....	24
3.2 Chlazení.....	24
3.3 Vlhkost .....	25
3.3.1 Vlhčení .....	25
3.4 Ventilátory.....	26
3.4.1 Radiální ventilátor .....	26
3.4.2 Axiální ventilátor.....	27
3.4.3 Diagonální ventilátor .....	28
3.4.4 Diametrální ventilátor.....	28
3.5 Zpětné získávání tepla .....	29
3.5.1 Deskové rekuperační výměníky ZZT .....	30
3.5.2 Trubkové rekuperační výměníky ZZT .....	31
3.5.3 Rotační regenerační výměníky .....	32
3.5.4 Přepínací výměníky .....	34
3.5.5 Systémy s kapalinovým okruhem.....	35
3.5.6 Tepelné trubice .....	35
3.6 Klapky .....	36
3.7 Požární ochrana .....	36

3.8	Filtrace .....	38
3.8.1	Třídění filtrů atmosférického vzduchu .....	40
3.8.2	Použití filtrů pro všeobecné větrání .....	41
4	ZPŮSOBY MĚŘENÍ KONCENTRACE CO <sub>2</sub> VE VZDUCHU .....	44
4.1	NDIR senzory .....	44
4.2	Elektrochemické senzory .....	44
4.3	Elektroakustické senzory .....	45
4.4	NDIR senzory s využitím kalibrovaných hodnot .....	45
4.5	Příklady dostupných senzorů CO <sub>2</sub> na trhu .....	45
5	PRAKTICKÁ ČÁST .....	47
5.1	Koncept modelu .....	47
5.2	Výpočet koncentrace CO <sub>2</sub> .....	47
5.3	Návrh modelu .....	48
5.4	Simulace modelu .....	49
5.4.1	Místnost .....	49
5.4.2	Model osob .....	50
5.4.3	Model oken .....	51
5.5	Identifikace neznámých parametrů .....	53
5.5.1	Zařízení pro měření .....	53
5.5.2	Referenční místnost .....	53
5.5.3	Vyhodnocení měření .....	54
5.6	Verifikace modelu .....	58
5.7	Příklady využití získaných modelů .....	59
5.7.1	Školní přednášková místnost .....	59
5.7.2	Spánek v ložnici .....	61
5.7.3	Studentský pokoj .....	62
6	ZHODNOCENÍ .....	63
7	ZÁVĚR .....	64
	LITERATURA .....	65
	PŘÍLOHY .....	67



## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AC	Střídavé napětí
DC	Stejnoseměrné napětí
DDC	Direct Digital Control
DIP	Direct In-Line Package
EATR	Exhaust Air Transfer Ratio
EPA	Efficiency Particulate Air Filter
EPS	Elektrická požární signalizace
CHÚZ	Chráněná úniková cesta
MaR	Měření a regulace
MPPS	Most Penetrating Particle Size
NDIR	NonDispersive Infrared Sensor
OACF	Outdoor Air Correction Factor
SHZ	Samočinné hasicí zařízení
SOZ	Samočinné odvětrávací zařízení
ULPA	Ultra High Penetrating Air Filter
VOC	Volatile organic compound (Těkavé organické látky)
ZZT	Zpětné získávání tepla

## SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH A FUNKCÍ

$pH$	vodíkový exponent
$\varphi$	účinnost zpětného získávání tepla
$t_{e1}$	teplota přiváděného vzduchu před výměníkem, °C
$t_{e2}$	teplota přiváděného vzduchu za výměníkem, °C
$t_{i1}$	teplota odváděného vzduchu za výměníkem, °C
$O_c$	celková odlučivost filtru, %
$c_p$	koncentrace částic před filtrem, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
$c_v$	koncentrace částic za filtrem, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
$V$	vyměněný objem větráním, $\text{m}^3$
$c_{vst}$	venkovní koncentrace $\text{CO}_2$ , ppm
$V_d$	vydechovaný objem, $\text{m}^3$
$c_d$	vydechovaná koncentrace $\text{CO}_2$ , ppm
$c_m$	aktuální koncentrace $\text{CO}_2$ v místnosti, ppm
$V_m$	objem místnosti ve které probíhá měření, $\text{m}^3$
$c_{n0}$	počáteční koncentrace $\text{CO}_2$ v místnosti, ppm

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – Vývoj CO <sub>2</sub> v atmosféře (Earth System Research Laboratory, 2018).....	16
Obr. 3.1 – Schéma radiálního ventilátoru (Zmrhal, 2006) .....	27
Obr. 3.2 – Schéma axiálního ventilátoru (Zmrhal, 2006) .....	27
Obr. 3.4 – Schéma diametrálního ventilátoru (Zmrhal, 2006) .....	29
Obr. 3.5 – Princip deskového rekuperačního výměníku (Zikán, 2010) .....	30
Obr. 3.6 – Princip rotačního regeneračního výměníku (Postupa, 2017) .....	32
Obr. 3.7 – Princip ZZT pomocí tepelné trubice (Lain, 2006b) .....	36
Obr. 3.8 – Typy požárních ochran vzduchotechnického potrubí (Gebauer, 2005).....	37
Obr. 5.1 – Výpočet aktuální koncentrace CO <sub>2</sub> .....	50
Obr. 5.2 – Maska subsystému místnost.....	50
Obr. 5.3 – Maska subsystému produkce CO <sub>2</sub> .....	51
Obr. 5.4 – Subsystém produkce CO <sub>2</sub> .....	51
Obr. 5.5 – Maska subsystému okna.....	52
Obr. 5.6 – Subsystém pro výpočet větraného průtoku .....	52
Obr. 5.7 – Výkres místnosti s polohou umístění senzoru CO <sub>2</sub> .....	54
Obr. 5.8 – Průběh větrání při uzavřené místnosti.....	55
Obr. 5.9 – Průběh větrání při plně otevřeném okně .....	56
Obr. 5.10 – Průběh větrání pomocí ventilace s jednou přítomnou osobou .....	56
Obr. 5.11 – Průběh větrání pomocí okenní mikroventilace .....	57
Obr. 5.12 – Verifikace modelu .....	58
Obr. 5.13 – Simulovaný průběh koncentrace CO <sub>2</sub> při přednášce v letním režimu .....	60
Obr. 5.14 – Simulovaný průběh koncentrace CO <sub>2</sub> při přednášce v zimním režimu .....	60
Obr. 5.15 – Simulovaný průběh koncentrace CO <sub>2</sub> při spánku jedné osoby .....	61
Obr. 5.16 – Simulovaný průběh koncentrace CO <sub>2</sub> při spánku ve dvou osobách .....	62
Obr. 5.17 – Simulovaný průběh koncentrace CO <sub>2</sub> ve studentském pokoji v jedné osobě .....	62

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Minimální objemový prostor podle třídy práce (Česko, 2007).....	18
Tab. 1.2 – Rozdělení tříd práce (Česko, 2007).....	19
Tab. 1.3 – Množství přiváděného venkovního vzduchu do různých prostorů (Česko, 2005) .	20
Tab. 3.1 – Velikost typických příměsí ve vzduchu (Vybíral, 2016) .....	39
Tab. 3.2 – Třídy filtrů podle ČSN EN 779:2012 (Vybíral, 2016).....	41
Tab. 3.3 – Rozdělení vnějších prostředí (Vybíral, 2016a) .....	42
Tab. 3.4 – Třídy kvality vnitřního vzduchu (Vybíral, 2016a).....	42
Tab. 3.5 – Filtry pro kombinaci kvality vnitřního a vnějšího vzduchu (Vybíral, 2016a) .....	42
Tab. 5.1 – Vstupy a výstupy modelu.....	48
Tab. 5.2 – Neznámé parametry modelu .....	49
Tab. 5.3 – Prováděné činnosti v čase pro verifikaci modelu.....	58

# ÚVOD

Tato práce vznikla na základě zkoumání příčin ospalosti a únavy osob ve vnitřních prostorech a také na základě pracovních zkušeností ve firmě Domat Control System, která se zabývá především inteligentním řízením budov. Problematice mikroklimatu v budovách byla věnována řada studií, která ve většině případů zjistila nedodržování platné legislativy v České republice.

V budovách trávíme převážnou část našeho života. Vnitřní prostředí budov nás tedy ovlivňuje více, než si uvědomujeme. Vhodné prostředí může pozitivně ovlivnit naše zdraví, produktivitu a celkovou pohodu. Právě díky tomu je cílem automatizace budov zajištění vhodných hygienických podmínek pro zdravý život a pro práci nebo vzdělávání.

Současný trend snižování energetické náročnosti budov vede k používání materiálů s co nejvyššími izolačními vlastnostmi. Mnohé budovy dnes již prošly rekonstrukcí za účelem snížení energetických nároků. U většiny budov, včetně vzdělávacích zařízení, se ovšem zapomíná na kvalitu vnitřního prostředí. Především ve vzdělávacích zařízeních je důležitá pozornost a aktivita žáků, studentů i samotných vyučujících. Efekt snižování energetické náročnosti vede ke snižování úrovně kvality vzduchu ve vnitřním prostředí, pokud není zajištěna dostatečná výměna vzduchu dle typu prováděné činnosti. Přirozené větrání se poté stává nedostatečné a nejsou často zabezpečeny hygienické požadavky dané platnou legislativou. Lidé se pak v izolovaných a neodvětrávaných budovách mohou setkat se syndromem nezdravých budov.

Řešením je řízené nucené větrání s využitím zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu, které umožňuje snížit tepelné ztráty způsobené větráním. Dalším možným řešením je měření a signalizace aktuální koncentrace oxidu uhličitého pro přítomné osoby, které by měly na základě indikace vhodně zasáhnout.

# 1 OXID UHLIČITÝ

Oxid uhličitý je jednou ze základních složek naší atmosféry. I když jeho poměrné zastoupení není velké, tak malé změny mohou způsobit velké změny klimatu na naší Zemi. Při dlouhodobém poklesu CO<sub>2</sub> v atmosféře by se teplota na Zemi snižovala. Sledovat změny při zvyšující se koncentraci CO<sub>2</sub> můžeme každý již dnes.

Oxid uhličitý je plyn, který je tvořen jedním atomem uhlíku a dvěma atomy kyslíku. Jeho hustota je 1,977 g·l<sup>-1</sup>, což vzhledem k průměrné hustotě vzduchu (1,3 g·l<sup>-1</sup>) způsobuje, že se CO<sub>2</sub> v nevětraných prostorech s omezenou výměnou vzduchu, jako jsou jeskyně či propasti, hromadí ve spodní vrstvě. Oxid uhličitý je dobře rozpustitelný ve vodě, se zvyšujícím tlakem stoupá množství rozpouštěného CO<sub>2</sub>, a naopak se zvyšující se teplotou klesá množství rozpouštěného CO<sub>2</sub>.

## 1.1 VZNIK CO<sub>2</sub>

Oxid uhličitý vzniká při dokonalém spalování fosilních paliv nebo při dýchání člověka i ostatních organismů. Všechny tyto formy spotřebovávají kyslík a vytváří oxid uhličitý. Vzduch vydechaný člověkem obsahuje přibližně 4 % oxidu uhličitého. Opačným pochodem je fotosyntéza, která spotřebovává CO<sub>2</sub> a produkuje kyslík. Oxid uhličitý také vzniká při výrobě vápna a dalších chemických procesech.

## 1.2 VLIV OXIDU UHLIČITÉHO NA ČLOVĚKA

Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> způsobuje dýchací potíže, pocit únavy, ospalosti a nesoustředěnost. Delší působení desetiprocentní koncentrace CO<sub>2</sub> vede až ke smrti člověka. I dlouhodobý pobyt člověka, v řádu několika let, v prostředí se zvýšenou koncentrací, pouze 5000 ppm CO<sub>2</sub>, vede k vážným zdravotním rizikům. Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> vede ke změnám v metabolismu fosforu a vápníku, která se projevuje narušením struktury kostí a ukládání vápníku do tkání. Zvýšená koncentrace oxidu uhličitého také vede ke změně kyselosti krve. Tato vlastnost jedné z nejdůležitějších kapalin v lidském těle je velice přesně regulována. Průměrná denní hodnota pH krve je mezi 7,35 až 7,45. Pokud pH krve stoupne nad hodnotu 7,6, krev je alkalická. Tento jev se nazývá alkalóza. Naopak při poklesu pH krve pod hodnotu 7,2 se krev stává kyselější. Tento jev se označuje jako acidóza. Se zvyšující se koncentrací oxidu uhličitého se zvyšuje kyselost krve. Pokud by se na Zemi zvýšila koncentrace CO<sub>2</sub> na hodnotu 720 ppm, u člověka by došlo k patologické acidóze. Důsledkem tohoto můžou být poruchy struktury kostí, pocit únavy, ospalosti a mírné zvýšení krevního tlaku. Tyto

všechny příznaky mohou vést ke zvýšení úmrtnosti a neschopnosti velké části populace vykonávat fyzicky náročnou aktivitu. Člověk totiž není dostatečně přizpůsobený, jako například mořští savci, na zvýšenou koncentraci CO<sub>2</sub> v krvi. Podmořští savci si během evoluce vyvinuli mechanismy umožňující toleranci zvýšeného množství CO<sub>2</sub> v krvi.

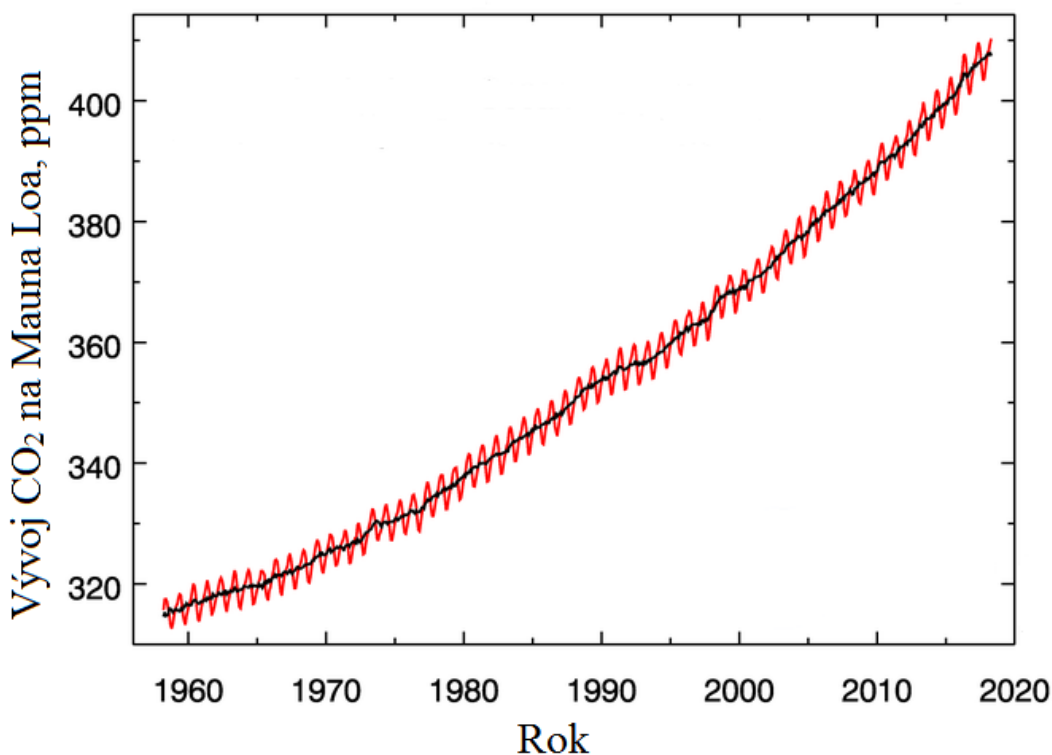
### **1.3 VYJÁDŘENÍ KONCENTRACE OXIDU UHLIČITÉHO**

Koncentraci CO<sub>2</sub> lze vyjádřit několika způsoby. V technické praxi se nejčastěji vyjadřuje pomocí hodnoty ppm (pars per milion). Tato hodnota odpovídá počtu částic na jeden milion částic. V běžném životě se setkáme s vyjádřením pomocí objemových procent. V chemii se můžeme setkat s vyjádřením mg CO<sub>2</sub> v jednom litru vzduchu. (NÁTR, 2006)

### **1.4 OXID UHLIČITÝ V ATMOSFÉŘE**

Současná hodnota CO<sub>2</sub> v atmosféře se pohybuje okolo 410 ppm. Tato hodnota se mění v závislosti na ročním období. Největší koncentrace je okolo dubna až května v době, kdy končí vegetační klid na severní polokouli. Minimum je v září, kdy na severní polokouli vrcholí vegetační období. Toto kolísání během jednoho roku dosahuje přibližně 7 ppm.

Nejdelší dlouhodobé měření zahájil roku 1957 Charles D. Keeling v ústavu Loa Jolla v Kalifornii. V roce 1974 bylo měření přesunuto na havajskou sopku Mauna Loa, kde měření probíhá do současnosti. Měření probíhá na principu NDIR senzorů, popsány v kapitole 4.1. Analyzátor množství oxidu uhličitého porovnává přesně známý vzorek oxidu uhličitého s neznámým vzorkem. Kalibrovaný a neznámý vzorek se střídají v měření a tímto je vyhodnocena absolutní koncentrace oxidu uhličitého v neznámém vzorku. Přesnost měření v těchto observatořích se uvádí menší než 0,2 ppm. Z obr. 1.1, kde je zaznamenáno celé měření oxidu uhličitého v Loa Jolla a Mauna Loa, se od začátku měření zvýšila koncentrace o více jak 92 ppm. (Wagner, 2009)



Obr. 1.1 – Vývoj CO<sub>2</sub> v atmosféře (Earth System Research Laboratory, 2018)

## 1.5 VYUŽITÍ OXIDU UHLIČITÉHO

Oxid uhličitý se využívá v řadě technologických procesů, kde se uplatňují jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Typickou aplikací je vysokotlaká extrakce v potravinářském průmyslu, kde je nutné při zpracování zachovat cenné látky, jakými jsou například vitamíny, které jsou při zpracování vysokou teplotou nestabilní. Jedna z nejznámějších extrakcí v našem regionu je extrakce chmele v pivovarnictví, kde se až polovina světové produkce chmelového extraktu získá tímto postupem. Další aplikací je odstraňování kofeinu z kávy a čaje. Oxid uhličitý se také využívá v nápojovém průmyslu při výrobě sycených nápojů nebo jako tlačný plyn při stáčení. Použitím CO<sub>2</sub> se eliminuje působení kyslíku, které negativně ovlivňuje senzoryckou stabilitu a trvanlivost výrobku.

Oxid uhličitý, resp. pelety z CO<sub>2</sub>, lze také využít ve velice širokém spektru čistících aplikací. V automobilovém průmyslu a strojírenství k čištění výrobních zařízení a periferií, a předúpravě povrchu před lakováním, v dopravních prostředcích k hloubkovému čištění interiérů suchou cestou, ve stavebnictví k čištění stavebních strojů a zařízení či čištění přímo fasád budov a památek, v polygrafickém průmyslu k čištění tiskařských strojů, v chemickém průmyslu, v městské infrastruktuře, dále je možné využít CO<sub>2</sub> k sanaci objektů po požáru atd.



Proces čištění využívá kombinaci tří efektivních faktorů, díky kterým dosahuje vysoké účinnosti. První z faktorů je využití kinetické energie pelet suchého ledu, které jsou urychlovány stlačeným vzduchem a dosahují až rychlosti zvuku. Druhým faktorem je termický šok, kdy je znečištěná vrstva prudce zchlazena. Nečistota po zchlazení křehne a postupně se uvolňuje. Teplota suchého ledu dosahuje  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Posledním významným faktorem je sublimace, která spočívá ve změně skupenství dopadajících pelet suchého ledu z pevného na plynné. Při této změně skupenství dochází k prudkému znásobení objemu (700 až 800×). Tento efekt dokonale odstraní nečistoty bez poškození čištěného povrchu. Pelety  $\text{CO}_2$  se po sublimaci odpaří a po čištění zůstává pouze uvolněná nečistota, kterou lze snadno odstranit. (EcoStations, 2018)

V neposlední řadě se nachází uplatnění v hasicích přístrojích, kde se kombinuje jeho účinek. Jednak ve formě sněhu (suchého ledu) ochlazuje plameny a vzhledem k vyšší objemové hustotě vytváří nad plameny ochrannou atmosféru, která zabraňuje přístupu vzduchu k plamenům. Jelikož je oxid uhličitý nevodivý, lze s ním hasit i elektrická zařízení pod proudem. Dále se využívá v tepelných čerpadlech jako pracovní látka či ve sprejích jako hnací plyn a také jako efektivní prvek při kulturních akcích. (Bušta, 2012)

## 1.6 KVALITA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

Kvalitu vnitřního prostředí neurčuje pouze koncentrace oxidu uhličitého, ale i další faktory. Mezi tyto faktory patří teplota, relativní vlhkost vzduchu, rychlost proudění vnitřního vzduchu, intenzita osvětlení, prašnost, hluchost, vodní páry, těkavé organické látky (VOC) a mnohé další. Nedodržení pouze jedné hodnoty zmíněných faktorů v přijatelných mezích může vést ke sníženému komfortu užívaného prostoru.

Na kvalitu vnitřního prostředí z hlediska koncentrace oxidu uhličitého má zásadní vliv odvětrávání znehodnoceného vzduchu. Větrat lze buď přirozeně nebo nuceně. Přirozené větrání zajišťují netěsnosti v oknech, dveřích a stavební konstrukci. Vzhledem k neustálé snaze zvyšování těsnosti budov je ovšem velmi problematické. Pouze přirozené větrání budov, které jsou izolovány například zateplením obvodového zdiva, nebo pomocí plastových oken, není dostatečné pro výměnu vzduchu v budovách obývanými lidmi. Pro udržení optimální koncentrace je nutné využít nucené větrání. Nuceným větráním neovlivňujeme pouze koncentraci oxidu uhličitého, ale i další parametry. Součástí vzduchotechniky je také filtr, kterým je zajištěna nižší prašnost větraného prostoru.

