



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra technických zařízení budov

Holistický pohled na personalizované větrání

Holistic view on personalized ventilation

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. arch. Vojtěch Mazanec

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Pozemní stavby

Školitel: Prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

Praha, 2020



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Vojtěch Mazanec

Název disertační práce: Holistický pohled na personalizované větrání

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Prof. Ing. Karla Kabeleho, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

Návrh personálního větrání pracoviště řídicího letového provozu + funkční vzorek zařízení, Smlouva o dílo č. 224/2015/IS/186

a

OP PIK: Vzduchotechnická jednotka s termoelektrickým chlazením a ohřevem

CZ.01.1.02/0.0/0.0/17_107/0012468

V Praze dne

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval svému školiteli, prof. Ing. Karlovi Kabelemu, CSc., v první řadě za inspiraci k doktorskému studiu, vytvoření hlubokého vztahu k vědě i řešenému tématu a odborné i lidské vedení během práce a za trpělivost při sledování mých neúspěchů a neutuchající podporu i v období, kdy psaní této práce uvázlo na mrtvých bodech.

Poděkování patří i celému kolektivu lidí na katedře TZB ČVUT a na UCEEBu a lidem, kteří mi neváhali radit či asistovat se složitými technologiemi a postupy, případně konstruktivní kritikou dokázali vyvést ze slepé uličky. Zejména bych tu chtěl poděkovat Ing. Martinu Kny, Ph.D., Ing. Janě Horváthové, Ph.D. a Ing. Danieli Adamovskému, Ph.D.

Rád bych také poděkoval prof. Arsenu Melikovovi za přijetí na dánské univerzitě, odborné vedení a inspiraci. Také celému doktorandskému kolektivu na DTU za přijetí a podporu.

V neposlední řadě patří také velké poděkování mé ženě Ing. Haně Mazancové za neustálou podporu během práce, a hlavně vyčerpávající korekturu výsledného textu.

ANOTACE

Práce se zabývá problematikou vývoje personalizovaného větrání založeném na holistické analýze současných systémů. Je rozdělena podle hlavních cílů na čtyři základní části.

První část je zaměřena na vymezení personalizovaného větrání v jeho dnešních podobách, srovnání jeho výhod a limitů oproti aktuálně nejpoužívanějším systémům na základě současného stavu poznání a rešerši prototypů a aplikací.

V druhé části je využito předchozí rešerše k vytvoření komplexního analytického nástroje k holistickému posouzení vlivů jednotlivých systémů personalizovaného větrání. Holistickým posouzením je myšlen pohled ze všech zásadních směrů, tedy ekonomického, technologického, provozního a vlivu na kvalitu vnitřního prostředí pracoviště.

Třetí část se zabývá procesem vývoje nového zařízení pro pracoviště letového dispečera na základě skutečné poptávky. Pro proces vývoje byla zvolena metoda stage-gate (metoda výzkumných fází a hodnotících uzlů).

První fází je analýza prostoru pracoviště letových dispečerů a vyhodnocení požadavků na systém personalizovaného větrání. Pro určení vhodného systému bylo použito předchozího analytického nástroje.

Druhou fází je prvotní vývoj zařízení, který spoléhá z velké části na matematické modelování a prvotní měření jednotlivých komponent. Je zde ověřena vhodnost a použitelnost jednotlivých prvků a základní geometrie zařízení.

Třetí fází je vývoj reálného prototypu, jeho měření a následná optimalizace.

Ve čtvrté části je pak převedení prototypu na základě zpětné vazby od budoucího provozovatele do formy aplikovatelné v reálném provozu a přizpůsobení možnostem výroby a realizace.

Poslední fází procesu je pak žádost o udělení ochrany duševního vlastnictví pomocí užitého vzoru.

Čtvrtá část popisuje stručněji vývoj druhého typu zařízení, které je koncipováno více univerzálně a určeno pro provoz v běžných kancelářských provozech.

Poslední část práce se zabývá diskuzí a možným dalším navázáním na poznatky zjištěné během analýzy a vývoje.

ANNOTATION

The thesis is dealing with a development of personalized ventilation system based on the holistic analysis of contemporary devices. The thesis contains four parts sorted by main goals.

The first part is focused on definition of personalized ventilation in its contemporary forms, comparison of advantages and limits of personalized ventilation with currently used systems based on the current state of knowledge, and research of current prototypes and applications.

The second part uses the previous research to create a complex tool for holistic assessment of the effects of individual types of personalized ventilation systems. The holistic assessment means a view from all fundamental perspectives, i.e. economic, technological, and operational and impact on the internal environment of the workplace.

The third part deals with the process of developing a new device for the air traffic controller workplace, based on the actual assignment. The stage-gate method (a method composed of research phases and decision nodes) was used for the development process.

The first phase is the analysis of the space of the flight dispatchers' workplace and the evaluation of the requirements for the personalized ventilation system. A previous analysis tool was used to determine the appropriate system.

The second phase is the initial development of the device, which relies heavily on mathematical modeling and initial measurement of individual components. The suitability and applicability of individual elements and the basic geometry of the device are verified.

The third phase is the development of a real prototype, its measurement and subsequent optimization.

In the fourth part, the transfer of the prototype to the form applicable in real operation and adaptation to production based on feedback from the future operator.

The last stage of the process is then the application for the granting of intellectual property protection through a utility model.

The last fourth part is composed of discussion and possible further continuation of the research which would follow the findings found during the analysis and development.

OBSAH

OBSAH.....	7
1 Motivace.....	1
1.1 Aktuálnost tématu.....	1
1.2 Historie větrání a původ současných standardů.....	2
1.3 Pokročilá distribuce vzduchu.....	4
1.4 Výhody a limity pokročilé distribuce vzduchu.....	6
1.4.1 Výhody pokročilé distribuce vzduchu.....	6
1.4.2 Limity pokročilé distribuce vzduchu.....	11
2 Formulace cílů práce.....	13
3 Současný stav poznání.....	15
3.1 Kvalita vnitřního prostředí.....	16
3.1.1 Kvalita vzduchu.....	18
3.1.2 Tepelný komfort.....	21
3.2 Současné způsoby hodnocení větrání.....	27
3.2.1 Účinnost výměny vzduchu.....	27
3.2.2 Účinnost odvodu kontaminantů.....	28
3.2.3 Účinnost ochrany uživatelů.....	29
3.2.4 Celkové srovnání systémů.....	29
3.3 Současné aplikace osobního větrání.....	30
3.3.1 Integrace v dopravních prostředcích.....	30
3.3.2 Integrace v budovách.....	32
3.4 Vnější vlivy na efektivitu personalizovaného větrání.....	41
3.4.1 Mezní vrstvy lidského těla.....	42
3.4.2 Efektivita distribuce vzduchu na základě pozice vyústek.....	46
3.4.3 Vliv tvaru vyústky na efektivitu větrání.....	48
4 Použité metody.....	49
4.1 Analytické metody.....	49
4.1.1 Měření proudění vzduchu (PIV).....	49
4.1.2 Objektivní měření vnímání tepelně vlhkostního mikroklimatu pomocí termálního manekýna.....	51
4.2 Predikční metody.....	52
4.2.1 CFD simulace.....	52
4.3 Metoda vývoje: Stage-gate.....	58

5	Holistická analýza systémů personalizovaného větrání.....	59
5.1	Systém hodnocení.....	60
5.1.1	Kategorie úspor energie	62
5.1.2	Kategorie vnitřního prostředí.....	64
5.1.3	Vlivy na investiční náklady spojené s instalací systému	68
5.2	Výpočetní software.....	71
5.2.1	Vstupní parametry	71
5.2.2	Výpočetní prostředí.....	72
5.2.3	Výstupy hodnocení.....	73
5.2.4	Příklad hodnocení.....	74
6	Vývoj systému pers. větrání pro Řízení letového provozu (mkj-1).....	79
6.1	Podrobnosti projektu.....	79
6.1.1	Zadání	79
6.1.2	Pracovní tým.....	80
6.2	Aplikace stage-gate metody.....	80
6.2.1	Fáze 0: analýza	81
6.2.2	Fáze 1: základní vývoj systému.....	81
6.2.3	Fáze 2: optimalizace.....	82
6.2.4	Fáze 3: úpravy pro realizaci	83
6.2.5	Fáze 4: finální podoba a ochrana duševního vlastnictví	83
6.3	Analýza ATS sálu	84
6.3.1	Popis ATS sálu	84
6.3.2	měření a analýza dat ATS sálu.....	89
6.4	návrh řešení.....	99
6.4.1	Shrnutí zjištěných nedostatků.....	99
6.4.2	Koncept návrhu	100
6.4.3	Umístění jednotky a vyústek.....	101
6.4.4	Zdroj tepla a chladu.....	103
6.4.5	Parametry výstupního vzduchu	105
6.4.6	Výsledné Schéma konceptu MKJ 1.....	106
6.4.1	Očekávané působení na vnitřní prostředí.....	107
6.5	Prototyp pro analýzu proveditelnosti.....	109
6.5.1	Konstrukce prototypu	109
6.5.2	Měření prototypu.....	110

