

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**Regulace větrací jednotky na základě
koncentrace VOC**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Josef Kovařík

4-TZSI-2023

Souhrn

Bakalářská práce se zabývá problematikou znečišťujících látek ve vnitřním prostředí, zejména pak VOC (těkavé organické sloučeniny) a jejich koncentrací k následnému využití pro regulaci větrací jednotky. V praktické části zkoumá, jak se chovají čidla VOC v prostředí rodinného domu a také reakci větrací jednotky na implementaci algoritmů zpracovávajících signál z čidla VOC.

Summary

This bachelor thesis discusses the problematics of pollutants in indoor climate, especially the problematics of VOC's (volatile organic compounds) and its concentration for follow-up use for ventilation unit regulation. The practical part examines behaviour of VOC sensors in an environment of a family house and a response of a ventilation unit to implementation of signal processing algorithms.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Regulace větrací jednotky na základě koncentrace VOC“ vypracoval samostatně pod vedením Doc. Ing. Vladimíra Zmrhala, Ph.D, s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové/bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 14.6.2023

Josef Kovařík

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu při mém studiu. Dále děkuji vedoucímu práce panu Doc. Ing. Vladimíru Zmrhalovi, Ph.D za věcné rady a odborné vedení. Velmi děkuji panu Assoc. Prof. Jakubu Kolaříkovi za užitečné rady, možnost uskutečnit měření na Dánské technické univerzitě a poskytnutí dat z experimentu v první praktické části.

Obsah

1. Úvod.....	- 9 -
2. Větrání a znečišťující látky	- 10 -
2.1. Vodní pára a psychrometrie	- 11 -
2.2. Oxid uhličitý.....	- 11 -
2.3. VOC a TVOC.....	- 12 -
2.2.1 Zdroje VOC	- 14 -
2.2.2 Měření TVOC	- 15 -
2.2.3 Vliv VOC na lidské zdraví.....	- 16 -
2.4. Výtah z norem pro bytové větrání v ČR	- 17 -
2.5. Využití cenově dostupných čidel pro detekci kvality vzduchu a řízení větrací jednotky	- 18 -
2.6. Možnosti implementace v Českém prostředí	- 30 -
3. Praktická část č.1 – Koncentrace VOC v prostředí rodinného domu	- 30 -
3.1. Popis experimentu	- 30 -
3.2. Analýza naměřených dat	- 32 -
3.3. Diskuse	- 39 -
4. Praktická část č.2 – implementace algoritmů pro práci se signálem VOC v řízení větrací jednotky.....	- 41 -
4.1. Popis laboratorního vybavení.....	- 41 -
4.2. Přípravné měření – netěsnosti obálky budovy	- 44 -
4.3. Měřicí procedura	- 45 -
4.4. Algoritmy práce se signálem.....	- 47 -
4.5. Analýza naměřených dat	- 49 -
4.6. Diskuse	- 52 -
5. Závěr	- 53 -
Bibliografie	- 54 -

Seznam použitého značení

Značka	Veličina	Rozměr
$C(t)$	objemová koncentrace látky v čase	[ppm]
C_0	objemová koncentrace látky na počátku	[ppm]
n	intenzita větrání vlivem infiltrace	[h ⁻¹]
t	čas	[m, h, d]

Seznam zkratek:

FID – „Flame ionization detector” – Plamenový ionizační detektor

MOS – „Metal organic semiconductor” – Kovově-organický polovodičový senzor

MVOC – „Microbial Volatile Organic Compounds” – VOC pocházející z mikroorganismů

PAS – „Photoacoustic spectroscopy“ – Foto akustická spektroskopie

PID – „Photo ionization detector” – Světelný ionizační detektor

POM – „Organic compounds associated with particular matter“ - Organické sloučeniny vázané k organické hmotě

ppb – „Parts per billion“ – Objemový počet částic na miliardu

ppm – „Parts per million“ – Objemový počet částic na milion

SVOC – „Semi-volatile organic compounds“ – Částečně těkavé organické sloučeniny

TVOC – „Total volatile organic compounds“ – Celkové těkavé organické sloučeniny

VOC – „Volatile Organic Compounds” – Těkavé organické sloučeniny

VVOC – „Very volatile organic compounds“ – Velmi těkavé organické sloučeniny

WHO – Světová zdravotnická organizace

1. Úvod

Z dat Ministerstva Průmyslu a Obchodu ČR (k roku 2017) vyplývá, že až okolo 30 % vyrobené elektrické energie v ČR je spotřebováno domácnostmi a z toho přibližně 60 % na úpravu vnitřního prostředí (chlazení, vytápění, větrání). Vzhledem k rostoucí ekonomické náročnosti energií a změnám v globálním klimatu, které volají po snižování emisí skleníkových plynů a tím tedy i ke snižování spotřeby energie, vzniká potřeba snižovat energetickou náročnost budov i v oblasti větrání. Nelze však za účelem snižování spotřeby energie zcela vynechat žádné prostředky zajišťující kvalitu vnitřního prostředí. Průměrný člověk totiž ve vnitřním prostředí stráví 90 % času [1] a dlouhodobý pobyt ve zhoršeném vnitřním prostředí může mít na lidský organismus negativní účinky [2]. V ČR je velká část větrání v domácnostech zajištěna pouze přirozeným větráním, které ale nemusí být vždy efektivní, nebo dokonce použitelné a v zimním období může vést ke zvýšeným tepelným ztrátám, jelikož u tohoto řešení nelze využít zpětné získávání tepla. Jako zřejmým krokem se pak jeví využití rovnotlakého větrání větrací jednotkou. Pokud bychom ale využili větrání s konstantním průtokem, bylo by větrání energeticky nevhodné. Nabízí se tedy možnost nastavení časového rozvrhu pro spouštění a vypínání větrací jednotky (či změnu průtoků) na základě dlouhodobého vzorce výskytu osob v obytném prostředí, což může vést ke snížení energetické náročnosti větrání. S využitím čidel pro měření kvality vnitřního ovzduší vzniká možnost regulovat větrací jednotku na základě aktuální potřeby. Některé studie ukázaly, že když byla větrací jednotka řízena na základě aktuální potřeby, došlo k ušetření 15 % energie spotřebované na vytápění a až 70 % energie spotřebované na provoz ventilátoru [3].

S takovýmto řešením ale přichází celá další problematika a vyvstává otázka, který indikátor kvality vnitřního prostředí je nejlepší využít k řízení větrací jednotky. Nabízí se relativní vlhkost, CO₂, či těkavé organické sloučeniny (VOC). Využívání CO₂ čidel pro detekci kvality vnitřního prostředí je v současnosti poměrně rozšířený postup. Nicméně koncentrace CO₂ nemusí být vždy správným indikátorem kvality vnitřního prostředí, jelikož tato chemická sloučenina je spojena pouze s pobytem osob v prostředí a nemusí vypovídat o koncentraci jiných škodlivin vznikajících např. při vaření, uklízení, používání kosmetiky atp. Na druhou stranu VOC ukazují potenciál být indikátorem kvality vnitřního prostředí i pro škodliviny vznikající tímto způsobem. Je však náročné najít dostatečně kvalitní způsob měření VOC, který by se dal využít pro regulaci větrací jednotky. Je tedy zapotřebí hlubšího výzkumu chování čidel VOC.

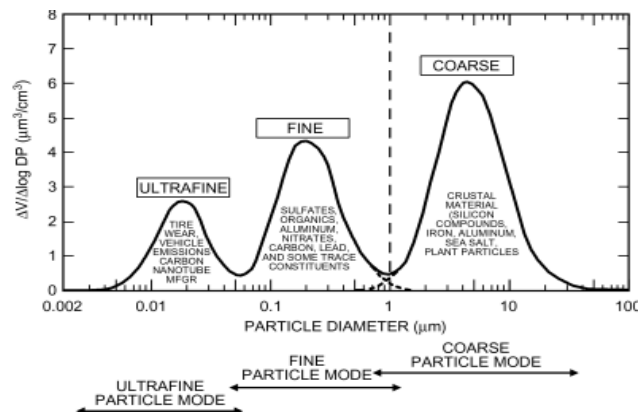
2. Větrání a znečišťující látky

Znečišťující látky v prostředí můžeme dělit dle skupenství na látky pevné, kapalné, plynné a komplexní.

Pevnými znečišťujícími látkami jsou míněny malé částice, okem špatně, či vůbec viditelné. Nejběžnější a nejvíce známý z této skupiny znečišťujících látek je *prach*. Jde o soubor malých částic, které se do vzduchu dostávají důsledkem lidské činnosti, např.: těžba kamení, jízda autem, či vlivem přirozených jevů, jako je sopečná erupce nebo zemětřesení [4].

Kapalné znečišťující látky jsou zpravidla souborem malých kapének volně rozptýlených ve vzduchu, tvořících s ním aerosolové směsi. Tyto látky mohou mít původ v chemických prostředcích, které se do vzduchu dostávají např. rozprašováním, mícháním kapalin nebo prostřednictvím prudké chemické reakce. Druhou skupinou jsou kapénky vody, které se do vzduchu dostanou zpravidla kondenzací vodní páry přirozeně obsažené ve vzduchu. Vlastností takto zkondenzovaných kapének je, že mohou dosahovat velmi malých rozměrů, často i submikroskopických, a stávají se tak jakýmsi přechodem mezi aerosolem a párou [4].

Za „meziskupinu“ mezi plynnými, kapalnými a pevnými látkami jsou *látky komplexní*, mezi které řadíme zejména kouře. *Kouř* je soubor malých plynných a kapalných částic vznikající nedokonalým spalováním organických materiálů, jako je například tabák, uhlí, benzin, či další látky na bázi uhlíku. Částičky v kouři mohou dosahovat různých velikostí, průměrně se však velikost pohybuje od 0,1 μm do 0,3 μm . Příkladem kouřů z běžného prostředí je např. tabákový kouř, či industriální smog [4].



Obr. 1 - Rozdělení aerosolových částic ve vzduchu dle velikosti [4]

Plynné látky se řadí do několika skupin, jejichž charakter a chování ve vnitřním prostředí je rozdílné.

2.1. Vodní pára

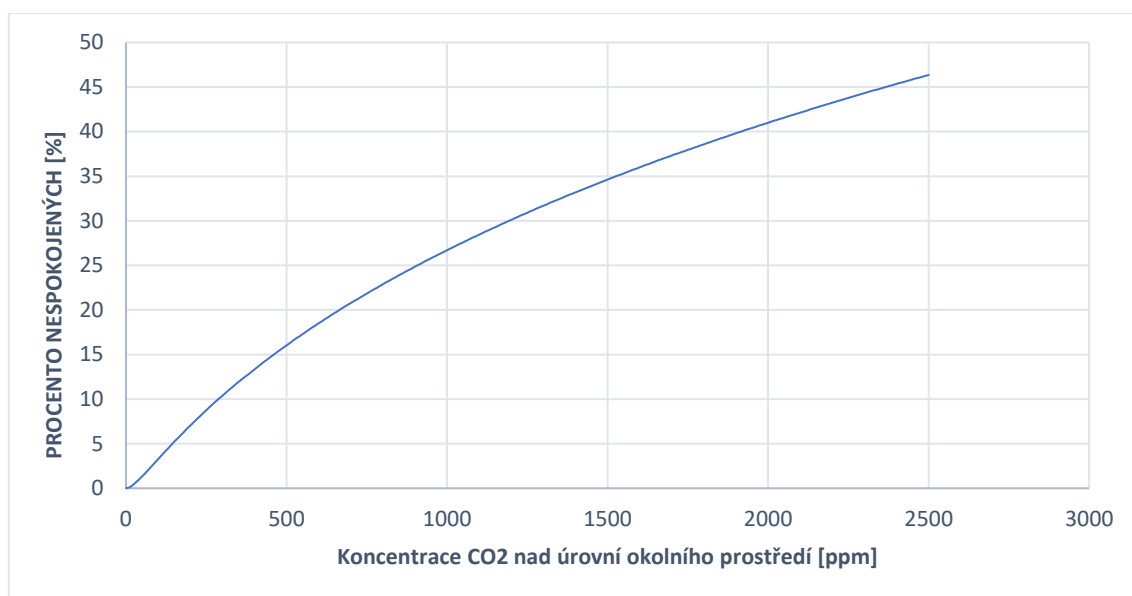
Vlhkost a vodní pára jsou velmi důležitou součástí vnímaného tepelného komfortu. Hlavními zdroji obsahu vodní páry ve vzduchu jsou obsah páry ve venkovním prostředí a lidská činnost [4].

Samotná vlhkost vzduchu má dopad na osoby ve vnitřním prostředí. Zvýšená vlhkost může zapříčinit růst plísní, což může u některých lidí vést k alergickým reakcím. Vyšší vlhkost může také zapříčinit vyšší emise formaldehydu z povrchu některých stavebních materiálů. Na druhou stranu příliš nízká vlhkost vzduchu vede k pocitu suchosti a podráždění kůže a oční sliznice. Pokud je relativní vlhkost udržována v rozmezí od 30 % do 70 %, dochází k těmto problémům pouze zřídka [4].

2.2. Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je netoxická sloučenina kyslíku s uhlíkem přirozeně se vyskytující ve vzduchu, s chemickým značením CO_2 . Kromě jeho běžného výskytu v atmosféře, se z velké části uvolňuje do vzduchu jako odpadní látka lidského dýchání a tato emise je přímo úměrná úrovni metabolické aktivity člověka [5]. Běžná koncentrace CO_2 ve vnějším ovzduší v městských oblastech se pohybuje okolo 470 ppm [6], tato hodnota může být v městských zástavbách vyšší, vlivem např. spalovacích motorů [5]. Ačkoli je oxid uhličitý plyn, který je bez vůně, či zápachu a je netoxický, jeho koncentrace v ovzduší se dá poměrně efektivně použít jako indikátor kvality vnitřního prostředí, zejména v případě látek pocházejících z lidské činnosti, které jsou toxické, či zapáchající.

Byla prokázána korelace mezi procentem spokojených obyvatel s kvalitou vnitřního ovzduší a koncentrací CO₂. Nicméně CO₂ není dobrým indikátorem koncentrace toxických látek, nesouvisejících s lidskou činností, jako jsou například radon, či oxid uhelnatý (CO). Je proto třeba opatrnosti při využívání CO₂ jako indikátoru kvality vnitřního ovzduší [4] [5].



Obr. 2 - Graf závislosti % spokojených obyvatel s kvalitou vnitřního ovzduší [5]

2.3. VOC a TVOC

VOC neboli těkavé organické sloučeniny (z anglického výrazu „volatile organic compounds“) Jsou širokou škálou organických sloučenin s bodem varu mezi 0 °C až okolo 400°C. Světová zdravotnická organizace rozděluje VOC do čtyř kategorií na základě míry těkavosti [7].

Tab. 1-Rozdělení VOC [7]

ROZDĚLENÍ	NÁZEV	ROZSAH BODU VARU °C	
VVOC	Velmi těkavé organické sloučeniny	<0	50-100
VOC	Těkavé organické sloučeniny	50-100	240-260
SVOC	Částečně těkavé organické sloučeniny	240-260	380-400
POM	Organické sloučeniny vázané k organické hmotě	> 380	

Pro kvalitu vnitřního prostředí je nejdůležitější skupina druhá, tedy “VOC.”

Přesná definice toho, co jsou VOC je podle WHO taková, že VOC jsou „Organické sloučeniny eluující mezi a včetně *n*-hexanu a *n*-hexadekanu na plynové chromatografické koloně specifikované jako kapilární plynová chromatografická kolona s 5 % fenyl 95 % methyl polysiloxanem.“ [7] Narozdíl od definice VOC, je definice VVOC a SVOC částečně nepřesná a u některých látek je sporné do které z těchto dvou skupin je zařadit [8] [9].

Jelikož VOC je opravdu široké spektrum sloučenin, v odborné literatuře se často přechází k určitému zjednodušení a s organickými sloučeninami ve vzduchu není operováno s každou jednotlivě, ale uvažuje se celý souhrn sloučenin pod zkratkou TVOC („Total Volatile Organic Compounds“). Jde jednoduše o souhrn všech látek, které jsou považovány za VOC. L. Molhave ve své publikaci navrhl 62 konkrétních chemických sloučenin které zahrnul do pojmu TVOC [10]. Mezi často se vyskytující VOC se řadí benzen, formaldehyd, toluen, xylen, styren, tetrachlormetan, etylbenzen, či propylenoxid [9] [10].