## 1.7 LEGISLATIVA V ČR

V České republice platí vyhláška č.268/2009 Sb. O technických požadavcích na stavby, která v paragrafu jedenáct odstavec 5 uvádí, že ukazatel kvality vnitřního prostředí slouží koncentrace oxidu uhličitého, která nesmí překročit hodnotu 1500 ppm.

Minimální množství přiváděného venkovního vzduchu v závislosti na typu vykonávané činnosti stanovuje nařízení vlády č.361/2007 Sb. O ochraně zdraví při práci. Činnosti jsou rozděleny do pěti tříd v tab. 1.1. Větrání pracovišť musí být dostatečně zajištěno pomocí přirozeného, nuceného či kombinací obou větrání. Minimální množství přiváděného venkovního vzduchu na pracoviště musí být pro třídu I a IIa  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  pro jednoho zaměstnance na pracovišti bez přítomnosti chemických látek, prachů či jiných zdrojů znečištění. Pokud při vykonávání činnosti třídy I a IIa je pracoviště znečištěno přítomností chemických látek, prachů či jiných znečištění, musí být minimální množství přiváděného vzduchu  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . Pro zaměstnance vykonávajícího činnost zařazenou do tříd IIb, IIIa nebo IIIb musí být zajištěn přívod  $70 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  venkovního vzduchu. Pro nejnáročnější činnosti zařazené do třídy IVa, IVb nebo V je na zaměstnance nutný přívod  $90 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  venkovního vzduchu. Při další zátěži, kterou představuje teplo či pachy, je nutné zvýšit přívod venkovního vzduchu o  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  na jednoho zaměstnance oproti hodnotě dané typem činnosti. Proudění přiváděného vzduchu musí zabezpečovat provětrání pracoviště, ale nesmí současně přispívat k šíření škodlivin na jiné pracoviště.

Nucené větrání musí být použito vždy, kdy není možné pouhým přirozeným větráním prokazatelně zajistit podmínky k ochraně zdraví zaměstnance po celý rok. Nařízení také udává minimální objemový prostor pro zaměstnance uvedený v tab. 1.2. Tento udávaný objemový prostor nesmí být zmenšen stabilním provozním zařízením. (Česko, 2007)

Tab. 1.1 – Minimální objemový prostor podle třídy práce (Česko, 2007)

Třída činnosti	Minimální objemový prostor
I a IIa	$12 \text{ m}^3$
IIb, IIIa a IIIb	$15 \text{ m}^3$
IVa, IVb a V	$18 \text{ m}^3$

Tab. 1.2 – Rozdělení tříd práce (Česko, 2007)

Třída práce	Druh práce
I	Práce vsedě s minimální celotělovou pohybovou aktivitou, kancelářské administrativní práce, kontrolní činnost v dozornách a velínech, psaní na stroji, práce s PC
IIa	Práce převážně vsedě spojená s lehkou manuální prací rukou a paží
IIb	Práce spojená s řízením nákladního vozidla, traktoru, autobusu, trolejbusu, tramvaje. Převažující práce vstoje s trvalým zapojením obou rukou, paží a nohou – dělnice v potravinářské výrobě, mechanici, strojní opracování a montáž středně těžkých dílců, práce na ručním lisu.
IIIa	Práce vstoje s trvalým zapojením obou horních končetin občas v předklonu nebo vkleče, chůze – údržba strojů, mechanici, obsluha koksové baterie, práce ve stavebnictví – ukládání panelů na stavbách pomocí mechanizace, skladníci s občasným přenášením břemen do 15 kg, řezníci na jatkách, zpracování masa, pekaři, malíři pokojů, operátoři poloautomatických strojů, montážní práce na montážních linkách v automobilovém průmyslu
IIIb	Práce vstoje s trvalým zapojením obou horních končetin, trupu, chůze, práce ve stavebnictví při tradiční výstavbě, čištění menších odlitek sbíječkou a broušením, příprava forem na 15 až 50 kg odlitky, foukači skla při výrobě velkých kusů, obsluha gumárenských lisů, práce na lisu v kovárnách, chůze po zvlněném terénu bez zátěže, zahradnické práce a práce v zemědělství.
IVa	Práce spojená s rozsáhlou činností svalstva trupu, horních i dolních končetin – práce ve stavebnictví, práce s lopatou ve vzpřímené poloze, přenášení břemen o váze 25 kg, práce se sbíječkou, svoz dřeva, práce v dole – chůze po rovině a v úklonu do 15°, práce ve slévárnách, čištění a broušení velkých odlitek, příprava forem pro velké odlitky, strojní kování menších kusů, plnění tlakových nádob plyny.
IVb	Práce spojené s rozsáhlou a intenzivní činností svalstva. Práce na pracovištích hlubinných dolů – ražba, těžba, doprava, práce v lomech, práce v zemědělství s vysokým podílem ruční práce, strojní kování větších kusů.
V	Práce spojené s rozsáhlou a velmi intenzivní činností svalstva. Transport těžkých břemen např. pytlů s cementem, výkopové práce, práce sekerou při těžbě dřeva, chůze v úklonu 15 až 30°, ruční kování velkých kusů, práce na pracovištích hlubinných dolů s ruční ražbou v nízkých profilech důlních děl.

Pro vzdělávací zařízení platí vyhláška č. 410/2005 Sb. o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých. Tato vyhláška stanovuje množství přiváděného venkovního vzduchu v učebnách, tělocvičnách, šatnách a hygienických zařízeních, hodnoty jsou v tab. 1.3. V tělocvičnách je rozsah  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  až  $90 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  s ohledem na konkrétní využití. Při náročném cvičení bude jistě přiváděné množství na žáka větší než při kulturní akci. Vyhláška také stanovuje průměrné hodnoty teplot, rychlostí proudění a relativní vlhkosti pro jednotlivé typy prostoru. (Česko, 2005)

Tab. 1.3 – Množství přiváděného venkovního vzduchu do různých prostorů (Česko, 2005)

Typ prostoru	Množství vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ ]
Učebny	20 až 30 na 1 žáka
Tělocvičny	20 až 90 na 1 žáka
Šatny	20 na 1 žáka
Umývárny	30 na 1 umyvadlo
Sprchy	150 až 200 na 1 sprchu
Záchody	50 na jednu kabinku, 25 na jeden pisoár

## 2 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE

Základní myšlenku modelování lze vyjádřit větou: Všechny modely jsou špatně, ale některé mohou být užitečné. První část věty říká, že všechny modely jsou zjednodušením reality, jinak by to nebyl model. Model se vždy liší od reality díky zjednodušení či zanedbání faktorů. Druhá část říká, že některé modely mohou být užitečné právě díky zjednodušení. Dobrý model vybírá důležité faktory reality a ty nepodstatné neuvažuje. Tímto nám model pomáhá lépe poznat realitu, ale ani všechny zjednodušené modely nemusí být užitečné pro poznání reality. Jedním z příkladů typického zjednodušeného modelu je mapa. Mapa je model prostoru, který ovšem neobsahuje všechny detaily a tím dochází ke zkreslení reality. Jedním z účelů modelování je modelovat problém a nemodelovat systém. To lze dokázat na příkladu s mapami. Mapa, která by obsahovala všechny detaily (tzv. univerzální mapa), by byla vcelku nepřehledná a nepoužitelná, proto existují mapy pro specifický účel, například automapy či turistické mapy. Dnes výkon výpočetní techniky dovoluje udělat model, který bude obsahovat veškeré detaily, bude velice složitý a efektně vypadá, ale stále by měl odpovídat na základní otázku, pro jaký účel byl model vytvářen.

Existuje celá řada typů modelů, přičemž některé jsou úzce svázány s konkrétním cílem. Prvním typem jsou mentální modely, protože i myšlení je založeno na použití mentálních modelů. Realitu teda vnímáme každý přes vlastní informační filtr, čímž vzniká velmi zjednodušený model. Veškeré myšlení probíhá s využitím tohoto modelu s využitím analýz a simulací mentálního modelu reality. Dalším typem jsou matematické modely, které pomocí matematických rovnic vyjadřují stav systému. Tyto systémy lze rozdělovat podle více hledisek. Základní dělení je do kategorií stochastických a deterministických modelů. Stochastické modely, které si lze představit jako černou skříňku s měřitelnými vstupy a výstupy, nemají žádný fyzikální smysl. Popis stochastického modelu se získává z experimentálně naměřených dat. Deterministické modely mají pevně danou vnitřní strukturu, chování modelu je pak dáno touto strukturou. Při sestavování modelu pomocí analytických metod vycházíme například z látkové nebo energetické rovnováhy, z fyzikálních, chemických či biologických procesů. Matematické modely se dále dělí podle časové závislosti na statické a dynamické a podle spojitosti signálu na spojité a diskrétní. Dynamické systémy se popisují pomocí diferenciálních rovnic ve spojité oblasti a pomocí diferenčních rovnic v diskrétní oblasti. Posledním typem jsou výpočetní modely, které jsou tvořeny soustavou rovnic nebo programem. Model se však nezkoumá analyticky, ale pomocí simulací. Tyto modely se používají pro zkoumání komplexních systémů.

I přesto, že jsou modelovací techniky značně rozmanité, základní fáze modelování jsou ve všech případech podobné. Tento proces dělíme na šesti fází,

- formulace problému,
- základní návrh modelu,
- implementace modelu,
- verifikace a validace,
- simulace a analýza,
- sumarizace výsledků.

Tento seznam je však idealizovaný, v praxi nepostupujeme plynule od první fáze do poslední, ale často se vracíme k předešlým bodům. I přesto bychom měli tento postup znát a neopomínat žádný z uvedených bodů.

Experimentální identifikace je vyšetření dynamických vlastností systému a stanovení jeho matematického modelu experimentálním postupem. Pomocí přesně definovaných testovacích signálů působíme na systém a zaznamenáváme jeho odezvu.

Předmětem identifikace je určení struktury a parametrů modelu. Strukturu určuje řád a zvolený typ diferenciální či diferenční rovnice nebo soustava rovnic, poté se hovoří o strukturální identifikaci. Parametry pak představují koeficienty těchto rovnic nebo přenosů, tento proces se nazývá parametrická identifikace. Proces identifikace a modelování se tedy vzájemně prolínají. Při procesu identifikace hraje roli samotná identifikace informací o modelu. Informace zjištěné pozorováním objektu, což se nejčastěji děje pomocí měření, které se kvantifikuje a vhodnými prostředky zpracovává, se nazývá aposteriorní informací. Oproti tomu informace získané z existujících poznatků, které nahromadilo lidstvo pozorováním příbuzných tříd objektů, do kterých patří i zkoumaný systém, se nazývají apriorní informace. Oba tyto typy informace představují úplnou informaci o zkoumaném systému. Apriorní informace má především charakter kvalitativní, zatímco aposteriorní informace přináší spíše kvantitativní charakter.

Identifikace v procesu řízení má charakter pomocného oboru. Abychom mohli objekt řídit, je potřeba znát vlastnosti řízeného objektu. Na základě vytvořeného modelu je možné navrhnout vhodnou strategii řízení. Model určený pro potřeby syntézy řízení nemusí vyjadřovat vnitřní mechanismy, ale postačí formální souvislost mezi vstupy a výstupy. Model založený na fyzikální analýze je obtížnější na tvorbu, neboť vyžaduje technologickou znalost podstaty problému. Identifikaci můžeme provádět dvěma způsoby. Off-line, kdy je model stanovený na základě fyzikálních zákonů, technologických a konstrukčních vlastností nebo na základě

prováděných experimentů. Sestavený model je pak zachován po dobu činnosti zařízení. Druhý způsob je pomocí on-line metody, kdy je model neustále adaptivně zpřesňovaný na základě nepřetržitých experimentů na identifikovaném objektu. Obecně lze upravovat jak strukturu, tak i parametry modelu. Tyto modely se využívají u systémů s nestacionárním chováním.

K zabezpečení řízení je třeba na základě měřených veličin mít znalost o aktuálním stavu řízené soustavy, definovat cíle řízení a vytvořit algoritmus řízení. Stále častěji se u velmi složitých řízených systémů stává model soustavy přímo součástí řídicího algoritmu. Hlavní výhodou zahrnutí modelu do řídicího algoritmu je navržení nejvhodnějšího způsobu řízení. K nastavení parametrů řízení, k získávání informací o stavu systému, které nelze přímo určit měřeními a při změně parametrů soustavy v čase je možné opakovanou identifikací provádět opravu parametrů regulátoru. (Pelánek, 2011)

## 3 VZDUCHOTECHNIKA BUDOV

Vzduchotechnická zařízení slouží k úpravě a distribuci vzduchu. Mezi procesy, kterými upravujeme parametry vzduchu, patří ohřívání, chlazení, zvlhčování, sušení, rekuperace a filtrace. Všechny tyto komponenty spolu s pohonnou jednotkou a klapkami jsou součástí vzduchotechnické jednotky. Pohonnou jednotkou je ventilátor, který slouží k transportu vzduchu na místo určení.

### 3.1 OHŘÍVÁNÍ

Ohřivače ve vzduchotechnice pracují na různých principech a podle toho rozdělujeme ohřivače na vodní, parní, elektrické a chladvové. Vodní ohřivače, které patří mezi nejrozšířenější, a jedná se vlastně o rekuperační výměník voda-vzduch, mají za teplotní médium vodu s teplotním spádem např. 55 °C na 45 °C. Výkon vodního ohřivače ovlivňuje především teplosměnná plocha a rozdíl teplot vody a ohřivaného vzduchu. Regulace vodních ohřivačů se dělí na kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní regulace spočívá v konstantním průtoku vody ohřivačem a regulaci její teploty. Kvantitativní regulace, která je méně účinná než regulace kvalitativní, naopak udržuje konstantní teploty vody a mění se její průtok. Celý proces probíhá např. tak, že do výměníku vstupuje voda o teplotě 55 °C, proudící vzduch odebírá přes teplosměnnou plochu teplo, čímž dochází k ochlazení vody ve výměníku a voda, která vystupuje z výměníku, má teplotu např. 45 °C. Tento příklad by odpovídal výměníku 55 °C na 45 °C.

### 3.2 CHLAZENÍ

Hlavním cílem chladiče je snížení teploty vzduchu. Principy jsou obdobné jako u ohřivačů. U chlazení je menší teplotní rozdíl mezi teplotou látkou a ochlazovaným vzduchem, proto je potřeba větší teplosměnná plocha než u ohřivačů. Chladiče se principiálně dělí na vodní nebo přímé výparníky. Přímé výparníky mají za teplotní látku chladičivo – vzduch. Chladičivo se vstříkuje do proudu vzduchu, který prochází výparníkem, odpařuje se přes stěny výměníku a odebírá teplo vzduchu. Přímý výparník se těžko reguluje a může docházet k namrzání výměníku. Chladicí proces vodního výměníku je opačný k procesu ohřívání. Teplota vody je nižší než teplota procházejícího vzduchu, který se ochlazuje o stěnu výměníku a předává teplo vodě. Chlazení vzduchu může být suché či mokré. Záleží, zda při procesu dochází ke kondenzaci či nikoli. U suchého chlazení je povrchová teplota chladiče vyšší než teplota rosného bodu a naopak. (Lom, 2013)



### 3.3 VLHKOST

Vlhkost je základní vlastnost vzduchu. Udává, jaké množství vody ve formě páry je obsaženo ve vzduchu. Vlhkost ve vzduchu lze vyjádřit více definovanými způsoby. Stav, kdy vzduch pojme maximální množství, páry se nazývá nasycení. První vyjádření vlhkosti vzduchu je absolutní vlhkost vzduchu, která je definována jako hmotnost páry obsažené v 1 m<sup>3</sup> vlhkého vzduchu. Dalším způsobem vyjádření je pomocí měrné vlhkosti, která je definována jako poměr hmotnosti vodní páry a suchého vzduchu. Tato definice se využívá při úpravách vlhkosti vzduchu. Poslední možností, jak vyjádřit vlhkost, je pomocí relativní vlhkosti, která je odvozena a experimentálně měřitelná. Je definována jako poměr parciálního tlaku vodní páry a parciálního tlaku nasycené vodní páry. Případně je také definována jako poměr absolutní vlhkosti vzduchu daného vzduchu k absolutní vlhkosti nasyceného vzduchu při stejné teplotě.

Chováním vlhkého vzduchu a termodynamikou se zabývá obor psychrometrie, která počátkem minulého století zaznamenala výrazné prohloubení teoretických poznatků. Tyto poznatky vedly k vývoji nových technologických řešení. Správná vlhkost vzduchu se často opomíjí a hledí se pouze na teplotu vzduchu či koncentraci oxidu uhličitého. Správná vzdušná vlhkost působí pozitivně na lidské zdraví. Optimální relativní vzdušná vlhkost je v rozmezí 40 % až 60 %. Pokud je vlhkost nižší než 40 %, zvyšuje se riziko tvorby plísní, riziko onemocnění z nachlazení. Sliznice pro svou správnou funkci potřebují minimální relativní vlhkost 45 %. Vlhkost se ovšem netýká pouze lidí, ale různé technologické procesy vyžadují specifickou vlhkost, jako například výroba papíru, zpracování tabáku, dřeva, vlákn, výroba a skladování potravin, uchovávání hudebních nástrojů, obrazů a uměleckých předmětů, chov zvířat a pěstování rostlin. Zvlhčováním vzduchu zvyšujeme kvalitu klimatu, kvalitu výrobků a ochranu proti bakteriím. Naopak snižujeme prašnost prostředí a velikost elektrostatického náboje.

#### 3.3.1 Vlhčení

Zařízení pro zvyšování vlhkosti vzduchu je zvlhčovač. Na provozní funkci zvlhčovačů má zásadní vliv kvalita vody a upraveného vzduchu. Při volbě správného zvlhčovače je třeba brát v úvahu kritéria jako hygienické požadavky, podíl venkovního vzduchu, požadovaný vlhčící výkon, možnost instalace, přesnost regulace, pořizovací náklady, provozní náklady a mnohé další. Pro vlhčení vzduchu se využívá dvou základních principů. Vlhčení vodou, kde se přímo rozprašuje voda do proudu vzduchu a vlhčení pomocí páry, kde se do proudu vzduchu vstříkuje pára. Rozlišují se také dva procesy vlhčení. Vyjadřují se pomocí čar v Molliérově

diagramu. Jedná se o proces adiabatický, kdy při vlhčení vodou dochází k poklesu teploty vzduchu a proces izotermický, kdy při vlhčení párou zůstává teplota vzduchu konstantní. Vlčení vodou se také používá jako přímé adiabatické chlazení. Pro správnou funkci chlazení je nutná podmínka malé počáteční vlhkosti přívodního vzduchu. Pokud by přivedený vzduch měl vysokou vlhkost, tak další vlhkost nepojme a nebude docházet k chlazení vzduchu. (Silbernágl, 2016)

### 3.4 VENTILÁTORY

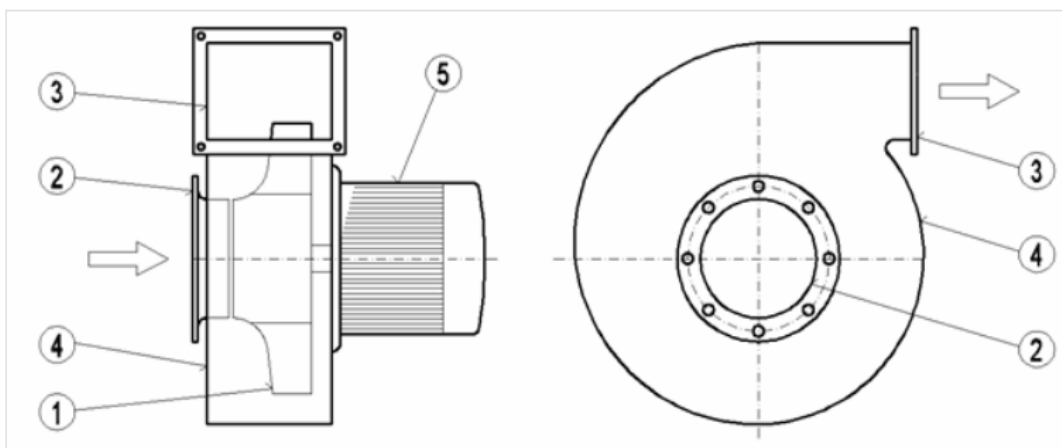
Každá vzduchotechnika obsahuje ventilátor, který slouží k dopravě vzduchu do větraného prostoru a z větraného prostoru. Ventilátor musí zajistit dostatečný tlakový rozdíl pro překonání tlakových ztrát. Hlavními parametry ventilátoru je dopravní tlak, příkon, objemové množství vzduchu a hlučnost. Objemový průtok vzduchu je definován jako množství vzduchu, které je schopen ventilátor dopravit. Průtok se udává v  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a je zpravidla pro hustotu vzduchu  $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . U vysokotlakých ventilátorů je potřeba navíc počítat se stlačitelností vzduchu, ta se zanedbává u nízkotlakých a středotlakých ventilátorů. Výkon ventilátoru se stanoví jako součin průtoku a celkového dopravního tlaku. Příkon ventilátoru je definován jako podíl výkonu ventilátoru a celkové účinnosti. Ventilátory se dělí na radiální, axiální, diagonální a diametrální.

Důležitý parametr u ventilátorů je ohřátí vzduchu ve ventilátoru, který nám může ovlivnit teplotní regulaci, pokud bychom tento parametr zanedbali.

Především v klimatizačních systémech je třeba počítat s energií, kterou ventilátor předává proudícímu vzduchu. U nízkotlakých ventilátorů nehraje ohřátí velkou roli, protože ke zvyšování teploty dochází především při stlačování vzduchu. Další teplo se přívodnímu vzduchu předává, pokud je v cestě vzduchu elektromotor.