6.5.3	CFD model.....	113
6.5.4	Zhodnocení proveditelnosti.....	116
6.6	Návrhy a optimalizace jednotlivých prvků systému.....	117
6.6.1	Tělo jednotky	118
6.6.2	Vyústky	133
6.6.3	Rozvodná síť.....	149
6.7	Závěrečná podoba systému	152
6.7.1	Tělo jednotky	153
6.7.2	Rozvodná síť.....	154
6.7.3	Distribuční prvky.....	154
6.7.1	Vliv na tepelný komfort.....	155
6.7.2	Technická specifikace	157
6.8	Zhodnocení jednotky.....	158
6.8.1	Splnění zadání.....	158
6.8.2	Originalita řešení	158
6.8.3	Právní ochrana.....	159
7	Vývoj Stolní jednotky personalizovaného větrání (mkj-2).....	161
7.1	Zadání.....	161
7.2	Návrh řešení	162
7.2.1	Koncept.....	162
7.3	Optimalizace	165
7.3.1	Vývojové fáze vyústky	166
7.3.2	Výsledná podoba vyústky.....	167
7.4	Měřené parametry jednotky.....	170
7.4.1	Výkonové parametry.....	170
7.4.2	Výsledná podoba jednotky	171
7.5	Zhodnocení Jednotky	172
7.6	Pracovní tým	172
8	Návaznost na projekty.....	173
8.1	MKJ-1	173
8.2	MKJ-2	173
9	Navazující projekty a pokračování výzkumu.....	175
9.1	Univerzální jednotka personalizovaného větrání (MKJ-2.1).....	175
9.2	Aplikace systému Peltierových článků pro lokální větrací jednotky.....	177

9.3	Dynamický profil pro personalizované větrání	179
10	Závěr.....	181
10.1	Výsledky dizertace – vlastní přínos disertanta.....	181
10.2	Přínos pro praxi a rozvoj vědního oboru	181
10.2.1	Články autora	182
10.3	Splnění cílů.....	183
11	Literatura.....	187

Seznam zkratk a symbolů

ADI	<i>Air distribution index</i> (Index distribuce vzduchu)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Výpočtová dynamika tekutin)
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (Zařízení s vázanými náboji)
CMOS	<i>Complementary metal–oxide–semiconductor</i>
GWP	<i>Global warming potential</i> (Potenciál globálního oteplování)
IAQ	<i>Indoor Air Quality</i> (Kvalita vzduchu)
IEQ	<i>Indoor Environment Quality</i> (Kvalita vnitřního prostředí)
MKJ	Mikro klimatizační jednotka
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped yttrium aluminum garnet</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i> (Integrální laserová anemometrie)
PMV	<i>Predicted mean vote</i> (Předpověď středního tepelného pocitu)
PPD	<i>Predicted perc. of dissatisfied</i> (Předpovězený podíl nespokojených)
SVE	<i>Scale for Ventilation Efficiency</i> (Měřítko efektivity větrání)
TMS	<i>Thermal manikin sensation</i> (Vnímání termálního manekýna)
VOC	<i>Volatile organic compounds</i> (Těkavé organické látky)
VZT	Vzduchotechnika

1 MOTIVACE

1.1 AKTUÁLNOST TÉMATU

V dobách, kdy lidé žili převážně venku, budovy byly často otevřené nebo netěsné a čerstvý vzduch byl dostupný jak na venkově, tak ve městech, by téma osobního větrání vyznělo velmi humorně. Nicméně doba se mění stále a v poslední době velmi rychle. Na počátku minulého století bylo nucené větrání využíváno jen u velmi specifických budov. Cena energií nebyla tak vysoká a použití přirozené ventilace tak nebylo zdaleka tak nevhodné, lidé trávili mnoho času venku na čerstvém vzduchu, ať už z charakteru své práce, nebo trávení volného času, byli tak i daleko více navyklí na změny, které přinášelo střídání ročních období. I přesto už staří Egypťané pozorovali, že lidé dlouhodobě pracující v interiéru budov mají mnohem větší problémy s onemocněním dýchacích cest než ti, co pracovali převážně venku.

Současnost ale zahrnuje do interiérů většinu populace, ať už kvůli zcela odlišnému zastoupení práce v jednotlivých odvětvích, používaným technologiím a prostředí potřebnému k práci, nebo jen prostému pohodlí. Trávíme tak v interiéru budov nebo dopravních prostředků okolo 80–90 % [1] času a kvalita vnitřního prostředí má na nás mnohonásobně větší vliv, než na naše předky jen o několik generací zpět. Naše budovy se navíc stále více izolují a oddělují od světa venku, zprvu tepelně, později i svou vzduchotěsností. Změny nastávají tak rychle, že adaptace na nové systémy je relativně pomalá. Velmi dobře je to vidět v sektoru bydlení, kde bývá problém nedostatečné větrání nově zatěsněných objektů a kumulace škodlivin vznikajících provozem. Stejný problém však můžeme potkat i u větších staveb, například administrativních nebo školských budov, kde špatné vnitřní prostředí vede ke vzniku známého syndromu nemocných budov (SBS – sick building syndrome) [2].

V současnosti je tak větrání budov zásadním a důležitým tématem. Postupujícím trendem je řízeně větrat nejen velké objekty, ale i malé rodinné domy. S umělým větráním a umělým vnitřním prostředím obecně se tak náš organismus setkává většinu svého času a přijde mi závažné se tímto tématem zabývat podrobně a hledat cesty, jak vnitřní prostředí vytvořit pro člověka co nejpříjemnější, nejpřirozenější a nejzdravější. I z tohoto důvodu jsem se začal zajímat o personalizované (v české původní variantě také osobní) větrání, které, ač samo rozhodně není technologií novou, nachází kvůli měnícím se okolním parametrům stále větší a podstatnější uplatnění.

Aplikace personalizovaného větrání však v současnosti naráží na řadu zásadních problémů od legislativy po technické řešení a nedostatek informací, které ústí v situaci, kdy na českém trhu není dostupné žádné zařízení personalizovaného

větrání. Považuji tedy za důležité zabývat se tímto tématem a přispět k odbourávání těchto nepříznivých bariér.

1.2 HISTORIE VĚTRÁNÍ A PŮVOD SOUČASNÝCH STANDARDŮ

Ačkoliv je větrání budov výrazným aktuálním tématem, potřeba čerstvého vzduchu je ve společnosti známá již velmi dlouhou dobu. První normy, pravidla a technologie však nevznikaly pro budovy, ale pro místa, která nedostatkem vzduchu trpěla od nepaměti. Doly a šachty.

Potřeba těla zbavovat se při dýchání oxidu uhličitého byla známa už z konce 18. století, kdy tuto problematiku podrobně studoval otec moderní chemie A. Lavoisier [3]. Ve svých studiích došel k závěru, že přebytek oxidu uhličitého v prostoru je pro vnímání kvality vzduchu výraznější než snížené množství kyslíku.

První normy pro minimální množství vzduchu pak byly stanoveny o necelé půl století později Cornwallským důlním inženýrem T. Tredgoldem [4], který na základě měření odhadoval, že minimální biologická potřeba čerstvého vzduchu na osobu je přibližně 0,8 m³/h na odvod CO₂ a 5 m³/h na odvod vlhkosti. To však zdaleka nebralo v potaz otázku komfortu prostředí.

Tyto hodnoty byly postupně revidovány i pro komfort a budovy. Zde je nutné uvést, že již dlouhou dobu byl pohled na větrání rozštěpen na dvě větve [4]. Prvním byl pohled architektonicky-inženýrský, který zastával hodnoty nutné pro komfort uživatelů převážně z hlediska odérů a pocitu vydýchaného vzduchu a které byly spíše nižší. Druhý pohled byl lékařský, který vycházel mimo jiné ze zkušeností z Krymské a Americké občanské války, kde bylo jasné prokázáno, že šíření nemocí je významně vyšší v hůře větraných prostorách a podporoval výrazně vyšší hodnoty větrání.

Zásadní publikací (podle Klausse [4]), pak byla práce Ventilation and Heating od lékaře J. Billingse z roku 1893, která uváděla ideální množství čerstvého vzduchu na 85 m³/h na osobu. Hodnota klade důraz právě na šíření nemocí v budovách, mezi něž v té době patřila i velmi nebezpečná tuberkulóza. Z tohoto čísla pak odvozuje 50 m³/h čerstvého vzduchu jako minimum a 100 m³/h jako doporučenou hodnotu pro větrání. Hodnota 50 m³/h pak byla převzata jako minimum americkou asociací ASHAE (American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers). K dosažení požadovaných hodnot se tedy začalo využívat umělé větrání. Zprvu se používalo ventilátorů poháněných parou, ty ovšem bylo možné provozovat jen během otopné sezony. Až po obecné elektrifikaci bylo možné použít nezávislé elektrické ventilátory.

Tabulka 1: Změna paradigmatu ve filosofii větrání budov od roku 1800 [5]

Rok	Paradigma	Zdroje znečištění
2050 2025	Osobní estetika	Lidé, budovy a vnější prostředí
2000	Zdraví, produktivita, komfort	
1975	Komfort (+zdraví)	Lidé a budovy
1935	Komfort	Lidé
1900	Přenos infekcí	
1800	Otrava	

Od té doby se pochopitelně minimální i doporučené hodnoty mnohokrát měnily na základě nových studií i společenských požadavků. Přestože se historicky mění (a pravděpodobně dále měnit bude) filosofie a požadavky na větrání i zdroje znečištění (Viz Tabulka 1), vědecká činnost se doposud primárně soustředila na to, aby zjistila a zajistila potřeby uživatelů při využití větrání založeném na výměně celého objemu vzduchu v místnosti [3]. Na něm jsou postaveny i dnešní standardy větrání a z nich vycházející normy. Dnes jsme však dospěli do fáze, kdy tepelné ztráty budovy skrze větrání jsou procentuálně jedny z nejvyšších a současný trend snižování energií nás tlačí k úsporám i v tomto odvětví. Ovšem s úsporami na větrání si zásadně protirečí komfort uživatelů a snaha o úspory často vede k jeho zhoršení. I přes snahu o inovace leží stále kvalita vnitřního prostředí na celkovém množství čerstvého vzduchu přiváděného do místnosti, což možnosti úspor podstatně limituje. Zároveň se ukazuje, že ani dodržení současných standardů větrání nezaručí ve větším měřítku spokojenost s vnitřním prostředím, ani nedokáže zcela odstranit zdravotní komplikace spojené se špatným vnitřním prostředím budov (tzv. syndrom nemocných budov ‚sick building syndrome‘) [6] [7].