2.2.1 Zdroje VOC

Zdrojů VOC se ve vnitřním prostředí vyskytuje hned několik. Mezi dva nejvýznamnější zdroje se řadí znečištění ze stavebních materiálů, respektive znečištění emitované lidskou činností. Tyto jsou pak již v menší míře následovány produkcí VOC mikroorganismy, VOC z okolního ovzduší a VOC emitované chemikáliemi (mezi obvyklé se řadí např. čisticí přípravky, či parfémy) [11].

Stavební materiály mohou emitovat sloučeniny skrz celé spektrum VOC a SVOC. Ve vnitřním prostředí je ale zpravidla spojuje to, že po určitém časovém úseku nastane v místnosti tzv. kvazi stabilní stav, kdy se vyrovná jejich koncentrace ve vzduchu a už se dále nezvyšuje. Zpravidla se jedná o týdny, či měsíce, ve výjimečných případech nižší jednotky let. Tento jev je zapříčiněn obvykle exponenciálním úbytkem VOC ve vzduchu. Tento stav může být narušen různými změnami v místnosti, např. malování, či nová skřín. V praxi mohou být VOC emitovány např. koberci, lakovaným nábytkem, barvou atd [11].

V porovnání se stavebními materiály, emituje *lidská činnost* ještě širší škálu VOC. VOC jsou lidmi produkovány formou nejen takzvaných bioefluntů (bioefluenty jsou soubor chemických látek emitovaných lidmi), kdy dochází k jejich uvolňování do vzduchu přirozenou lidskou činností (dýchání aj. např.: metabolické plyny), ale i jinou běžnou lidskou činností (vaření, úklid, používání osobní kosmetiky...). Z hlediska trvání zvýšené úrovně VOC ve vzduchu se dají zdroje rozdělit na dlouhodobé a krátkodobé. Mezi krátkodobé se řadí zejména kouření nebo také např. práce s fotokopírkou, které jsou v řádu minut až hodin vyvětrány. Dlouhodobé emise pak mohou být způsobeny např. malováním. K dlouhodobé emisivitě může zároveň dojít i tak, že VOC uvolněné při používání čisticích prostředků, či např. parfémů se absorbují do stavebních materiálů nebo prachových částic a jsou následovně znovu emitovány. Takové emise jsou pak sice co do koncentrace zásadně nižší než emise původního zdroje, zato trvají mnohem déle [11].

VOC pocházející z mikroorganismů se značí *MVOC*, nicméně jejich skutečné propojení s mikroorganismy není s jistotou prokazatelné. Má jít o rozvětvené aldehydy a 2-ketony. Jejich koncentrace bývá v domácnostech často spojená se zvýšenou mírou zápachu [11].

Poslední skupinou zdrojů VOC je venkovní vzduch. K znečištění dochází zejména ze spalovacích motorů a konkrétními příklady VOC jsou zejména alkany a aromatické látky. Tento zdroj je podle různých studií závislý především na aktuálním počasí a zdaleka nezanedbatelný, chceme-li tedy řídit vnitřní kvalitu vzduchu, pak zejména v letním období stojí za zvážení, má-li větrání pozitivní účinek, či naopak [11].

2.2.2 Měření VOC

Základní (laboratorní) princip měření spočívá ve využití trubiček se sorbentem. Vnitřní kontaminovaný vzduch je skrz trubice nasáván a VOC, společně s VVOC a SVOC se tak do sorbentu zachytávají. Zachycené sloučeniny jsou následně ze sorbentu vyloučeny pomocí tepla. Sloučeniny jsou poté (v plynném skupenství) pod inertními plyny přiváděny do plynového chromatografu vybaveného hmotnostním spektrometrem a kapilární kolonou, a následně dochází k vyhodnocení [8]. Tento způsob je nicméně využíván spíše k laboratornímu zkoumání složení vzduchu a jednotlivých VOC. Toto měření nelze provádět v reálném čase, a to ho činí nevyužitelným pro regulaci větrací jednotky.

Metod pro měření koncentrace VOC v reálném čase je celá řada. Nicméně rozdílná technologie měření může vyústit i k rozdílným výsledkům, proto by tak k výsledné hodnotě z měření měl být udáván i způsob, jakým byla koncentrace měřena [9].

Metoda PAS neboli foto akustická spektroskopie funguje na základě excitace molekul. Energie z excitovaných molekul, je následně uvolněna v podobě tepla. K tomuto procesu dochází opakovaně, s velmi krátkou periodou opakování. Vlivem uvolněné energie dochází k rychlému zahřívání a ochlazování vzduchu v malé vzduchové komoře měřicího zařízení, důsledkem čehož dochází ke vzniku tlakových vln, které jsou zachytávány citlivou membránou jako elektrický signál úměrný koncentraci [9].

Metoda FID – flame ionization detector neboli plamenový ionizační detektor funguje na principu změny elektrické vodivosti uhlíkového plamene v elektrickém poli. Tato technologie je citlivá především na molekuly s C – C a H – C vazbami. Organické sloučeniny vstupující do plamene jsou jím nejprve na molekulární úrovni roztříštěny a poté ionizovány, což ovlivňuje výslednou vodivost ve spalovací komoře [9].

Metoda PID – Photo ionization detector neboli světelný ionizační detektor. Tento druh měření funguje velmi podobně na základě měření vodivosti v komoře měřicího zařízení, avšak s tím rozdílem, že namísto plamene, který plnil funkci ionizátoru v metodě FID, je zde ionizátorem ultrafialové světlo [9].

Metoda MOS – Metal organic semiconductor. Princip MOS měření TVOC spočívá v tom, že čidlo obsahuje tenkou vrstvu oxidu kovu (typicky oxidu cíničitého), která se nachází mezi dvěma elektrodami. Když čidlo přijde do kontaktu s VOC, molekuly VOC se adsorbují na povrch oxidu kovu, což způsobuje změnu elektrického odporu [9].

Výhodami FID, PID a PAS metod je jejich vysoká přesnost. Na druhou stranu je nevýhodou jejich vysoká cena, horší kompaktnost a hlučnost.

Výhodou MOS čidel je jejich nízká cena, malé rozměry, nízká energetická náročnost a tichý chod. Nevýhodou může být nižší přesnost (čidla jsou dobrá v zaznamenávání relativní změny kvality vzduchu, avšak výstupní hodnota je často velmi nepřesná) a křížová citlivost na vlhkost a teplotu, což může ovlivňovat výsledky měření.

2.2.3 Vliv VOC na lidské zdraví

V řadě studií byl prokázán negativní vliv TVOC na vnímanou kvalitu vnitřního prostředí [10]. V tabulce 2 jsou shrnuty možné důsledky vystavení lidského organismu prostředí se zvýšenou úrovní TVOC (koncentrace nad 2000 ppb – 3000 ppb).

Tab. 2 - Možné vlivy VOC na člověka [11]

	SYMPTOMY	DRUH VYŠETŘENÍ
SMYSLOVÉ	Parestezie, zhoršení zrakových a sluchových schopností	Neurologické, zrakové a sluchové
KOGNITIVNÍ	Zhoršení paměti (krátkodobá i dlouhodobá), dezorientace	Wechsler memory scale
CHOVÁNÍ	Nervozita, podráždění, apatie, deprese, kompulzivní chování	Eysenck Personality Inventory
POHYBOVÉ	Slabost rukou, špatná koordinace, slabost, třes	Neurologické

Jev, při kterém se projevovaly výše zmíněné symptomy ve vnitřním prostředí, byl v anglické literatuře pojmenován jako “Sick Building Syndrom” tedy v Českém jazyce něco jako “Syndrom nemocných budov.” [10] „*Syndrom nemocných budov (SBS) se používá k popisu situací, kdy se u uživatelů budov projevují akutní účinky na zdraví a pohodlí, které zřejmě souvisejí s pobytem v budově, ale nelze určit konkrétní onemocnění nebo příčinu.*“ [12]

2.4. Výtah z norem pro bytové větrání v ČR

V České republice pojednává o požadavcích pro bytové větrání norma ČSN EN 15665 [13]. V normě jsou doporučeny tři formy větrání a to:

- 1) *Podtlakové větrání* – odsávání vzduchu pomocí větráku z vnitřku budovy, čímž je vytvořen podtlak v místnosti, a implementace speciálních štěrbin ve venkovních stěnách stavby, kterými do vnitřního prostředí proudí venkovní vzduch [13].
- 2) *Hybridní větrání* – tento typ větrání kombinuje nucené větrání s větráním přirozeným, z důvodu snižování energetických požadavků pro TZB budov [13].

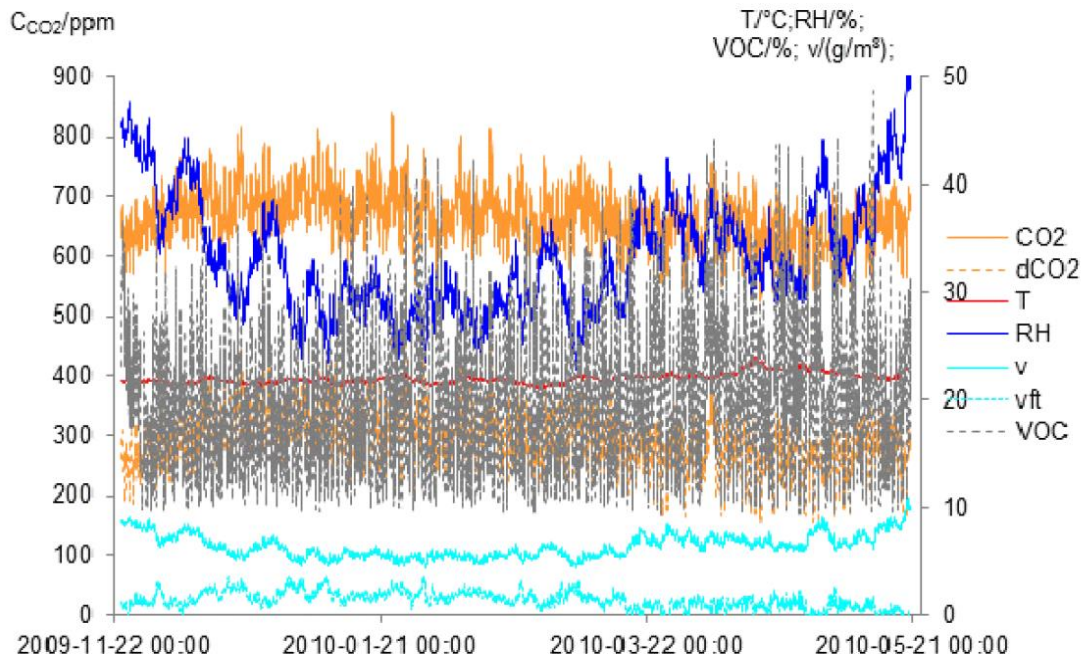
- 3) *Nucené rovnotlaké větrání.* Oproti hybridnímu a podtlakovému větrání poskytuje nucené rovnotlaké větrání vyšší kvalitu vzduchu, avšak za cenu vyšší energetické náročnosti, jelikož větrací jednotka je zpravidla v provozu nepřetržitě. Je také vhodnou alternativou v místech, kde podtlakové větrání nelze využít, např. je-li venkovní stěna přikloněna směrem k rušné komunikaci, či k místu s trvalým zvýšeným znečištěním vzduchu. Pro tento typ větrání, navrhuje norma následující hodnoty průtoků vzduchu:

Tab. 3 - Požadavky pro průtoky větracího vzduchu pro obytné budovy [13]

Požadavek	Trvalé větrání (průtok venkovního vzduchu)		Nárazové větrání (průtok odsávaného vzduchu)		
	Intenzita větrání [h ⁻¹]	Dávka venkovního vzduchu na osobu [m ³ /(h-os)]	Kuchyně [m ³ /h]	Koupelny [m ³ /h]	WC [m ³ /h]
Minimální hodnota	0,3	15	100	50	25
Doporučená hodnota	0,5	25	150	90	50

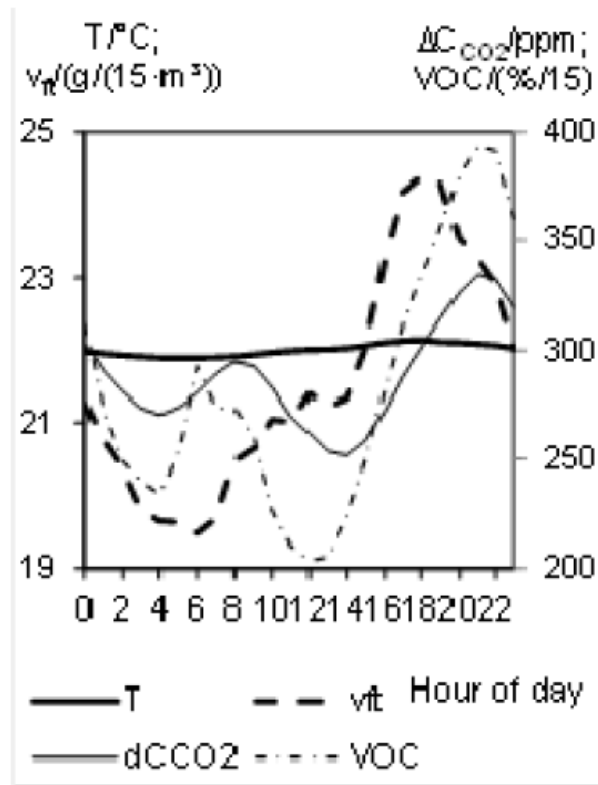
2.5. Využití cenově dostupných čidel pro detekci kvality vzduchu a regulaci větrací jednotky

Prvním studovaným článkem je studie, která byla provedena ve Švédském městě Malmö, kde byla měřena kvalita vnitřního ovzduší ve 4 obytných domech, dohromady se 72 bytovými jednotkami. Výsledky byly zaznamenávány každých 30 minut po dobu 177 dní. Čidla pro měření byla umístěna v odvodním vzduchu v kuchyni a koupelně. Tím se předešlo vlivu lokálních výkyvů znečištění v daném bytu. Přívod čerstvého vzduchu byl mezitím umístěn v ložnicích a obývacích pokojích. Studie se zabývala primárně korelací mezi jednotlivými indikátory stavu vnitřního ovzduší. Měřené veličiny byly teplota, relativní vlhkost, koncentrace CO₂ a koncentrace VOC spolu s měrnou vlhkostí [14].



Obr. 3 - Průběh koncentrací jednotlivých škodlivin [14]

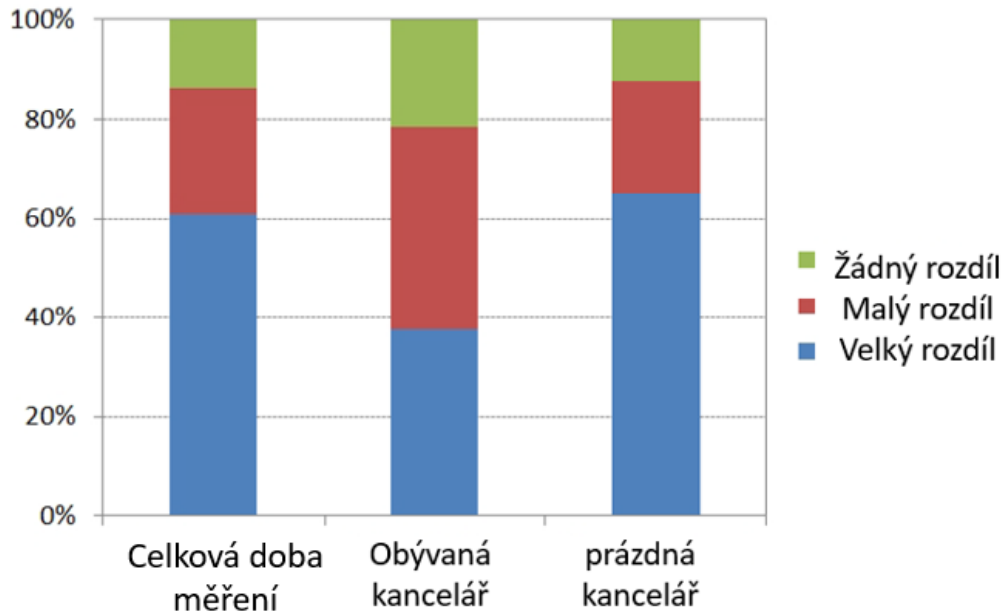
Křivka „dCO₂“ z grafu na obrázku 4 reprezentuje rozdíl koncentrací CO₂ uvnitř a vně bytu. Malé „v“ je obsah vodní páry ve vnitřním vzduchu a „vft“ pak vyjadřuje obsah vodní páry v přiváděném vzduchu. Z grafu je patrná poměrně stabilní koncentrace CO₂ (oranžová) a teploty (červená), zatímco křivka relativní vlhkosti, značená RH prokazuje patrný pokles v zimním období. Za zmínku stojí i velmi nestabilní křivka koncentrace VOC (šedá přerušovaná), která prakticky nemá v tomto časovém měřítku žádný sledovatelný průběh a nachází se na ní nestabilní výskyt extrémů koncentrací, které představují výzvu při používání koncentrace VOC jako parametru k regulaci větrací jednotky [14].