#### 3.4.1 Radiální ventilátor

Radiální ventilátor, zobrazen na obr. 3.1, se skládá z oběžného kola (1), sacího hrdla (2), výtlačného hrdla (3), spirální skříně (4) a elektromotoru (5). Součástí oběžného kola jsou lopatkové kanály, které při otáčení nasávají vzduch v axiálním směru, ale výtlačný vzduch je v kolmém (radiálním) směru na osu rotace. Spirální skříň, obdobně jako difuzor, přeměňuje kinetickou energii na energii tlakovou.

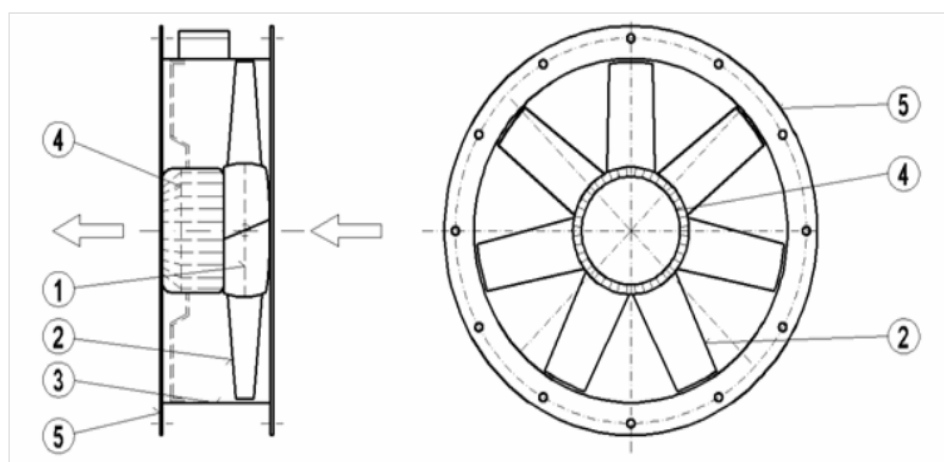


Obr. 3.1 – Schéma radiálního ventilátoru (Zmrhal, 2006)

Radiální ventilátory se rozlišují dle tvaru lopatek oběžného kola na oběžná kola s dopředu zahnutými lopatkami, dozadu zahnutými lopatkami a radiálně zakončenými lopatkami. Nejvyšší účinnosti dosahují ventilátory s dozadu zahnutými lopatkami a to až 85 %. Radiální ventilátory se dělí podle dopravního tlaku na nízkotlaké, které jsou do tlaku 1000 Pa, středotlaké od 1000 Pa do 3000 Pa a vysokotlaké nad 3000 Pa.

### 3.4.2 Axiální ventilátor

Axiální ventilátor, zobrazený na obr 3.2, se zpravidla skládá z rotoru (1) s oběžnými lopatkami (2), pláště (3), elektromotoru (4). Potrubní provedení axiálních ventilátorů je opatřeno přírubami (5). U axiálních ventilátorů proudí vzduch ve směru osy otáčení rotoru. Hlavní výhodou je velký průtok vzduchu, ale nedosahuje vysokého dopravního tlaku.

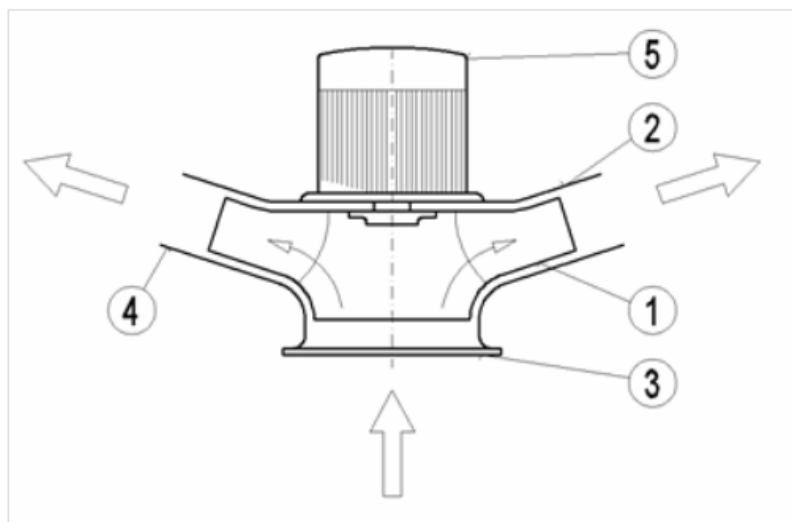


Obr. 3.2 – Schéma axiálního ventilátoru (Zmrhal, 2006)

Axiální ventilátory se dělí na přetlakové a rovnotlaké. Přetlakové mají za oběžným kolem vyšší tlak než před ním. Objemový průtok se pohybuje v širokém pásmu a používá se především pro větrací a klimatizační zařízení, ale i pro chladicí věže. Celková účinnost těchto typů se pohybuje okolo 85 %. Rovnotlaké ventilátory se využívají zejména v průmyslu. Statický tlak, jak vychází z názvu, je před i za oběžným kolem stejný, pouze se v oběžném kole urychluje proud vzduchu. Za oběžným kolem ventilátoru, které může dosahovat průměru až 3 metry, je umístěn difuzor, ve kterém při poklesu dynamického tlaku roste statický tlak. Celková účinnost dosahuje cca 80 %.

### 3.4.3 Diagonální ventilátor

Diagonální ventilátor, který svou konstrukcí připomíná radiální ventilátor, ve skutečnosti se jedná o přechod mezi axiálním a radiálním ventilátorem. Vzduch je do ventilátoru přiváděn v axiálním směru, ve směru osy rotace oběžného kola, a je vytlačován z ventilátoru pod úhlem menším než 90 °. Schéma ventilátoru je na obr. 3.3, mezi hlavní součásti patří oběžné kolo (1), skříň ventilátoru (2), sací hrdlo (3), výtlačné hrdlo (4) a elektromotor (5).

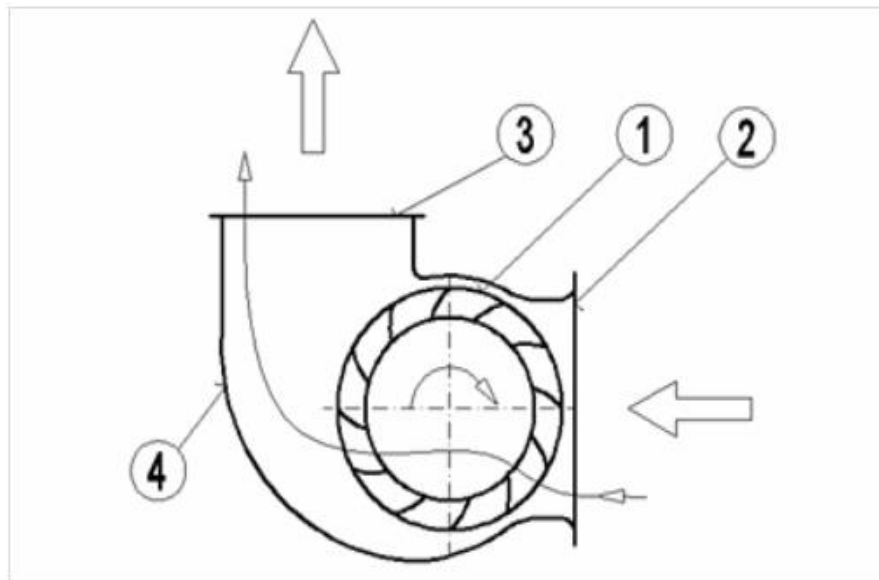


Obr. 3.3 – Schéma diagonálního ventilátoru (Zmrhal, 2006)

### 3.4.4 Diametrální ventilátor

Diametrální ventilátor, která je znázorněný na obr. 3.4, nasává vzduch z vnějšího obvodu oběžného kola (1) v sacím hrdle (2). Dále vzduch prochází příčně oběžným kolem a vystupují na vnějším obvodu, odkud je vytlačován do výtlačného hrdla (3). Všechny tyto

komponenty jsou v pevné skříni ventilátoru. Po obvodu oběžného kola jsou rozmístěné dopředu zahnuté lopatky. Použití diametrálních ventilátorů je především pro nasávání vzduchu v širokém podélném rozměru například u jednotek typu fan-coil. Celková účinnost tohoto typu se uvádí 45 % až 55 %. (Zmrhal, 2006)



Obr. 3.3 – Schéma diametrálního ventilátoru (Zmrhal, 2006)

### 3.5 ZPĚTNÉ ZÍSKÁVÁNÍ TEPLA

V nových či rekonstruovaných objektech jsou snižovány tepelné ztráty a v těchto objektech narůstá podíl tepelných ztrát větráním. To dává podnět pro vývoj zařízení pro ZZT ve vzduchotechnice. Dnes se klade důraz na zlepšení hospodaření s energiemi a tím snížení provozních nákladů.

Účinnost ZZT se vyjadřuje jako koeficient teplotní účinnosti  $\varphi$  daný vztahem

$$\varphi = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{t_{i1} - t_{e1}}, \quad (3.1)$$

kde  $\varphi$  – účinnost ZZT,

$t_{e1}$  – teplota přiváděného vzduchu před výměníkem, °C,

$t_{e2}$  – teplota přiváděného vzduchu za výměníkem, °C,

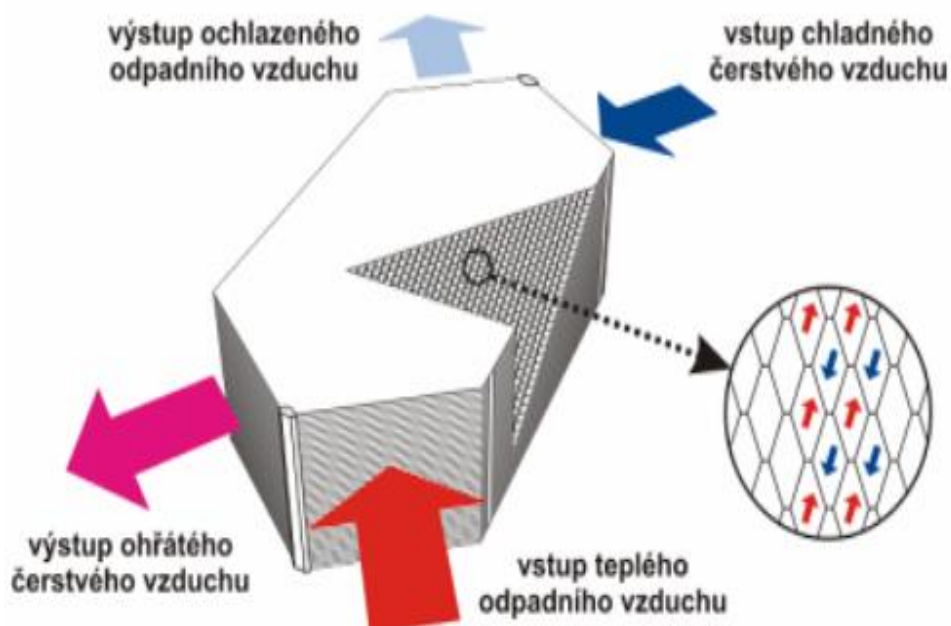
$t_{i1}$  – teplota odváděného vzduchu před výměníkem, °C.

Účinnost zařízení pro ZZT je velmi ovlivněna dimenzováním a provozem. Základním parametrem je teplosměnná plocha, tj. plocha výměníku vzhledem k průtoku vzduchu. Při malém průtoku vzduchu a velkém výměníku roste účinnost a klesají tlakové ztráty a naopak.

Účinnost je definována pouze pomocí teplot, kterou ovlivňuje i poměr průtoků přiváděného a odváděného vzduchu. Jakmile je průtok odváděného vzduchu větší než množství přiváděného, pak roste účinnost systému ZZT. Dalším parametrem, který výrazně ovlivňuje účinnost, je kondenzace vlhkosti odpadního vzduchu. Pokud má odpadní vzduch vyšší vlhkost, pak roste jeho teplota rosného bodu i riziko kondenzace vody. Při kondenzaci vody se předává vázané výparné teplo do přiváděného vzduchu a tím roste i součinitel přestupu tepla na stěnách výměníku. Účinnost zařízení pro ZZT je důležitá při běžném provozu, vysoké účinnosti lze dosáhnout při krajních podmínkách, kdy odpadní vzduch má vysokou vlhkost, je více odváděného vzduchu než přiváděného a je malý průtok vzduchu výměníkem.

### 3.5.1 Deskové rekuperační výměníky ZZT

Deskové rekuperátory v posledních letech doznaly velkých změn. Díky změně tvaru z čtvercových na šestiúhelníkové se zvýšila teplosměnná plocha. Proudění vzduchu se dá rozdělit na křížové a protiproudé. Rekuperační výměníky s křížovým prouděním dosahují účinnosti 50 % až 70 %, kdežto výměníky s protiproudým prouděním dosahují účinnosti 80 % až 90 %. Výměníky jsou konstruovány z nerez, oceli či hliníku a jsou mechanicky spojeny pomocí svařování, pájení či lepení. Princip protiproudového deskového výměníku je na obr. 3.5. Díky jednoduchosti výroby a malým pořizovacím nákladům jsou nejpoužívanější v malých vzduchotechnikách pro rodinné a bytové domy.



Obr. 3.4 – Princip deskového rekuperačního výměníku (Zikán, 2010)

Deskový rekuperátor má výhodu, že se v něm nevyskytují žádné pohyblivé části. To ovšem také znamená, že výměník nelze přímo regulovat, např. v případě námrazy a následného poškození výměníku. V případě, že není potřeba ZZT, je většina výměníků osazena tzv. bypassem neboli obchozem rekuperátoru s uzavírací klapkou, který zajišťuje průchod přiváděného vzduchu mimo výměník.

Při provozu deskových výměníků dochází v našem klimatickém podnebí v zimním období velmi často ke kondenzaci vlhkosti odpadního vzduchu. Kondenzát z výměníku a klimatizační jednotky je třeba odvádět přes zápachovou uzávěrku do kanalizační sítě. Při teplotách pod bodem mrazu dochází na stěnách výměníku k namrzání vlhkosti, tím je způsoben horší průchod vzduchu výměníkem a v extrémním případě může dojít až k poškození výměníku. Častým řešením odstranění vzniklé námrazy je krátkodobé uzavření přívodu vzduchu. Tím se využije teplo odpadního vzduchu a dojde k roztání vzniklé námrazy. Další možností je cirkulační režim, kdy je přiveden teplý odpadní vzduch i místo čerstvého vzduchu. Některá zařízení jsou v kritických místech vybavená přídatným elektrickým ohřevem. U větších deskových výměníků s vysokým rizikem námrazy lze použít přehřev před vstupem čerstvého vzduchu do výměníku. Krajním řešením je použití bypassu, kdy je však nutné dimenzovat výkon ohřívače pro provoz bez použití ZZT.

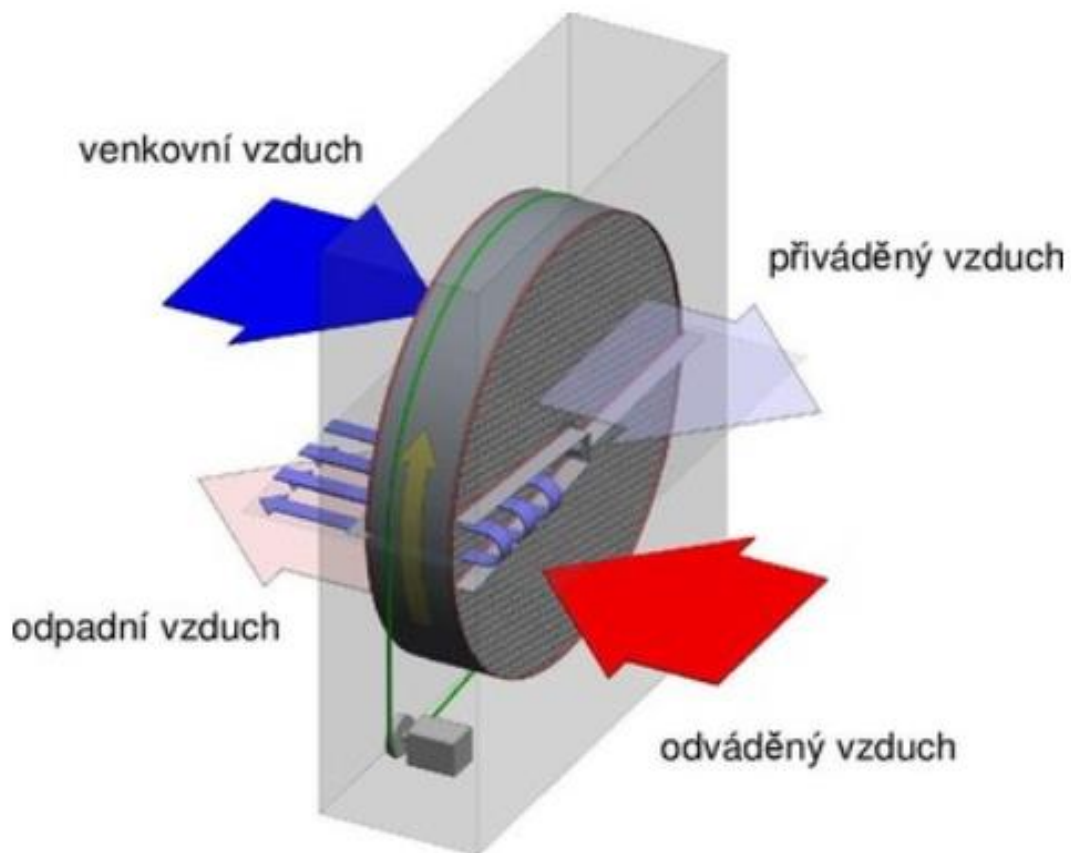
Bezpečnost deskového výměníku je zajištěna díky oddělení odváděného a přívodního vzduchu. Proto je deskový výměník vhodný, pokud je odpadní vzduch znečištěný pachy, prachem, tukem, olejem, bakteriemi či jinými nečistotami. Ovšem deskové výměníky jsou díky své konstrukci velice špatně čistitelné, proto nejsou vhodné pro příliš znečištěný vzduch, pokud nejsou použity vhodné filtry, které podléhají pravidelné údržbě.

### **3.5.2 Trubkové rekuperační výměníky ZZT**

Trubkové rekuperační výměníky jsou v principu podobné deskovým výměníkům. Teplosměnnou plochu tvoří svazek trubek, kterými proudí odváděný vzduch a z vnější strany protéká přiváděný vzduch. Výhodou trubkových výměníků je vyšší pevnost trubek. Výměníky tak mohou být snadno čištěny, a proto jsou vhodné pro velmi znečištěný vzduch. Nevýhodou je jejich malá teplosměnná plocha a tím i menší účinnost výměníku. Účinnost dosahuje pouze 30 % až 50 %. Ostatní parametry, které posuzujeme u výměníků, jsou obdobné jako u deskových výměníků. V praxi se používají především v technologických provozech, kde je odváděn znečištěný vzduch či spaliny. (Lain, 2006a)

### 3.5.3 Rotační regenerační výměníky

Rotační výměníky s rotující akumulací hmoty jsou využívány především pro velké klimatizační zařízení. Jejich hlavní výhodou je velmi vysoká účinnost až 85 % při relativně malých rozměrech a možnosti přestupu nejenom citelného tepla, ale i vázaného tepla, tedy vlhkosti. Rotační výměník pracuje na principu akumulace energie, tedy tepla a vlhkosti z odpadního vzduchu do akumulací hmoty a díky cyklickému otáčení je energie předávána do přiváděného čerstvého vzduchu viz obr. 3.6. Vysoké účinnosti běžně 80 % dosahují díky vysoké teplosměnné ploše a také díky přenosu nejenom citelného tepla, ale i vázaného tepla.



Obr. 3.5 – Princip rotačního regeneračního výměníku (Postupa, 2017)

Nejdůležitější částí rotačního výměníku je rotor. Nejběžněji se používá šíře 200 mm a 250 mm, který se používá pro silně znečištěný vzduch například v těžkém průmyslu. Na rotor je střídavě navinuta rovná a zvlněná hliníková fólie. Výška vln se pohybuje od 1,4 mm do cca 2 mm, což vychází z poměru nejvyšší účinnosti vůči tlakovým ztrátám. Optimální tlaková ztráta se pohybuje od 100 Pa do 150 Pa. Rotory se dělí na nehygroskopické, také nazývané teplotní, hygroskopické a epoxidové. Teplotní rotory jsou určeny pro přenos tepla bez přenosu vlhkosti.



Hygroskopické rotory umožňují přenos tepla i vlhkosti, a to s účinností přenosu vlhkosti až 90 %. Tyto rotory se dále dělí na entalpické, kdy při přenosu vlhkosti dochází k částečné kondenzaci, a sorpční, u kterých nedochází ke kondenzaci vlhkosti. Epoxidové rotory jsou vhodné do agresivního prostředí, například větrání bazénů a v přímořských oblastech.

Těsnění rotačního výměníku je velmi důležitou součástí výměníku, díky kterému se dříve rotační výměníky nepoužívaly. Díky novým technologiím a materiálům mají těsnění menší netěsnosti. Těsnění musí být provedeno po obvodu rotoru a v místě dělicí roviny. Těsnění se dělí na bezdotyková, která dosahují netěsnosti 5 % až 8 % a dotyková těsnění pomocí kartáčů s netěsností 3 % až 5 %. Nejlepší těsnění jsou speciální labyrintové dosahující netěsnosti do 1,5 %. Právě tato labyrintová těsnění zapříčinila rozšíření rotačních výměníků. Deklarace parametrů rotačního výměníku je posuzována mnoha typy certifikací, například Eurovent, TÜV, AHRI, VDI a dalšími. Kromě parametrů účinnosti přenosu energie a tlakových ztrát jsou sledovány i parametry těsnosti dle normy EN308:1997, jsou to faktory OACF a EATR. OACF (Outdoor air correction factor) určuje poměr přírodního čerstvého vzduchu před a za výměníkem. Ztráty jsou způsobeny netěsností výměníku. Tento parametr slouží pro návrh přírodního ventilátoru. EATR (Exhaust air transfer ratio) udává přenos odpadního vzduchu zpět do přiváděného vzduchu. Vystihuje se tím kontaminace přiváděného vzduchu.