Problémy s vnitřním prostředím jsou zvláště výrazné u místností s velkým otevřeným objemem a velkou kumulací osob. Mohou to být například vestibuly nebo kinosály, ale zde člověk tráví relativně krátký pobytový čas, a tudíž by nás otázka komfortu nemusela tolik znepokojovat. Kritické to je ovšem u kancelářů typu open-space, které jsou také svým velkým objemem typické, ale na rozdíl od dříve jmenovaných v nich uživatelé tráví třetinu až polovinu pracovního dne (a tedy po započtení víkendů, svátků a dovolených až čtvrtinu svého života). Není se proto čemu divit, že právě odsud zaznívá výrazná kritika současných systémů větrání.

1.3 POKROČILÁ DISTRIBUCE VZDUCHU

Předchozí kapitola celkem zřejmě poukazuje na to, že současné větrání budov historicky i legislativně spočívá na větrání celého objemu místnosti a zaměřuje se tedy na vytváření ideálního a kvalitního unifikovaného prostředí. Způsob distribuce vzduchu je pak jen prostředek dosažení tohoto žádaného stavu. V současné době je tak komfort uživatelů velmi těsně spojen s objemem vzduchu, který do místnosti přivádíme. U velkých prostor větráme obvykle stejnou měrou místa lidmi dlouhodobě obývaná a místa, kde se lidé příliš nezdržují (například koridory), nebo se dokonce ani zdržovat nemohou (volné objemy nad obytnou zónou).

Pokročilá distribuce vzduchu je pojmem, který označuje systémy větrání, které cíleně podporují zónování místnosti, a tedy rozdílnost výměny vzduchu v jednotlivých provozních částech. Přívod vzduchu je koncipován tak, aby se čerstvý neznečištěný vzduch dostal primárně do prostor s vyšší pravděpodobností výskytu uživatelů a teprve sekundárně byly větrány zóny, kde se uživatelé dlouhodobě nezdržují a není od nich očekávaná vysoká potřeba koncentrace na práci. Druhou specifikou pokročilé distribuce vzduchu je možnost uživatelsky co nejsnadněji regulovat své bezprostřední okolí a nastavit si tak vlastní, co nejvhodnější parametry prostředí pracoviště.

Podle A. Melikova [1] můžeme popsat tři základní body, které pokročilou distribuci vzduchu definují:

Uživatelsky ovladatelné

Klíčovým prvkem pokročilé distribuce vzduchu je možnost snadno a přímo ovládat systém větrání tak, aby splňoval požadavky komfortu jednotlivých uživatelů a aby si v každé zóně mohl uživatel nastavit, pokud možno, co nejpřesněji vlastní parametry vnitřního prostředí. Systém tak musí být dostatečně flexibilní, aby změna nastavení měla reálně odezvu ve vnímaném stavu vnitřního prostředí v dané zóně (pokud uživatel nebude mít pocit, že se prostředí mění, nebude ovládání využívat), ale aby zároveň nastavení jedné zóny nemělo negativní dopady na zóny ostatní. Uživatelské ovládání by však mělo být limitováno hygienickými standardy a ekonomikou provozu.

Personalizované či personální (osobní) větrání

Druhý bod pokročilé distribuce vzduchu požaduje, aby bylo větrání čerstvého vzduchu efektivní a cílené, a tedy úzce lokální. V ideálním případě se čerstvý vzduch přivádí přímo do dýchací zóny uživatele a vznikající exhalace a škodliviny jsou naopak přímo od jeho osobní zóny odváděny. Toho je možné dosáhnout vhodným rozmístěním výústek přímo v jednotlivých zónách, ať už se jedná o pracovní místo v kanceláři, nebo omezený osobní prostor v dopravním prostředku či kině.

Oba anglické výrazy (tedy ‚personalised‘ a ‚personal‘ ventilation) se v češtině historicky překládají pojmem ‚osobní větrání‘, které sice výstižně popisuje pointu přivádění vzduchu cíleně do osobní zóny, ale zanedbává způsob, jak je toho dosahováno. Pokud bychom využili původní terminologie, pod personalizovaným větráním si můžeme představit spíše systém pevně zabudovaný v okolním prostředí (v nábytku, sníženém podhledu apod.), zatímco personální systémy naopak předpokládají zařízení spjaté s konkrétním uživatelem. Příkladem mohou být větrací systémy zabudované v headsetu [1], nebo v ochranných oblecích záchranných složek.

Původní český pojem ‚osobní větrání‘ v sobě zahrnoval obě zmíněné složky, pro účel této práce je využíván tedy hlavně jako nadřazený pojem pro obecně jakékoliv systémy přímé distribuce vzduchu. Pojmy ‚personalizované‘ a ‚personální‘ větrání jsou pak využívány hlavně v případě, že je potřeba oba systémy rozlišit.

Inteligentní

V současné době se pojem inteligentních zařízení používá snad u všeho, od hodinek, přes mobilní telefony až k budovám. V pohledu osobního větrání je tento pojem vázán k několika hlavním bodům.

První bod je jednoznačně potřeba provázání se systémem řízení centrálního větrání budovy. Personalizované jednotky jsou schopné získávat a shromažďovat data od obsazenosti místnosti (a s ním spojeným požadavkem na větrání) po individuální nastavení, a tedy preferenci jednotlivých uživatelů. Pokud s těmito daty nebude pracovat centrální vzduchotechnické zařízení, velká část možných benefitů a úspor osobního větrání nebude možné využít.

Druhým bodem je pak řízení větrání daného pracovního místa, kde lze využít prediktivního řízení a sensoriky k chytré reakci na fyziologické signály a potřeby člověka.

1.4 VÝHODY A LIMITY POKROČILÉ DISTRIBUCE VZDUCHU

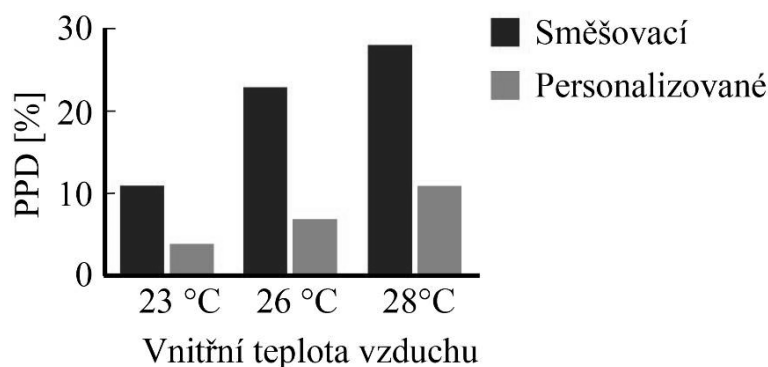
Pokud chceme vytvořit komplement či náhradu současné praxe, je potřeba znát, v jakých případech je současný systém vyhovující, a kde a čím je jeho využití limitováno a tyto body porovnat s výhodami a limity, které nám přináší či může přinést personalizované větrání. Není cílem této práce kritizovat současný funkční systém, pouze hledat nové cesty a řešení, které by rozšířily a optimalizovaly současný stav pro specifické provozy [8].

1.4.1 VÝHODY POKROČILÉ DISTRIBUCE VZDUCHU

1.4.1.1 Uživatelský komfort

Uživatelský komfort se stále častěji dostává do popředí zájmu při řešení větrání budovy a zdravé vnitřní prostředí je i součástí nové evropské legislativy [9]. Centrální systémy distribuce vzduchu vytváří jednotné prostředí pro celou místnost, které je ideálně pečlivě počítané tak, aby vyhovovalo co nejvíce lidem. I tak ale nikdy není možné vytvořit situaci, která bude vyhovovat všem (viz kapitolu 3.1.2.3) [10]. Ideálem centrálního systému je tedy zcela uniformní prostředí s co nejvhodnějšími předpokládanými podmínkami. Tento přístup je ale velmi zjednodušený a kromě toho, že vnitřní prostředí v budově nebude nikdy zcela homogenní, zcela ignoruje také individuální rozdíly mezi lidmi, jejich činnostmi, oblečením, zdravotním i fyzickým stavem, návyky, preferencemi a požadavky [1]. Jakákoliv drobná chyba v návrhu (případně jen odlišně postavený nábytek) pak může způsobit ještě větší nehomogenitu celého prostředí a vytvářet místa, kam se čerstvý vzduch vůbec nedostane.

Hlavní podstatnou výhodou pokročilé distribuce je právě důraz na jednotlivce a jeho požadavky. K uživateli je distribuován čistý upravený vzduch, který není znečištěn exhalacemi, drobnými částicemi a pachy. I při nižším objemu vzduchu ho tak uživatel cítí jako chladnější a kvalitnější. Díky přímé distribuci je zajištěný přívod vzduchu ke každému uživateli, a i možnost přizpůsobit si podmínky podle vlastních potřeb. Ty se mohou během pracovní doby měnit, a to ať už kvůli vnějším vlivům (například změně počasí, oslunění), nebo vnitřním vlivům (například příchod z chladné či vyhřáté místnosti, vliv metabolických dějů, horkých nápojů apod.). To vede obecně k vyššímu komfortu a spokojenosti s vnitřním prostředím [11]. Personalizované systémy rychle reagují na tyto situace a jsou tak schopné rychle se uživateli přizpůsobit v situacích, které centrální systém ani teoreticky nemůže zaznamenat.