Obr. 4 - Vývoj koncentrace jednotlivých škodlivin – denní profil [14]

Na tomto grafu (obrázek 4) už si lze lépe všimnout určité závislosti mezi koncentrací CO_2 ve vzduchu a koncentrací VOC. Avšak lze říct, že koncentrace VOC je za koncentrací CO_2 opožděna a má citelnější výkyvy. Při tomto výzkumu byla zjištěna korelace mezi koncentracemi VOC a CO_2 , která se však vyskytovala jen v určitých časových obdobích.

J. Kolařík v další studii [3] sledoval vztah koncentrací CO_2 a VOC a cílem studie bylo prohloubit znalosti ohledně korelace mezi koncentrací VOC a koncentrací CO_2 . Studie probíhala na ČVUT v Praze a její experimentální část byla uskutečněna v kanceláři pro jednu osobu. Studie se zabývala rozdílnými reakcemi CO_2 a VOC čidel.



Obr. 5 - Porovnání rozdílů mezi čidly [3]

Rozdíl hodnot mezi CO₂ a VOC v ppm je shrnut v grafu na obr. 5. Malý rozdíl je definován jako rozdíl ne větší než 200 ppm a velký rozdíl je pak hodnota rozdílu větší než 200 ppm. Pro tento experiment byla stanovena požadovaná hodnota 800 ppm, od které, pokud byla překročena, došlo ke spuštění větrací jednotky [3]. Z obrázku 5 je také patrné, že největší rozdíl mezi koncentracemi CO₂ a VOC je v období, kdy se v kanceláři nenacházela osoba.

Tab. 4 - Procentuální zastoupení případů [3]

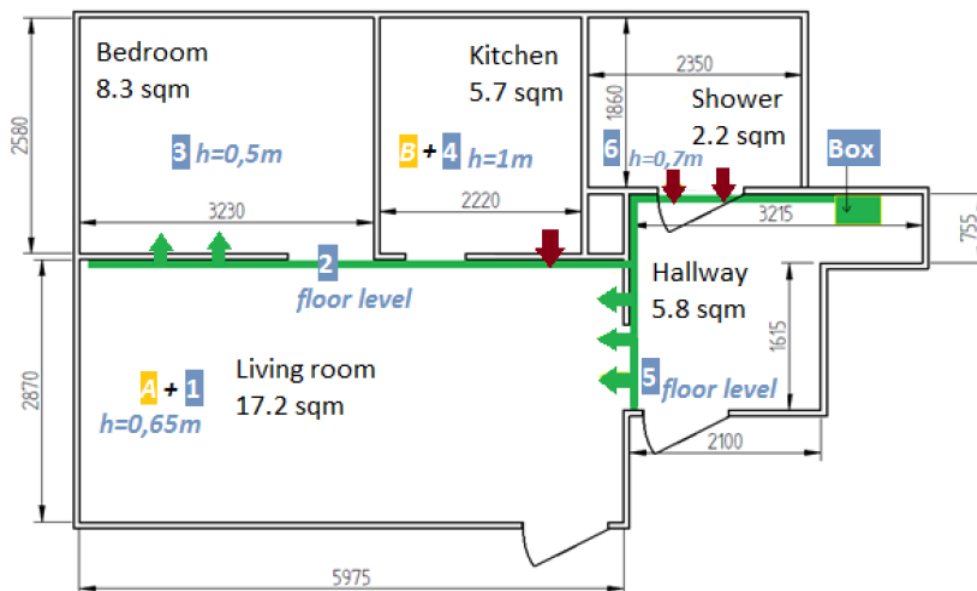
Případ	Zastoupení případů [%]			Rozdíl v ob. kan. [%]		
	Celá doba měření	Obývaná kancelář	Prázdná kancelář	Žádný rozdíl	Malý rozdíl	Velký rozdíl
VOC nad požad. hodnotou, CO ₂ pod požad. hodnotou	8,9	10,9	8,5	0,0	0,8	10,1
CO ₂ nad požad. hodnotou, VOC pod požad. hodnotou	1,0	5,7	0,1	0,0	2,7	3,1
Oba signály pod požad. hodnotou	81,2	49,1	87,2	29,7	18,8	0,6
Oba signály nad požad. hodnotou	0,6	3,6	0,0	1,6	1,4	0,6
VOC nad požad. hodnotou, CO ₂ na požad. hodnotě	0,4	2,1	0,0	0,6	1,1	0,5
CO ₂ nad požad. hodnotou, VOC na požad. hodnotě	0,3	1,6	0,1	0,4	1,0	0,2
VOC i CO ₂ na požad. hodnotě	0,3	1,9	0,0	1,9	0,0	0,2
VOC pod požad. hodnotou, CO ₂ na požad. hodnotě	3,7	21,5	0,4	2,9	13,5	5,0
CO ₂ pod požad. hodnotou, VOC na požad. hodnotě	3,7	3,6	3,7	0,6	1,7	1,4

Nejužitečnější data jsou ta, která byla naměřena za přítomnosti osoby v kanceláři, jelikož jde o nejdynamičtější časové období z hlediska vývoje koncentrací VOC a CO₂.

Je to také období, ve kterém je největší potřeba větrat. Můžeme vidět, že celých 10,9 % času je podle čidel VOC vzduch v kanceláři nevyhovující, zatímco pokud by jednotka byla regulována pouze pomocí čidel CO₂, průtok by vůbec nebyl zvýšen. Nicméně ani hodnota 5,7 % kdy čidlo CO₂ znečištění zaznamenává a čidlo VOC nikoli, není zanedbatelná. Ovšem rozdíl mezi signály není tak významný jako v předchozím případě [3]. Z této studie vyplývá, že chceme-li regulovat větrací jednotku pomocí kvality vzduchu, nemusí být dostačující pouze hodnota koncentrace CO₂, jak tomu bylo doposud, ale i hodnota signálu VOC, která může zaznamenat znečištění vzduchu i tam, kde CO₂ ne, zejména v případě znečišťujících látek, které se neřadí do skupiny bioefluentů.

Slabinou této studie (jak je v ní ostatně i uvedeno) mohou být čidla VOC, u nichž výrobce neuváděl hodnotu nepřesnosti měření a ta byla tak stanovena experimentálně.

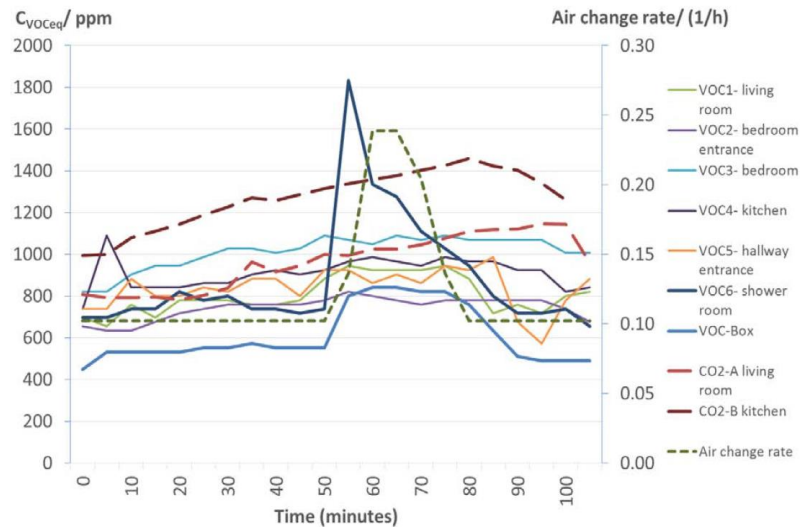
Abdul-Hamid a kol. se ve své studii [15] zabývali samotnou účinností MOS čidel a doporučením nastavení požadovaných hodnot koncentrace VOC k regulaci větracích jednotek. Výzkum probíhal ve Švédsku a zabýval se koncentrací VOC v rodinných domech a průběh experimentu byl nastaven tak, aby se docílilo co nejpřesnější simulace běžného prostředí a běžných aktivit v obývaném domě [15].



Obr. 6 - Popis rozmístění čidel v domě [15]

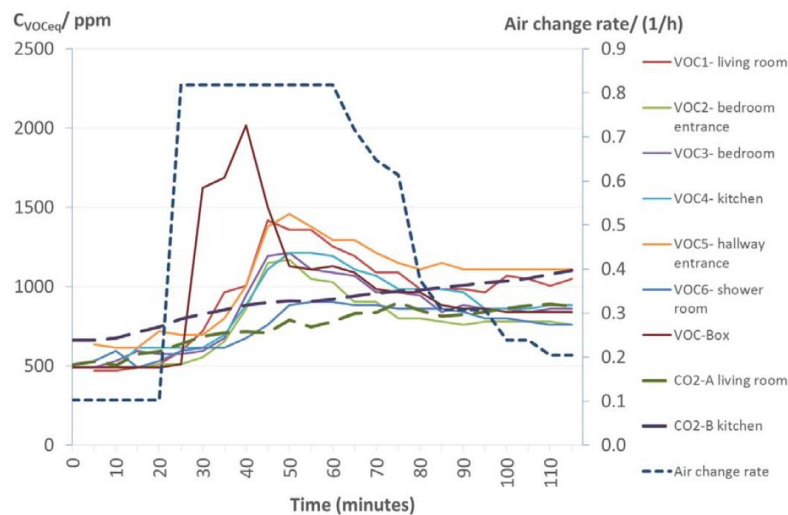
Na tomto obrázku vidíme laboratorní vybavení. Čidla 1-6 byla MOS čidla měřící koncentraci VOC s křížovou citlivostí na relativní vlhkost vzduchu a jejich výstupní signál byl hodnotou v ppm CO₂ ekvivalentu. Další takové čidlo na obrázku je na

schématu (obr. 6) označeno „Box.“ Čidla A a B byla pomocná čidla, která měřila koncentraci CO₂ [15].



Obr. 7 - Vývoj koncentrace látek – případ 1 [15]

Popis obr. 7: $t = 0$ min, přítomnost tří dospělých s nízkou úrovní metabolické aktivity v obývacím pokoji. $t = 50$ min, rozprašování osvěžovače vzduchu v koupelně. $t = 65$ min, v obývacím pokoji byla zaznamenána vůně osvěžovače vzduchu. $t = 80$ min, otevření dveří do koupelny [15].

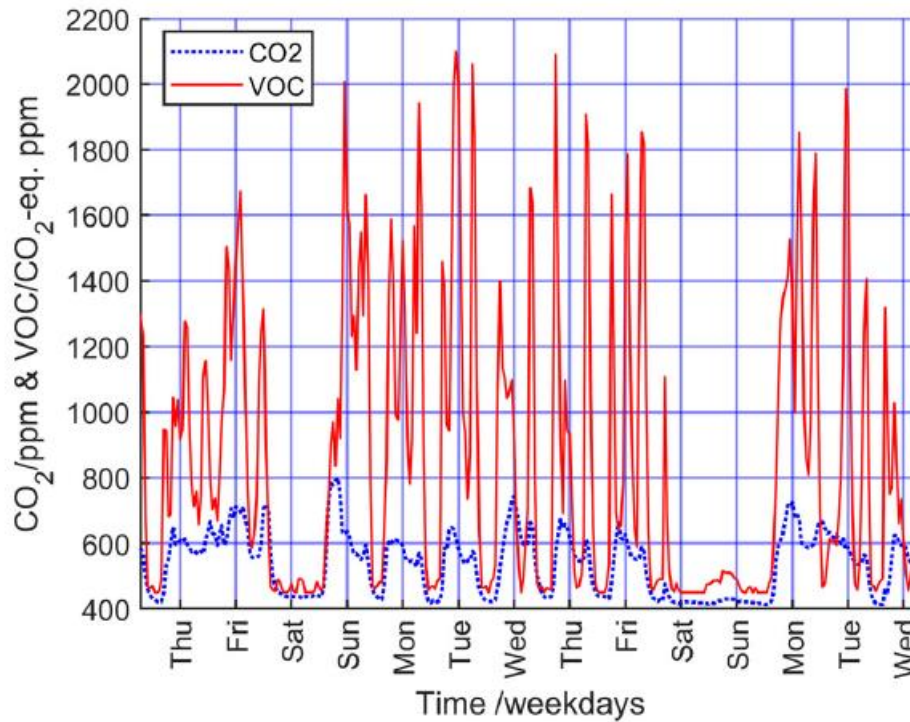


Obr. 8 - Vývoj koncentrace látek – případ 2 [11]

Popis obr. 8: $t = 0$ min, přítomnost dvou dospělých osob s nízkou úrovní metabolické aktivity. $t = 9$ min, začíná smažení. $t = 17$ min, je činnost ukončena. $t = 41$ min, v bytě se nikdo nenachází. [15]

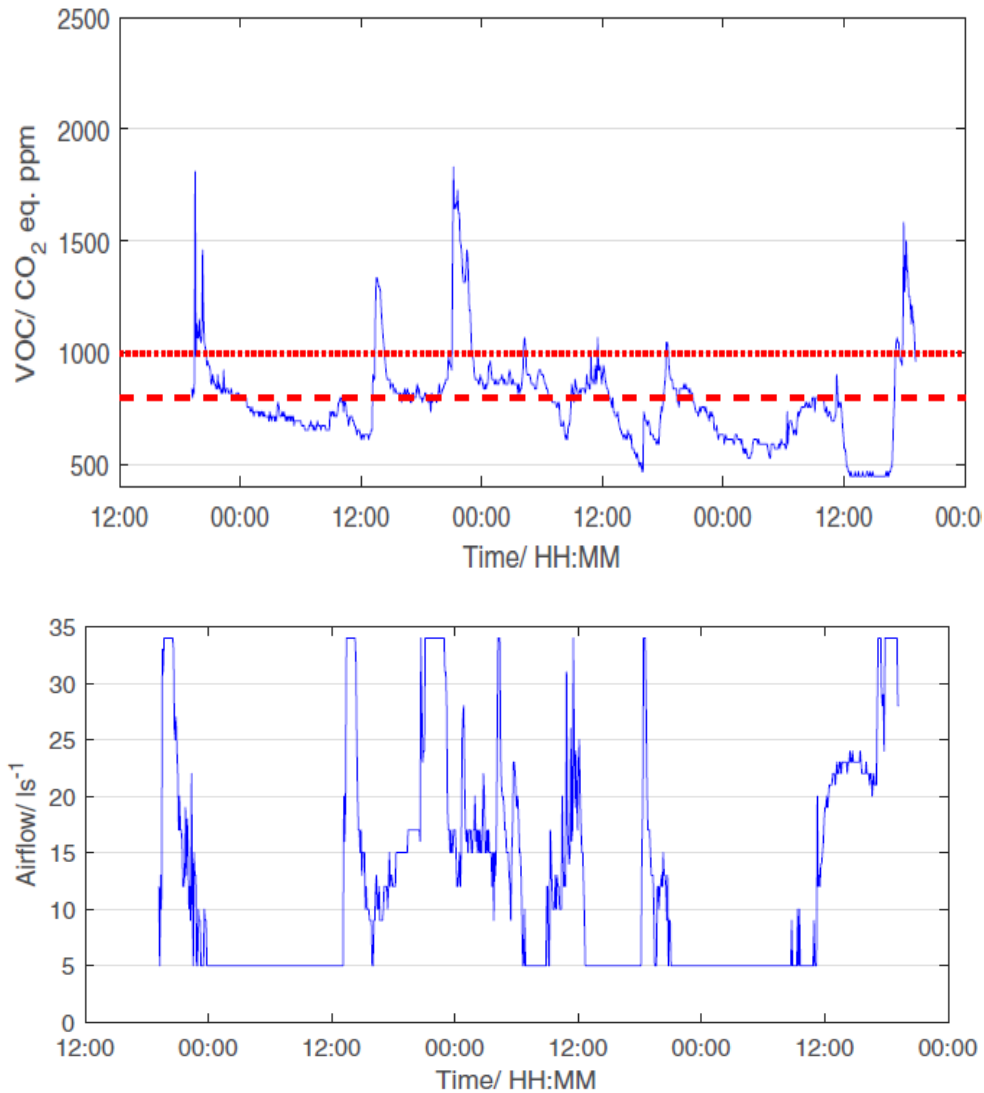
Na obrázku 7 MOS-čidlo (na obrázku jako „VOC – box“) dosáhlo hodnoty cca 500 ppm při přítomnosti tří dospělých v obývacím pokoji. Čidlo VOC1 však v té době dosáhl přibližně 800 ppm (CO_2 ekv.). Při rozprašování osvěžovače vzduchu v koupelně se čidlo VOC6 zvýšilo na maximální hodnotu přibližně 1800 ppm (CO_2), později, po 15 minutách následovaný čidlem „VOC-Box“ s maximální hodnotou 800 ppm (CO_2 ekvivalentu). K tomuto došlo ve všech testech při porovnání čidlu prvně vystaveného znečištění a „VOC-Box.“ Výstup z CO_2 -čidel dosáhl přibližně 600 ppm během nečinné přítomnosti s nepatrnou změnou přibližně +100 ppm během činnosti s rozprašováním. Stejný test jako prezentovaný na obrázku 8 byl opětovně proveden, ale s minimálním větráním 0,5 1/h. Bylo zjištěno, že čidlo umístěné v krabici zaregistroval maximální hodnotu VOC výrazně rychleji (během 5 minut) a obsah VOC se snížil rychleji na úroveň před rozprašováním [15].