Vyplachovací komora, někdy používaný název proplachovací komora, je klínová komora umístěná v dělicí rovině výměníku. Tato komora má za cíl minimalizovat kontaminaci přírodního vzduchu odpadním vzduchem. Kontaminace přírodního vzduchu vzniká otáčením rotoru tzv. Carry over efekt. Vyplachovací komora tvoří zkrat mezi přírodním a odpadním kanálem, jak je vidět na obr. 3.6. Díky tomu odchází část přírodního vzduchu spolu s odpadním vzduchem. Tímto je snížena kontaminace přírodního vzduchu, ale je tím snížena účinnost výměníku, a to až o 5 %. Je tedy na zvážení, kdy použít vyplachovací komoru. Kontaminace přírodního vzduchu bez použití vyplachovacích komor se pohybuje od 3 % do 5 %. Naopak s použitím vyplachovacích komor je kontaminace od 0,1 % do 0,2 %. Použití a velikost vyplachovacích komor je dána polohou ventilátoru a velikostí jejich statického tlaku, rychlostí otáčení rotoru, vstupní rychlostí vzduchu, výškou vlny rotoru a typem rotoru, resp. tlakovou ztrátou rotoru.

Hnacím prvkem rotačního výměníku je elektromotor s převodovkou. Používají se střídavé motory, se šnekovou převodovkou, která má účinnost cca 75 %, řízené pomocí frekvenční modulace v rozsahu 18 Hz až 87 Hz. Minimální otáčky odpovídají dvěma otáčkám za minutu. Speciální střídavé motory s kuželočelní převodovkou, dosahující účinnosti až cca 95 %. Tyto motory se řídí pomocí frekvenční modulace v rozsahu 5 Hz až 120 Hz. Elektronicky

komutované motory jsou řízeny signálem 0 V až 10 V. A poslední možností je krokový motor, který dosahuje maximálního výkonu od minimálních otáček, a je řízen napětím 0 V až 10 V. Nejvyšší účinnosti přenosu tepla dosahují teplotní rotory při rychlosti  $12 \cdot \text{min}^{-1}$  až  $15 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , u sorpčních rotorů je nejvyšší účinnost při přibližně  $20 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .

K namrzání rotačního výměníku dochází jen zřídka, v našich podnebních podmínkách k němu téměř nedochází. K namrzání dochází při venkovních teplotách pod  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pokud však nastane namrznutí rotoru, snižuje se účinnost výměníku a v krajním případě může dojít až k trvalému poškození výměníku. Na namrzání má největší vliv teplota přiváděného vzduchu a měrná vlhkost odváděného vzduchu. Ochranou proti námraze může být předehřev přívodního vzduchu, snížení výkonu výměníku pomocí obtoku přívodního vzduchu mimo výměník a snížení účinnosti snížením otáček rotoru.

Jedna z velkých výhod rotačního výměníku je jejich samočisticí schopnost. Tato schopnost spočívá v protiproudém umístění ventilátorů ve vzduchotechnické jednotce, pak jsou nečistoty usazené na čelní straně rotoru strženy spolu s odpadním vzduchem. Ovšem i těmito výměníky se doporučuje použití filtru, a to minimálně třídy G4. I při dobré filtraci a samočisticímu mechanismu může především v průmyslu dojít k postupnému zanášení kanálků. Proto jsou moderní výměníky doplněny plně automatickým čistícím systémem, který využívá tlakový vzduch či tlakovou vodu případně jejich kombinaci. Tento autonomní systém je nadřazen systémům MaR. Automatické čištění se provádí na základě vyšší tlakové ztráty výměníku např. dvojnásobek tlakové ztráty výměníku oproti novému. (Postupa, 2017)

### **3.5.4 Přepínací výměníky**

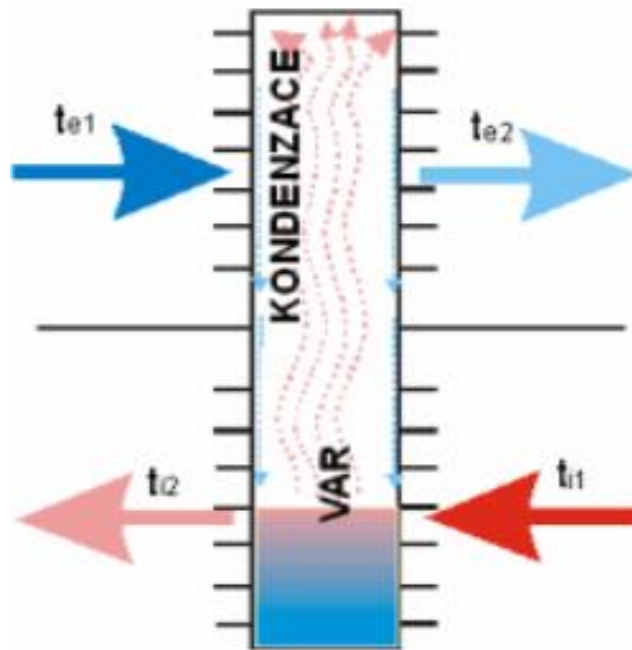
Přepínací regenerační výměníky pracují na principu předávání energie v akumulární hmotě a přepínáním proudu vzduchu. Přepínací výměníky mají dvě komory s akumulární hmotou a soustavu klapek, které přepínají přiváděný a odpadní vzduch do jednotlivých komor tak, aby vzduch procházel střídavě oběma komorami. Tyto výměníky dosahují vysoké účinnosti přenosu tepla i vlhkosti. Teplotní účinnost přepínacích výměníků dosahuje 60 % až 90 % a účinnost vlhkostní účinnost 50 % až 70 %. Nevýhodou je poměrně složitá konstrukce a větší rozměry vzhledem k výkonu výměníku. U těchto výměníků nelze zabránit přenosu škodlivin z odpadního vzduchu do vzduchu nově přichozícího, proto se používají pouze tam, kde není odváděný vzduch znečištěn či tam kde je přípustný přenos škodlivin.

### 3.5.5 Systémy s kapalinovým okruhem

Zařízení je tvořeno dvěma výměníky tepla vzduch-kapalina-vzduch. Tyto výměníky jsou nejčastěji lamelové, které jsou propojeny kapalinovým okruhem s oběhovým čerpadlem, expanzní nádobou a regulačními prvky. Vzhledem k tomu, že zařízení je určeno pro nízké teploty vzduchu, je jako oběhová kapalina zvolena nemrznoucí směs. Konstrukce výměníku musí odpovídat charakteru vzduchu, ve kterém bude výměník používán. Nejčastěji se používají výměníky s lamelami. Pro znečištěný vzduch se mohou použít i výměníky bez žeber či výměníky z chemicky odolných materiálů. Hlavní výhodou tohoto systému je libovolná vzdálenost mezi přívodním a odvodním potrubím vzduchotechniky. Jedná se taky o bezpečné oddělení přívodního a odvodního vzduchu. Nevýhodou je, že ke své funkci potřebuje další energii k pohybu teplotního média. Samostatný výměník má velmi malou účinnost, proto se využívá více výměníků v řadě. Poté je možné dosáhnout účinnosti 70 % až 80 %. Systémy s kapalinovým okruhem patří mezi nejbezpečnější, proto se využívají na místech, kde není přípustný přenos škodlivin do přívodního vzduchu, a to ani v případě havárie zařízení.

### 3.5.6 Tepelné trubice

Základem je tzv. tepelná trubice, což je uzavřená trubice s kapalnou náplní zobrazená na obr. 3.7. Jako náplň se volí čpavek, freon či voda. Důležitým parametrem je také tlak kapaliny v trubici, který může výrazně ovlivnit bod varu. Odváděný teplý vzduch proudí kolem spodní části trubice, kde dochází k ohřívání náplně. Dle pracovních teplot je vybrán vhodný druh náplně podle bodu varu. Při zahřívání spodní části trubice dochází k varu náplně a vypařování par směrem vzhůru. Horní část trubice je naopak ochlazovaná proudem přiváděného vzduchu. Výpary náplně jsou ochlazovány, kondenzují na stěnách trubice a následně stékají do spodní části trubice. Existují také vodorovné trubice. Tepelné trubice jsou většinou opatřeny žebrovaním pro lepší přenos tepla ze vzduchu do tepelné trubice a naopak. Účinnost tepelných trubic je přibližně 65 %. Jejich výhodou je v nepotřebě pohonu a další dodané energie pro svou činnost. Tepelné trubice jsou velice bezpečné systémy ZZT, kde je minimální riziko přenosu škodlivin z odpadního vzduchu. Problém je tedy v kvalitním těsnění mezi přívodním a odpadním vzduchem. (Lain, 2006b)



Obr. 3.6 – Princip ZTT pomocí tepelné trubice (Lain, 2006b)

### 3.6 KLAPKY

Každá vzduchotechnika obsahuje klapky, které slouží pro uzavření jednotky v momentě, kdy je vypnutý ventilátor. Dále regulační klapky, které mají za účel regulovat proud vzduchu. Klapky mohou mít jeden nebo více listů. Listy se mohou ovládat buď jednotlivě nebo jako celek. Ovládaný jsou buď mechanicky nebo pomocí servopohonu. Poloha listů reguluje průtok vzduchu, popřípadě se přívod vzduchu může zavřít úplně.

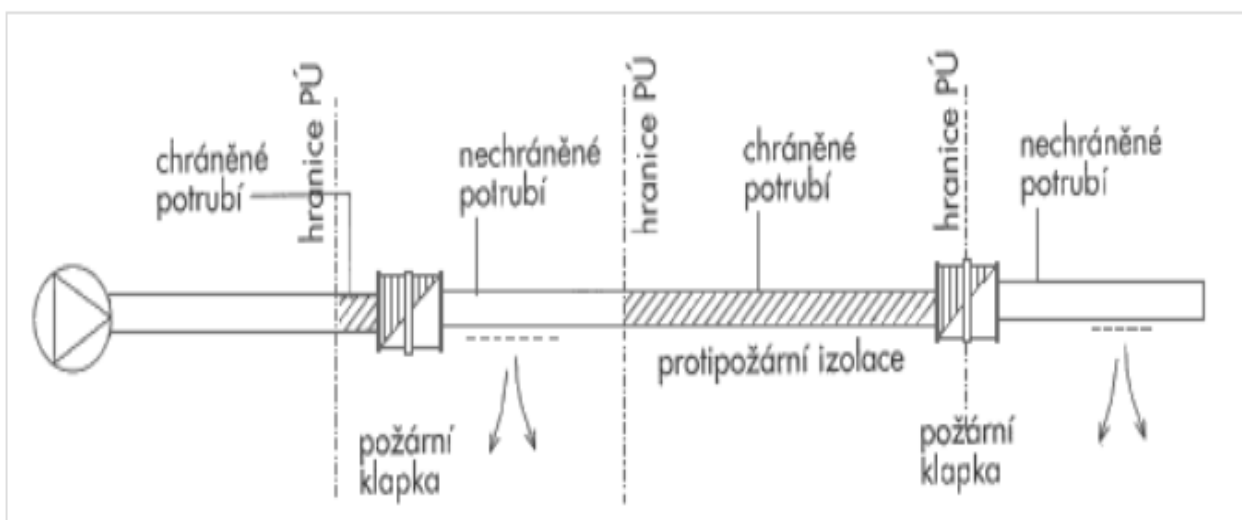
### 3.7 POŽÁRNÍ OCHRANA

Požární ochrana ve vzduchotechnice se dělí na pasivní a aktivní. Pasivní ochrana spočívá v rozdělení stavby do ucelených bloků, požárních úseků, s cílem zabránit šíření požáru mimo oblast, kde požár vznikl. Ve vzduchotechnice se šíření požáru vzduchotechnickým potrubím omezuje pomocí požárních, případně protipožární izolace tak, aby nebyla narušena celistvost požárních úseků. Aktivní ochrana zahrnuje dynamická požární bezpečnostní zařízení. Mezi tato zařízení patří elektrická požární signalizace (EPS), samočinné hasicí zařízení (SHZ), samočinné odvětrávací zařízení (SOZ) a další technické prvky, které mají za účel omezit vznik a šíření požáru. Aktivní opatření se realizuje větráním, odvodem tepla a kouře z únikových cest. Požární větrání se dělí na dvě skupiny. První je větrání běžných požárních úseků a větrání chráněných únikových cest. Při návrhu požárního větracího systému musí být rovnováha mezi přivedeným čerstvým vzduchem a mezi odvětraným vzduchem spolu se zplodinami a kouřem.

To znamená navržení správných velikostí otvorů pro přívod a odvod vzduchu, čímž definujeme tlakové poměry v odvětrávaném prostoru.

Tuto problematiku upravuje norma ČSN 73 0872, požární bezpečnost staveb. Ochrana staveb proti šíření požáru vzduchotechnickým zařízením, která nabyla účinnosti 1. února 1996. Všeobecně platí, že vzduchotechnika musí být navržena tak, aby se jí nešířil požár ani jeho zplodiny. Prostupy vzduchotechnického potrubí mezi požárně dělicími konstrukcemi musí být vždy zabezpečeny. Výjimka je pouze pokud průřez prostupujícího potrubí má plochu nejvýše 4 dm<sup>2</sup> a jednotlivé prostupy nemají ve svém souhrnu plochu větší než 1 % plochy prostupované požárně dělicí konstrukce. Pokud je potrubí v celém požárním úseku provedeno jako chráněné nebo jeli jiným technickým zařízením zamezeno šíření plamenů, tepla a zplodin hoření, tak nemusí být potrubí zabezpečeno požárními klapkami.

Pokud vzduchotechnické potrubí prochází více požárními úseky, je možné kombinovat požární klapky s protipožární izolací, viz obr. 3.8. Pokud je vzduchotechnika navržena správně, tak pokud vznikne požár v libovolném úseku, musí být zabráněno jeho šíření do kteréhokoliv jiného úseku, ne pouze do sousedního. Požární klapky je třeba umístit do potrubí s ohledem na přístup k reviznímu otvoru a ovládacímu mechanismu. Šachty pro vzduchotechnická potrubí tvoří samostatné požární úseky nebo mohou být součástí požárního úseku strojovny. Kromě případu, kdy strojovna tvoří samostatný požární úsek.



Obr. 3.7 – Typy požárních ochran vzduchotechnického potrubí (Gebauer, 2005)

Bezpečný únik z prostoru zasaženého požárem komplikuje kouř, který osobám značně ztěžuje orientaci v prostoru. Kouř se šíří mnohem rychleji než samotný požár, proto je nutné

kouř odvést ven a tím ve spodní části prostoru vytvořit oblast bez kouře. To se využívá v prostorech s vysokou kumulací osob a rozsáhlém půdorysu objektu, například ve shromažďovacích prostorech, velkokapacitních prodejnách, supermarketech atd. Rozsáhlým půdorysem je zajištěna větší délka nechráněných únikových cest a prodlužuje se tak doba pro evakuaci osob a zvířat. Požárním odvětráváním se současně odvádí i teplo, což v důsledku může vést ke snížení nákladů na ochranu stavebních konstrukcí, především jedná-li se o ocelové konstrukce, při zajištění jejich požární odolnosti. Odvod kouře dělíme na přirozený a nucený. V případě přirozeného větrání dojde k otevření světlíků, oken a jiných speciálních odkuřovacích klapek. Kouř se díky tepelnému vztlaku odvede těmito otvory. V případě nuceného větrání se uvedou v činnost požární ventilátory a případně se uzavřou požární klapky. V obou případech musí být automaticky zajištěn přívod neznečištěného vzduchu do spodní části prostoru.

Větrání chráněných únikových cest (CHÚC) se zavádí ze zkušeností, kde více než 90 % poškozených osob při požáru není poškozeno ohněm, ale právě zplodinami z hoření. CHÚC se vybavují přirozeným nebo nuceným větráním podle typu CHÚC, které se dělí do tří typů CHÚC A, B a C. CHÚC typu A je od ostatních úseků oddělena požárními uzávěry otvorů a bezpečná doba zdržení je 4 minuty. CHÚC typu B je od ostatních požárních úseků oddělena požárními otvory včetně samostatné větrací předsíně s kouřotěsnými dveřmi. Případně je řešení shodné s typem A, ale cesta je vybavena přetlakovým větráním. V těchto prostorách je bezpečná doba zdržení 15 minut. CHÚC typu C je od ostatních požárních úseků oddělena požárními uzávěry otvorů včetně větrané předsíně s kouřotěsnými dveřmi a je vybavena přetlakovým větráním ve které je možno se bezpečně zdržovat 30 minut. Všechny typy CHÚC musí být povinně větrány. Větráním se zabezpečuje požadavek na ochranu před zplodinami a současně zajišťuje přívod kyslíku, který se hořením spotřebovává. Obecně se dá říci, čím vyšší typ CHÚC, tím je zajištěna lepší ochrana unikajícím osobám, ale vytváří i zásahovou cestu hasičským jednotkám. (Gebauer, 2005)

### **3.8 FILTRACE**

Základní operací při ochraně vnitřního vzduchu před nečistotami je filtrace atmosférického vzduchu. Filtrace spočívá v zachycení nežádoucích částic ve vlákniště. První vzduchový filtr slouží k odstranění nečistot z čerstvého nasávaného vzduchu z vnějšího prostředí. Druhý filtr pak chrání rekuperační jednotku před nečistotami v odváděném tzn. odpadním vzduchu, který se odvádí z vnitřních prostorů.

Nečistoty se dělí na tuhé a kapalné látky. Tuhými částicemi se obecně rozumí prach, pokud není důležitý způsob vzniku těchto částic. Podle původu vzniku pak dělíme prach na popílek, aerosol, dým, kouř a další. Každý z těchto typů má charakteristickou velikost, tvar, fyzikální a chemické vlastnosti. Prach může obsahovat toxické a infekční složky. Za atmosférický prach se považují částice o velikosti 0,01  $\mu\text{m}$  až 20  $\mu\text{m}$ , z čehož je přibližně 99 % částic z celkového počtu částic menší než 1  $\mu\text{m}$ . Pro použití správného filtru je důležité znát velikost typických příměsí ve vzduchu. Velikosti typických příměsí jsou v tab. 3.1. Nejvyšší koncentrace tuhých látek je ve velkých městech a v blízkosti průmyslových oblastí, kde může dosahovat hodnot okolo 1  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Naopak nejmenší koncentrace je v čistých venkovských oblastech s hodnotami desítek  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tab. 3.1 – Velikost typických příměsí ve vzduchu (Vybíral, 2016)

Příměsí ve vzduchu	Velikost částic, $\mu\text{m}$
Viry	0,005 – 0,1
Bakterie	0,2 – 20
Výtrusy hub, mechu a lišejníků	2 – 120
Pyl	10 – 200
Plísně	2 – 100
Cigaretový kouř	0,01 – 1
Olejová mlha	0,04 – 1
Saze	0,01 – 0,5
Kouř (spalování organické hmoty)	< 1

Pro průnik částic dýchacím ústrojím do lidského organismu je důležitá velikost částice. Částice o velikosti větší než 10  $\mu\text{m}$  se zachytí v horních cestách dýchacích. Torakální částice o velikosti menší než 10  $\mu\text{m}$  pronikají dýchacím ústrojím dále za hrtan. Respirabilní částice menší než 2,5  $\mu\text{m}$  pronikají až do plic a částice menší než 1  $\mu\text{m}$  mohou pronikat až do krevního řečiště.

Na filtrech sledujeme především účinnost filtrace a zanesení filtru. Účinnost filtrace závisí na schopnosti odlučování nečistot čistě vláknité tkaniny. V praxi se pro vyjádření účinnosti filtrace používá tzv. celková odlučivost, která se stanoví jako

$$O_c = \frac{C_p - C_v}{C_p} \times 100, \quad (3.2)$$

kde  $O_c$  – celková odlučivost filtru, %,

$C_p$  – koncentrace částic před filtrem,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,

$C_v$  – koncentrace částic za filtrem,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Důležitá je počáteční tlaková ztráta nového a čistého filtru. Tato ztráta se měří pomocí diferenčního tlakového čidla. Porovnává se rozdíl tlaků před a za filtrem, tato provozní vlastnost souvisí s jímavostí a životností filtru. Jímavost filtru se stanoví jako hmotnost zachyceného prachu vztahovaná na plochu filtru. U filtru nejprve dochází ke zvýšení odlučivosti, protože se částice zachycují na vláknech filtru i na již zachycených částicích. Po dalším zanášení se ovšem odlučivost začne výrazně snižovat. Při stanovené tlakové ztrátě, například dvojnásobek počáteční hodnoty tlakové ztráty nebo je výrobcem stanovená tlaková ztráta, se indikuje zanesení filtru a je nutná výměna filtru.

### 3.8.1 Třídění filtrů atmosférického vzduchu

Dle normy mezinárodní normy se vzduchové filtry dělí na filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic u všeobecného větrání, které se třídí dle normy ČSN EN 779:2012, a na filtry s vysokou účinností, které se testují a třídí dle normy ČSN EN 1822. Norma ČSN EN 779:2012 pozbyla účinnosti 1. prosince 2017. Nyní je platná norma ČSN EN ISO 16890-1 Vzduchové filtry pro všeobecné větrání – Část 1: technické specifikace, požadavky a klasifikační metody založené na účinnosti odlučování částic. Rozdělení filtru dle ČSN EN 779:2012 je v tab. 3.2.

Filtry pro všeobecné větrání se testují na definované zkušební, kde se měří odlučivost částic  $A_m$  a účinnost filtrace  $E_m$ . Testuje se pomocí kapalného aerosolu DEHS (DiethylHexaSebacate - $C_{26}H_{50}O_4$ ) a syntetického prachu. Zkouška filtrů probíhá při průtoku atmosférického vzduchu  $3400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (pokud výrobce neurčí jiný objemový průtok). Maximální konečná tlaková ztráta 250 Pa je stanovena pro hrubé filtry a tlaková ztráta pro střední a jemné filtry je 450 Pa.