Obr. 1: Porovnání procenta nespokojených (PPD index) mezi běžně používaným směšovacím větráním a personalizovaným větráním při různých teplotách interiéru. [12] [11] [8]

Výše popsané principy dobře vystihuje Obr. 1, který vykresluje rozdíl procenta nespokojených při různých teplotách interiéru při použití směšovacího větrání a personalizovaného větrání pomocí indexu PPD [11] (Predicted Percentage of Dissatisfied, viz kapitolu 3.1.2.3). Oba sloupce grafu jednoznačně stoupají se zvyšující se interiérovou teplotou vzduchu, ale výrazně se také mění rozdíl mezi oběma systémy. U personalizovaného větrání se i při 28 °C drží PPD index pod 10 %, zatímco u větrání směšováním bude s prostředím nespokojeno okolo 30 % uživatelů. Z tohoto modelu je patrná i možnost úspor energií na chlazení při instalaci personalizovaného systému při zachování či snížení počtu nespokojených osob.

1.4.1.2 Efektivita distribuce vzduchu

Vzduch přiváděný pomocí směšovacího (ale i při použití zaplavovacího či vytěšňovacího) systému větrání ve větší vzdálenosti od uživatelů má tu zásadní nevýhodu, že než se k jednotlivým osobám dostane, smísí se s okolním znečištěným vzduchem a jeho vlastnosti se tak významně zhorší. Přímo pro dýchání by mělo člověku postačit běžně kolem 1 m³/h [4] [13], dnešní standardy pro směšovací větrání se však podle činnosti pohybují od 25 do 90 m³/h na osobu [14]. Průměrně tedy upravujeme a přivádíme do místnosti až 50krát více vzduchu, než by bylo potřeba. Minimální množství vzduchu je sice velmi extrémní příklad (situace by byla použitelná například při využití personálních systémů v těsné blízkosti dýchací zóny), ale jednoznačně poukazuje na to, že v současných systémech máme výrazné rezervy v efektivitě distribuce a v budoucnu by tak bylo možné výrazně snížit náklady na větrání budov právě cílenou distribucí čerstvého vzduchu.

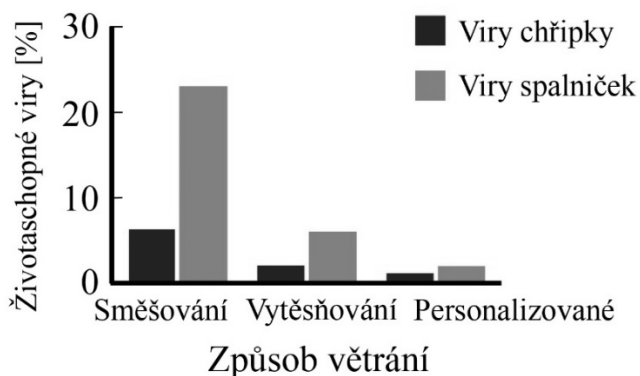
1.4.1.3 Vnější vlivy na distribuci vzduchu

I přes to, že centrální systémy distribuce jsou dobře zdokumentované mnohými měřeními a projekční podklady jsou obsáhlé, obvykle se větrání místnosti navrhuje bez zahrnutí vnitřních a vnějších vlivů, které mohou proudění vzduchu výrazně ovlivnit. Mnohdy je ani v potaz brát nelze, protože v době návrhu nejsou známy, nebo se během životnosti budovy mění. Část z nich se také mění i s ročním obdobím, denní dobou a obsazeností a provozem v místnosti. Ať už zmíníme konvekční proudy od vytápění a chlazení, které se liší podle využitých těles, plochy oken, které jsou v zimě výrazně chladnější a v létě naopak výrazně teplejší, než ostatní povrchy v místnosti a jejich teplota se mění podle denní doby a počasí, zařízení produkující velké množství tepla (počítače, lednice, větší tiskárny apod.), překážky v podobě nábytku, nebo samotné uživatele, jejich pozice a obsazenost místnosti. Samotným užíváním tedy vždy měníme proudění a distribuci vzduchu, a i pokud bychom využili nejmodernější techniky pro návrh, například CFD simulaci celé místnosti, nikdy nebudeme schopni přesně určit, co se bude na jednotlivých místech dít a jestli skutečně můžeme zaručit dostatečnou distribuci vzduchu pro všechny uživatele.

1.4.1.4 Šíření chorob

Není pochyb o tom, že distribuce vzduchu směřováním odvádí škodliviny a znečištěný vzduch z místnosti v dostatečném množství, aby byly splněny všechny potřebné požadavky. Ovšem už z principu směřování velká část škodlivin zůstává v místnosti a je rozptýlena do prostoru s přiváděným čerstvým vzduchem. To bohužel podporuje šíření a přenos případných infekcí mezi jednotlivými uživateli. Výrazně lepších výsledků dosahuje vytěšňovací větrání, zvláště pokud je směr šíření vzduchu odspoda nahoru a znečištěný vzduch je tak směřován mimo pobytovou zónu. Jak však lépe přerušit přenos chorob, než zaručit každému uživateli vlastní přívod čerstvého vzduchu?

Pozitivním vlivem osobního větrání na přenos chorob a biologického aerosolu se v současné době zabývá mnoho studií ([11] [13] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]) a dá se v současné době považovat za prokázaný. Nejvhodnější variantou se jeví možnost čerstvý vzduch přivádět do dýchací zóny a exhalace následně rovnou z dýchací zóny uživatele odvádět například nasáváním zabudovaným v opěrkách hlavy [20]. Zvláště ve stísněnějších prostorách (např. dopravní prostředky), v prostorách s vysokou koncentrací potenciálně infekčních lidí (nemocnice) [1] [21], nebo s vysokou koncentrací lidí obecně (konferenční sály, kinosály) je tento efekt velmi výrazně kladný. I v případě, že uživatel má pouze osobní přívod čerstvého vzduchu, má instalace personalizovaného větrání pozitivní dopad na šíření chorob, protože pouze minimální procento znečištění se šíří mezi zónami.



Obr. 2: Graf znázorňující přenos životaschopných virů chřipky a spalniček mezi pracovními místy při použití různých systémů větrání [8] [12] [17].

Na Obr. 2 můžeme vidět praktické měření přenosu virů chřipky a spalniček mezi pracovními místy při různých typech větrání [17]. Při větrání směšováním, jak už bylo naznačeno, je šíření infekce velmi vysoké, hlavně u virů s vysokou životaschopností, jako je právě spalničková infekce. U větrání vytěšňováním se šíření infekcí výrazně snižuje, ale teprve personalizované větrání jej dokáže téměř eliminovat. Snížením přenosu chorob pak klesá nemocnost na pracovišti a tím v principu i náklady zaměstnavatele na zaměstnance. Snížení přenosu chorob tak není pouze záležitostí hygieny a komfortu, ale také prvkem ekonomicky pozitivním.

1.4.1.5 Vliv na energetickou náročnost budov

Energetické úspory dosažitelné pomocí osobních systémů větrání jsou pochopitelně (jako téměř u všech systémů) velmi variabilní a náchylné na technické řešení i na provoz, do kterého jsou instalovány. Část možných úspor na větrání byla zmíněna už v předchozích kapitolách, celkově si ale můžeme úspory shrnout do těchto hlavních bodů [22]:

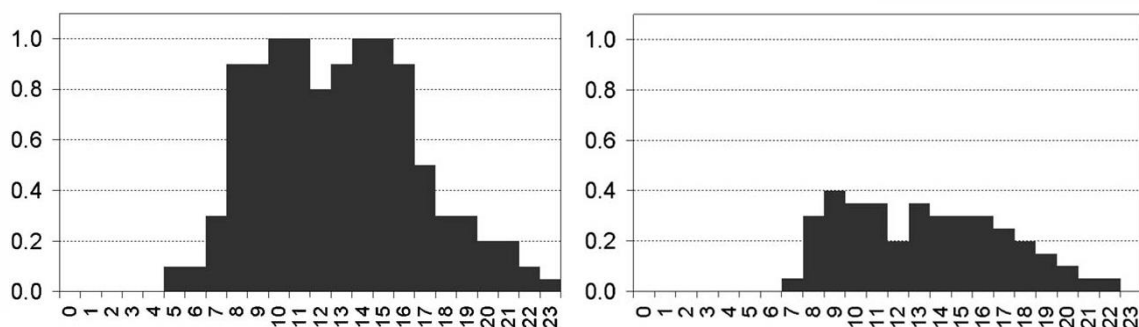
- **Snížení množství větracího vzduchu vzhledem k efektivnější distribuci**
- **Snížení množství větracího vzduchu vzhledem k obsazenosti místnosti**
- **Zvýšení maximální přípustné teploty interiérového vzduchu v letním období**

První způsob tedy sleduje zvýšení efektivity distribuce pomocí lokálních přívodů přímo na jednotlivá pracovní místa. Krátké trasy a možnost více větrat blízké okolí uživatele, a naopak méně mařit čerstvý vzduch pro prázdné a nevyužívané části místnosti mohou snížit množství potřebného větracího vzduchu opravdu rapidně. Zde velmi záleží na zvolené technologii a její schopnosti efektivně vzduch distribuovat. Technologie používající zatím nejméně větracího vzduchu jsou například přívody skrze mikrofon headsetu, kdy je čerstvý vzduch přiváděn přímo do dýchací zóny a dojde jen k jeho zcela zanedbatelnému smísení a znečištění okolním prostředím. Zde se tedy můžeme velmi přiblížit potřebné hodnotě 1 m³/h

na osobu, což by v mnoha provozech znamenalo nutnost upravit pouze jednu padesátinu objemu přiváděného vzduchu oproti směšovacímu větrání. U personalizovaných vyústek pak sice nebude úspora tak výrazná, ale (v závislosti na zvoleném systému) lze ušetřit i desítky procent objemu přiváděného vzduchu. Taková úspora bude mít vliv nejen na ekonomiku provozu, ale také na nutnou počáteční investici do vzduchotechnických zařízení.