Další studie zabývající se korelací mezi koncentracemi CO_2 a VOC ve vzduchu byla opět prováděna ve Švédsku, a to ve městě Norrköping, opět v prostředí obývaného domu. Zajímavý je graf z obrázku 9, na kterém je pozorovatelná nesporná korelace mezi koncentrací VOC a koncentrací CO_2 .



Obr. 9 - Porovnání koncentrace CO_2 a VOC [16]

Zde můžeme vidět, že zvýšená koncentrace CO_2 je skoro vždy doprovázena i zvýšenou koncentrací VOC. Za povšimnutí stojí i to, že zatímco v kancelářském prostředí se stávalo, že koncentrace CO_2 byla někdy i vyšší než koncentrace VOC, na tomto grafu se to stává velmi zřídka. Důvodem ale může být i fakt, že na tomto grafu jsou data zaznamenávána jako průměrná za jednu hodinu, zatímco na grafu z obrázku 9 byla data s jemnějším časovým krokem pěti minut. Je důležité připomenout že data o koncentraci VOC jsou vyjádřena jako CO_2 ekvivalent, tudíž nejde o jejich reálnou koncentraci (CO_2 ekvivalent je výstup z čidla, zpracovaný algoritmem výrobce tak, aby odpovídal míře znečištění, pokud by pocházelo pouze z CO_2). VOC se vyskytují přirozeně v zásadně menší koncentraci než CO_2 . Jejich častěji používanou jednotkou jsou tedy ppb (parts per billion) a nikoli ppm (parts per milion) [16].



Obr. 10 - Grafy koncentrací a průtoku vzduchu jednotkou [16]

Z grafů na obrázku 10 můžeme vidět průběh koncentrace VOC se zvýrazněnou hodnotou minimálního a maximálního průtoku jednotkou (pozn.: jednotka byla řízena P regulátorem) a v následujícím grafu průtok jednotkou. Výrazná lokální maxima způsobují, že jednotka byla několikrát v provozu na maximální výkon. Otázkou však je, zdali to bylo skutečně zapotřebí, protože podíváme-li se na graf na obrázku 9, maxima koncentrace VOC nejsou zdaleka vždy doprovázeny i zvýšenou koncentrací CO₂ (což může být způsobeno sekundárními reakcemi povahou těkavých VOC v porovnání s inertním CO₂), což by mohlo naznačovat, že kvalita vnitřního ovzduší tedy nemusí být natolik zhoršená, jak by se podle signálu VOC mohlo jevit a větrání by pak mohlo být energeticky neefektivní. Nabízí se tedy řešení ve formě algoritmů, které budou signál VOC zpracovávat tím způsobem, aby docházelo k odstraňování zmíněných ostrých

lokálních maxim, tím se zmenšila energetická náročnost větrání, ale aby se tak nedělo na úkor kvality vnitřního ovzduší [16].

S tím pracovala studie prováděná v Belgii, na univerzitě v Ghentu. Měřicí vybavení bylo následující: CO₂ a VOC čidla byla umístěna opět do odvodního vzduchovodu a větrací jednotka byla umístěna v nově postavených rodinných domech. Průtok vzduchu do místnosti byl regulován pomocí ventilů řízených proporčně v závislosti na úrovni znečištění prostředí. V této práci byly představeny celkem tři kontrolní algoritmy.

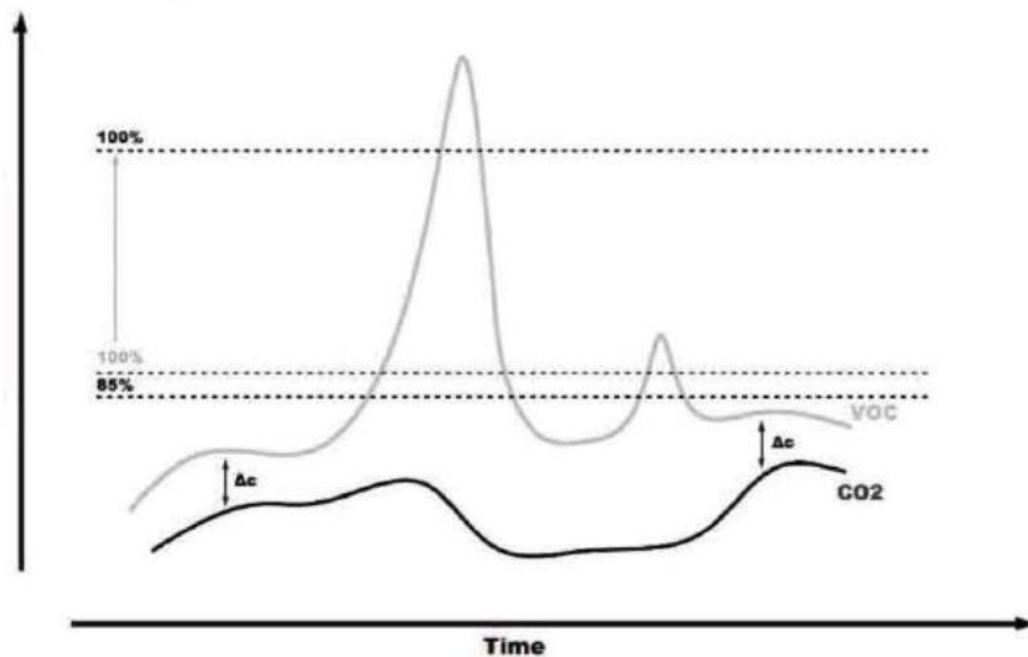
- 1) „Horizontal stretching“ v praxi šlo o klouzavý průměr vypočítávaný z hodnot koncentrace VOC. Ačkoli tato strategie přinesla částečné zredukování ostrých lokálních maxim, přináší s sebou i několik problémů. Prvním z nich je otázka, z jak dlouhého časového intervalu by se měl tento průměr vypočítávat [17].

Tato otázka by měla být podrobena výzkumu a na jeho základě by poté měla být doporučena délka intervalu. Dalším problémem může být, že pokud koncentrace VOC vlivem větrání klesne pod požadovanou hodnotu, po klouzavém průměru se hodnota může zdát stále zvýšená, jelikož v časovém intervalu výpočtu bude stále obsažena zvýšená koncentrace a bude se tak zvyšovat energetická náročnost. Výhodou tohoto algoritmu je jeho nenáročnost a také fakt, že je k němu potřeba pouze jedno čidlo VOC.

- 2) „Vertical shift“ do češtiny přeložitelné jako „Vertikální posuv.“ Tato strategie pracuje se statistikou VOC a CO₂. Princip spočívá v tom, že od koncentrace VOC se odečte 75. percentil rozdílu mezi hodnotami VOC a CO₂ pro daný časový úsek. Aby se předešlo necitlivosti systému vůči dlouhodobě zvýšeným koncentracím, byla stanovena hodnota 600 ppm jako maximální výpočtová hodnota pro posuv [17].

Nevýhodou tohoto systému je „zabíhací čas“ (v tomto konkrétním případě bylo pracováno se 14 dny), během kterého dochází ke sbírání statistických dat k výpočtu hodnoty 75. percentilu. Další nevýhodou může být potřeba dvou čidel, která jsou nezbytná k provozu algoritmu. Tento algoritmus také může být neefektivní v prostředí, ve kterém není žádná pravidelnost emisí znečišťujících látek. Výhodou tohoto algoritmu naopak může být efektivita v prostředí, ve kterých dochází k pravidelnému vzorci znečišťování vnitřního prostředí. Nabízí se tedy prostředí rodinného domu, které zpravidla mívá určitou míru pravidelnosti chování jeho obyvatel. Další výhodou je schopnost okamžité reakce oproti předchozímu algoritmu.

- 3) Poslední strategie byla nazvána „peak shaving,“ což by se dalo přeložit jako „redukce maximálních koncentrací.“ Tato strategie je nastíněna pomocí tečkovaných čar na obrázku 11. Ve srovnání s CO_2 mají maxima VOC velmi prudký nárůst, následovaný prudkým poklesem, pro které není vždy nutné z pohledu zdraví a komfortu zvyšovat větrání. Nicméně tyto někdy extrémně vysoké a škodlivé vrcholové koncentrace VOC nelze zanedbat. Koncentrace VOC nad 2000-3000 ppm (CO_2 ekvivalentu) mohou mít v dlouhodobém horizontu nepříznivé účinky na lidské zdraví. Proto je stanoven dodatečný požadavek. Pouze pokud průměrná koncentrace VOC vyjádřená v ekvivalentu CO_2 , překročí po dobu 5 minut hodnotu 3000 ppm, klapka regulující průtok vzduchu bude plně otevřena. Proto je rozšířen rozsah druhé nejvyšší polohy klapky tak, aby klapka reagovala ekonomičtěji, ale byla plně otevřena, když signál VOC dosáhne hodnot nad 3000 ppm vzhledem k pohodlí a zdravotním problémům [17].



Obr. 11 - Popis kontrolní strategie [17]

2.6. Možnosti implementace v českém prostředí

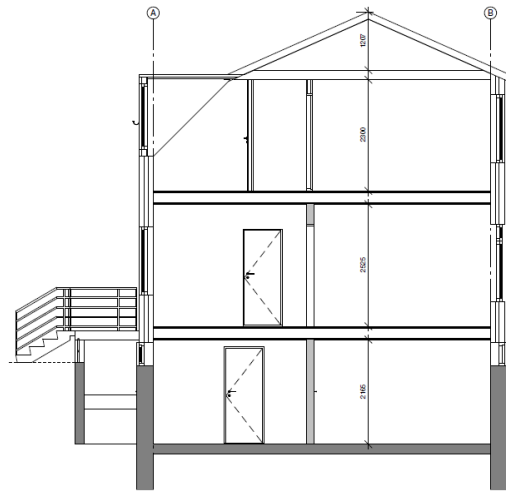
V současné době je většina bytů v ČR bez nuceného větrání. Avšak moderní trend naznačuje, že větrací jednotky v českých domácnostech budou přibývat, po vzoru zemí západní Evropy, jako jsou např. Dánsko či Švédsko. Tam je nucené větrání v domácnostech normou přímo vyžadováno, na rozdíl od českých norem, které průtoky vzduchu pouze doporučují. Použití konstantních průtoků je však neekonomické a energeticky nešetrné. Chceme-li tedy zajistit, aby nedocházelo k nadbytečnému větrání v nevytížených hodinách, je zapotřebí zajistit větrání na základě aktuální potřeby. České normy pojednávají jako o indikátoru kvality vnitřního ovzduší pouze o oxidu uhličitém, což ale nemusí vždy být správný postup [3] [13].

Lze tedy říct, že v současnosti normy nevyžadují ani nucené větrání, ani jeho následnou regulaci. Avšak vzhledem ke zvyšující se nárokům na energetickou hospodárnost budov, ale zároveň i na kvalitu vnitřního prostředí, se jeví přikročení k větrání na základě aktuální potřeby jako logický krok. V této chvíli jsou však znalosti této problematiky omezené. Vzniká tak poptávka po dalším výzkumu, aby mohlo docházet k implementaci zařízení a postupů, které jsou ověřené.

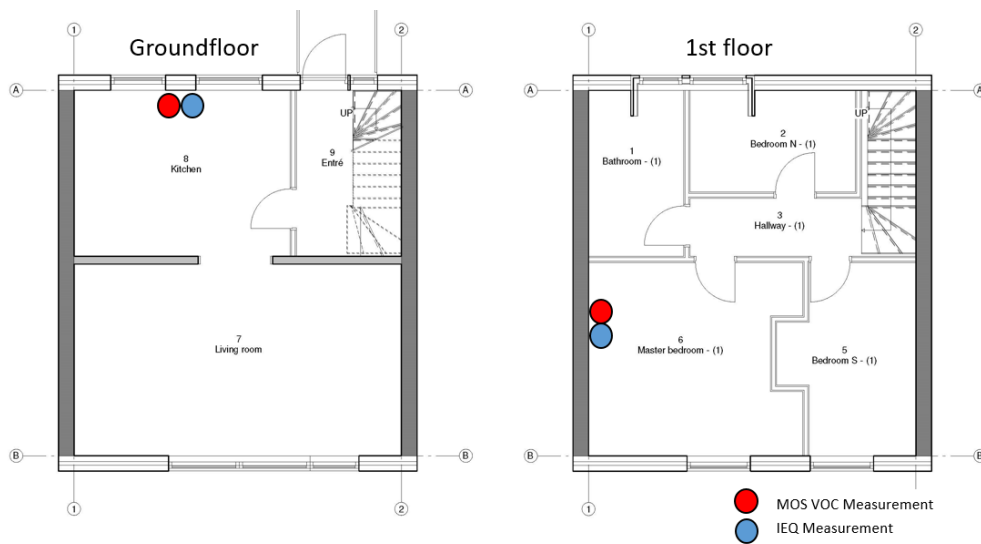
3. Praktická část č.1 – Koncentrace VOC v prostředí rodinného domu

3.1. Popis experimentu

Předmětem tohoto experimentu bylo sledovat a analyzovat chování různých čidel VOC v prostředí obytného domu, obrázky 12 a 13, za účelem hlubšího porozumění chování MOS VOC čidel v takovýchto prostředích. K měření byla použity 3 MOS čidla VOC od různých výrobců. Test probíhal v řadovém domě v Dánském městě Lyngby. Celková plocha domu činí 100 m², rozložena je pak do dvou podlaží, s vytápěným podsklepením. Měřeným obdobím bylo 3.4.2022 (úterý) až 10.4.2022 (úterý). Data byla zaznamenávána v 5minutovém intervalu. V období experimentu byl dům obýván 2 dospělými osobami a 2 dětmi (věk základní školy). Kromě čidel VOC byla v domě instalována čidla CO₂, relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu. Jako referenční měřicí zařízení bylo použito PID čidlo od společnosti GrayWolf.



Obr. 12 - Bokorys zkoumaného domu [18]



Obr. 13 - Půdorys přízemí a prvního patra [18]

Tab. 5 - Parametry použitých čidel

Označení čidla	SVM	EMV	CCS
Výstup	VOC index *	Napětí [V]	TVOC ekvivalent** CO ₂ ekvivalent***
Měřicí rozsah	0–500 VOC index	0–3 V	0–29206 ppb TVOC ekv. 400–32768 ppm CO ₂ ekv.
Provozní teplota	-20–50 °C	-10–50 °C	-40–85 °C
Provozní vlhkost	0–80 %	-	10–95 %

*Dle údajů výrobce je VOC index relativní interpretace koncentrace VOC ve vzduchu – hodnota 100 VOC indexu znamená průměrnou kvalitu v daném prostředí za posledních 24 hodin, na základě toho je dopočítána relativní změna v kvalitě ovzduší.