Filtry, které pro DEHS průměru  $0,4 \mu\text{m}$  nedosahují hodnoty střední účinnosti  $E_m$  větší než 40 %, jsou zařazeny do třídy G tzv. hrubé filtry. Tyto hrubé filtry se dále dělí do tříd G1 až G4. Rozlišují se podle hodnoty střední odlučivosti  $A_m$  na zátěžový syntetický prach ASHRAE 52.1, který se skládá z 72 % hmotnosti z jemného pouštního písku, z 23 % sazí a 5 % bavlněných vláken, které vznikají při zpracování bavlny.

Další třídou jsou střední filtry, které dosahují hodnot střední účinnosti filtrace  $E_m$  mezi 40 % a 80 %. Tato skupina se označuje jako třída M.

Filtry s hodnotami střední účinnosti filtrace  $E_m$  nad 80 % patří do třídy F tzv. jemné filtry. Jejich zařazení je dáno hodnotou střední účinnosti filtrace a hodnotou minimální účinnosti filtrace během zkoušky.



Tab. 3.2 – Třídy filtrů podle ČSN EN 779:2012 (Vybíral, 2016)

Skupina	Třída	Konečná tlaková ztráta, Pa	Střední odlučivost ( $A_m$ ) na syntetický prach, %	Střední účinnost filtrace ( $E_m$ ) pro částice 0,4 $\mu\text{m}$ , %	Minimální účinnost filtrace pro částice 0,4 $\mu\text{m}$ , %
Hrubý	G1	250	$50 \leq A_m \leq 65$	–	–
	G2	250	$65 \leq A_m \leq 80$	–	–
	G3	250	$80 \leq A_m \leq 90$	–	–
	G4	250	$90 \leq A_m$	–	–
Střední	M5	450	–	$40 \leq E_m \leq 60$	–
	M6	450	–	$60 \leq E_m \leq 80$	–
Jemný	F7	450	–	$80 \leq E_m \leq 90$	35
	F8	450	–	$90 \leq E_m \leq 95$	55
	F9	450	–	$95 \leq E_m$	70

Třídění vysoce účinných filtrů je založené na odlučivosti částic, které filtrem nejvíce pronikají tzv. MPPS (Most Penetrating Particle Size). Filtry se dělí do 3 tříd. Třída E – EPA (Efficiency Particulate Air Filter), které se označují E10 až E12. Třída H – HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) s označením H13 a H15. Poslední třídou jsou filtry s nejvyšší odlučivostí částic, třída U – ULPA (Ultra High Penetrating Air Filter) s označením U15 až U17.

### 3.8.2 Použití filtrů pro všeobecné větrání

Filtr vybíráme na základě znečištění vnějšího vzduchu a na požadavcích na čistotu vnitřního prostoru nebo na ochranu zařízení před prachem.

Hrubé filtry se používají jako první stupeň u vícestupňové filtrace, k ochraně výměníků, zvlhčovačů a ventilačních systémů. Filtry s označením G1 a G2 jsou účinné pro částice větší než 10  $\mu\text{m}$ . Používají se v těžkých průmyslových provozech. Filtry G3 a G4 jsou účinné proti pylu, používají se pro vytápěcí a větrací systémy v průmyslových provozech, garážích, sportovních halách a obchodních domech.

Pro použití středních filtrů se doporučuje předřazení hrubého filtru G1 až G4. Střední filtry jsou účinné proti bakteriím, ale nejsou účinné proti sazím, olejové mlze, tabákovému kouři a kouři z technologických procesů. Používají se pro větrací a klimatizační systémy ve školách shromažďovacích místnostech, restauracích, sportovních halách a kancelářských budovách. V průmyslu se využívají pro provozy s vyššími požadavky na čistotu.

Jemným filtrům by měl předcházet první stupeň z filtru G1 až G4 stejně jako u středních filtrů. Jemné filtry se rozdělují do tří kategorií F7, F8 a F9. Filtry F7 jsou účinné proti bakteriím

a částečně účinné proti sazím, olejové mlze, tabákovému kouři a kouři z technologických procesů. Používá se ve větracích a klimatizačních zařízeních pro laboratoře, nemocniční pokoje, kancelářské budovy, divadla, kuchyně a obchody s potravinami. V průmyslu se využívají pro telefonní ústředny, výroby potravin, dílny přesné mechaniky a optiky, rozhlasová a televizní studia a střídací boxy. Filtry F8 a F9 jsou velmi účinné proti sazím, olejové mlze, tabákovému kouři, kouři z technologických procesů a bakteriím. Používají se pro operační sály, výzkumné zkušebny a laboratoře, chemické a farmaceutické výroby a sterilizační pracoviště.

Pro byty a rodinné domy nejsou žádné platné normy na rozdíl od pracovního prostředí. Jako pomoc lze využít normu ČSN EN 13779:2010, která uvádí doporučení pro použití filtrů u větrání nebytových prostor. Doporučení filtrů závisí na kvalitě vnějšího prostředí, které se dělí do tří tříd podle tab. 3.3.

Tab. 3.3 – Rozdělení vnějších prostředí (Vybíral, 2016a)

ODA 1	čistý vzduch, který může být pouze dočasně znečištěn prachem, např. pylem,
ODA 2	znečištěný vzduch (vzduch obsahující vysoké koncentrace prachu nebo plynných znečišťujících látek)
ODA 3	velmi znečištěný vzduch (vysoké koncentrace prachu nebo plynných znečišťujících látek).

Kvalita vnitřního ovzduší se v pobytové zóně rozděluje do čtyř kategorií podle tab. 3.4.

Tab. 3.4 – Třídy kvality vnitřního vzduchu (Vybíral, 2016a)

IDA 1	Velmi vysoká
IDA 2	střední
IDA 3	Průměrná
IDA 4	Nízká

Doporučené minimální třídy filtrů pro kombinace IDA a ODA jsou v tab. 3.5. (Vybíral, 2016a)

Tab. 3.5 – Filtry pro kombinaci kvality vnitřního a vnějšího vzduchu (Vybíral, 2016a)

	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDA 4
ODA 1	F9	F8	F7	M5
ODA 2	F7 + F9	M6 + F8	M5 + F7	M5 + M6
ODA 3	F7 + GF + F9	F7 + GF + F9	M5 + F7	M5 + M6

Další možností filtrace je pomocí uhlíkových filtrů (GF), které slouží pro zachycení plynných znečišťujících látek. Pracuje na principu adsorpce s účinnými látkami s velkým měrným povrchem, který u uhlíku dosahuje až  $1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Jelikož je tento filtr velice citlivý

na prach, je velice důležité pro jeho dlouhodobou životnost, tedy i pro zamezení tlakových ztrát, před tento filtr umístit filtr nejlépe třídy F7. Před tento filtr se opět kvůli životnosti doporučuje hrubý filtr třídy G. Pak tedy vznikne tří stupňová filtrace. Toto třístupňové provedení může být v provedení jednoho dílu. (Vybíral, 2016b)

## 4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ KONCENTRACE CO<sub>2</sub> VE VZDUCHU

Pro účely měření koncentrace CO<sub>2</sub> v budovách jsou potřeba senzory s měřícím rozsahem od 400 ppm, díky venkovní koncentraci pomalu přesahující tuto hodnotu, do 1500 ppm podle českých zákonů, do 1000 ppm dle např. nizozemských norem, ovšem vyšší rozsah může být vhodný pro jiné aplikace. Pro použití v budovách je vyžadována co nejvyšší přesnost po dobu projektované životnosti systému, která bývá v řádu desítek let.

### 4.1 NDIR SENZORY

NDIR (NonDispersive Infrared Sensor) senzory pracují na principu útlumu infračerveného záření na pyrodetektoru v závislosti na koncentraci CO<sub>2</sub> v ovzduší. Pracují na přesných vlnových délkách v závislosti na požadovaných vlastnostech měření. Nejvíce využívané vlnové délky jsou 7,2 μm, 14,99 μm a 4,256 μm. Limitujícím faktorem IR senzorů je tzv. „oslepnutí“ senzoru při vyšších koncentracích CO<sub>2</sub>. Více molekul CO<sub>2</sub> je schopno prakticky pohltit veškeré infračervené záření sledovaných vlnových délek. Vyšší přesnosti měření tedy dosahují při nižším rozsahu v řádu tisíců ppm.

### 4.2 ELEKTROCHEMICKÉ SENZORY

Elektrochemický senzor se skládá z elektrochemického článku s tuhým elektrolytem, který je přidavným topením vyhřívám na pracovní teplotu. Materiál elektrod, složení elektrolytu a napětí mezi elektrodami jsou zvoleny tak, aby na měřicí elektrodě docházelo k elektrochemické reakci, kdy vznikají volné elektrony. Pomocí elektroniky se vyhodnocuje elektrický proud mezi elektrodami, který odpovídá koncentraci CO<sub>2</sub>. Senzory pracují od hodnoty cca 400 ppm, což vzhledem ke koncentraci venkovního vzduchu cca 400 ppm není žádný omezující faktor.

Tyto senzory jsou velice přesné, ale pro udržení přesnosti je nutné často čidlo kalibrovat. Kalibrace je nutná z důvodu chemických změn v elektrolytu, které vedou k postupnému vyčerpání elektrolytu. Životnost senzoru se uvádí cca 1 rok až 2 roky, proto se nepoužívají pro MaR aplikace, které se projektují na delší časový horizont. (Vafek, 2016)

### **4.3 ELEKTROAKUSTICKÉ SENZORY**

Elektroakustické senzory vyhodnocují změny kmitočtu ultrazvuku v mechanickém rezonátoru. Na základě této změny kmitočtu elektronika vyhodnotí aktuální koncentraci CO<sub>2</sub> ve vzduchu. Tyto senzory jsou dlouhodobě stabilní a nejsou potřeba překalibrovat oproti předchozím principům. (Robenek, 2016)

### **4.4 NDIR SENZORY S VYUŽITÍM KALIBROVANÝCH HODNOT**

Pro velmi přesné vyhodnocení aktuální koncentrace CO<sub>2</sub> se využívají přesně kalibrované vzorky, které se porovnávají s neznámou hodnotou. Princip spočívá ve výměně vzorků mezi staticky umístěnými infračervenými diodami. Tento princip se využívá především u observatoří, pro vyhodnocení koncentrace v místnosti je ovšem naprosto nevhodný. (Vafek, 2016)

### **4.5 PŘÍKLADY DOSTUPNÝCH SENZORŮ CO<sub>2</sub> NA TRHU**

Na trhu je více výrobců senzorů pro měření CO<sub>2</sub> ve vnitřních prostorech, vybral jsem pro porovnání některé z nich. Většina výrobců používá pro měření CO<sub>2</sub> senzory typu NDIR. Všechny tři následující příklady využívají tento princip, mohou být napájeny 24 V AC/DC. Z technického pohledu jsou rozdíly v algoritmu kalibrování senzorů, v přesnosti měření a rozsahu měření. Liší se také ovšem.

První pokojové čidlo teploty a CO<sub>2</sub> UT090 od české firmy Domat Control System. Teplota je měřena v rozsahu 0 °C až 50 °C s přesností ± 0,5 °C. Měření CO<sub>2</sub>, které probíhá na NDIR principu, má nastavitelné rozsahy 0 ppm až 2000 ppm nebo 0 ppm až 5000 ppm podle nastavení DIP přepínače uvnitř čidla. Čidlo má funkci autokalibrace, které zamezuje snížení přesnosti čidla díky stárnutí čidla a otřesům při přepravě. Čidlo neustále sleduje minimální naměřenou hodnotu koncentrace CO<sub>2</sub> a předpokládá, že alespoň jednou za 8 dní dojde k poklesu na úroveň venkovní koncentrace CO<sub>2</sub>. Nejmenší naměřené hodnotě je přiřazena hodnota koncentrace 400 ppm. Autokalibrační algoritmus nefunguje v případě, že v místnosti nedojde k poklesu koncentrace CO<sub>2</sub> jako např. ve sklenících. V těchto případech je nutné pomocí přepínače vypnout funkci autokalibrace, která je ve výchozím nastavení zapnuta. Přesnost měření CO<sub>2</sub> je ± 30 ppm ± 5 % z měřené hodnoty. Výstup čidla je 0 V až 10 V jak pro teplotu, tak pro CO<sub>2</sub>, výstupní D/A převodníky mají rozlišení 12 bitů. (Domat Control System, 2018)

Druhé pokojové čidlo RFTM-CO2 MODBUS od německého výrobce S+S Regeltechnik GmbH, které obsahuje měření teploty, relativní vlhkosti a CO<sub>2</sub>. Teplota je

měřena stejně jako u předchozího čidla v rozmezí od 0 °C do 50 °C s odchylkou  $\pm 0,2$  K při 25 °C. Měření relativní vlhkosti v rozsahu 0 % až 95 % s odchylkou  $\pm 3$  % při 20 °C, při jiné teplotě  $\pm 5$  %. Oxid uhličitý je měřený v rozsahu 0 ppm až 5000 ppm s přesností  $\pm 30$  ppm a  $\pm 3$  % z měřené hodnoty. Navíc se zde uvádí závislost CO<sub>2</sub> na teplotě  $\pm 5$  ppm nebo  $\pm 0,5$  % z měřené hodnoty na °C, kde se počítá s větší hodnotou. Měřená hodnota je také závislá na tlaku  $\pm 0,13$  mm Hg. Měření je založeno na principu NDIR s funkcí autokalibrace nebo manuální kalibrace. Čidlo je kalibrováno již z výroby, ale každá měřená veličina má vlastní manuální nastavení pomocí potenciometru o  $\pm 10$  % z měřené hodnoty. Výrobce garantuje dlouhodobou stabilitu přesnosti měření, která je menší než 2 % za 15 let. Komunikace probíhá pomocí sběrnice RS485 pomocí protokolu Modbus RTU. Parametry komunikace jsou komunikační rychlost a parita. Komunikační rychlost lze nastavit na 9600/18200/38400 bps. Parita se nastavuje pomocí DIP přepínače. Adresa se nastavuje pomocí přepínačů od 0 do 247. (S+S Regeltechnik, 2018)

Poslední porovnávaný snímač STHC 102 je od české firmy Sensit, který v sobě obsahuje měření teploty, relativní vlhkosti a CO<sub>2</sub>. Je určený pro provozní podmínky teplot od 0 °C do 45 °C, relativní vlhkosti od 0 % do 85 % (nekondenzující vlhkost) a při tlaku od 87 kPa do 106 kPa. V rozsahu teplot, které jsou dané provozními podmínkami, je garantována přesnost měření CO<sub>2</sub>, a od -30 °C do 70 °C, kromě provozních podmínek, bez garance přesnosti. Pro rozsah provozních podmínek měří teplotu s přesností měření  $\pm 0,5$  °C. Relativní vlhkost je měřena s přesností  $\pm 3$  % při provozních podmínkách a mimo provozní podmínky nad 85 % s  $\pm 4,5$  %. Měření koncentrace CO<sub>2</sub> je měřeno v rozsahu od 400 ppm do 5000 ppm ovšem s přesností  $\pm 200$  ppm. Reakční doba senzoru, náběh na hodnotu 90 % je 90 sekund. Komunikace s řídicím systémem probíhá přes sběrnice RS485 pomocí protokolu Modbus RTU. (Sensit, 2018)

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části práce jsem provedl měření v referenční místnosti. Na základě provedeného měření jsem vytvořil model místnosti a identifikoval jsem neznámé parametry modelu. Na základě těchto parametrů jsem vytvořil strategii řízení pro udržení koncentrace CO<sub>2</sub> v doporučených limitech. Navrženou strategii simulačně ověřím spolu s vyhodnocením vybraných typických situací.

### 5.1 KONCEPT MODELU

Model je koncipován pro použití ve vzdělávacích zařízeních nebo kancelářských budovách. Zde jsou místnosti typické svým kvádrovým tvarem, u kterého jednoduchým měřením získáme objem místnosti. Počet oken v místnosti je také známý. Identifikovat průtokové objemy oken lze během řádu dnů po nainstalování měřícího zařízení a po proběhnutí potřebného počtu autokalibračních cyklů. Počet osob a jejich činnost je taktéž známá veličina. Jediným neměřitelným faktorem je psychická zátěž osob. Tento model má za cíl vyhodnotit, za jakou dobu dojde k překročení stanovených limitů koncentrace oxidu uhličitého v místnosti, kde není instalováno automatické řízení kvality vzduchu, a také jak co nejefektivněji snížit koncentraci CO<sub>2</sub>. Efektivitou je v tomto smyslu myšleno za cenu co nejmenších tepelných ztrát především v zimním období a rychlost snížení koncentrace CO<sub>2</sub>. Vzniklé tepelné ztráty se musí kompenzovat, což činí další vzniklé provozní náklady.

### 5.2 VÝPOČET KONCENTRACE CO<sub>2</sub>

Výpočet aktuální hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti vychází z bilanční rovnice

$$\dot{V}c_{vst} + \dot{V}_d c_d = \dot{V}c_m + V_m \frac{dc_m}{dt}, \quad (5.1)$$

kde  $V$  – vyměněný objem větráním, m<sup>3</sup>,  
 $V_d$  – vydýchaný objem, m<sup>3</sup>,  
 $V_m$  – objem místnosti, m<sup>3</sup>,  
 $c_{vst}$  – venkovní koncentrace CO<sub>2</sub>, ppm,  
 $c_d$  – vydechovaná koncentrace CO<sub>2</sub>, ppm,  
 $c_m$  – aktuální koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti, ppm.

Z této rovnice (5.1) jsem vyjádřil rovnici (5.2) pro změnu koncentrace CO<sub>2</sub> v čase

$$\frac{dc_m}{dt} = \frac{\dot{V}c_{vst} + \dot{V}_d c_d - \dot{V}c_m}{V_m}, \quad (5.2)$$

kde  $c_{n0}$  – počáteční koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti, ppm.

V modelu jsou definovány počáteční podmínky koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti

$$c_m(t = 0) = c_{n0}, \quad (5.3)$$

kde  $c_{n0}$  – počáteční koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti, ppm.

### 5.3 NÁVRH MODELU

Návrh simulačního modelu místnosti či domu spočívá v identifikaci parametrů o produkci a spotřebě oxidu uhličitého. Model je modulární a lze ho po vhodné úpravě a identifikaci parametrů využít pro simulaci jiné místnosti či budovy. Tímto lze navrhnout vhodnou strategii pro řízení kvality vzduchu.

Model předpokládá dokonalé promísení vzduchu v místnosti. Reálně ovšem závisí na tvaru místnosti, rozměrech, umístění místnosti vůči okolním místnostem, umístění oken, vytápění a vzduchotechnických výustí, teplotě v místnosti a rozdílu teplot vůči okolí. Veškeré tyto závislosti se v modelu zanedbávají, jejich implementací by se model stal nepřehledný. Ani měření oxidu uhličitého není přesnou disciplínou, proto pokud se dodrží montážní postup daný výrobcem, považují výsledky měření za korektní.

Model k výpočtu koncentrace zpracovává vstupní hodnoty uvedené v tab. 5.1. Hodnoty jsou zadávané formou počtu osob, které vykonávají vybranou činnost, a počtu oken v určité poloze. Jedinou výstupní hodnotou je koncentrace uhličitého v místnosti.

Tab. 5.1 – Vstupy a výstupy modelu

Název vstupu / výstupu	Význam parametru	Jednotka
Pocet1	Počet sedících osob v místnosti	Počet osob
Pocet2	Počet stojících osob v místnosti	Počet osob
Pocet3	Počet chodících osob v místnosti	Počet osob
Pocet4	Počet zrychleně pohybujících se osob v místnosti	Počet osob
Pocet5	Počet středně pracujících osob v místnosti	Počet osob
Pocet6	Počet běžících osob v místnosti	Počet osob
Pocet7	Počet extrémně zatížených osob v místnosti	Počet osob
Pocet8	Počet plně otevřených oken	Počet oken
Pocet9	Počet otevřených oken na mikroventilaci	Počet oken
Pocet10	Počet otevřených oken na ventilaci	Počet oken
CO <sub>2</sub>	Aktuální hodnota CO <sub>2</sub> v místnosti	ppm

Model také obsahuje neznámé parametry uvedeny v tab. 5.2. Jedna kategorie popisuje vnitřní stav a popis místnosti včetně okolí místnosti. Další kategorie popisuje prvky větrání



v místnosti a poslední kategorie popisuje produkci oxidu uhličitého lidmi. Produkce CO<sub>2</sub> je charakterizována vydechovaným průtokem, která je ovlivněna i psychickou zátěží, a vydechovanou koncentrací CO<sub>2</sub>.