O druhém způsobu již pojednává kapitola 1.4.1.1. Jedná se o možnost zvýšit teplotu interiéru v horkých obdobích i o několik kelvinů při zachování stejné míry vypočtené hodnoty PPD [11]. Zvýšení maximální požadované interiérové teploty v letních měsících má pak výrazný dopad na úspory energie potřebné pro chlazení [22].

Třetí způsob úspory energie je pak velmi závislý na provozu konkrétního objektu, protože využívá možnost snížit množství větracího vzduchu podle obsazenosti místnosti. Vzhledem k tomu, že jsou jednotlivá pracovní místa přímo regulována uživateli a na neobsazených místech jsou vypnuta. U intenzivně využívaných provozů tak bude úspora téměř nulová, zatímco u provozů s typicky nižší obsazeností se může opět vyšplhat na desítky procent.



Obr. 3 Graf porovnání obsazenosti (0-100 % na svislé ose) dvou odlišných provozů během dne (0-24 h na vodorovné ose). V prvním případě je obsazenost vysoká a prostor pro úsporu energie není zásadní, v druhém případě je ale naopak možnost úspory výrazná, protože obsazenost se běžně pohybuje pod 50 %, což centrální systémy neumí zohlednit [22]

Na Obr. 3 můžeme vidět dva profily obsazenosti, které byly využity pro studii úspor při použití personalizovaného větrání [22]. Vlevo je zobrazen provoz s vysokým vytížením, vpravo provoz s menší intenzitou obsazenosti. Ze studie vyplývá, že u intenzivního provozu se úspory pohybují mezi 1–36 % (podle denní doby), u méně intenzivního provozu jsou však úspory od 25 do 51 %.

Abychom však zahrnuli i negativní vlivy, je potřeba zmínit, že osobní větrání může znamenat větší tlakové ztráty z rozvodů, a tedy i zvýšit energetické nároky ventilátoru. V případě lokálních větracích jednotek obsahujících ventilátory (popř. dohřev a dochlazení) je nutné zahrnout i jejich spotřebu na každé pracoviště. Tato spotřeba je však obvykle jen zlomkem spotřeby např. osobních počítačů.

1.4.2 LIMITY POKROČILÉ DISTRIBUCE VZDUCHU

1.4.2.1 Technologie a zastoupení na trhu

Vzhledem k tomu, že pro splnění hygienických a energetických standardů v budovách je dnes nucené větrání téměř nutností, rozvoj a aplikace nuceného větrání a vzduchotechnických systémů postoupil prudce dopředu. V současnosti nám tento pokrok zaručil dosažení velmi vysoké technologické úrovně a znalostí v tomto oboru. Jednotlivé prvky centrální vzduchotechniky od vyústek přes úpravu vzduchu až po sofistikované metody řízení jsou velmi efektivní a dostupné. Díky výrazné poptávce na trhu můžeme nalézt bezpočet variant zařízení a lze tak dnes vzduchotechnické systémy napasovat do téměř všech myslitelných situací, od historických objektů a rekonstrukcí, po speciální designové aplikace. Cenově se stávají stále dostupnější i prvky, které u nás byly dříve považovány za luxusní, například klimatizace.

Technologické řešení a trh je oproti tomu dnes pro systémy osobního větrání zásadním a podstatným limitem. Tyto systémy jsou pochopitelně technologicky výrazně obtížnější a investičně o něco nákladnější než systémy centrální, což vede k tomu, že trh zatím nabízí pouze naprosté minimum možných řešení pokročilé distribuce vzduchu a cena těch, které na trhu existují je i díky tomu oproti centrálním systémům výrazně vyšší. Tím spíše, že v současnosti se častěji používají personalizované prvky jako doplněk centrální vzduchotechniky, nikoliv jako primární způsob větrání a jsou vnímány jako něco méně potřebného či užitečného.

1.4.2.2 Projekční podklady a legislativa

Dalším podstatným limitem pro aplikaci osobního větrání je pak omezující legislativa, informovanost projektantů a také zcela chybějící projekční podklady. Vzhledem k tomu, že legislativa je přímo uzpůsobená centrální výměně vzduchu v místnostech, je pochopitelné, že tyto systémy se v jejím rámci i jednoduše navrhují, zatímco efektivně navrhnout systémy pokročilé distribuce vzduchu je v současné době velmi obtížné. Systémy pro výměnu celkového objemu vzduchu se také podrobně učí na technických školách, vysoká je informovanost odborné komunity o problematice, dostupnost projekčních podkladů u jednotlivých výrobců, k dispozici jsou potřebné výpočetní podklady a často i návrhový software.

I ve všech těchto parametrech pak pokročilá distribuce vzduchu zásadně pokulhává. Informovanost odborné a laické veřejnosti není velká, a i pokud by někdo chtěl reálně systémy osobního větrání projektovat, tvrdě narazí na nedostatek návrhových podkladů i nepřizpůsobivé legislativní požadavky. Velká část benefitů, které nám dovolují ušetřit energii pomocí pokročilé distribuce vzduchu, by totiž neprošla současnými hygienickými standardy, které kalkulují primárně s přímou výměnou vzduchu, případně dávkou čerstvého vzduchu

na osobu v místnosti, ale nezapočítávají efektivitu distribuce [14]. Tato bariéra by se ale snad měla prolomit jako první, protože nové návrhy legislativy s pokročilou distribucí vzduchu počítají. A s prolomením tohoto problému vznikne prostor pro rozvoj a rušení dalších limit.

2 FORMULACE CÍLŮ PRÁCE

Práce reaguje na stále se zvyšující požadavky na kvalitu vnitřního prostředí, které jdou ale v částečné opozici k požadavkům na snižování spotřeby energií. Hlavním cílem práce tak bylo přispět k rozvoji stavu poznání v oboru personalizovaného větrání a zhodnotit možnost aplikace těchto systémů jako řešení nedostatků a zvýšení kvality vnitřního prostředí v budovách.

Vzhledem k širší tématu se práce soustředí na zlepšení vnitřního prostředí v provozech, kde je jeho kvalita opakovaně silně diskutována a kde je výrazný prostor pro aplikaci právě personalizovaného větrání, tedy v kancelářích typu open-space. Tyto kanceláře mají dlouhodobě problém s distribucí a s řízením teploty vzduchu, velkým počtem lidí s často výrazně rozdílnými požadavky na vnitřní prostředí a obvyklé je i výrazné šíření škodlivin a infekcí. Vše dohromady pak vede k výraznému diskomfortu pracovníku, což snižuje jejich pracovní výkonnost a má negativní dopady na jejich zdravotní stav (například známý syndrom nemocných budov, ale i nemocnost obecně).

Vzhledem k tomu, že neexistuje v současnosti na domácím trhu žádné dostupné zařízení personalizovaného větrání, bylo potřeba vytvořit fungující prototyp, který by požadavkům odpovídal. V konkrétním kontextu tedy zařízení, které by dokázalo zlepšit kvalitu vnitřního prostředí osob pracujících v open-space kancelářích, a to jak v oblasti tepelné pohody, tak vnímané kvality vzduchu. Výsledné zařízení by mělo být cenově dostupné, aby byla možnost jeho pozdějšího uplatnění na trhu a technologicky aplikovatelné do co nejširšího množství provozů. Konkrétní návrh je však primárně určen a optimalizován pro instalaci do budovy řízení letového provozu, které projevilo o podobné řešení zájem a povolilo nutný dotazníkový průzkum a měření situace v sálu letových dispečerů.

Aby však bylo možné vhodné řešení nalézt, bylo nutné na počátku podrobně analyzovat problematiku vnitřního prostředí, současný stav poznání v oblasti personalizovaného větrání a provést jejich holistický rozbor. Holistickým rozbohem je v tomto případě myšleno zhodnocení daných zařízení ve všech pozitivních a negativních jevech, které jsou pro tyto systémy větrání podstatné, tedy hlavně jejich dopady na kvalitu vnitřního prostředí, technické řešení, investiční náklady a náklady na provoz. Na základě tohoto rozboru je pak možné provést ideový návrh tak, aby co nejvíce pasoval do požadavků zadání, a to jak provozních, tak uživatelských.

Cíle práce tak lze shrnout do několika bodů:

- 1) Zpracování rešerše současného stavu poznání systémů personalizovaného větrání:
 - co je to personalizované větrání, srovnání se současnými systémy větrání,
 - kvalita vnitřního prostředí, složky, požadavky legislativní interindividuální preference vs. uniprostředí.
- 2) Holistická analýza systémů personalizovaného větrání a její aplikace na stávající i navrhované systémy z hlediska:
 - kvality vnitřního prostředí,
 - investičních nákladů,
 - provozních nákladů.
- 3) Analýza kvality vnitřního prostředí a určení vhodné aplikace systému personalizovaného větrání za pomoci:
 - dotazníkového průzkumu a fyzického měření,
 - analýzy vnitřního prostředí a možností jejich řešení na základě holistického posouzení.
- 4) Vývoj vhodného zařízení pro řešení zjištěných nedostatků kvality vnitřního prostředí za použití těchto metod:
 - 3D modelování,
 - CFD modelování,
 - 3D Tisk,
 - stage-gate metoda vývoje.
- 5) Vyhodnocení dopadu zařízení na kvalitu vnitřního prostředí za použití:
 - termálního manekýna,
 - PIV anemometrie.
- 6) Podání žádosti o ochranu duševního vlastnictví

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Definovat rozmezí řešené problematiky pro řešerši současného stavu poznání bylo samo o sobě docela komplikovaným úkolem. Zařízení pro personalizované v sobě zahrnuje velké množství samostatných jevů a součástí a nebylo možné se dopodrobna zabývat veškerými zahrnutými tématy. Pro bližší představu lze stručně shrnout, co všechno hrálo zásadní roli při návrhu a čím se autor práce dopodrobna zabýval:

- Kvalita vnitřního prostředí a jeho hodnocení
- Personalizované větrání a jeho aplikace
- Mezní konvekční vrstvy lidského těla a jejich vliv na vnímané prostředí a efektivitu distribuce vzduchu
- Výměníky tepla, tepelné trubice
- Peltierovy články a jejich řízení
- Senzory a řízení teploty
- Aerodynamika a obrazy proudění na vyústkách
- 3D modelování
- CFD modelování
- 3D tisk
- Ventilátory

Z tohoto výčtu je tedy v práci dopodrobna popsáno to zásadní, co mělo na práci vliv. A tím je v první řadě kvalita vnitřního prostředí, její vnímání, měření a dopady, které na ní mají jednotlivé činitele. V druhé řadě pak personalizované větrání, jeho aplikace a specifické podmínky využití.