**TVOC ekvivalent je dle údajů výrobce signál z čidla upravený tak, jako kdyby znečištění ve vzduchu pocházelo jen z TVOC

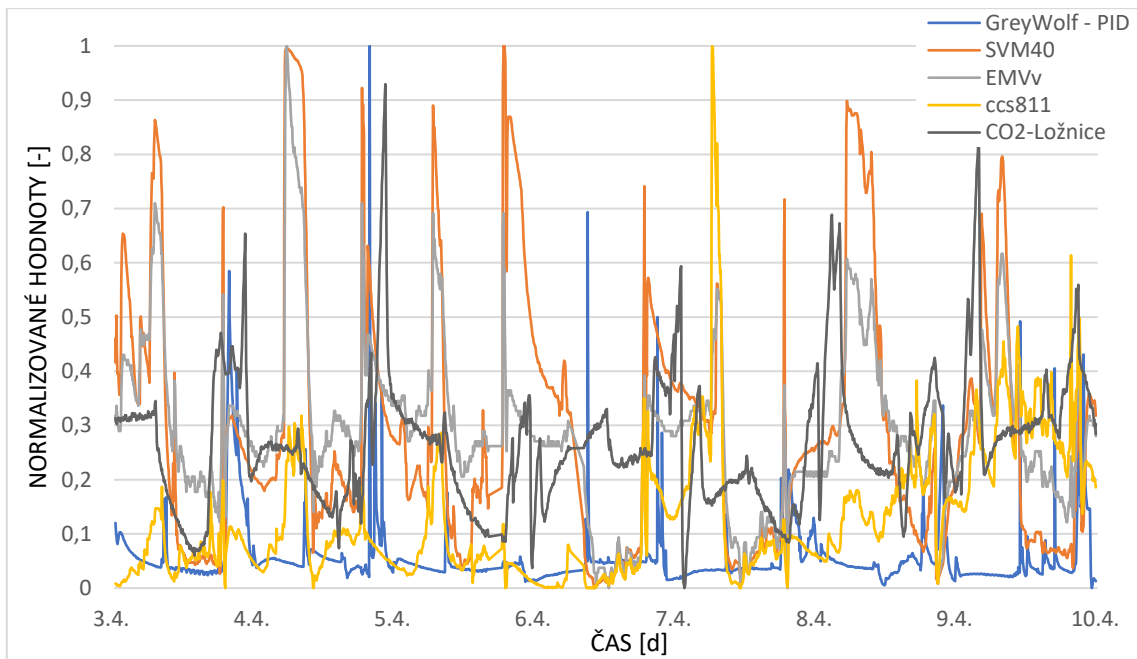
*** CO₂ ekvivalent je dle údajů výrobce signál z čidla upravený tak, jako kdyby znečištění ve vzduchu pocházelo jen z CO₂

3.2. Analýza naměřených údajů

Z tabulky 5 si lze všimnout, že každé čidlo má jiný druh výstupního signálu. Z hlediska grafické interpretace by bylo velmi obtížné porovnávat v jednom grafu signály s tak rozlišnými hodnotami. Tam, kde je vzájemně porovnáváno 2 a více čidel byl signál znormalizován tzv. min-max normalizací (1). Tato normalizace pak zároveň eliminuje nepřesnosti v absolutní hodnotě signálu a dovoluje tak sledovat pouze schopnost čidel reagovat na změny relativně.

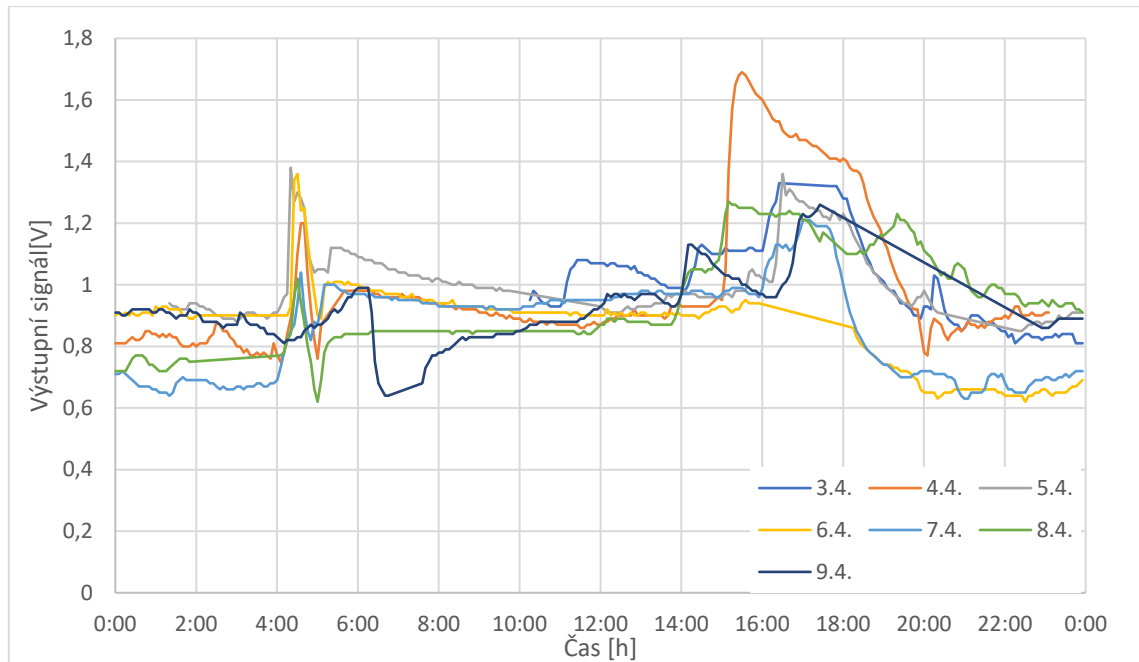
$$y = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

Kde x je výstupní hodnota signálu a y normalizovaná hodnota tohoto signálu vzhledem k minimální a maximální hodnotě za dané měřené období.



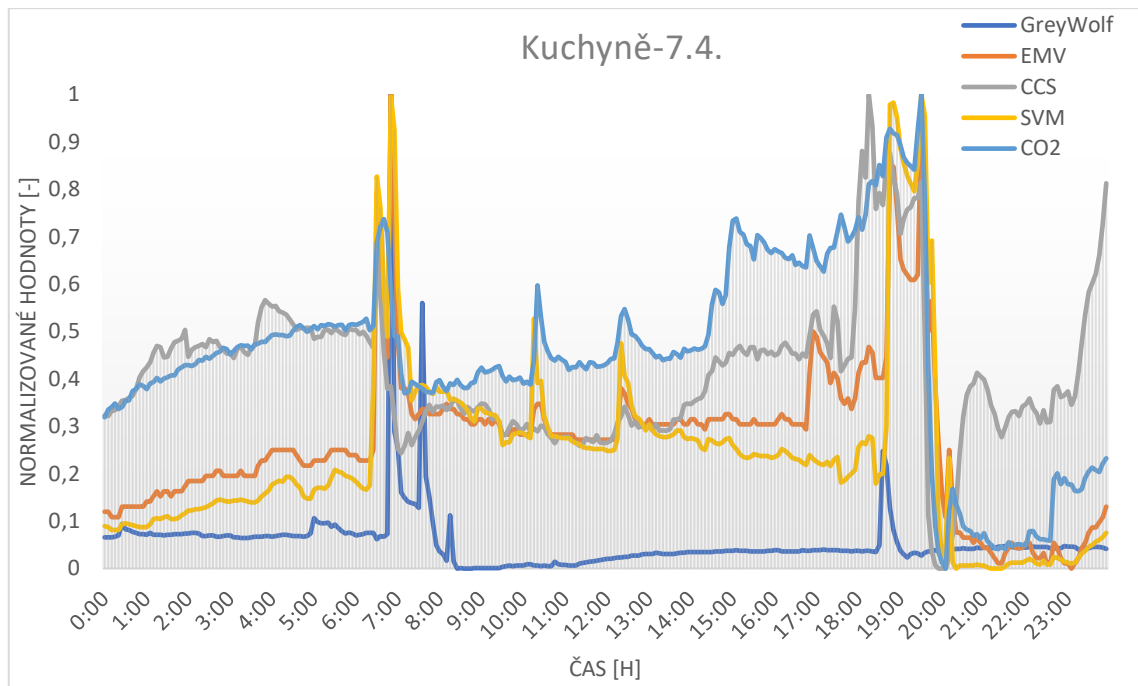
Obr. 14 - Naměřené údaje z celého období

Obrázek 14 je grafem pro celé časové období experimentu a jsou v něm zahrnuta data z měření z ložnice. Z grafu na obrázku 14 je patrné, že čidla nereagují vždy naprosto stejně a v některých místech se dokonce některá čidla blíží svému maximu, zatímco jiná se blíží svému minimu. Avšak jsou patrná taková období, kdy čidla mají tendenci reagovat podobně. Časové období celého experimentu je však příliš dlouhé na to, aby se daly blíže zkoumat trendy v reakcích signálu, nabízí se tedy vybrat alespoň jeden celý den a data z tohoto dne podrobit hlubší analýze.



Obr. 15 - Porovnání průběhů signálu čidla EMV v jednotlivých dnech – Ložnice

Ve snaze vybrat den, který by se dal považovat za nejvíce reprezentativní, byl sestrojen graf z obrázku 15. Za povšimnutí stojí, že zatímco většina dnů má podobný průběh, jsou i dny, které výrazně vybočují, např. 4.4. nebo 9.4. V oblastech, kde jsou data reprezentována přímkou, došlo k technické závadě a čidla pro tento časový úsek nesnímala, nebo nebyla připojena k elektřině (např. 9.4. od 18.00 hodin do 22.00 hodin, nebo 6.4. od 16 do 18 hodin). Nakonec byl vybrán den 7.4., jednalo se o čtvrtek. Z grafu je patrné, že poměrně dobře kopíruje průběhy ostatních dnů, byť na začátku a konci dne zde podle čidla EMV byla jedna z nejlepších kvalit vzduchu v porovnání s ostatními dny. Při tomto rozhodnutí však bylo přihlédnuto k faktu, že jako jeden z mála dní je pro 7.4. kompletní sada dat, tedy že nedošlo k žádné poruše a čidla tak snímala po celý den.



Obr. 16 – Porovnání výstupních signálů jednotlivých čidel pro 7.4.

Na tomto grafu (obr. 16) je zachycen normalizovaný průběh koncentrace VOC (jako období pro tuto normalizaci byl brán úsek vyobrazený na grafu), tak jak ho zaznamenala použitá čidla, navíc je zde vyobrazena pro srovnání křivka koncentrace CO₂ (opět normalizovaná, nejmenší a největší koncentrace CO₂ pro tento den byly 347 ppm a 1033 ppm). Z průběhu grafu jsou patrné dva časové intervaly se zvýšenou koncentrací VOC a CO₂ a to ráno (6.00h – 8.00h) a večer (19.00h – 20.00h) které jsou způsobeny přítomností a zvýšenou aktivitou osob obývajících dům (snídaně, ranní hygiena...), večerní maximum je pak prudce ukončeno ve 20.00h, kdy bylo v domě provedeno větrání průvanem. Po tomto denním minimu dochází k postupnému zhoršování kvality vnitřního ovzduší, podobný trend lze sledovat i v ranních hodinách. V období mezi těmito maximy se v domě nenacházely žádné osoby, což je patrné i ze snižujících se či převážně stagnujících koncentrací měřených znečišťujících látek v prostředí. Dá se říct, že všechna čidla se shodují v ranním maximu, o něco hůře pak v maximu večerním.

Mezi koncentrací VOC a CO₂ je zde pozorovatelná korelace. Např. maxima koncentrací se časově shodují. Rozdíl však tato čidla vykazují v časech mimo maxima. Mezi 9.00h a 18.00h pozorujeme u VOC koncentrace spíše stagnaci, zatímco CO₂ ve vzduchu zdatelně přibývá.

Znatelný rozdíl je pak mezi signálem z čidla měřícího metodou PID (GrayWolf) a čidly, která měřila metodou MOS (EMV, CCS, SVM). MOS čidla prokazují zvýšenou koncentraci po celý den a v podstatě až na několik výjimek se pohybují minimálně nad úrovní 0,25 normalizované hodnoty jejich signálu. Oproti tomu PID měření vykazuje většinu dne spíše nižší hodnoty pohybující se dokonce pod úrovní 0,1 jeho normalizované hodnoty a reagoval pouze v obdobích, kde i další čidla vykazovala svoje maxima.

Rozdíly se vyskytují i mezi jednotlivými MOS VOC čidly. EMV a SVM čidla vykazují po většinu dne velmi podobné výsledky, výjimkou je snad jen časový interval od 14.00h do 19.00h, kde koncentrace VOC dle čidla SVM spíše klesá, zatímco hodnota z EMV stagnuje a v druhé polovině jeho signál roste. Velký rozdíl v průběhu koncentrace lze ale pozorovat mezi dvojicí čidel EMV, SVM a třetím MOS čidlem CCS. Podobné průběhy pozorujeme pouze v průběhu ranního maxima, částečně pak i u maxima večerního. Křivka průběhu signálu CCS pak v obdobích mimo maximální koncentrace částečně kopíruje křivku koncentrace CO₂. Výjimkou je období po větrání, po kterém se signál CCS velmi rychle dostává na poměrně vysoké hodnoty, když všechna ostatní čidla vykazují spíše pozvolný nárůst. Ke zjištění míry odlišnosti jednotlivých signálů, byla použita metoda „Root mean square error“ (2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_{1,t} - x_{2,t})^2}{n}} \quad (2)$$

Kde je:

$x_{1,t}$ – signál porovnávaného čidla v časovém kroku t

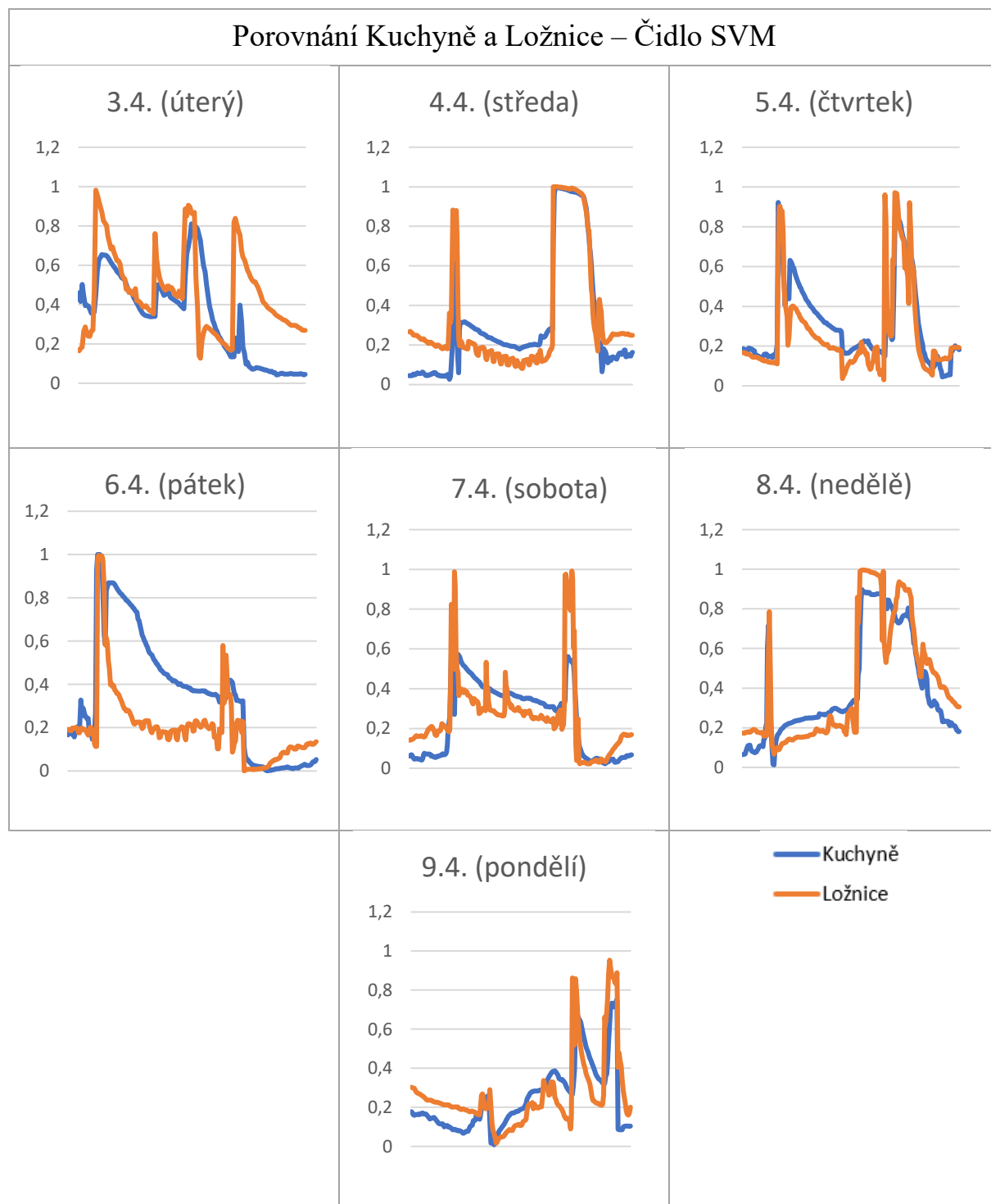
$x_{2,t}$ – signál druhého porovnávaného čidla v časovém kroku t