Tab. 5.2 – Neznámé parametry modelu

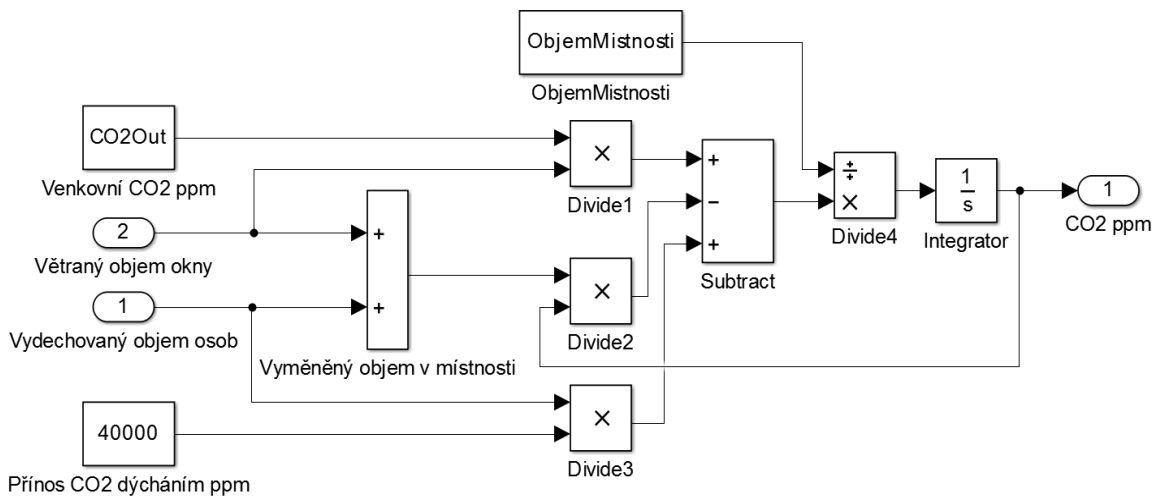
Název parametru	Význam parametru	Jednotka
Objem místnosti	Objem měřené místnosti	m <sup>3</sup>
Počáteční stav CO <sub>2</sub> v místnosti	Koncentrace CO <sub>2</sub> v místnosti	ppm
Venkovní CO <sub>2</sub>	Venkovní koncentrace CO <sub>2</sub>	ppm
Psychická zátěž	Psychické zátěže osob	-
Průtok při plném otevření	Průtok vzduchu do místnosti při plném otevření okna	m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup>
Průtok při mikroventilaci	Průtok vzduchu do místnosti při mikroventilaci okna	m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup>
Průtok při ventilaci	Průtok vzduchu do místnosti při otevřené ventilaci okna	m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup>
Průtok při uzavřené místnosti	Průtok vzduchu uzavřené místnosti	m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup>
Průtok sezení	Vydechovaný průtok při sezení	l·min <sup>-1</sup>
Průtok stání	Vydechovaný průtok při stání	l·min <sup>-1</sup>
Průtok chůze	Vydechovaný průtok při chůzi	l·min <sup>-1</sup>
Průtok zrychlený pohyb	Vydechovaný průtok při zrychleném pohybu	l·min <sup>-1</sup>
Průtok středně těžká práce	Vydechovaný průtok při středně těžké práci	l·min <sup>-1</sup>
Průtok běh	Vydechovaný průtok při běhu	l·min <sup>-1</sup>
Průtok extrémní zátěž	Vydechovaný průtok při extrémní zátěži	l·min <sup>-1</sup>
Vydechovaná koncentrace CO <sub>2</sub>	Koncentrace CO <sub>2</sub> vydechovaného vzduchu	ppm

## 5.4 SIMULACE MODELU

Pro simulační ověření jsem zvolil software Matlab & Simulink, jehož prostředí umožňuje efektivně pracovat s rychlou odezvou vypočtených výsledků. Je také vhodný pro zpracování naměřených dat, z kterých identifikuji parametry místnosti. Model je rozdělen do více subsystémů. Rozdělení je uspořádáno na systémy produkce CO<sub>2</sub>, přívod vzduchu větráním a výpočet aktuální koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti.

### 5.4.1 Místnost

Na základě předchozí rovnice v kapitole 5.2 jsem sestavil model místnosti na obr. 5.1. Vstupní proměnné jsou větraný průtok a vydechovaný průtok. Neznámými parametry jsou venkovní koncentrace CO<sub>2</sub>, koncentrace vydechovaného vzduchu, počáteční koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti a objem místnosti.



Obr. 5.1 – Výpočet aktuální koncentrace CO<sub>2</sub>

Neznámé parametry se zadávají v masce subsystému na obr. 5.2. Objem místnosti lze zadávat jako jednu číselnou hodnotu v m<sup>3</sup> nebo jako součin výšky, šířky a délky v metrech. Hodnoty koncentrací CO<sub>2</sub> se zadávají v hodnotách ppm.

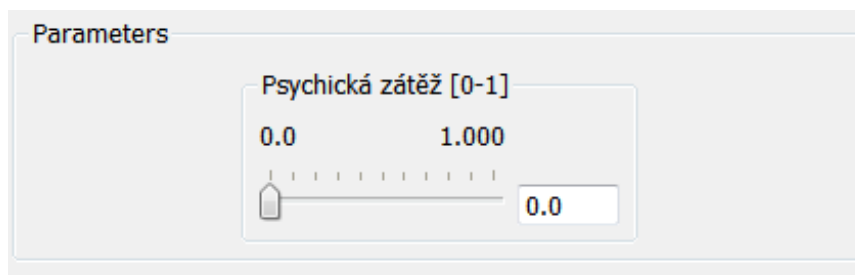
Parameters	
Objem místnosti [m3]	<input type="text" value="29.42"/>
Počáteční stav CO2 [ppm]	<input type="text" value="400"/>
Venkovní CO2 [ppm]	<input type="text" value="400"/>

Obr. 5.2 – Maska subsystému místnost

#### 5.4.2 Model osob

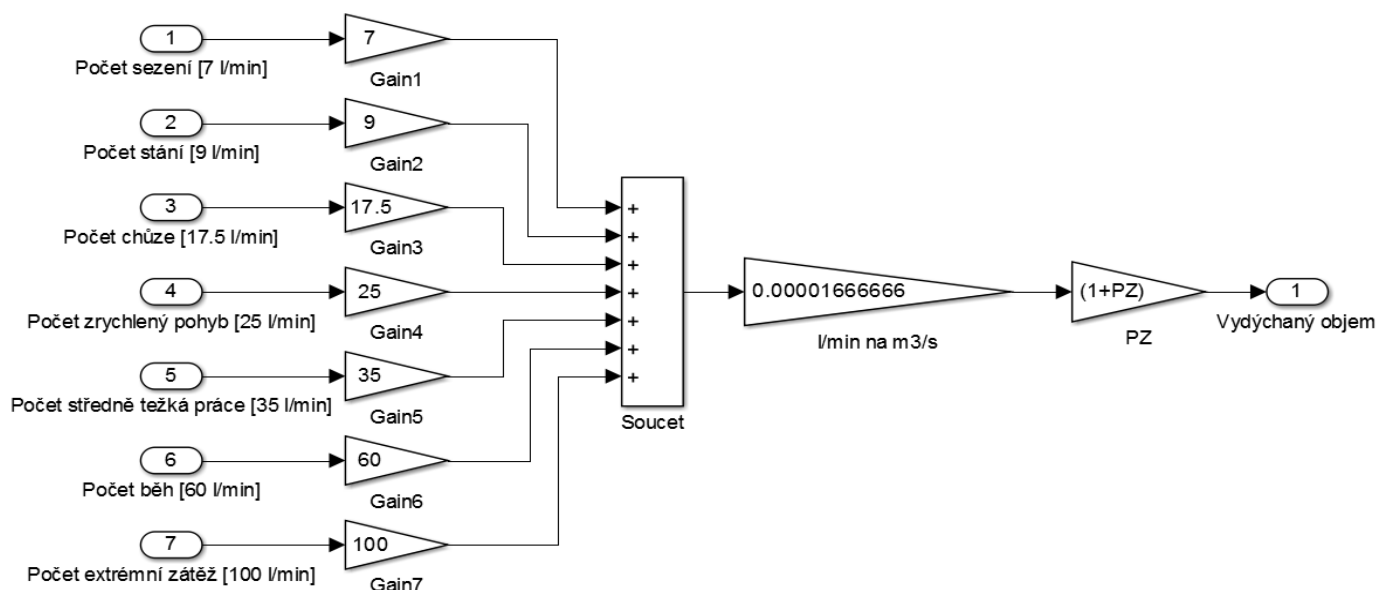
Model osob udává produkci CO<sub>2</sub> v místnosti. Nejen počet osob, ale i typ činnosti osob má vliv na produkci CO<sub>2</sub>. Vykonávané činnosti jsem rozdělil vzestupně podle spotřebovaného vzduchu za minutu: klid/sezení (7 l·min<sup>-1</sup>), stání (9 l·min<sup>-1</sup>), chůze (17,5 l·min<sup>-1</sup>), zrychlený pohyb (25 l·min<sup>-1</sup>), středně těžká práce (35 l·min<sup>-1</sup>), běh (60 l·min<sup>-1</sup>) a extrémní

zátěž ( $100 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Lze také zadat parametr psychické zátěže, který také ovlivňuje spotřebu vzduchu od 0 do 1. Parametr se zadává pomocí posuvníku na obr. 5.3.



Obr. 5.3 – Maska subsystému produkce CO<sub>2</sub>

Vstupy do subsystému, jak je znázorněno na obr. 5.4, jsou počty osob vykonávající určitou činnost. Tyto počty jsou vynásobeny hodnotou průtoku vydechovaného vzduchu dle typu činnosti. Přínosy oxidu uhličitého jsou sečteny, poté převedeny z  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$  na  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a vynásobeny hodnotou psychické zátěže.



Obr. 5.4 – Subsystém produkce CO<sub>2</sub>

### 5.4.3 Model oken

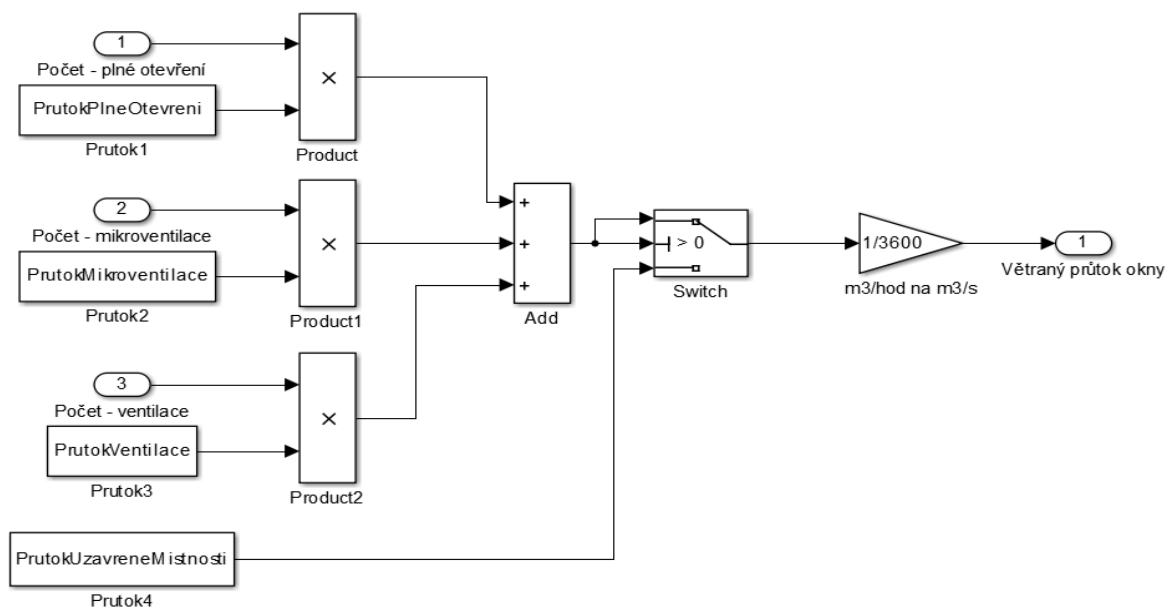
Tento model se uplatní při modelování místnosti, kde je přívod vzduchu zajištěn ať už manuálně nebo automaticky pomocí oken. V modelu je uvažováno okno s třemi, resp. čtyřmi polohami. Polohy jsem nazval *plně otevření*, *mikroventilace*, *ventilace* a poslední poloha je při

uzavřené místnosti. Každý z těchto parametrů okna či místnosti byla experimentálně změřena a následně vyhodnocena. Veškeré průtokové parametry se zadávají v  $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  viz obr. 5.5.

Parameters	
Průtok při plném otevření [m3/hod]	338
Průtok při mikroventilaci [m3/hod]	6
Průtok při ventilaci [m3/hod]	79
Průtok při uzavřené místnosti [m3/hod]	8

Obr. 5.5 – Maska subsystému okna

Vstupem do subsystému jsou počty oken v určité poloze, které mají v masce stanované objemové parametry. Po vynásobení počtu oken s průtokovými parametry jsou tyto hodnoty sečteny a převedeny ze zadávaných  $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  na  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  viz obr 5.6. V případě otevření jakéhokoliv okna se ve výpočtu neuplatňuje paramet větrání místnosti při uzavřeném okně



Obr. 5.6 – Subsystém pro výpočet větraného průtoku

## 5.5 IDENTIFIKACE NEZNÁMÝCH PARAMETRŮ

### 5.5.1 Zařízení pro měření

Pro identifikaci neznámých parametrů, kterou představuje místnost v rodinném domě, jsem zvolil DDC regulátor mark 220 s operačním systémem Linux a pokojový ovladač UI091 s měřením teploty a CO<sub>2</sub>. Oba výrobky jsou od firmy Domat Control System. Regulátor komunikuje s pokojovým ovladačem pomocí sběrnice RS485, protokolem Modbus RTU a linkovým protokolem serial. Do paměti regulátoru jsou v intervalu 5 sekund ukládány hodnoty teploty a koncentrace CO<sub>2</sub>, které lze z regulátoru stáhnout ve formátu .csv pro následnou identifikaci systému.

Dle montážního postupu jsem senzor umístil do výšky 130 cm, výrobce doporučuje výšku 120 cm až 150 cm. Umístění čidla nesmí být do 50 cm od rohu místnosti, od okna či dveří, aby měřené hodnoty neovlivňoval např. průvan. Dále nesmí být čidlo v blízkosti zdroje tepla či chladu (vyústění klimatizace, topení) a instalační krabice musí být utěsněna, aby nedocházelo k ovlivnění vzduchem z instalačních trubek.

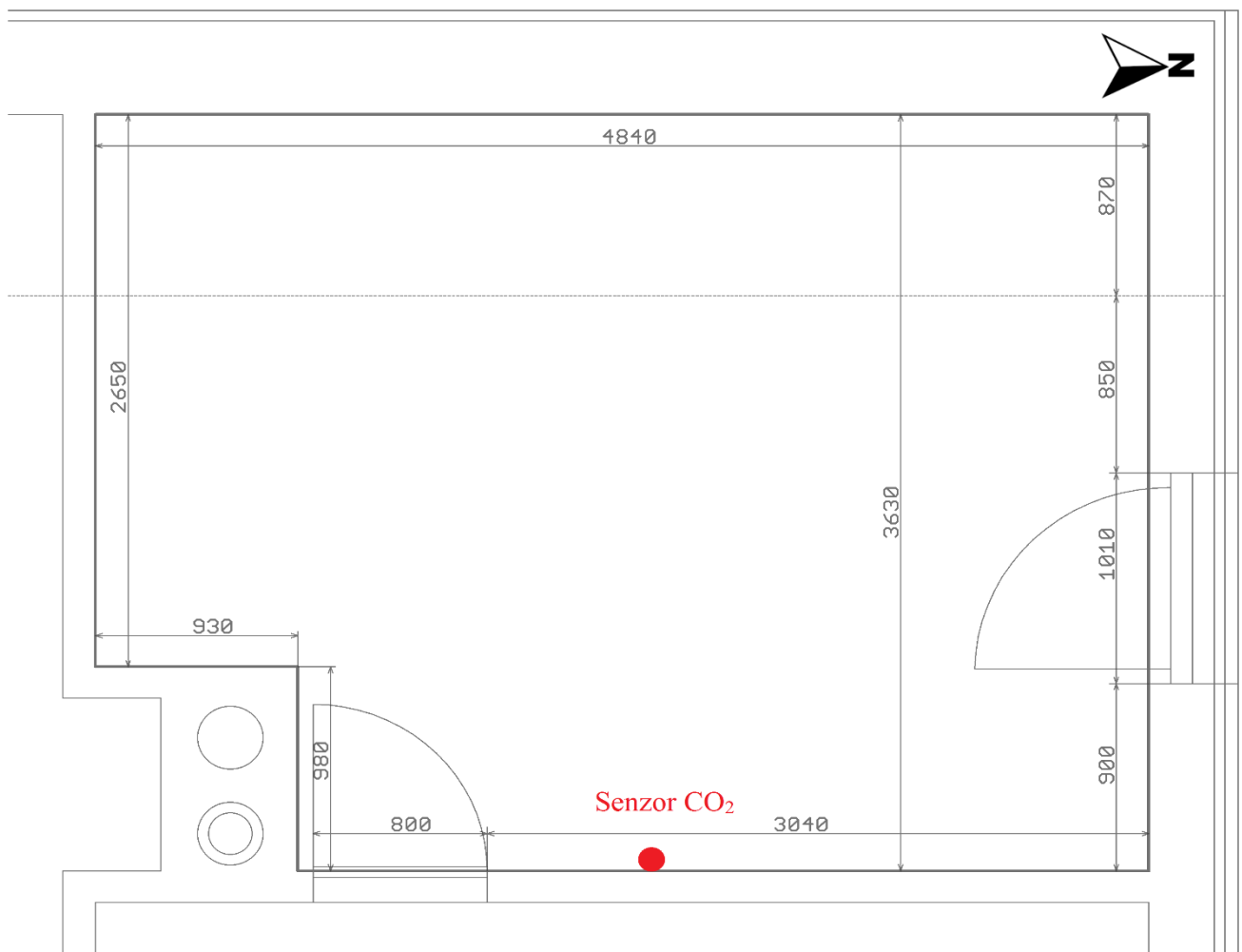
### 5.5.2 Referenční místnost

Měření probíhalo v místnosti, která se nachází v 3. nadzemním podlaží rodinného domu. Půdorys místnosti je na obr. 5.7. Místnost má jedno plastové okno a jedny dveře, kde je okno orientováno na severní stranu. Okno pětikomorové s dvojsklem, kde je prostor mezi skly vyplněný argonem, který zlepšuje izolační vlastnosti. Místnosti je 2010 mm vysoká a na západní straně od 870 mm od západní stěny zkosená. Výška západní zdi je 1640 mm. Objem referenční místnosti jsem vypočítal na 32,7 m<sup>3</sup>. Z této hodnoty jsem odečetl 10 % objemu, který je reprezentovaný především nábytkem a dalším zařízením místnosti. V modelu se počítá s objemem místnosti 29,42 m<sup>3</sup>. Pro výpočet koncentrace je důležité zadat počáteční stav koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti a venkovní koncentraci CO<sub>2</sub>. Počáteční stav v místnosti změříme pomocí čidla CO<sub>2</sub> a venkovní koncentraci CO<sub>2</sub> lze odhadnout například z meteorologických měření. Referenční dům se nachází na venkově, kde není v blízkém okolí žádná průmyslová oblast. Vycházel jsem i z údajů zmíněných v teoretické části z měření na Mauna Loa. Proto jsem zvolil hodnotu venkovní koncentrace CO<sub>2</sub> 400 ppm.

Proud přiváděného vzduchu oknem do místnosti neměl žádné překážky, jako například závěsy, záclony nebo sítě proti hmyzu, které byly během experimentu odstraněny. Otevřené okno je 670 mm vysoké a 1010 mm široké, dveře jsou široké 800 mm a vysoké 1930 mm. Referenční místnost má polovinu celkové plochy vnějšího pláště spojenou s venkovním

prostředím, druhá polovina je spojena s okolními místnostmi domu. Vnější obvodové zdivo je tvořeno 350 mm silným YTONGEM s 50 mm polystyrenu. Strop, který má současně funkci střechy, je izolován 20 mm polystyrenu a 100 mm skelné vaty.

Čidlo CO<sub>2</sub> bylo umístěno dle montážního postupu a před měřením proběhly více než 3 doporučené autokalibrační cykly. Před zahájením měření průtoku vzduchu oknem, byla v místnosti vždy koncentrace CO<sub>2</sub> nad 1000 ppm. Následně bylo otevřeno okno do příslušné polohy a měření probíhalo, dokud koncentrace CO<sub>2</sub> neklesla na přijatelnou hodnotu.



Obr. 5.7 – Výkres místnosti s polohou umístění senzoru CO<sub>2</sub>

### 5.5.3 Vyhodnocení měření

Pro srovnání všech měření, resp. jejich modelů stanovím čas, kdy klesne koncentrace z 1000 ppm na 500 ppm. Je to tedy čas, kdy dojde k přívodu 32,32 m<sup>3</sup> venkovního vzduchu, který má koncentraci CO<sub>2</sub> 400 ppm. V některých západních zemích je maximální povolená

koncentrace CO<sub>2</sub> pouze 1000 ppm. Česká legislativa je mírnější, stanovuje maximální přípustnou hranici 1500 ppm.