3.1 KVALITA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

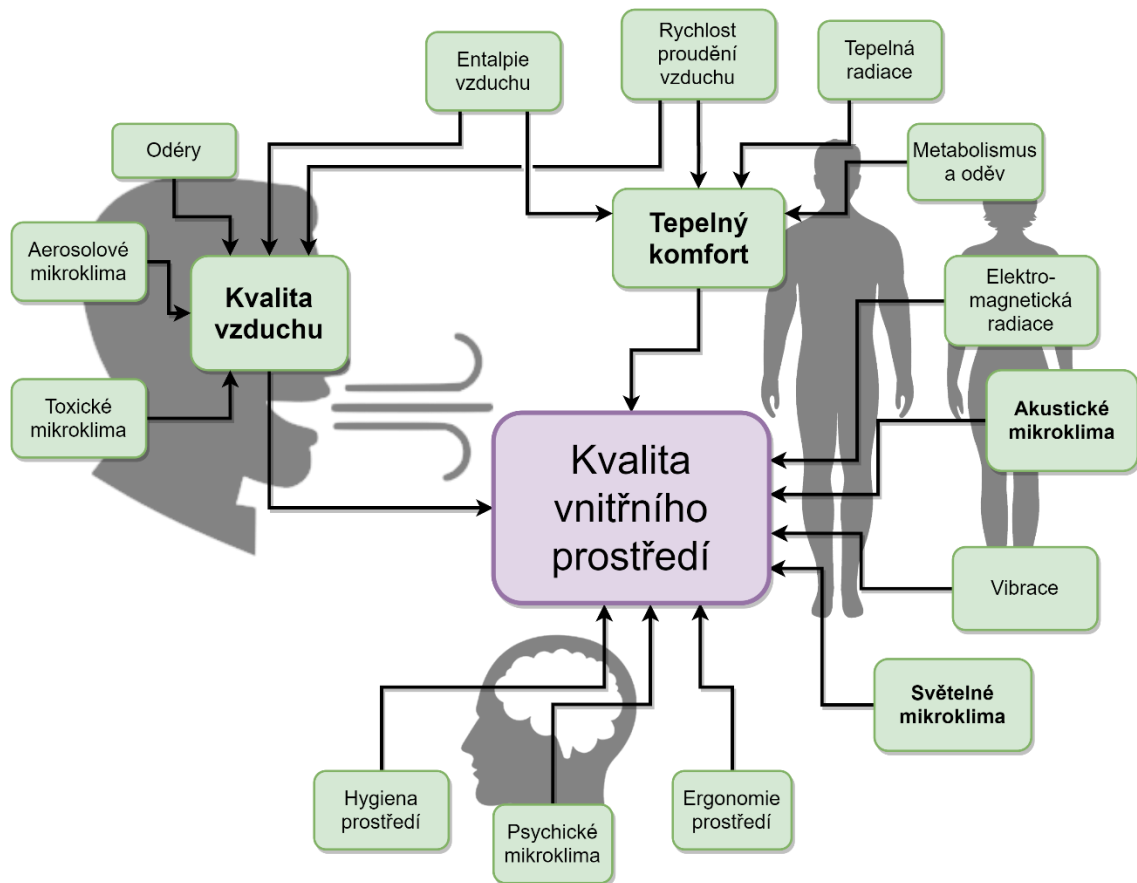
Zlepšení kvality vnitřního prostředí na pracovištích je jedním z hlavních cílů práce. Bylo proto nezbytné pečlivě rozebrat a analyzovat jednotlivé pohledy na tuto problematiku, aby bylo možno posoudit složky kvality vnitřního prostředí, na které může mít personalizované větrání přímo vliv.

Z pohledu legislativy jsou požadavky na vnitřní prostředí definovány takto [23] [24]:

Tabulka 2: Předpisy stanovující limity pro jednotlivé faktory vnitřního prostředí [23]

Typ prostředí	Předpis	Existují limity pro:
pracovní	NV č. 361/2007 Sb., ve znění NV č. 93/2012 Sb. a NV č. 9/2014	MKL, chemické látky a prašnost, osvětlení, větrání
stravovací	vyhláška č. 137/2004 Sb. ve znění č. 602/2006 Sb.	žádné limity se neuvádí
školské	vyhláška č. 343/2009 Sb.	MKL, osvětlení, větrání
pobytové	vyhláška č. 6/2003 Sb.	MKL, chemické látky a prašnost, výskyt mikroorganismů, výskyt roztočů
bazény, sauny	vyhláška č. 238/2011 Sb.	MKL, osvětlení, větrání, mikrobiální kontaminaci vody
vnitřní prostředí staveb	vyhláška č. 268/2009 Sb. ve znění vyhlášky č. 20/2012 Sb.	větrání, koncentrace CO ₂
NV = nařízení vlády		
MKL = mikroklima (teploty, relativní vlhkost, rychlost proudění vzduchu)		

Legislativní požadavky ovšem definují minimální požadavky, které jsou obvykle spjaté s ohrožením zdraví uživatelů budovy. Pokud bychom chtěli hodnotit požadavky na vnitřní prostředí komplexněji, musíme nahlédnout do publikací, které se tímto tématem ve světě zabývají. Sestavit podrobný graf vzájemných vztahů a posoudit možné dopady jednotlivých faktorů vnitřního prostředí bylo velmi obtížné, vzhledem k velkému množství názorů na jeho jednotlivé složky a vzájemné vlivy (z pramenů uvedme například [5] [25] [26] [27] [23] [28] [24]). Finální graf (Obr. 4) tak zohledňuje nejčastěji vyskytované složky z pohledu jejich vnímání uživatelem daného prostředí.



Obr. 4: Vlivy na kvalitu vnitřního prostředí a jejich propojení s vnímanými smysly (Zdroj: Autor)

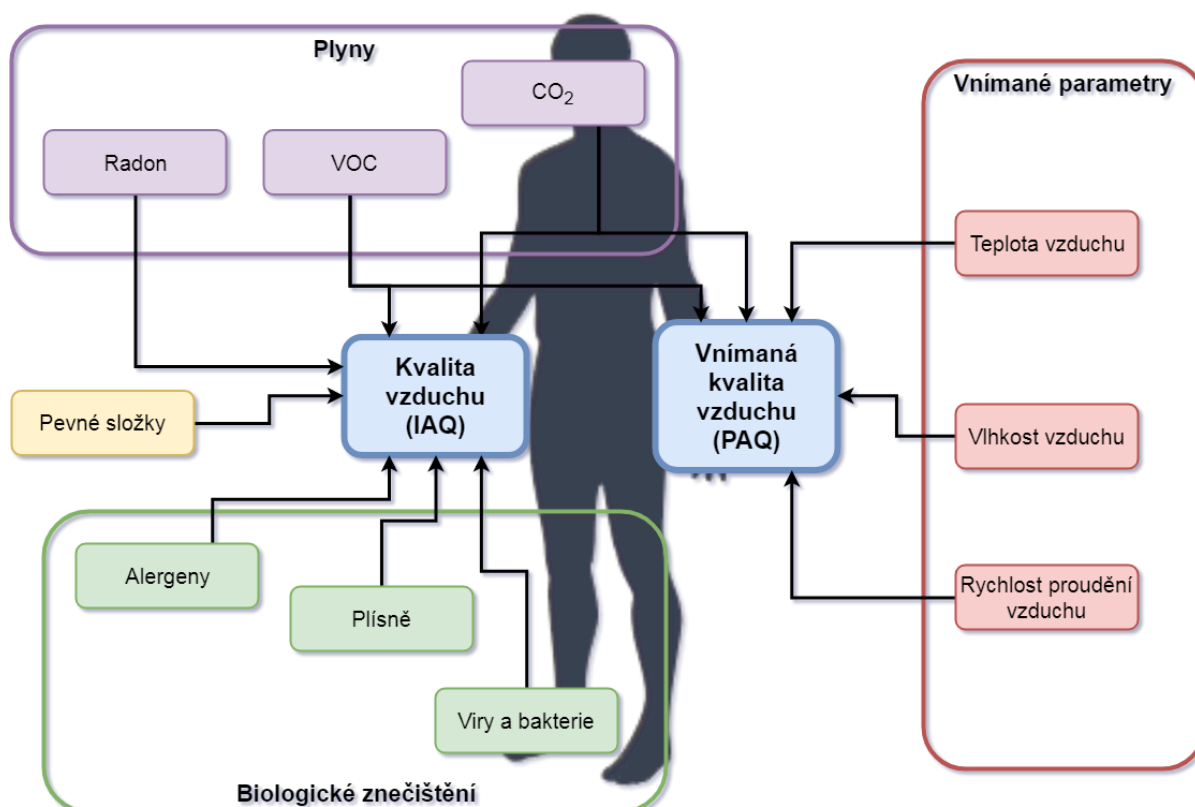
Mezi parametry, které můžeme ovlivnit pomocí personalizovaného větrání, můžeme zařadit primárně složky prostředí vázané k distribuci čerstvého vzduchu a úpravy teploty, tedy hlavní složky kvality vzduchu a tepelného komfortu. Tyto dvě hlavní skupiny jsou proto podrobně rozebírány v kapitolách níže. Personalizované větrání však částečně ovlivňuje i psychické vnímání prostředí (možnost nastavit, a tedy přímo ovlivnit své prostředí) a podle daného zařízení může ovlivňovat i akustické mikroklima skrze vyšší rychlosti proudění u výustek nebo aplikací zdrojů hluku (ventilátorů) v blízkosti pracovního místa.