n – počet časových kroků

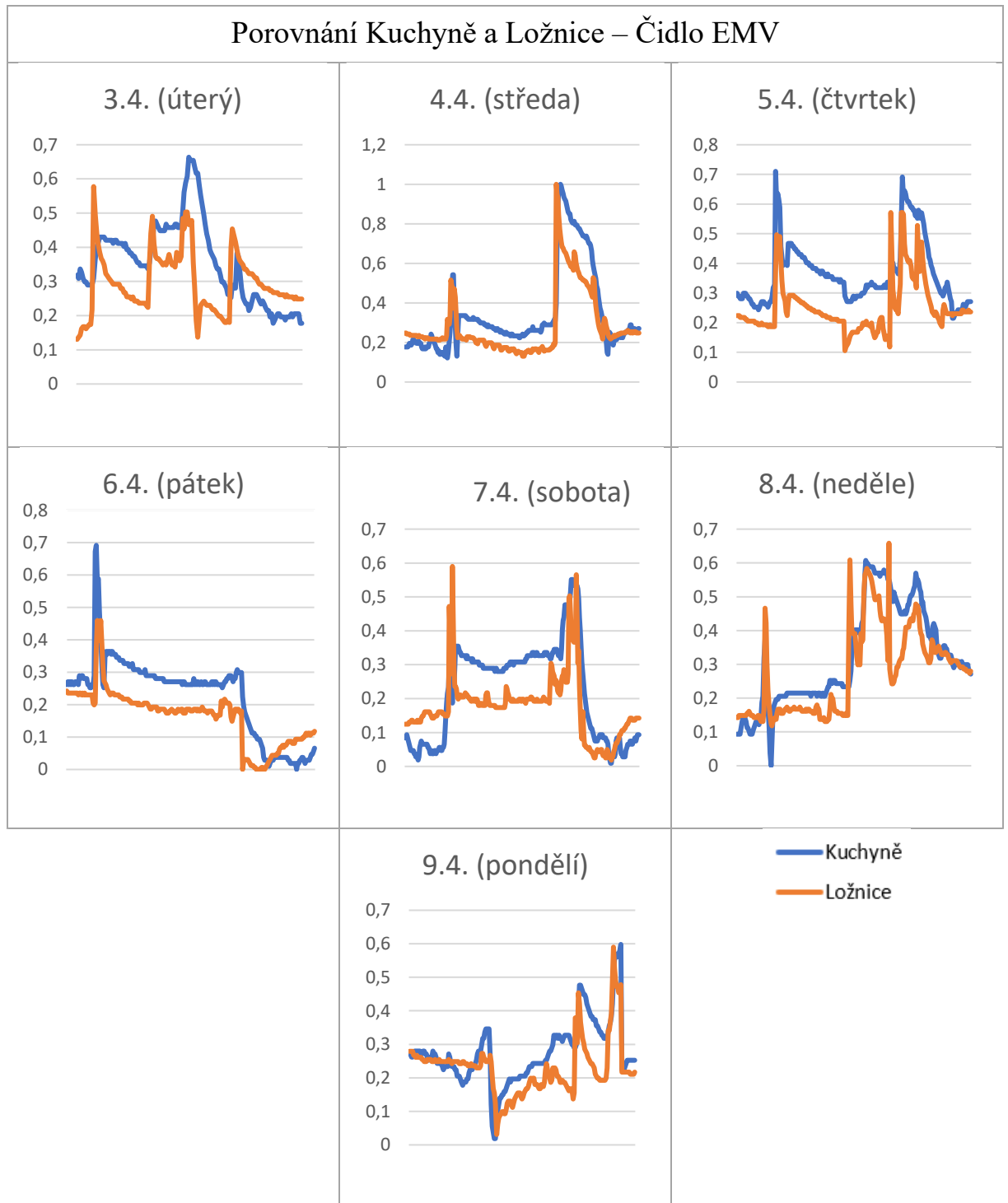
Tab. 6 - Hodnoty RMSE [-]

	EMV	SVM	CCS	PID (GW)
EMV		0,06	0,18	0,22
SVM	0,06		0,18	0,19
CCS	0,18	0,18		0,37
PID (GW)	0,22	0,19	0,37	

Tabulka 6 dále potvrzuje, že nejvíce se shodují čidla EMV a SVM, nejznatelnější je rozdíl mezi čidly CCS a referenčním PID měřením.



Obr. 17 - Porovnání reakcí čidla SVM pro dvě různá prostředí



Obr. 18 - Porovnání reakcí čidla EMV pro dvě různá prostředí

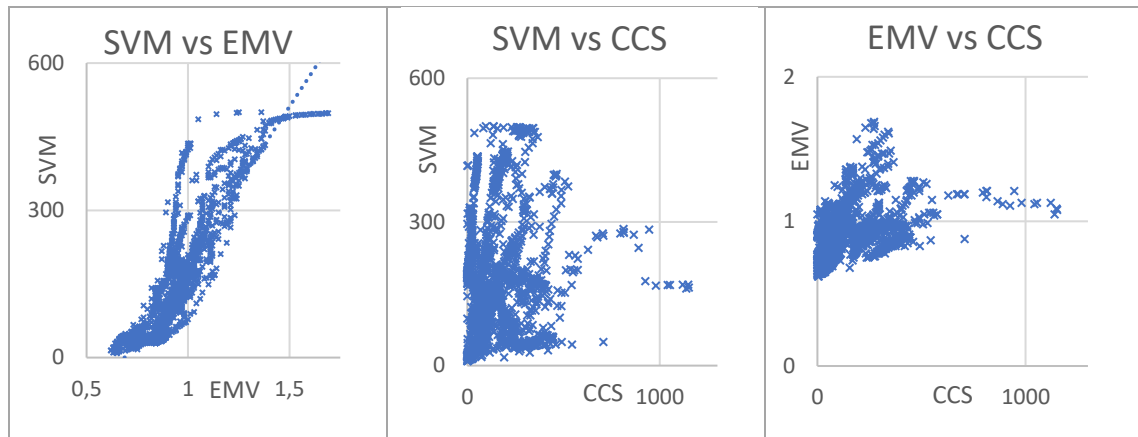
Na grafech z obrázků 17 a 18 je porovnání reakcí vždy dvou různých čidel EMV a SVM na prostředí kuchyně a ložnice. Porovnáním reakcí dvou čidel zjistíme, že každé čidlo reaguje na jedno prostředí různými způsoby. Zatímco v případě čidla SVM je v období špiček jasně horší kvalita zaznamenávána v kuchyni, v období mezi maximy je naopak dle čidla SVM horší kvalita ovzduší v ložnici. Naopak čidlo EMV vykazuje

průběh jiný a dle signálu z něj je v drtivé většině času horší kvalita vzduchu v kuchyni, ačkoli se zde najdou i výjimky, při kterých čidlo umístěné v kuchyni zaznamenává stejnou, či lepší kvalitu vzduchu.

Dále si můžeme povšimnout i různého charakteru dnů pracovních a víkendů. Zatímco u pracovních dnů (4.4. – 8.4.) lze pozorovat určitý společný vzorec – ranní a večerní maximum, u víkendových dnů (3.4. a 9.4.) se žádný vzorec prakticky nevyskytuje.

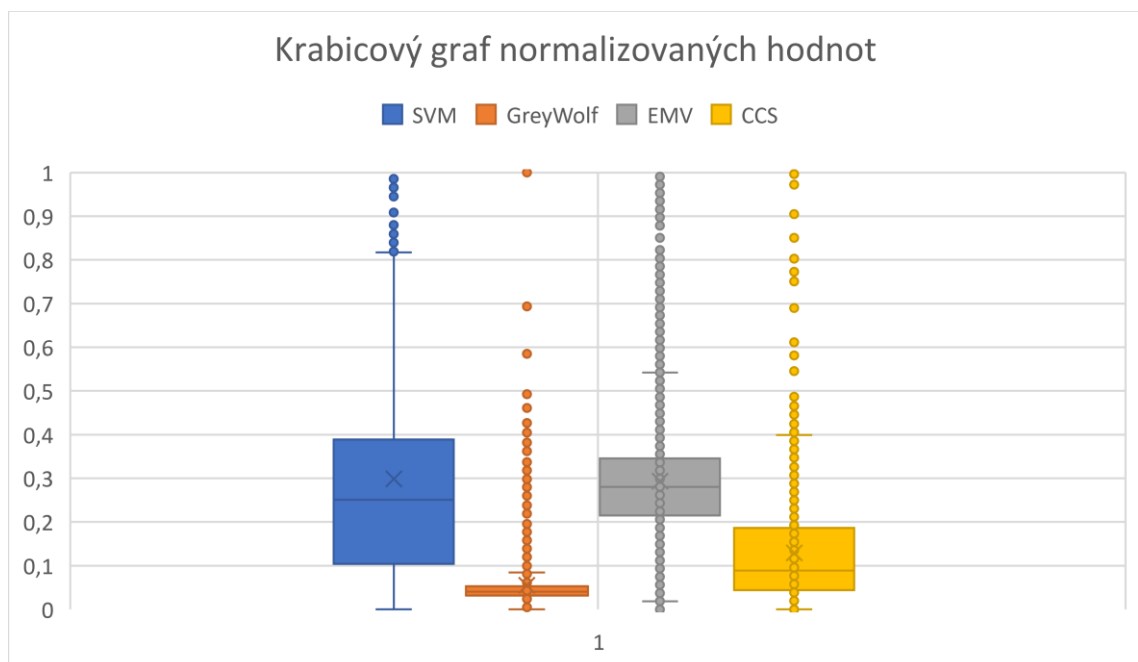
3.3. Diskuse

Časová období z naměřených grafů se dají rozdělit na dva druhy – maxima koncentrací a období mezi nimi. Z výše uvedených grafů si lze všimnout, že všechna čidla se poměrně dobře shodují v období maxim, ale v období mezi nimi dochází v několika případech až k markantním rozdílům. Toto může být mimo jiné způsobeno tím, že maxima jsou způsobena především vařením a při vaření (tepelné úpravě potravin) dochází k emitování široké škály VOC [19]. Zatímco v období mezi maximy jsou zdrojem VOC převážně emise z nábytku a metabolická činnost osob obývajících zkoumaný dům, což je naopak užší variace těkavých organických sloučenin [20] [21]. Nabízí se tedy 2 vysvětlení: některá čidla nejsou zkrátka dostatečně kvalitní na to, aby byla použita jako čidla detekce VOC ve vzduchu, nebo vysvětlení, že čidla mohou mít odlišnou citlivost vůči různým těkavým organickým sloučeninám. Druhé vysvětlení je pak i částečně podpořeno tvrzením výrobců čidel, v manuálu pro čidla EMV a SVM je uvedeno, že tato čidla lépe zaznamenávají znečištění z vaření, či etanol, zatímco čidlo CCS lépe reaguje na emise VOC z metabolické lidské činnosti, což koresponduje s faktem, že v mnoha případech se signál z čidla CCS podobal signálu z čidla CO₂, což je dalším ukazatelem znečištění, který je převážně způsoben lidskou metabolickou aktivitou [5].



Obr. 19- Křížové grafy použitých MOS VOC čidel

Čemuž následně odpovídají i křížové grafy z obrázku 19, na kterých si můžeme všimnout, že mezi signály SVM a EMV jasně existuje souvztažnost, zatímco jsou-li tato dvě čidla porovnána křížovým grafem s čidlem CCS, korelace se v grafu téměř vůbec nevyskytuje a body tak utvoří pouze neurčitý shluk.



Obr. 20 - Krabicový graf použitých VOC čidel

Graf z obrázku 20 dále potvrzuje předchozí tvrzení, kdy EMV a SVM mají podobné výsledky (byť SVM čidlo má evidentně větší rozptyl) a CCS se od nich liší.

Tento experiment svými výsledky poukázal na důležitost volby správného čidla VOC pro prostředí, ve kterém má být využíváno.

4. Praktická část č.2 – implementace algoritmů pro práci se signálem VOC v regulaci větrací jednotky

Cílem tohoto experimentu bylo zkoumat chování větrací jednotky při implementaci signálu zpracujících algoritmů, zejména pak klouzavého průměru a zjištění ideální délky výpočtu časového intervalu tohoto algoritmu.

4.1. Popis laboratorního vybavení

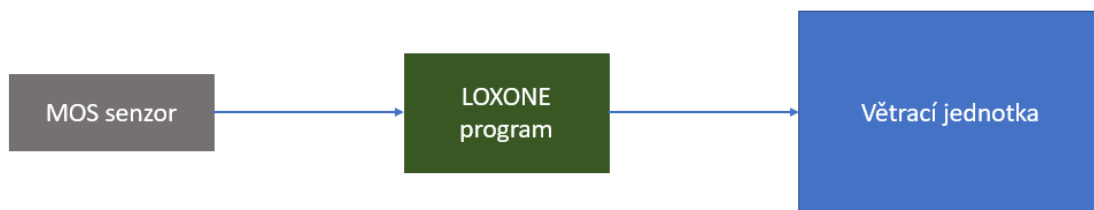
Data naměřená pro tuto část práce, byla měřena v testovacím zařízení Dánské technické univerzity nacházející se severně od Kodaně, ve městě Lyngby. Celý test byl prováděn v jediné místnosti, v níž byla regulována větrací jednotka, v režimu rovnotlakého větrání. Okno místnosti byla orientována na severo severo východ a jeho rozměry byly 2 m x 1,3 m. Objem místnosti byl 25,4 m³ (délka x šířka x výška 3,5 m x 2,9 m x 2,5 m). V místnosti se nacházely mimo větrací jednotku dva pracovní stoly, tři židle, elektrický přímotop a přenosný počítač s dokovací stanicí. Menší stěny (2,9 m x 2,5 m) byly obloženy dřevěnými deskami, větší stěny (3,5 m x 2,5 m) a strop byly ze sádkartonu. Podlaha byla krytá linoleem.



Obr. 21- Letecký snímek s vyznačeným směrem oken laboratoře (modrá)



Obr. 22 - Interiér testovací místnosti



Obr. 23 - Schéma zapojení

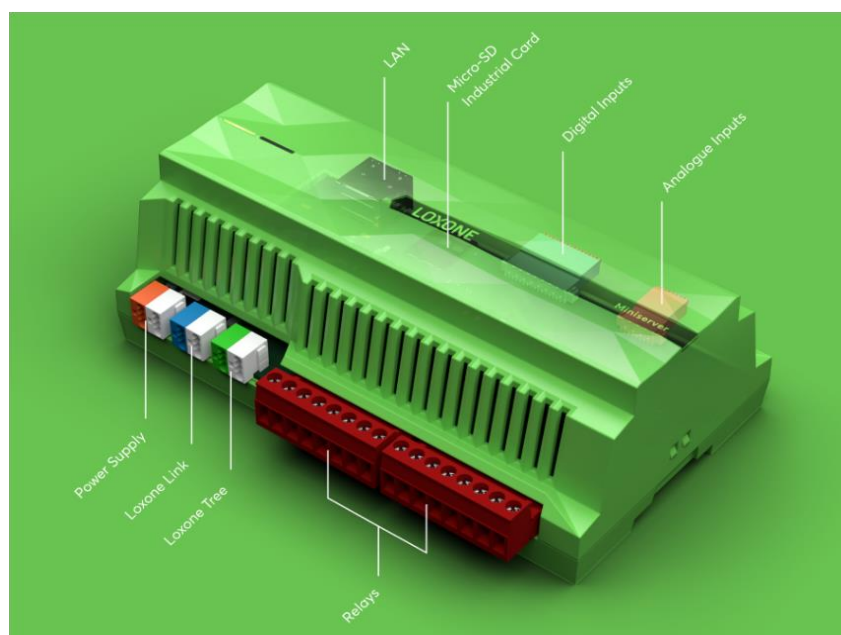
K měření koncentrace VOC ve vzduchu bylo použito MOS čidlo od firmy S+S Regeltechnik® s označením RLQ-W. Čidlo se dá podle dokumentace výrobce nastavit na tři stupně citlivosti, ponechána byla výchozí, tedy střední, citlivost. Čidlo disponuje automatickou kalibrací, která na jednu stranu usnadňuje práci s čidlem, na druhou stranu pak může dojít k posunu spodní hodnoty měřicího rozsahu a čidlo vlivem autokalibračního algoritmu může považovat znečištěný vzduch za čistý, je-li vystaveno po delší dobu zhoršené kvalitě ovzduší. Výstup čidla je signál v rozmezí 0-10 V. Výrobce v dokumentaci neuvádí, jaký je ekvivalent koncentrace VOC k výstupnímu signálu, pouze uvádí, že 10 V je hodnota pro znečištěný vzduch a 0 V pro vzduch čistý. Fakt, že chyběla reference, později komplikoval i stanovení požadované hodnoty při regulaci.