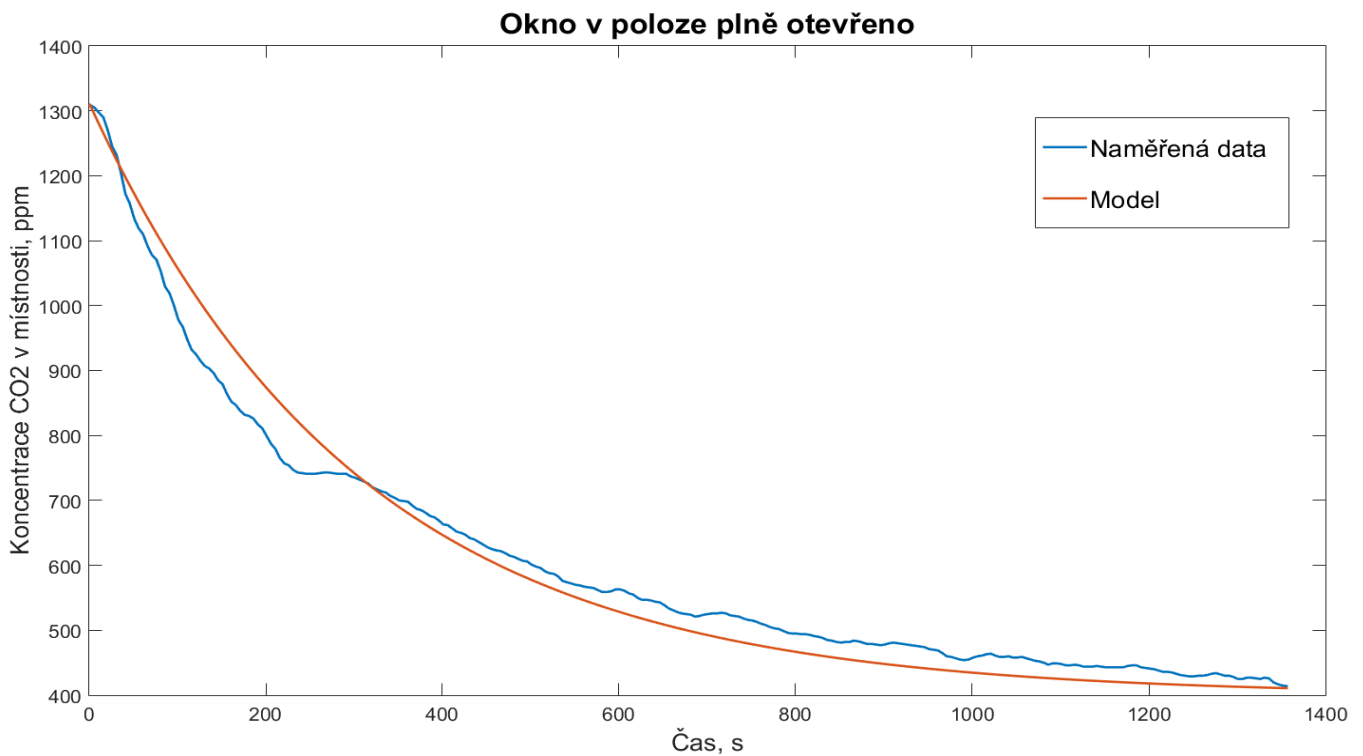
Data jsem vyhodnocoval v programu Matlab s využitím kvadratického kritéria. V programu *VypocetParametruOkna.m* se identifikují parametry okna. K výpočtu jsou potřeba naměřená data dle počtu pozic okna a simulační programy k jednotlivým pozicím. První hodnotu dat považuji za počáteční hodnotu koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti. Veškeré programy jsou přiloženy v příloze.

Prvním důležitým údajem o místnosti je větrání při uzavřené místnosti, pokud jsou zavřená okna i dveře. Tato vlastnost charakterizuje propustnost vzduchu obálkou místnosti. Z naměřených dat jsem stanovil hodnotu na 8 m<sup>3</sup>·hod<sup>-1</sup>. Měření průtoku vzduchu a vypočtený model jsou zobrazeny na obrázku 5.8. Dle modelu se místnost vyvětrá za 6 hodin 35 minut a 20 sekund.



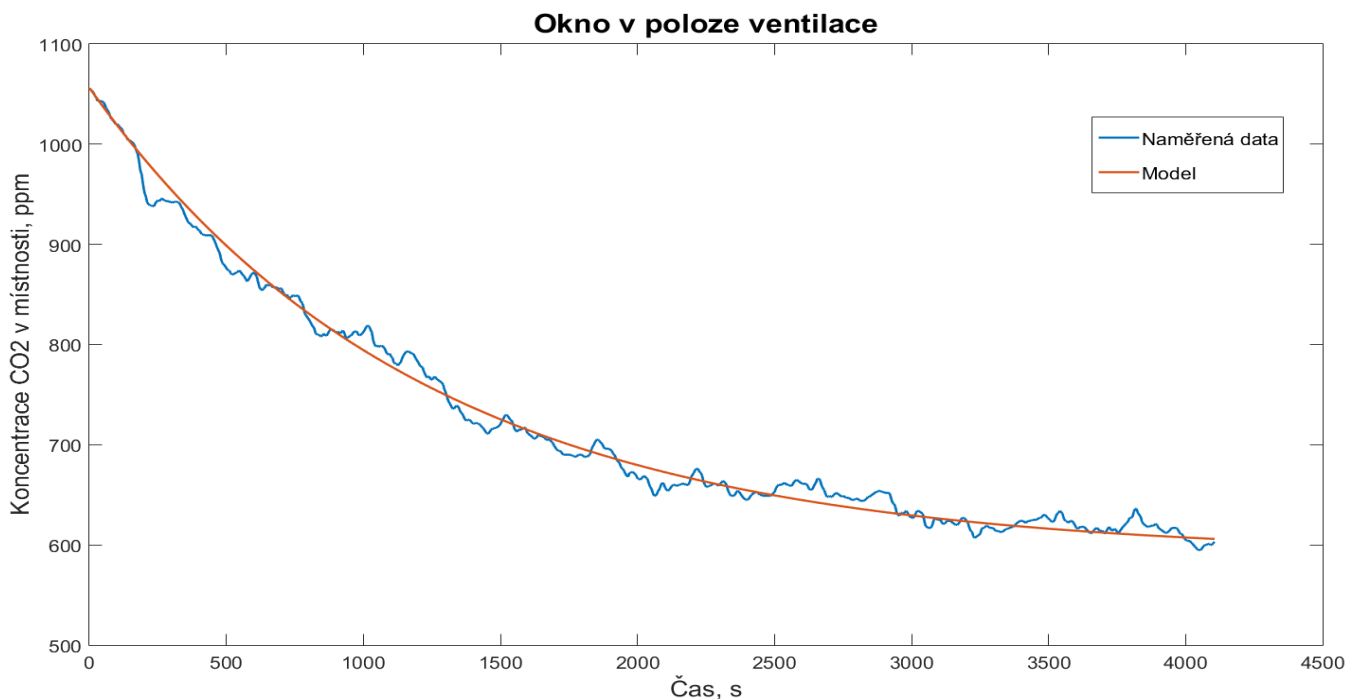
Obr. 5.8 – Průběh větrání při uzavřené místnosti

Dále jsem stanovil průtok při plně otevřeném okně, které oproti zavřenému stavu svírá úhel otevření 90°. Plně otevřeným oknem je dosaženo nejvyšší výměny vzduchu v místnosti. Po otevření okna nebyl v místnosti žádný zdroj oxidu uhličitého. Vypočtený průtok je 346 m<sup>3</sup>·hod<sup>-1</sup>. Místnost se vyvětrá pouze za 9 minut a 10 sekund. Dle předpokladu je tento způsob větrání nejefektivnější z pohledu energetického tak časového, jak je vidět na obr 5.9.



Obr. 5.9 – Průběh větrání při plně otevřeném okně

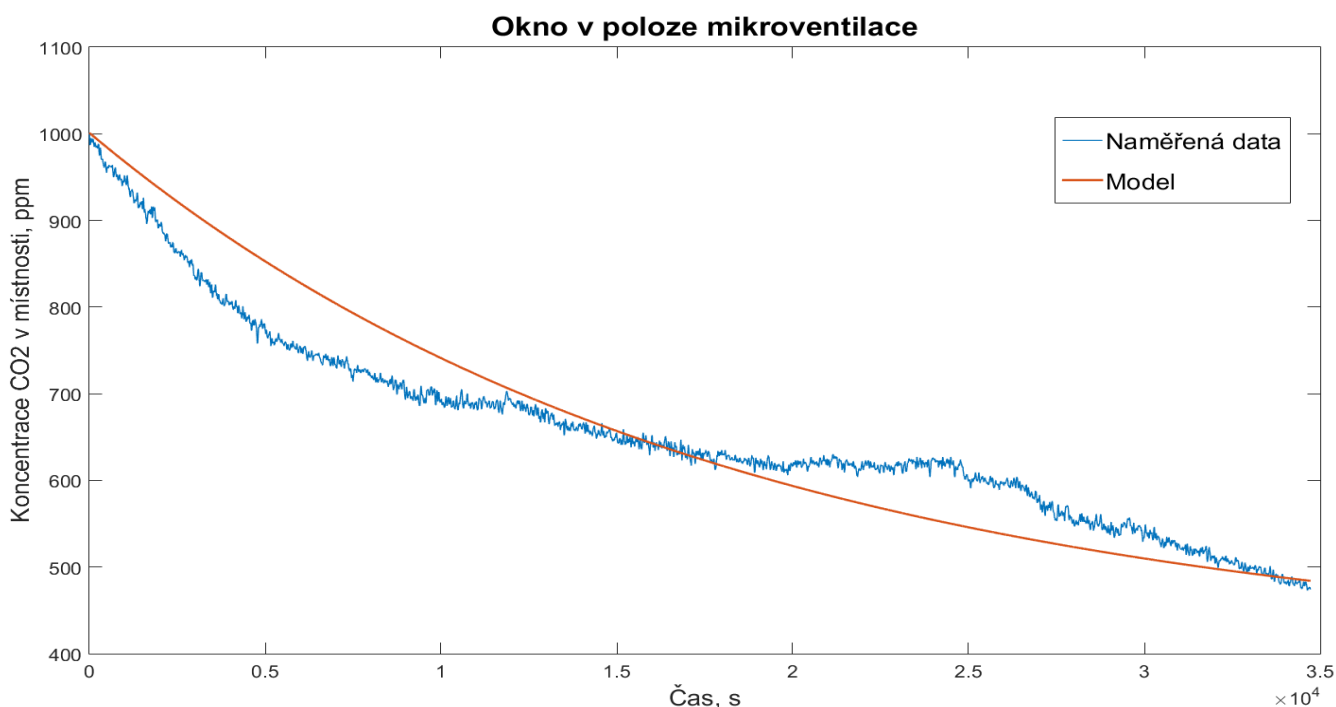
Třetí měření v poloze ventilace, která se využívá ke kontinuálnímu větrání, proběhlo za přítomnosti jedné osoby, která v místnosti pouze seděla. Dle modelu na obr. 5.10 jsem stanovil průtok na  $87 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . Tento model nejlépe ze všech vystihuje experimentální data. Při ventilaci se vzduch vymění za 36 minut a 20 s.



Obr. 5.10 – Průběh větrání pomocí ventilace s jednou přítomnou osobou



Čtvrté měření okno v poloze mikroventilace ukázalo paradox, kdy při otevřeném okně v této poloze se zmenšil průtok vzduchu oproti zavřenému oknu. Obměna vzduchu v místnosti tedy trvá déle a také se osobám přítomným v místnosti současně snižuje komfort v místnosti, protože okno v poloze mikroventilace nemá prakticky žádnou akustickou izolaci oproti zavřenému oknu. Měření s vyhodnocením model jsou na obr. 5.11. Během měření nebyl v místnosti žádný zdroj oxidu uhličitého. Průtok vzduchu jsem vypočítal pouze na  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . Místnost se tedy vyvětrá za 8 hodin 45 minut a 10 s, což je nejdelší čas ze všech možných způsobů větrání.

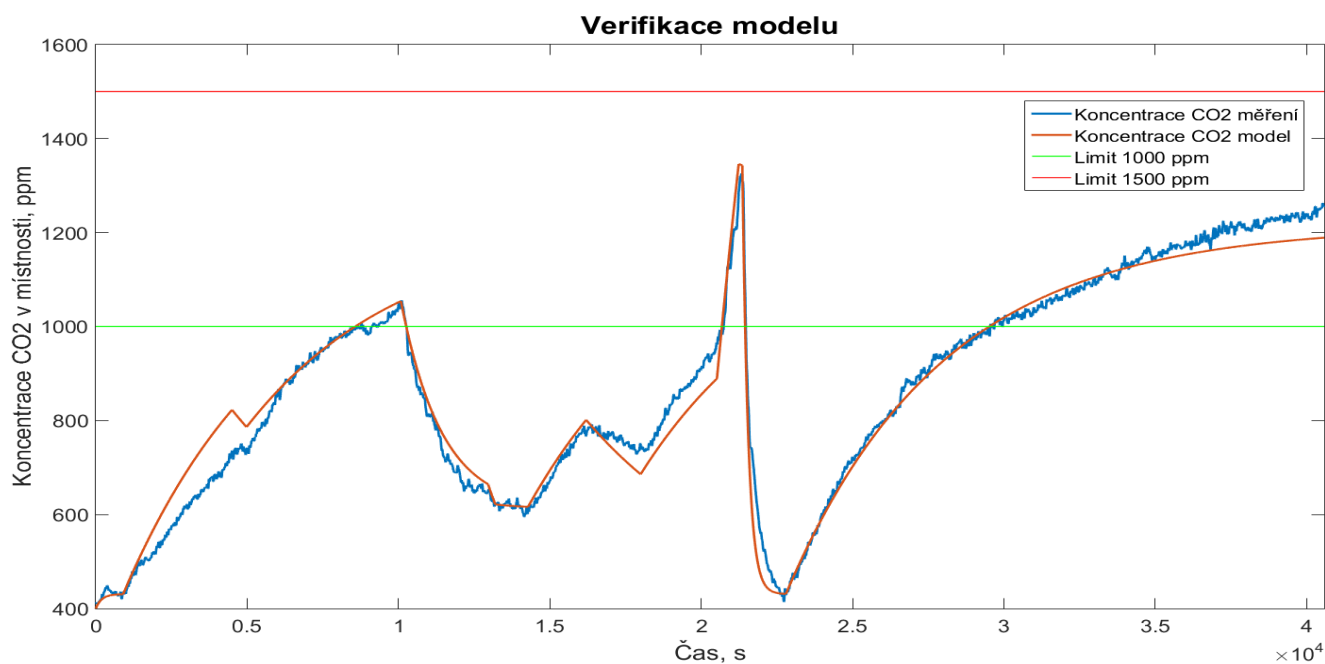


Obr. 5.11 – Průběh větrání pomocí okenní mikroventilace

Z těchto experimentálních měření jsem identifikoval všechny parametry okna. Tyto parametry dále použiji pro simulační ověření navržené strategie řízení pro udržení zvoleného komfortu z pohledu koncentrace oxidu uhličitého. Všechna vyhodnocovaná měření probíhala přes den při bezvětří.

## 5.6 VERIFIKACE MODELU

Po identifikaci systému je nutné ověřit, zda vytvořený model odpovídá realitě. Pro ověření jsem realizoval měření s kombinací vykonávaných činností a kombinací různých větrání. Porovnání modelu s měřenými daty je na obr. 5.17, vykonávané činnosti jsou v tab. 5.3. Program pro ověření s daty obsažený v příloze práce.



Obr. 5.12 – Verifikace modelu

Tab. 5.3 – Prováděné činnosti v čase pro verifikaci modelu

Čas, s	Typ akce
0	Vyvětráno na 400 ppm a příchod do vyvětrané místnosti
900	Uzavření okna a dveří
4500	Odchod z místnosti
4980	Příchod do místnosti
10080	Otevření okna na ventilaci
12960	Odchod z místnosti
13200	Příchod do místnosti
14280	Zavření okna
16200	Odchod z místnosti
18000	Příchod do místnosti
20520	Start cvičení
21240	Konec cvičení
21360	Otevření okna na plno a opuštění místnosti
22800	Zavření okna a příchod do místnosti

## 5.7 PŘÍKLADY VYUŽITÍ ZÍSKANÝCH MODELŮ

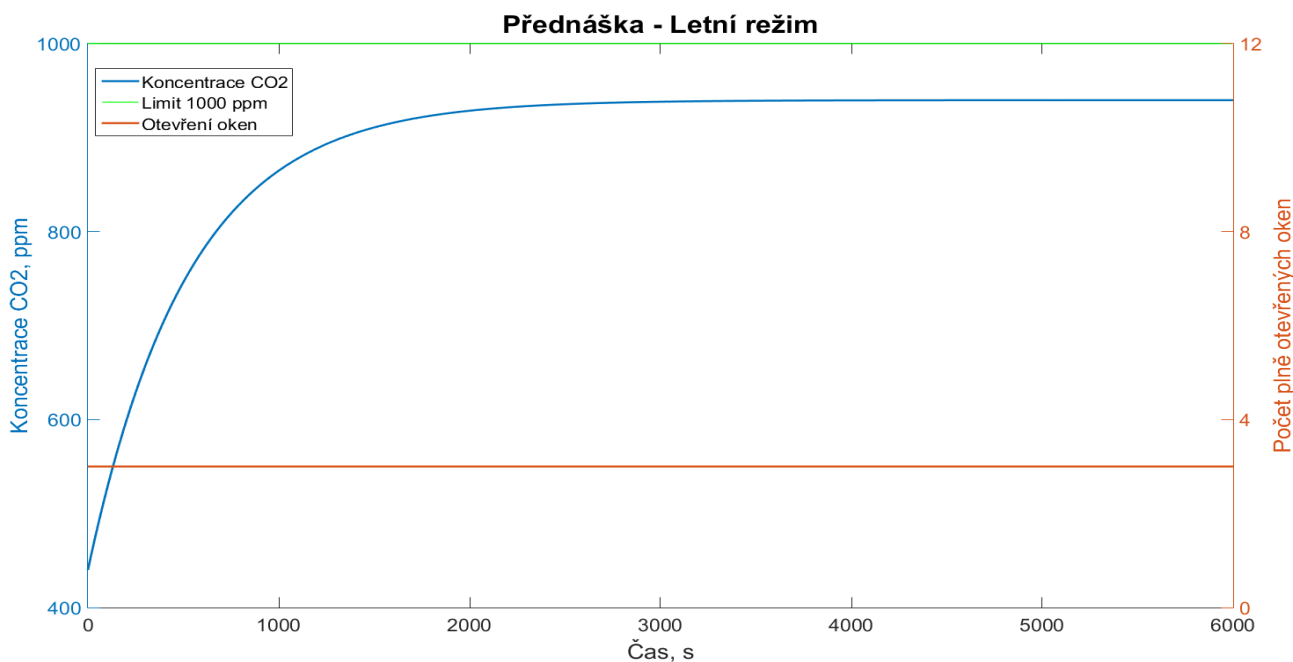
Jedním z cílů práce je vytvořit pokyny pro neautomatizované řízení k udržení koncentrace CO<sub>2</sub> dle platné legislativy. Vybral jsem typické situace ze života, pro které jsem na základě simulačního ověření vypracoval pokyny pro udržení vhodné kvality vzduchu. Simulační programy pro ověření zvolených strategií jsou přiloženy v příloze.

### 5.7.1 Školní přednášková místnost

Ve vzdělávacích zařízeních je prvotním cílem rozšiřování vědomostí studentů, proto by zde měl být zvýšený důraz na kvalitu vnitřního prostředí. Často se ale především v zimních měsících lze setkat s plnou přednáškovou místností a zavřenými okny po celou dobu vyučování.

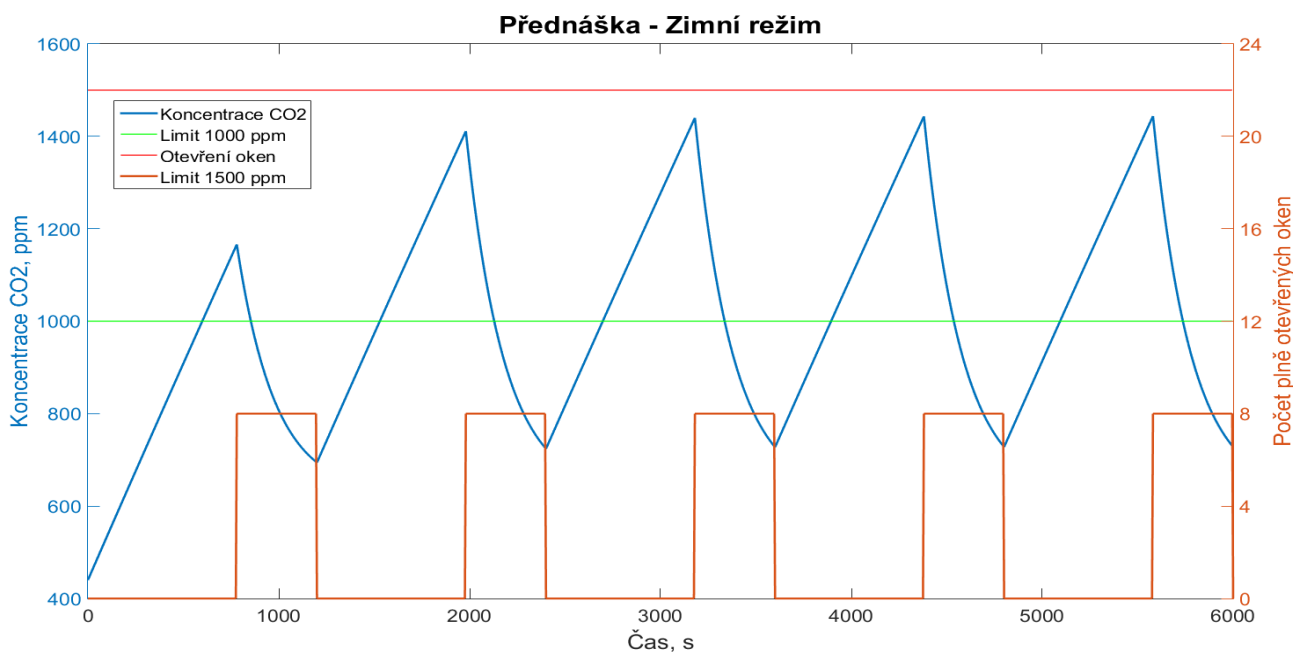
K názornému příkladu jsem vybral konkrétní předmět, který jsem absolvoval se známým počtem studentů a v konkrétní přednáškové místnosti. Na předmětu bylo zapsáno 40 studentů a vede ho jeden vyučující. Přednášková místnost je v 3. nadzemním podlaží poblíž centra města Pardubice a má objem 241,2 m<sup>3</sup>. Místnost je osazena 16 plastovými okny, která při plném otevření tvoří obdélník o ploše 1,06 m<sup>2</sup>. Průtok při plně otevřeném okně jsem tedy přepočítal v závislosti na velikosti plochy při otevřeném okně. Průtok při plně otevřeném okně jsem tedy stanovil na 542 m<sup>3</sup>·hod<sup>-1</sup>. Průtok při ventilaci okna jsem ponechal stejný jako změřený v předchozí kapitole 5.5, protože okna v přednáškové místnosti jsou sice větší, ale při otevřené ventilaci svírají menší úhel otevření. Standardní přednáška trvá hodinu a 40 minut bez pauzy. Pokyny rozdělím pro použití v letních měsících a zimních měsících. V zimních měsících není vhodné mít kontinuálně otevřená okna z důvodu tepelných ztrát.