3.1.1 KVALITA VZDUCHU

Kvalitu vzduchu řadí do posuzování kvality vnitřního prostředí každý ze zmíněných zdrojů, rozdíl ovšem je v tom, jaké složky řadit přímo do kvality vzduchu a jaké složky vytvářejí vlastní posuzovanou skupinu. Dále pak můžeme posuzovat subjektivní a objektivní vnímání kvality vzduchu, které také zahrnuje různé parametry prostředí různým způsobem. Obecně lze zařadit pod kvalitu vzduchu tyto složky vnitřního prostředí:

- Koncentrace škodlivin (toxické mikroklima)
- Koncentrace mikročastic (aerosolové mikroklima)
- Pachy (odérové mikroklima)
- Teplota a vlhkost vzduchu (entalpie)

Jednotlivé vlivy a jejich interakce na objektivní a vnímanou kvalitu vzduchu jsou zachyceny na Obr. 5. Lze je rozdělit do čtyř hlavních skupin: plyny, pevné složky, biologické znečištění a vnímané fyzikální parametry. Z posledně jmenovaného má na vnímanou kvalitu vzduchu vliv hlavně entalpie vzduchu [2] a rychlost jeho proudění [29].



Obr. 5: Vlivy prostředí na objektivní a vnímanou kvalitu vzduchu (Zdroj: Autor).

3.1.1.1 Objektivní kvalita vzduchu – IAQ

Objektivní kvalita vzduchu poukazuje převážně na reálné složení vzduchu a koncentrace škodlivin v něm obsažené. Mezi hlavní škodliviny v interiérech budov patří CO₂, vodní pára, ftaláty, těkavé organické látky (označované anglickou zkratkou VOC – volatile organic compound), formaldehyd a čisticí a kosmetické přípravky. Tyto látky mohou mít při vyšších koncentracích negativní vliv na zdraví a pohodu člověka [24]. Kvalita vzduchu ve vnitřním prostředí je podle ASHRAE zajištěna tehdy, „nejsou-li v něm obsaženy žádné škodlivé koncentrace znečišťujících látek určené odbornými autoritami, a pokud 80 % nebo více exponovaných uživatelů nevyjadřuje nespokojenost“ [24] [30]. Aby bylo zamezeno nepříznivým účinkům na zdraví lidí (či zvířat) a na komfort spojený s kvalitou vzduchu, jsou pro jednotlivé druhy znečišťujících látek stanovena jasná kritéria. V běžných provozech se ale pro indikaci kvality vzduchu běžně používá koncentrace CO₂, vzhledem k tomu že je snadno měřitelná a přímo odráží znečištění vzduchu přítomností a aktivitou lidí. Podle této hodnoty se také nejčastěji určuje požadavek na intenzitu větrání. Jemnějším indikátorem pachů a škodlivin je pak koncentrace těkavých látek (VOC), které jsou možnou budoucí alternativou (nebo doplňkem) pro hodnocení objektivní kvality vzduchu.

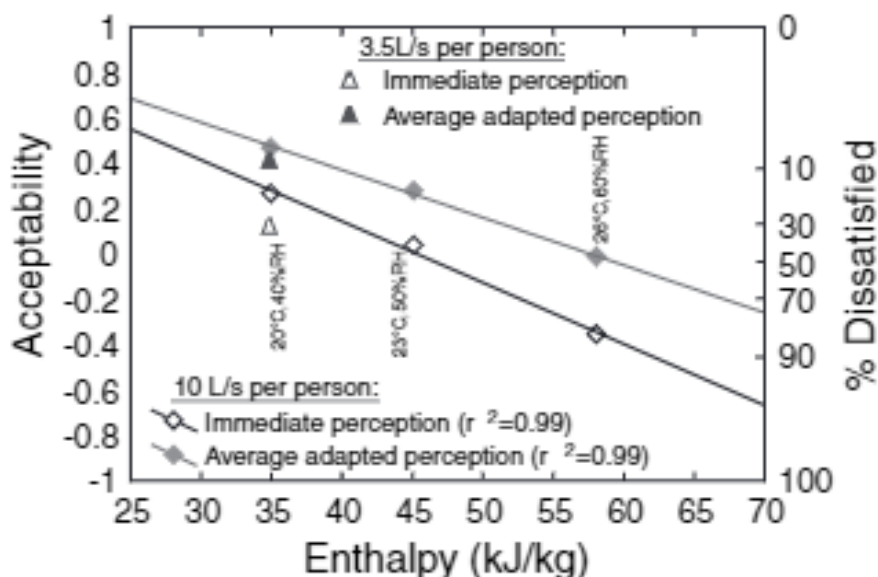
Legislativní požadavky určuje Vyhláška č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností některých staveb. Podle této vyhlášky jsou splněny (nebo pokládány za splněné) požadavky na kvalitu vnitřního prostředí staveb, nepřekročí-li střední hodnota hodinové koncentrace zjišťované látky v měřeném intervalu za standardních podmínek limitní koncentrace. Měřený interval zohledňuje variabilitu koncentrací zjišťované látky a reaguje na možnou expozici lidí v daném prostředí [23].

Tabulka 3: Limitní hodinové koncentrace chemických ukazatelů a prachu [23]

Ukazatelé	Hodinový limit v $\mu\text{g}/\text{m}^3$
oxid dusičitý (NO ₂)	100
frakce prachu PM ₁₀	150
frakce prachu PM _{2,5}	80
oxid uhelnatý (CO)	5 000
ozón (O ₃)	100
amoniak (NH ₃)	200
benzen (C ₆ H ₆)	7
toluen (C ₇ H ₇)	300
suma xylenů (C ₈ H ₁₀)	200
styren (C ₈ H ₈)	40
etylbenzen (C ₈ H ₁₀)	200
formaldehyd (HCHO)	60
trichloretylen (C ₂ HCl ₃)	150
tetrachloreten (C ₂ Cl ₄)	150

3.1.1.2 Subjektivní (vnímaná) kvalita vzduchu

Subjektivní kvalita vzduchu méně odpovídá exaktnímu měření a více tomu, jak se člověk v daném prostředí cítí. Do vlivů na vnímanou kvalitu vzduchu tak vstupuje teplota a vlhkost vzduchu (tedy entalpie vzduchu, jejíž vyšší hodnoty jsou vnímány převážně negativně [2] [29]), rychlost proudění v blízkém okolí lidského těla [29], psychické vjemy [31], pocity a subjektivní vnímání (stejnou vůni mohou dva lidé vnímat zcela odlišně) a v neposlední řadě i adaptace danému prostředí, které snižuje naši schopnost vnímat negativní jevy při dlouhodobé expozici a dynamicky přizpůsobuje fyziologické procesy lidského těla okolnímu prostředí (například pocení, třas) [24] [32]. Psychické vjemy a schopnost adaptace a dynamika lidského těla pak hrají klíčovou roli i v dalším faktoru, který ovlivňuje celkovou spokojenost člověka s okolním prostředím, a tou je možnost upravit jeho stav podle svých aktuálních představ.



Obr. 6 Závislost entalpie na vnímané kvalitě vzduchu [2]

Vnímaná kvalita vzduchu je v současnosti základem velké části standardů (ASHRAE, EN) a hodnotí procento uživatelů nespokojené s vnitřním prostředím [33]. Evropská norma i standardy ASHRAE používají vnímanou kvalitu jako kritérium pro stanovení požadavků na větrání a limitní hodnoty CO_2 .

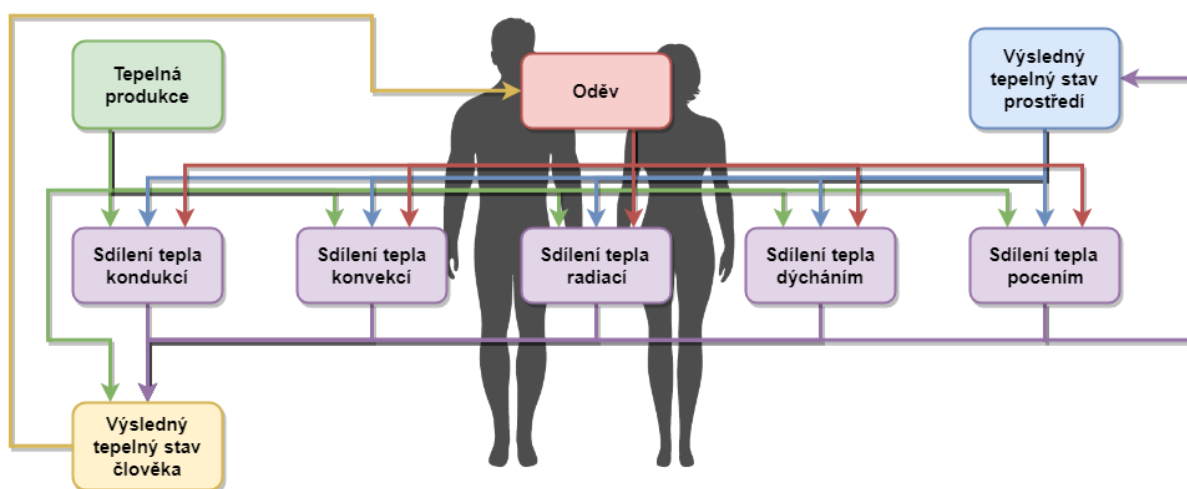
3.1.2 TEPELNÝ KOMFORT

Tepelný komfort je objektivní měřtko hodnocení tepelné pohody člověka a zahrnuje v sobě činitele vnitřního prostředí, aktivitu, fyzickou kondici a oděv osob, které obývají konkrétní vnitřní prostor. Tepelnou pohodu lze pak definovat jako stav, kdy díky vhodné okolní teplotě nemusí organismus lidského těla zapojovat žádný z termoregulačních mechanismů. Konkrétní teploty, které odpovídají tepelné pohodě, jsou v rozmezí 20 až 21 °C pro oblečené osoby a 28 až 30 °C pro osoby nahé. Ovlivňují ji však i další parametry, jako například psychický stav [34], který tuto hodnotu může upravit až o tři stupně. Při dosažení tepelné pohody tedy u člověka nepřevládají pocity chladu nebo tepla a je pro lidské tělo komfortní [35].