Tab. 7 - Základní parametry použitého čidla

Výstupní signál	Přesnost	Pracovní teplota	Doba zahřívání*
0–10 V	+/- 20 % rozsahu	0-50 °C	60 min.

*Dobou zahřívání se rozumí doba mezi zapnutím čidla a jeho provozuschopností

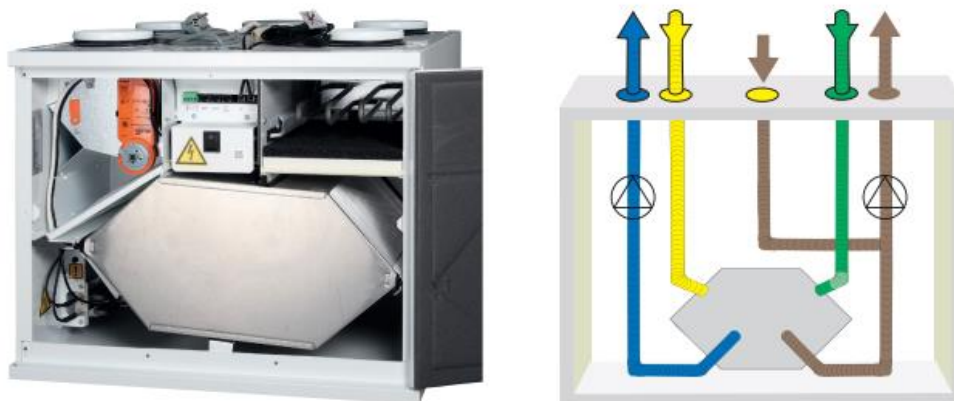
Pro zpracování signálu a následné regulování jednotky, byly použity produkty od firmy LOXONE®.



Obr. 24 - Použitý procesor

Jmenovitě šlo o miniserver, který byl ovládán přes počítač pomocí SW Loxone Config, ve kterém se zpracovával signál pomocí blokových schémat.

Samotné větrání obstarávala větrací jednotka CASA W3 Smart značky Swegon. Jednotka byla vybavena tepelným výměníkem pro zpětné získávání tepla.



Obr. 25 - Použitá větrací jednotka

V jednotce byly instalovány dva ventilátory o výkonu 230 W. Jednotka je schopná operovat v rozmezí průtoků 36 m³/h až 288 m³/h, pro účely experimentu byl však rozsah nastaven na rozmezí 60 m³/h až 250 m³/h. Takto vysoké hodnoty byly nastaveny, aby mezi jednotlivými znečišťujícími událostmi, které zahrnovala měřicí procedura, došlo k co největší míře vyvětrání místnosti a kvalita vzduchu se vrátila co nejdříve k základní úrovni. Průtok byl regulován pomocí PI regulátoru a jeho výstupní signál byl nastaven tak, aby se pohyboval v rozmezí od 1 V do 8 V, jelikož to byly hodnoty, na které byla jednotka nastavena výrobcem (1 V minimální průtok, 8 V maximální průtok, mezi těmito krajními hodnotami se průtok měnil lineárně).

4.2. Přípravné měření – netěsnosti obálky budovy

Mezi přípravnými měřeními, bylo provedeno měření netěsnosti místnosti. Jako kontrolní plyn pro toto měření byl použit oxid uhličitý, který byl vypouštěn z tlakové nádoby po dobu 10 s, poté se zavřely a utěsnily dveře.

Pro výpočet se vycházelo z následujícího vzorce:

$$C(t) = C_0 e^{-nt} \quad (3)$$

Kde je:

$C(t)$ – koncentrace látky v čase t [ppm]

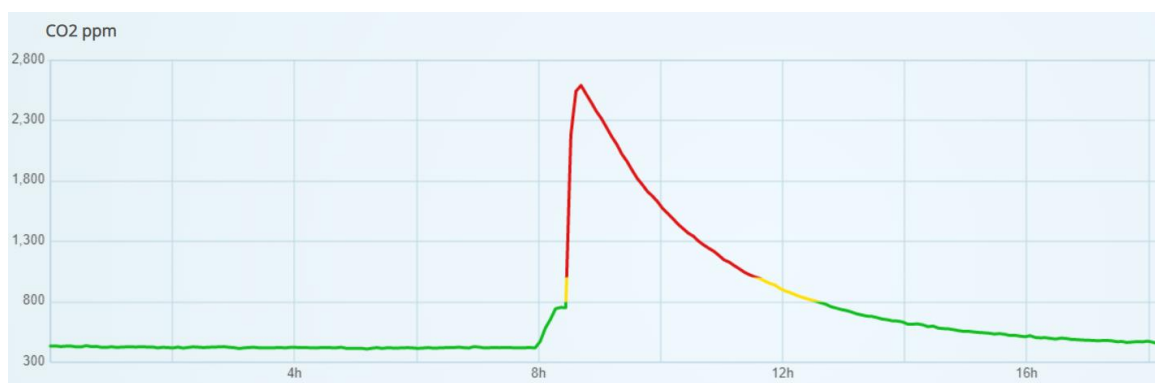
C_0 – koncentrace látky na počátku (maximální koncentrace) [ppm]

n – intenzita větrání vlivem infiltrace [h⁻¹]

t – čas [h]

Z tohoto vzorce pak může být vyjádřena výměna vzduchu netěsnostmi v obálce budovy.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C(t)}\right)}{t} \quad (4)$$



Obr. 26- Průběh koncentrace CO₂ pro 2. měření

Tab. 8 - Podmínky a výsledky měření

Měření č.	Nejvyšší konc. [ppm]	Čas nejvyšší konc. [h]	Ustálená konc. [ppm]	Čas ustálení [h]	Rychlost větru [m/s]	Směr větru	Výsledná intenzita [1/h]
1	3969	11.22	542	18.02	9,4	V	0,3
2	2592	8.42	540	15.22	3	Z	0,2
3	4215	9.22	517	12.22	8,3	SV	0,7

Tato měření byla provedena za účelem zjištění netěsností měřicí místnosti, které mohou mít vliv na celkovou intenzitu větrání v místnosti. Rychlost a směr větru jsou v tabulce 7 uváděny proto, že mají na intenzitu větrání vlivem netěsností vliv, což lze poznat i z výsledků pro měřené dny.

4.3. Měřicí procedura

Cílem této procedury bylo dosáhnout znečištění vzduchu v místnosti a ověřit tak funkčnost kontrolních algoritmů, které budou popsány dále. Při volbě prostředků k znečištění ovzduší bylo postupováno tak, aby došlo k dostatečnému zhoršení kvality

vzduchu a čidlo mohlo adekvátně reagovat, zároveň byl ale kladen důraz na to, aby znečišťující aktivity byly běžné pro prostředí buď kanceláře, nebo prostředí obytné budovy. Procedura byla pro každý den měření stejná, aby byla data mezi sebou vzájemně srovnatelná a veškeré aktivity zmíněné níže byly uskutečněny s přesností +/- 5 minut.

Samotná procedura byla následující:

- 8:30 příchod do místnosti – Do místnosti přichází jeden dospělý člověk, zároveň zapíná přenosný počítač a přímotop (teplota v místnosti byla v období měření udržována mezi 18 °C až 26 °C, poté byl přímotop vypínán kvůli úspoře energie)
- 9:00 malování fixou – Na papír byl namalován fixou na bílou tabuli čtverec o rozměru 10 cm x 10 cm, poté byl pomalovaný papír 10 minut ponechán na stole, a nakonec vnesen ven z místnosti. Fixa dle informací výrobce obsahuje mimo jiné látky jako ethanol, xylen či butanol
- 10:30 loupání pomeranče – Po oloupaní byly slupky zanechány po dobu 10 minut na stole, a nakonec vneseny ven z místnosti. Pomeranč byl zvolen zejména kvůli obsahu aromatických látek ve své kůře, mezi které se řadí např.: terpeny, pinény nebo limoneny [22]
- 12:00 4-5 rozprášení voňavky – Voňavka byla rozprášena volně do prostoru místnosti, mimo jiné voňavka dle informací obsahuje oxybenzen a tetramethylhydroxypiperidinol
- 14:00 mytí oken – Na začátku bylo na obě okna rovnoměrně rozprášeno 10 dávek čisticího prostředku, které byly vždy po 3 minutách setřeny suchou textilií, tento proces bylo zopakován celkem 5x. Celá tato operace tak trvala 15 minut. Podle informací výrobce, obsahoval čisticí prostředek limonen, ethanol a aceton
- 15:45 dezinfekce rukou – Jedna dávka dezinfekce na ruce, poté cca 5 minut čekání na uschnutí. Po pěti minutách byly ruce mimo místnost umyty. Dezinfekce obsahovala podle informací výrobce etanol, či isopropanol
- 16:00 odchod z místnosti

4.4. Algoritmy práce se signálem

Veškeré algoritmy použité pro zpracování signálu čidla byly založeny na tzv. klouzavém průměru. Klouzavý průměr (anglicky "moving average") je statistická metoda, která se často používá k analýze časových řad. Jedná se o průměr hodnot v určitém časovém období, který se posouvá po řadě a vypočítává se opakovaně pro každé nové období. Tento průměr může být použit k odstranění krátkodobých fluktuací v datových sadách a k identifikaci dlouhodobých trendů.

Hlavní výhody využití klouzavého průměru jsou především jeho schopnost odstranit krátkodobé fluktuace v datech a spíše tak sledovat vyvíjecí se dlouhodobé trendy signálu.

Mezi omezení tohoto algoritmu se řadí fakt, že může dojít k přílišné necitlivosti, pokud se zvolí příliš dlouhá doba výpočtu klouzavého průměru, a naopak k jeho nízké efektivitě, pokud se klouzavý průměr vypočítává z období příliš krátkého.

V prováděných měřeních došlo k pokusu o stanovení ideální délky časového intervalu k výpočtu klouzavého průměru ve spojitosti k regulaci větrací jednotky. Délky výpočtu klouzavého průměru byly následující.

- 3 minuty
- 5 minut
- 10 minut
- 15 minut
- Proměnná délka časového intervalu

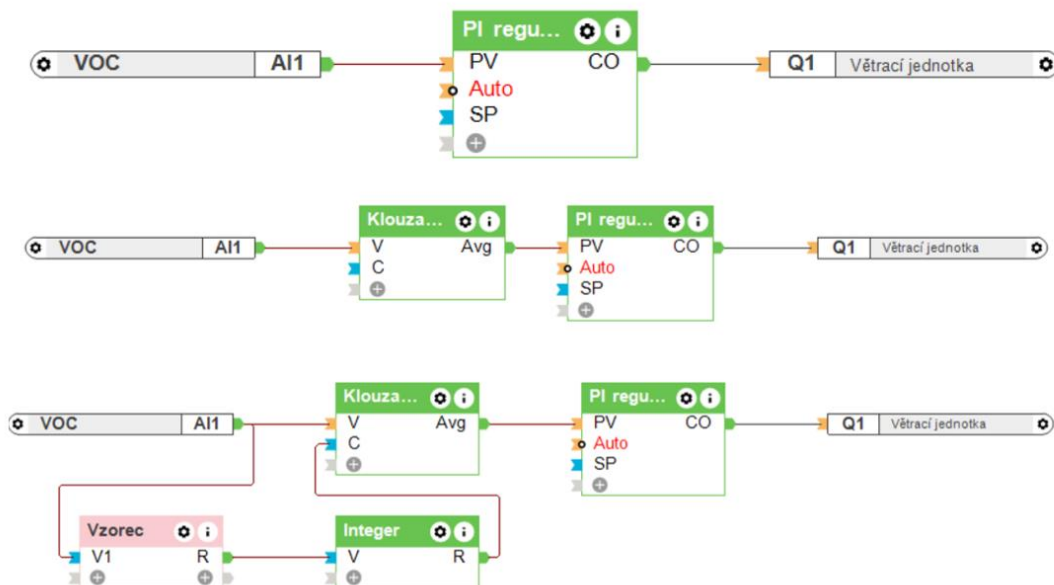
Jelikož v průběhu experimentu se začalo jevit, že zatímco délka intervalu pro výpočet 15 minut je neefektivní v časech s nižší koncentrací (algoritmus působil s nízkou citlivostí), naopak 3 minuty byly příliš citlivé v úsecích se zvýšenou koncentrací a nedocházelo tak příliš k dostatečnému snižování signálu, byl vyvinut algoritmus, který přizpůsoboval délku výpočtu časového okna na základě signálu z čidla.

Závislost délky výpočtu na výstupním signálu z čidla byla popsána lineárně a je zobrazena na obr. 27.



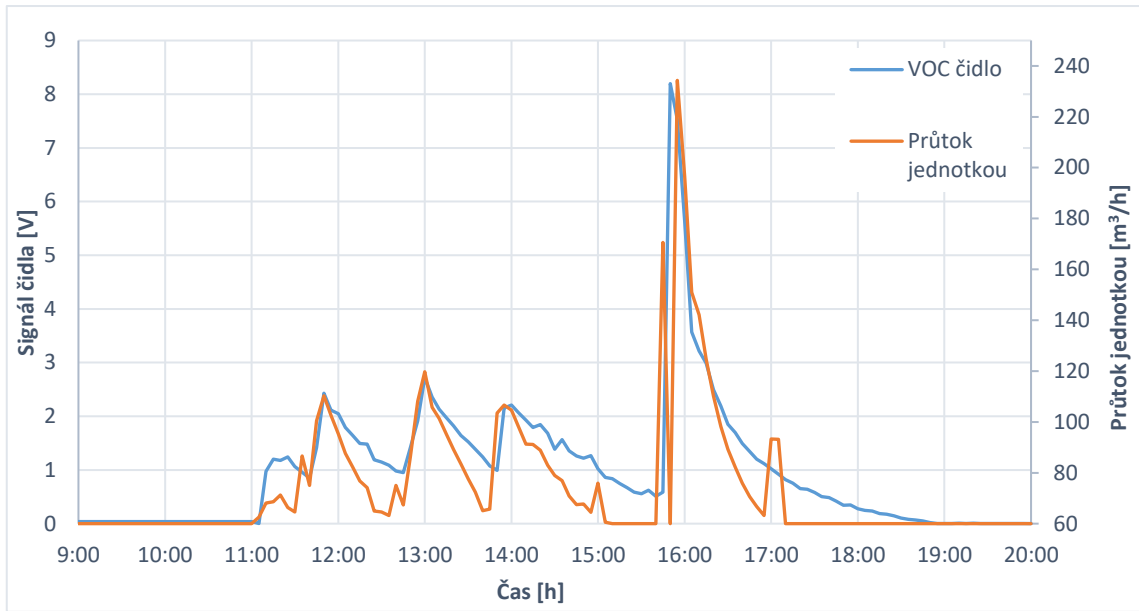
Obr. 27 - Závislost délky výpočtu časového okna na zaznamenávané kvalitě vnitřního ovzduší

Bloková schémata pro regulaci jsou zobrazena na obrázku 28. První schéma shora je zapojení pro neprocesovaný signál. Prostřední schéma je implementace klouzavého průměru s konstantním časovým intervalem (3 minuty, 5 minut, 10 minut a 15 minut). Poslední, nejspodnější, schéma je blokové schéma implementující poslední algoritmus, klouzavý průměr s proměnnou délkou časového intervalu. V bloku „Vzorec“ byla implementována rovnice z obrázku 27 a blok „Integer“ odstraňoval čísla za desetinnou čárkou, jelikož klouzavý průměr pracuje pouze s celými čísly.