V letních měsících dle simulačního ověření stačí mít po celou dobu vyučování plně otevřená 3 okna. Tím bude zaručena dostatečná kvalita vzduchu z pohledu koncentrace CO<sub>2</sub>, která dle simulace nepřesáhne 940 ppm. Simulovaný průběh je na obr. 5.12.



Obr. 5.13 – Simulovaný průběh koncentrace CO<sub>2</sub> při přednášce v letním režimu

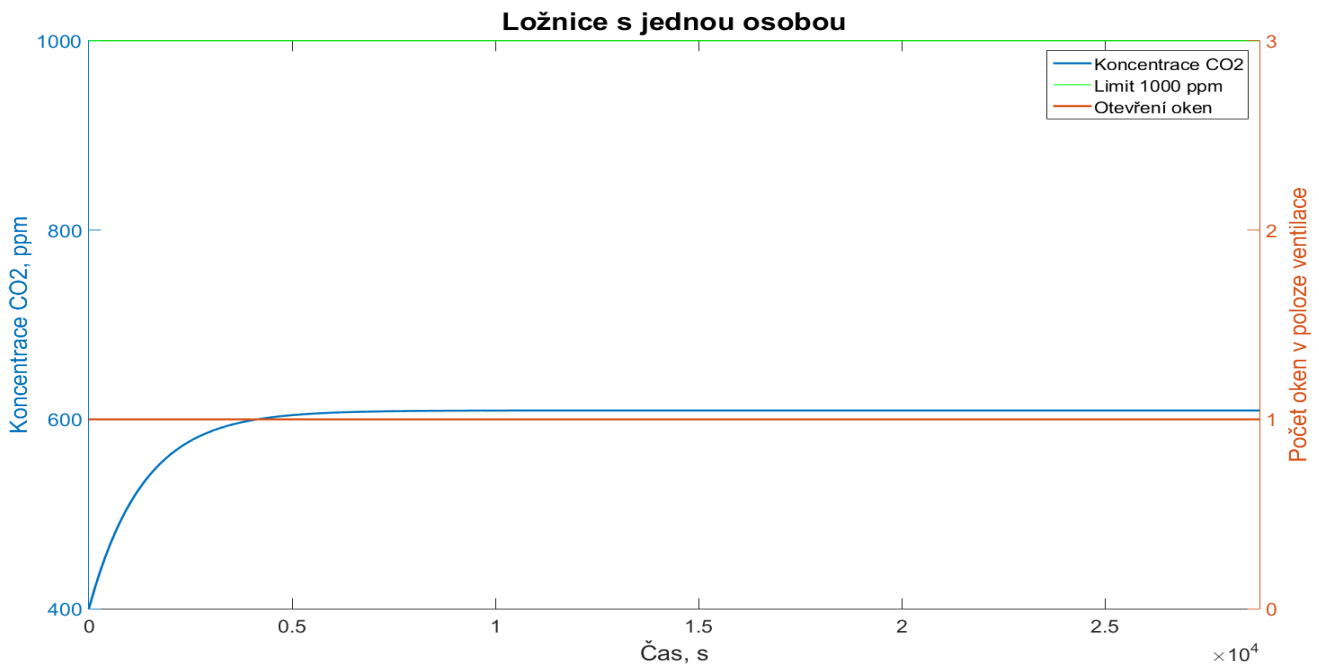
V zimních měsících není vhodné mít kontinuálně otevřené okno, pod kterým je umístěný radiátor. Dle strategie co nejrychleji vyvětrat a současně nepřekročit stanovené limity, jsem došel k řešení větrat plně otevřenými okny po 13 minutách na 7 minut, viz obr. 5.13. V místnosti je pouze 5,88 m<sup>3</sup> na osobu, což je méně než polovina dle české legislativy pro nejméně náročné zaměstnání. Místnost má ovšem kapacitu pro 80 osob, tedy je na osobu méně než 3 m<sup>3</sup> při plném obsazení.



Obr. 5.14 – Simulovaný průběh koncentrace CO<sub>2</sub> při přednášce v zimním režimu

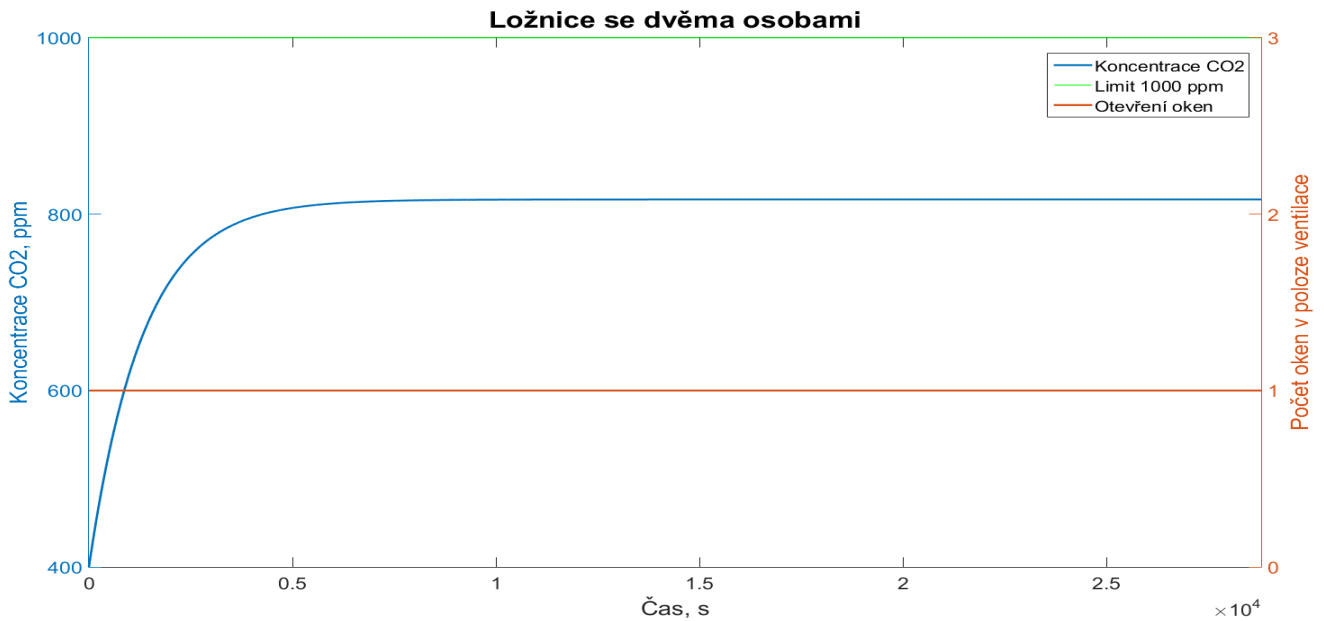
### 5.7.2 Spánek v ložnici

Regulace CO<sub>2</sub> ve spánku je typická aplikace, do které nelze manuálně zasahovat během probíhajícího procesu. Proto se musí manuálně nastavit regulační prvky před spánkem a během celé doby spánku se tyto prvky neovlivňují. Během osmihodinového spánku dvou osob je při běžné spotřebě vydycháno 6,72 m<sup>3</sup> vzduchu. Právě zde by se uplatnily automatizované řídicí systémy pro regulaci nebo doporučující pokyny pro udržení doporučených koncentrací CO<sub>2</sub>.



Obr. 5.15 – Simulovaný průběh koncentrace CO<sub>2</sub> při spánku jedné osoby

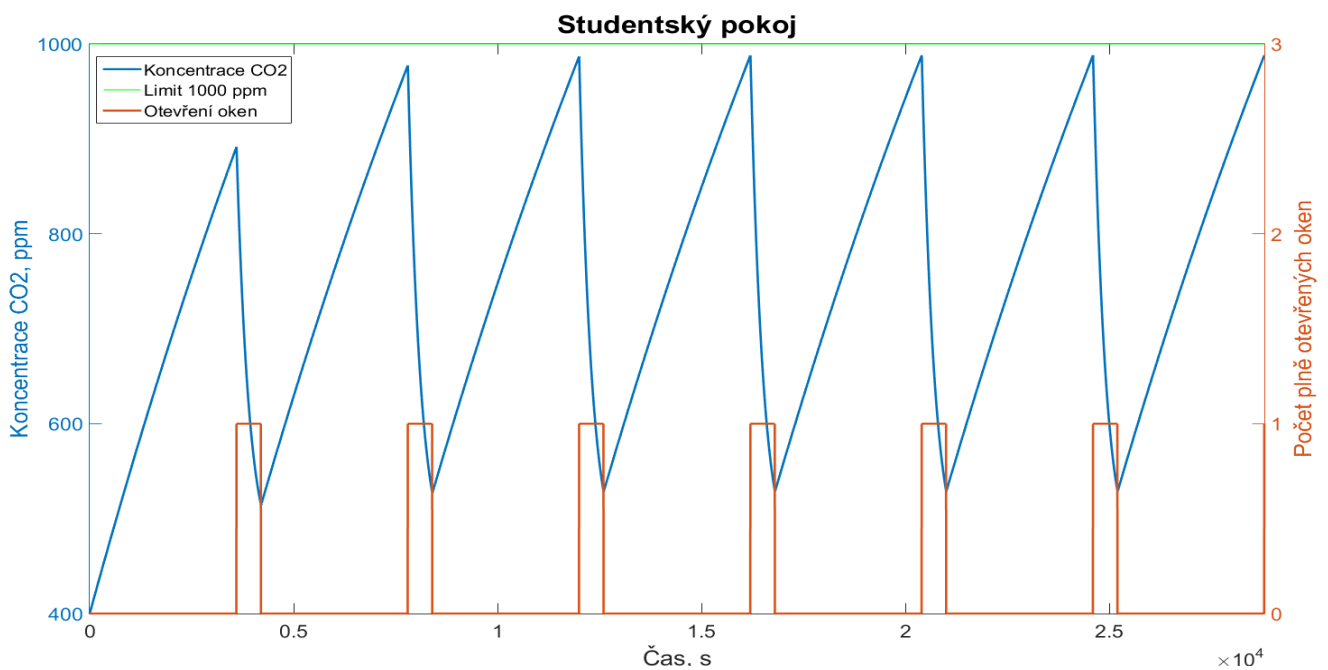
Místnost identifikovaná v kapitole 5.5 slouží také jako ložnice pro dvě osoby. Proto není potřeba přepočítávat identifikované parametry okna. Pro určení pokynů bylo testováno několik variant. Jedna osoba se zavřeným oknem a s oknem otevřeným v poloze ventilace, dvě osoby se zavřeným oknem a s oknem v poloze ventilace. Při jedné nebo dvou osobách v místnosti s otevřenou ventilací byly splněny i přísnější zahraniční limity. Během spánku jedné osoby v ložnici se maximální koncentrace CO<sub>2</sub> pohybovala okolo 630 ppm, simulovaný průběh je na obr. 5.14. Během spánku dvou osob nepřesáhla maximální koncentrace CO<sub>2</sub> hodnotu 850 ppm, viz obr. 5.15. Během spánku jedné osoby došlo k dosažení koncentrace CO<sub>2</sub> 1300 ppm a ve dvou osobách dokonce 1850 ppm. Pokyny pro neautomatizované zajištění zdravého spánku jsou tedy jednoznačně dány, a to spát s otevřeným oknem po celou dobu spánku.



Obr. 5.16 – Simulovaný průběh koncentrace CO<sub>2</sub> při spánku ve dvou osobách

### 5.7.3 Studentský pokoj

V identifikovaném studentském pokoji v kapitole 5.5 se nachází typicky jedna osoba při různých činnostech od sledování filmů až po cvičení. Na rozdíl od spánku lze při těchto činnostech regulovat otevírání oken. Při sezení postačí po hodině otevřít na plno okno na dobu 10 minut, jak naznačuje obr. 5.16. Tímto bude zaručeno udržení hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> pod 1000 ppm. Při cvičení postačí okno střídavě po deseti minutách otevírat naplno a zavírat.



Obr. 5.17 – Simulovaný průběh koncentrace CO<sub>2</sub> ve studentském pokoji v jedné osobě

## 6 ZHODNOCENÍ

Měření koncentrace oxidu uhličitého není na rozdíl např. od měření teploty přesná disciplína. Nejprve jsem naměřil experimentální data jak při pobytu v místnosti, tak při větrání místnosti. Poté jsem pomocí matematicko-fyzikální analýzy sestavil model pro určení koncentrace oxidu uhličitého za daných situací a také pro simulační ověření navržené strategie.

Z identifikovaných parametrů je patrné, že větrání při uzavřené místnosti je vhodné, pokud se v místnosti nebudou delší dobu vyskytovat žádné osoby. Například ve školní přednáškové místnosti po skončení vyučování, které může být do večerních hodin, není nutné otevírat okna přes noc, ale větrání při uzavřené místnosti zajistí vyvětrání do dalšího dne, kdy opět začne vyučování. Okno v poloze mikroventilace snížilo průtok vzduchu do místnosti, a navíc snižuje komfort především díky snížení akustické izolace. Tato poloha okna je tedy dle provedených měření prakticky nevyužitelná. Dle předpokládání je pak vyšší průtok při plně otevřeném okně než v poloze ventilace.

Všechny vybrané situace v kapitole 5.6 lze snadno manuálně regulovat především v letních měsících. V zimních měsících se nedoporučuje větrat kontinuálně. Větrání by mělo být intenzivní a krátké, tak aby zůstávalo teplo akumulované ve zdech. Ve studentském pokoji nepřesáhne koncentrace přísnější normu 1000 ppm při větrání po jedné hodině na 10 minut. V přednáškové místnosti při zavřených oknech u daného předmětu překročí koncentrace CO<sub>2</sub> platnou českou legislativu za 19 minut, pokud byla předtím místnost zcela vyvětrána. Navržená strategie po 13 minutách na 7 minut naplno otevřít 8 oken je však v praxi těžko představitelná. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. stanovuje minimální objem na osobu na 12 m<sup>3</sup>, ale v tomto případě je to méně než polovina, proto je nutné frekventovanější větrání.

Pro udržení koncentrace oxidu uhličitého pod stanovenými limity lze větrat v daných intervalech nebo, pokud je to možné, zvýšit objem místnosti spojením více místností a tím snížit intervaly větrání.

## 7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit parametrizovaný model místnosti, který by umožňoval počítat koncentraci CO<sub>2</sub> a tím umožnit návrh strategie větrání v místnosti tak, aby byly splněny hygienické normy i bez nutnosti měření.

V prostředí Merbon IDE jsem vytvořil program pro měření koncentrace oxidu uhličitého. Poté jsem sestavil model objektu popisující koncentraci CO<sub>2</sub>. Na základě naměřených dat jsem identifikoval neznámé parametry modelu. Po určení všech neznámých parametrů modelu jsem navrhl řízení pro udržení doporučené koncentrace CO<sub>2</sub>. Řízení jsem rozdělil na letní a zimní. Pro vybrané situace jsem tedy navrhl kontinuální větrání a jednorázové větrání.

Po identifikaci referenční místnosti jsem ověřoval věrohodnost modelu. Po dobu delší než 11 hodin jsem zapisoval veškeré vykonané činnosti, které jsem následně použil pro simulaci. Činnosti a větrání jsem co nejvíce kombinoval, abych ověřil model v celém jeho rozsahu. Model popisuje průběhy koncentrace v místnosti s průměrnou absolutní chybou 3,4 % z měřené hodnoty.

Model lze po identifikaci parametrů konkrétního objektu využít pro tvorbu pokynů k udržení doporučených koncentrací v závislosti na prostředí. Trend v izolaci budov stále pokračuje a na kvalitu vnitřního ovzduší se stále zapomíná, ale situace je již lepší než před pár lety. Nyní v ČR rozšiřuje povědomí o kvalitě vzduchu ve vnitřních prostorech, ale proti západním zemím jsme stále pozadu. Česká legislativa je totiž mnohem mírnější a povoluje koncentraci CO<sub>2</sub> až 1500 ppm. I přes mírnější legislativu se lze běžně setkat s vysokým překročením těchto hodnot. Ve Francii již před lety zavedli povinné monitorování oxidu uhličitého ve vzdělávacích zařízeních. Pevně věřím ve zlepšující se stav v České republice, protože v konečném důsledku pobyt v nedostatečně větraných prostorech má vliv na naše zdraví.

V dalším výzkumu bych do modelu přidal faktor rozdílu vnitřní a venkovní teploty, protože by tento faktor mohl mít významný vliv na proudění vzduchu.



## LITERATURA

- BUŠTA, K.; WAGNER, Z. 2012. *Oxid uhličitý a možnosti jeho využití I.* [online]. [cit. 2018-04-22]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/8492-oxid-uhlicity-a-moznosti-jeho-vyuziti-i>.
- ČESKO. 2005. *Vyhláška č. 410/2005 Sb. o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých.* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-410>.
- ČESKO. 2007. *Narizení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci.* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361/zneni-20160129>.
- DOMAT CONTROL SYSTEM. 2018. *UT090 Pokojové čidlo teploty a CO<sub>2</sub>.* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [http://domat-int.com/wp-content/uploads/domat\\_UT090\\_cz.pdf](http://domat-int.com/wp-content/uploads/domat_UT090_cz.pdf).
- ECOSTATIONS. 2018. *Princip čištění suchým ledem CO<sub>2</sub>.* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.eco-stations.eu/princip-a-aplikace-cisteni-suchym-ledem.php#prettyphoto>.
- GEBAUER, G.; HORKÁ, H.; RUBINOVÁ, O. 2005. *Vzduchotechnika.* Brno: Era – vydavatelství. ISBN 80-7366-027-x.
- LAIN, M. 2006a. *Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (I)* [online]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, [cit. 2018-05-02]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-i>.
- LAIN, M. 2006b. *Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (II)* [online]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, [cit. 2018-05-02]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-ii>.
- LOM, M.; MATZ, V. 2013. *Model řízení vzduchotechnické jednotky* [online]. [cit. 2018-05-02]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/regulace-vetrani-klimatizace/9796-model-rizeni-vzduchotechnicke-jednotky>.
- NÁTR, L. 2006. *Země jako skleník: proč se bát CO<sub>2</sub>?* Praha: Academia. Průhledy (Academia). ISBN 80-200-1362-8.
- PELÁNEK, R. 2011. *Modelování a simulace komplexních systémů: jak lépe porozumět světu.* Brno: Masarykova univerzita. ISBN 978-80-210-5318-2.
- POSTUPA, M. 2017. KASTT s.r.o. *Moderní rotační výměníky tepla* [online]. [cit. 2018-05-02]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/15795-moderni-rotacni-vymeniky-tepla>.
- ROBENEK, J. 2014. HW server s.r.o. *S čidlem CO<sub>2</sub> odhalíte dusnou atmosféru. Na výstavě i doma v ložnici.* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/s-cidlem-co2-odhalite-dusnou-atmosferu-na-vystave-i-doma-v-loznici.html>.
- SENSIT. 2018. *Snímače teploty a relativní vlhkosti a CO<sub>2</sub> do interiéru s výstupem RS 485 (Modbus).* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [http://www.sensit.cz/sqlcache/267\\_1990.pdf](http://www.sensit.cz/sqlcache/267_1990.pdf).
- SILBERNÁGL, P. 2016. *Adiabatické chlazení vzduchu* [online]. Diplomová práce. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce O. Rubinová. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z:

<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/57536/29151.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

S+S REGELTECHNIK. 2018. *RFTM - (LQ) - CO<sub>2</sub> – Modbus*. [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [https://spluss.de/fileadmin/assets/RFTM-LQ-CO2-Modbus\\_\\_GB-safe.pdf](https://spluss.de/fileadmin/assets/RFTM-LQ-CO2-Modbus__GB-safe.pdf).

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY. 2018. *Global Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>.

VAFEK, Z. 2016. *Možnosti měření oxidu uhličitého – měřicí přístroje a čidla. Vytápění, větrání, instalace* [online]. Praha, [cit. 2018-05-03]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/13910-moznosti-mereni-oxidu-uhliciteho-merici-pristroje-a-cidla>.

VYBÍRAL, P. 2016a. *Filtrace ve VZT jednotkách pro nucené větrání rodinných domů I*. [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, Ústav techniky prostředí. [cit. 2018-05-03]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-rodinnych-domu/14330-filtrace-ve-vzt-jednotkach-pro-nucene-vetrani-rodinnych-domu-i>.

VYBÍRAL, P. 2016b. *Filtrace ve VZT jednotkách pro nucené větrání rodinných domů II*. [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, Ústav techniky prostředí. [cit. 2018-05-03]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-rodinnych-domu/14330-filtrace-ve-vzt-jednotkach-pro-nucene-vetrani-rodinnych-domu-ii>.

WAGNER, V. 2009. *Jak se měří CO<sub>2</sub> – Studium časových změn obsahu oxidu uhličitého v atmosféře. Třípól* [online]. [cit. 2018-04-22]. ISSN 2464-7888. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/medicina-a-prirodoveda/838-jak-se-meri-co2-studium-casovych-zmen-obsahu-oxidu-uhliciteho-v-atmosfere>.

ZMRHAL, V. 2006. *Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - I. část* [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí, 2006 [cit. 2018-05-02]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>.

# PŘÍLOHY

A -CD

**Příloha k diplomové práci**

Řízení kvality vzduchu v budovách (koncentrace CO<sub>2</sub>)

Bc. Aleš Bárta

**CD**

## **Obsah**

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF
- 2 Aplikace pro měření koncentrace CO<sub>2</sub>
- 3 Úplný zdrojový kód pro identifikaci parametrů oken a verifikaci modelu
- 4 Programy pro simulační ověření navržené strategie řízení
- 5 Program pro řízení kvality vzduchu