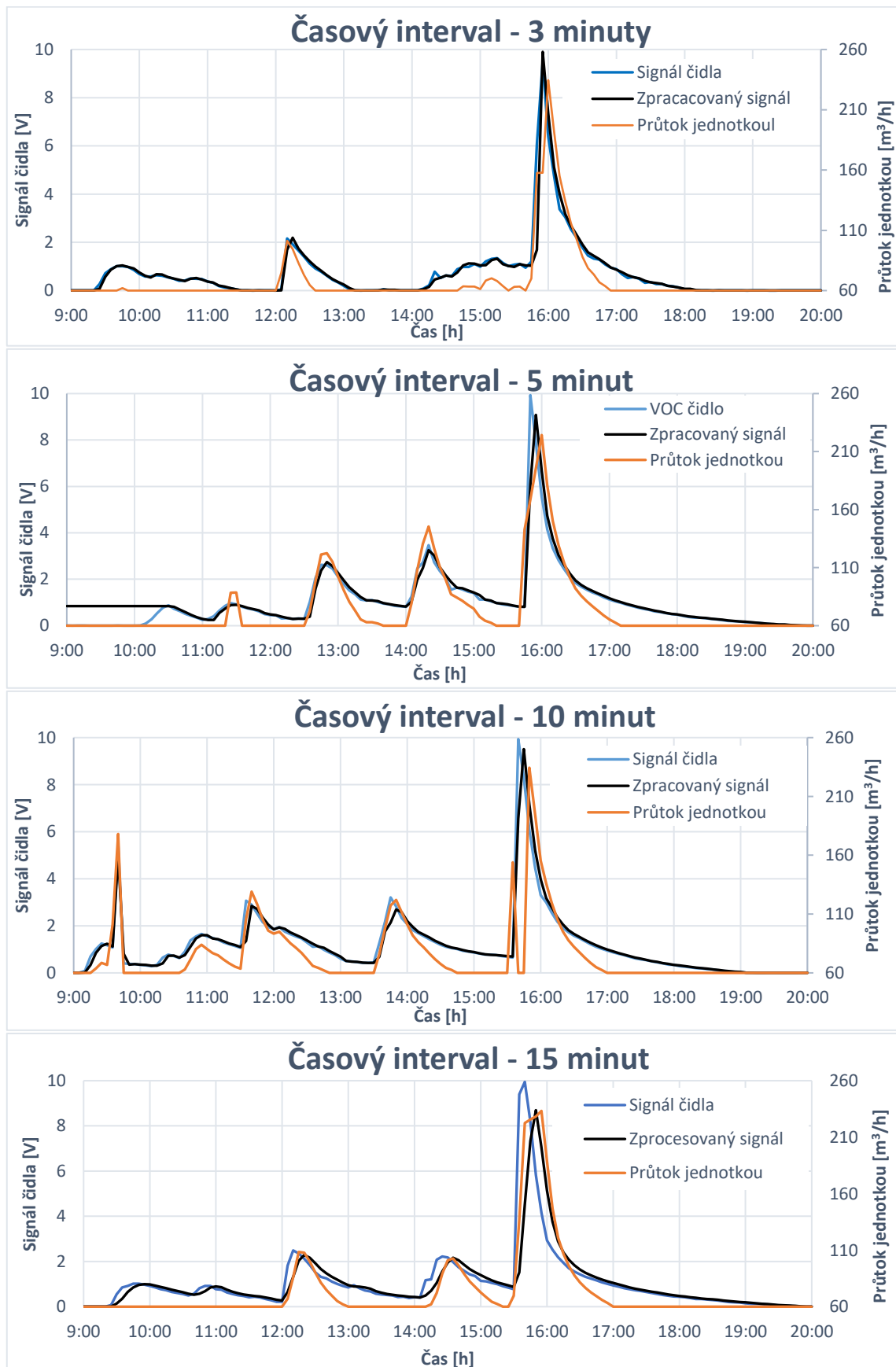
Obr. 28 - Blokovaná schémata použitá pro regulaci

4.5. Analýza naměřených dat



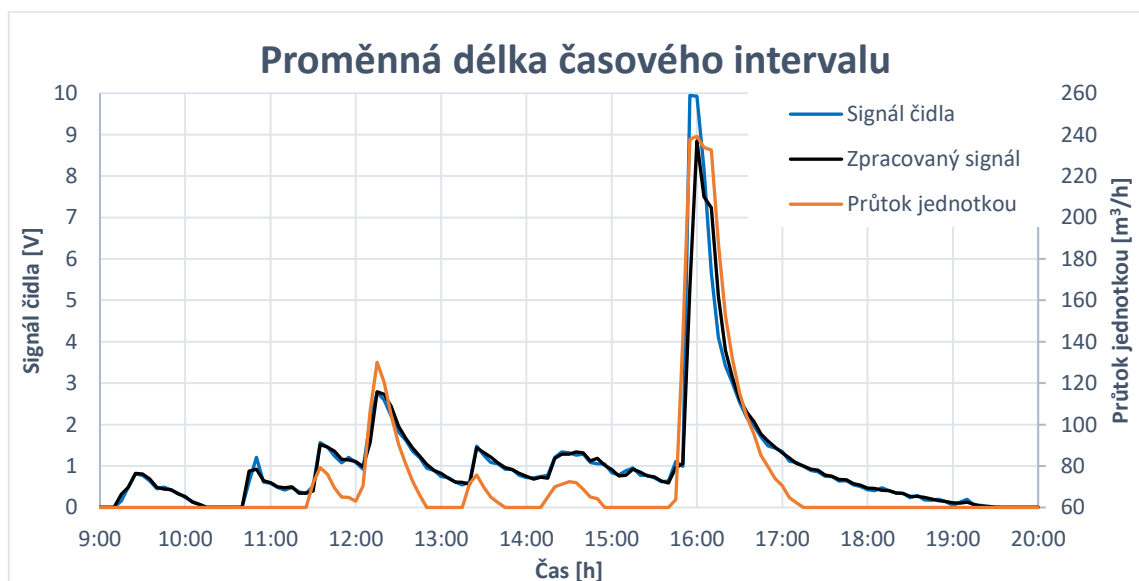
Obr. 29 - Vývoj průtoku jednotkou pro nezpracovaný signál čidla VOC

Z prvního měření (obr. 29) lze vidět, že i neprocesovaný signál se dá použít k řízení větrací jednoty, avšak s určitými omezeními. Z grafu je patrné, že signál způsobuje kmitavou odezvu PI regulátoru. Z grafu je také patrné, že nejlépe reaguje na poslední část měřicí procedury, a to na dezinfekci rukou, která obsahuje vysoké množství etanolu (dle složení uvedeném na výrobku 85 %). V tento den měření byla procedura z časových důvodů prováděna až od 10.30h, jde tak pouze o demonstrativní případ.



Obr. 30 - Vývoj řídicího signálu pro procesovaný signál čidla VOC – různé délky čas. oken

Z grafů na obrázku 30 je patrné, jak prodlužování časového intervalu pro výpočet klouzavého průměru pomáhá snižovat signál, který následně putuje do PI regulátoru a tím dochází ke snížení hodnoty řídicího signálu, a nakonec průtoku jednotkou. Je také patrné, že tento algoritmus snižuje, či úplně odstraňuje drobné výkyvy signálu a pomáhá tak předcházet kmitavé odezvě regulátoru, funguje tak tedy zároveň jako jednoduchý filtr. Při použití nejkratšího časového okna (v našem případě tři minuty) je však snižování průtoku, kterého bylo předpokládáno dosáhnout, nepatrné, takový algoritmus pak funguje tedy spíše jen jako filtr. Naopak u nejdelšího použitého časového okna je patrné snížení maxima. U takto dlouhého časového okna ale dochází k nežádoucímu jevu. Ostré maximum je sice tímto procesováním signálu sníženo, dochází ale zároveň k jeho časovému posunu vpřed, což způsobuje, že větrací jednotka reaguje zvýšenými průtoky v období, kdy již není aktuální potřeba natolik vysoká.



Obr. 31 - Vývoj řídicího signálu pro procesovaný signál čidla VOC – proměnná délka čas. okna

Na obrázku 31 je vidět, jak vypadá implementace algoritmu využívající klouzavého průměru s proměnnou délkou časového okna. Algoritmus kombinuje výhody krátkého časového okna pro výpočet (zanedbatelné časové posunutí špiček, funkce filtru) a dlouhého časového okna pro výpočet, které efektivně snižuje hodnoty špiček, čehož si na grafu lze všimnout zejména v 16.00h.

4.6. Diskuse

Z výše uvedených grafů (obrázky 29, 30 a 31) lze soudit, že implementace algoritmů pro zpracování signálu čidla VOC (zejména MOS čidel) by mohlo být dalším krokem pro zlepšení metod řízení větrací jednotky podle aktuální potřeby. Algoritmy, zejména poslední uvedený, prokázaly schopnost efektivně snižovat hodnoty signálu čidla VOC, a to zejména v období špiček, kdy je potřeba snižování nejvyšší. Pro budoucí výzkumy implementace tohoto algoritmu je doporučeno zvážit vyzkoušení ještě vyššího horního limitu pro výpočet délky proměnného časového okna, aby došlo ke znatelnějšímu snížení špiček.

Za zmínku také stojí, v jaké dny byla prováděna měření.

- 2.12. – Neprocesovaný signál
- 6.12. – Čas. okno 5 minut
- 7.12. – Čas. okno 10 minut
- 8.12. – Čas. okno 15 minut
- 13.12. – Čas. okno 3 minuty
- 14.12. – Proměnná délka časového okna

Z grafů je patrné (obr. 29, 30 a 31), že jak byla měření chronologicky prováděna, docházelo postupně ke snižování odezvy čidla na jednotlivé druhy znečištění (s výjimkou poslední části procedury). To bylo pravděpodobně způsobeno kombinací 2 faktorů: vlastností VOC absorbovat se do materiálů ve vnitřním prostředí a jejich následná emitace [11] a automatickou kalibrací čidla. Ta totiž funguje na základě dlouhodobějšího sledování kvality ovzduší, je-li pak koncentrace TVOC v ovzduší dlouhodobě zvýšená, algoritmus čidla nastaví tuto koncentraci jako základní, od které se následně odvíjí následující výstup. Pravděpodobně se tak mnoha měřícími procedurami absorbovalo množství TVOC do stěn a nábytku a větrací jednotka, která byla stále zapnuta, nedokázala tuto nepřetržitou emisi odvětrat natolik, aby nedošlo k přenastavení čidla, které pak vedlo k nižší citlivosti na emise VOC ke konci experimentu, v porovnání se začátkem experimentu. Vzhledem k tomu, že lokální maxima u poslední znečišťující aktivity dosáhla téměř vždy hodnoty 10 V, dá se předpokládat, že na krátkodobou reakci signálu neměla intenzita větrání vlivem netěsností téměř žádný vliv.

5. Závěr

Cílem této práce bylo zkoumat koncentraci VOC, zaznamenávanou zejména MOS čidly, v obytných prostorách, a to především z hlediska následného využití pro regulaci větrací jednotky. V teoretické části byla stručně shrnuta problematika větrání a znečišťujících látek ve vnitřním prostředí a následně byla provedena rešerše prací, které se již zabývaly VOC a jejich koncentrací ve vnitřním prostředí, která sloužila jako teoretický základ, na kterém se následovně stavěla praktická část. Ta se skládala ze dvou částí – koncentrace VOC v prostředí rodinného domu a implementace algoritmů pro regulaci větrací jednotky. V první části této práce byly odhaleny limity MOS VOC čidel, kdy se ukázalo, že rozdílná čidla mohou zaznamenávat zcela jiné hodnoty, pravděpodobně proto, že jsou kalibrovány na jiné látky ze spektra VOC. V druhé praktické části byl zkoumán vliv použití algoritmů na regulaci větrací jednotky. Tento postup prokázal potenciál pro budoucí postupy při regulaci větrací jednotky podle aktuální potřeby.

Výstupem této práce je položení základu pro užívání algoritmů práce s VOC signálem pro řízení větrací jednotky, nicméně aby se takové řešení mohlo začít široce využívat, je zapotřebí dalšího výzkumu. Ukázalo se také, že pouze MOS VOC čidla sama o sobě v blízké budoucnosti pravděpodobně nebudou stačit jako indikátor kvality vnitřního prostředí, zejména z důvodu pochybně fungující automatické kalibrace, dobře se ale doplňují s čidly CO₂, které nevykazují podobné problémy, a i při dlouhodobému vystavení zvýšené koncentraci nedochází k jejich znečitlivění.

Tato práce je přínosem zejména v oblasti „chytrého“ větrání, pro které představuje alternativu současných řešení.

Bibliografie

- [1] *Air quality in Europe — 2013 repor.* 1. Kodaň: European Environment Agency, 2013. ISBN 978-92-9213-406-8. ISSN 1725-9177.
- [2] MOLHAVE, L. Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. *Indoor Air.* 1991, (4), 357-376.
- [3] KOLAŘÍK, Jakub. *CO2 SENSOR VERSUS VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOC) SENSOR – ANALYSIS OF FIELD MEASUREMENT DATA AND IMPLICATIONS FOR DEMAND CONTROLLED VENTILATION.* Lyngby, Dánsko, 2014. DTU.
- [4] *2021 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS.* IS. 180 Technology Parkway, Peachtree Corners, GA 30092: ASHRAE, 2012. ISBN ISBN 978-1-947192-89-8.
- [5] *Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings.* In: . Italy: Comission of the European Communities, 1992, číslo 11.
- [6] GÓRKA, M. a D. LEWICKA-SZCZEBAK. One-year spatial and temporal monitoring of concentration and carbon isotopic composition of atmospheric CO₂ in a Wrocław (SW Poland) city area. *Applied Geochemistry.* 2013, **35**, 7-13. ISSN 08832927. Dostupné z: doi:10.1016/j.apgeochem.2013.05.010
- [7] *Indoor Air Quality: Organic Pollutants.* Copenhagen: WHO Regional Office for Europe (EURO Reports and Studies No. III), 1989.
- [8] *ISO 16000-6.* 3. Great Britain: ISO, 2021.
- [9] SALTHAMMER, Tunga. TVOC-REVISITED. *Environment International.* 2022, **2022**(167), 1-19. ISSN 18736750.
- [10] MøLHAVE, L. Total Volatile Organic Compounds Quality Investigations. *Indoor Air.* 1997, **7**(4), 225-240.
- [11] WOLKOFF, Peder. Volatile Organic Compounds-Sources, Measurments, Emissions, and The Impact on Indoor Quality. In: *Indoor Air: International Journal of Indoor Air Quality and Climate.* 3/95. Copenhagen: National Institute of Occupational Health, 1995, s. 11-57. ISBN 87-16-15184-4. ISSN 0908-5920.
- [12] SARKHOSH, Maryam, Ali NAJAFPOOR, Hosein ALIDADI, Jamal SHAMSARA, Hanieh AMIRI, Tittarelli ANDREA a Fatemeh KARIMINEJAD. Indoor Air Quality associations with sick building syndrome: An application of decision tree technology. *Building and Environment.* 2021, **188**. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2020.107446
- [13] ČSN EN 15665. *Větrání budov – Stanovení výkonových kritérií pro větrací systémy obytných budov Z1.* 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] JOHANSSON, Dennis a Lotti LINDSTRIL. *Measured indoor temperature, moisture supply occupancy and mixed gas concentrations in apartment buildings*

- *correlation between parameters*. Karlstadt, Švédsko, 2012. Sweden Karlstad University, Lund University.
- [15] A., ABDUL-HAMID, EL-ZOUBI S. a OMID S. *EVALUATION OF SET POINTS FOR MOISTURE SUPPLY AND VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS AS CONTROLLING PARAMETERS FOR DEMAND CONTROLLED VENTILATION IN MULTIFAMILY HOUSES*. Lund, Švédsko, 2014. Lund University.
- [16] ABDUL HAMID, Akram, Dennis JOHANSSON, Åsa WAHLSTRÖM a Victor FRANSSON. The impact of a DCV-system on the IAQ, energy use, and moisture safety in apartments - a case study. *International Journal of Ventilation*. 2022, **21**(1), 35-52. ISSN 1473-3315. Dostupné z: doi:10.1080/14733315.2020.1818375
- [17] JELLE, Laverge. *TVOC concentrations measured in Belgium dwellings and their potential for DCV control*. Ghent, Belgie, 2017. Ghent University.
- [18] BIRKHOLM, P. a R. ANDERSEN. *HOLISTI SK ENERGIREN OVERING*. Lyngby, 2021. Bakalářská práce. DTU.
- [19] Z., Hanyu, Xuejun W. a Xianbao S. Chemical characterization of volatile organic compounds (VOCs) emitted from multiple cooking cuisines and purification efficiency assessments. *Journal of Environmental Sciences*. 2023, (130), 163-173. ISSN 1001-0742.
- [20] T., Wei, Wenwen L. a Xia S. Emission characteristics, environmental impact assessment and priority control strategies derived from VOCs speciation sourced through measurement for wooden furniture-manufacturing industry in China. *Science of The Total Environment*. 2023, (877), 162-287. ISSN 0048-9697.
- [21] WANG, Nijing, Lisa ERNLE, Gabriel BEKÖ, Pawel WARGOCKI a Jonathan WILLIAMS. *Emission Rates of Volatile Organic Compounds from Humans*. 2022, **56**(8), 4838-4848. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.1c08764
- [22] PINHEIRO, C.L., O. TARANTO a E. TOMAZ. Study of volatile organic compounds (VOCs) emitted by orange bagasse drying process. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018, (114), 16-24. ISSN 0957-5820.