Různí autoři pak definují tepelný komfort takto:

- **Jokl (1969):** „Stav prostředí, kdy se lidé v daném prostoru cítí subjektivně co nejlépe a jsou tedy schopni maximálního fyzického nebo psychického výkonu či odpočinku.“ [36]
- **Fanger (1970):** „Stav, ve kterém největší procento osob z hodnocené skupiny vyjadřuje spokojenost s daným vnitřním prostředím.“ [36]
- **ASHRAE (2013):** „Stav myslí, který vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem v okolním prostředí a stanovuje se subjektivním hodnocením.“ [30]

Společným znakem těchto definic je popis stavu lidského těla (a myslí), kdy nedochází k negativnímu narušování neutrality tepelné rovnováhy člověka a okolního prostředí. Člověk tedy v danou chvíli nemá potřebu své prostředí jakkoliv měnit. Vztahy a souvislosti mezi tepelnou výměnou lidského těla a jeho okolím jsou podrobně zobrazeny na Obr. 7.



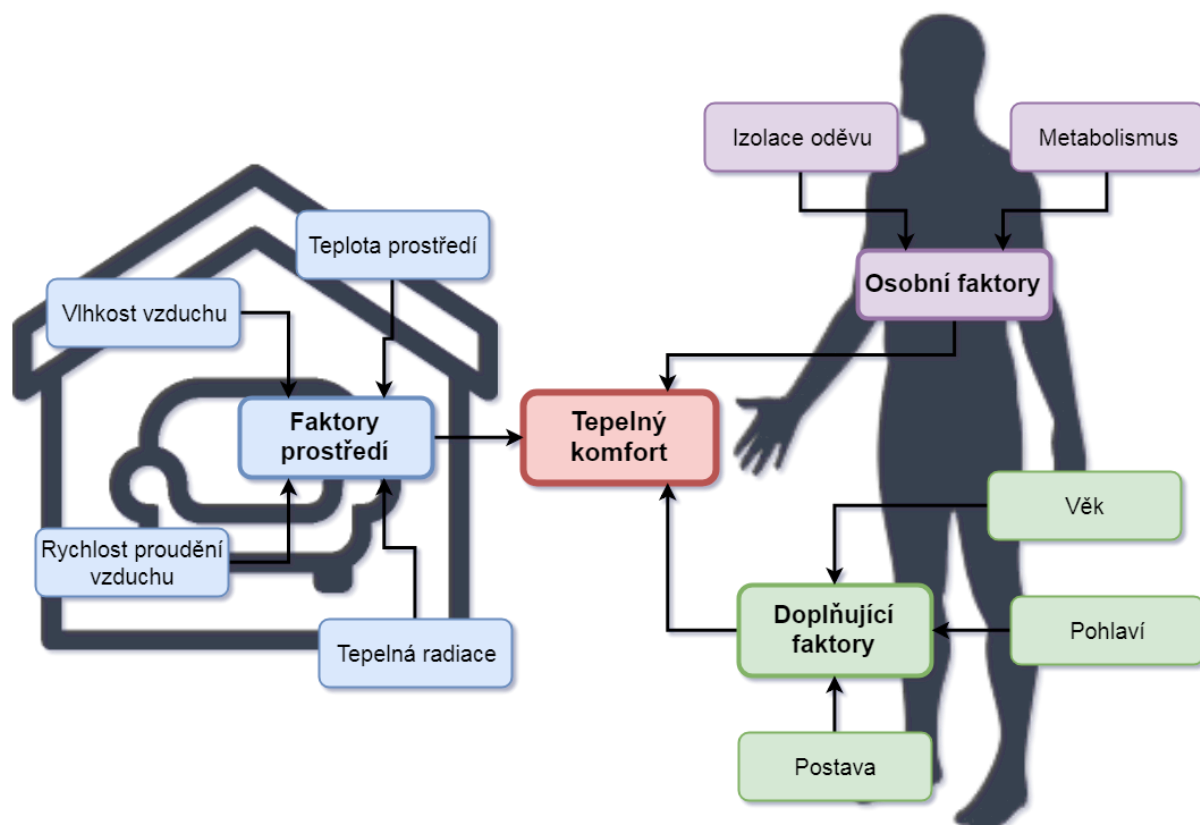
Obr. 7: Vztahy tepelné výměny lidského těla a okolního prostředí [10].

Jednotlivé vztahy zanesené v tomto grafu pak lze podle ČSN EN ISO 7933 a ČSN EN ISO 11079 [37] [38] zapsat pomocí rovnice takto:

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K_o + C + R + E + S \text{ [W/m}^2\text{]}$$

kde:

- M – hodnota metabolismu [W/m²];
- W – mechanická práce [W/m²];
- C_{res} – tepelný tok sdílený prouděním při dýchání [W/m²];
- E_{res} – tepelný tok odpařováním při dýchání [W/m²];
- K_o – tepelný tok vedením [W/m²];
- C – tepelný tok prouděním [W/m²];
- R – tepelný tok sáláním [W/m²];
- E – tepelný tok odpařováním z kůže [W/m²];
- S – akumulace tělesného tepla [W/m²].



Obr. 8: Faktory vstupující do vnímaného tepelného komfortu [10].

V praxi pak do tepelného komfortu vstupují tři základní skupiny činitelů: osobní faktory (metabolismus a izolace oděvu), faktory prostředí (teplota, vlhkost a rychlost proudění vzduchu a tepelná radiace) a faktory doplňující (věk, pohlaví, tělesná stavba). Pokud se tedy podíváme na schéma na Obr. 8, bude nám patrné, že i když vytvoříme dokonalé stejné vnitřní prostředí (levá polovina schématu),

osobní a doplňující faktory (pravá strana schématu) bude do vzájemného vztahu vnášet každý člověk zcela odlišné a odlišně tedy bude vnímat i výsledný tepelný komfort.

3.1.2.1 Hodnocení tepelného komfortu

Vzhledem k tomu, že v rámci této práce bylo nutné zhodnotit dopad finálního zařízení na tepelný komfort, je potřeba podrobně popsat, jak lze tepelný komfort reálně a objektivně hodnotit. Jedním z používaných přístupů, jak lze hodnotit tepelný komfort je pomocí kritérií. Kritéria tepelného komfortu zjednodušují popis daného tepelného prostředí tím, že obvykle kombinují dva a více parametrů tepelně-vlhkostního mikroklimatu do jedné proměnné. Díky tomu lze snáze popsat jak dané prostředí, tak tepelný stres, který je prostředím vyvoláván [10] [39]. Podle P. O. Fanger [26] a současné české legislativy [40] lze kritéria dělit na:

- **Empirická kritéria (založena na reálných měřených hodnotách)**
 - Efektivní teplota – ET
 - Upravená efektivní teplota – CET (Corrected Effective Temperature)
 - Ekvivalentní teplota – t_{eq}
 - WBGT index (Wet Bulb Globe Temperature)
 - Operativní teplota – t_o
- **Analytická kritéria (založena na teoretických pokladech nebo výpočetním modelu)**
 - P4SR index (Predicted four hour sweat rate)
 - HSI index (Heat stress index)
 - PMV index (Predicted Mean Vote)
 - PPD index (Predicted Percentage of Dissatisfied)
 - Nová efektivní teplota – ET (New Effective Temperature)
 - Standardní efektivní teplota – SET (Standard effective temperature)

Důležitým prvkem hodnocení jednotlivých kritérií je i tepelné prostředí, které podle současných mezinárodních standardů dělíme na chladné, mírné a horké. V každém prostředí jsou pak podstatná jiná kritéria. Normy rozlišují tyto kritéria takto:

Chladné prostředí (ČSN EN ISO 11079 - r. 2008)

Ergonomie tepelného prostředí – Stanovení a interpretace stresu z chladu pomocí potřebné izolace oděvu (IREQ) a místních účinků chladu [38]

Mírné prostředí (ČSN EN ISO 7730 - r. 2006)

Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu [41]

Horké prostředí (ČSN ISO 7243 - r. 1994)

Stanovení tepelné zátěže pracovníka podle ukazatele WBGT (teploty mokrého a kulového teploměru) a ČSN EN ISO 7933 [37] (r. 2005) - Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného stresu pomocí výpočtu předpovídané tepelné zátěže. [42]

Pro aplikaci v běžných kancelářských prostorách je nejpodstatnější posuzování tepelného komfortu v rámci mírného tepelného prostředí, proto se budeme dále zabývat primárně indexem PMV a PPD.

3.1.2.2 Predicted mean vote – PMV index

V současnosti je PMV index velmi často používaným kritériem objektivního hodnocení tepelného komfortu. Je to ukazatel, který souvisí s individuálním vnímáním tepelné pohody. Na základě odevzdaných hlasů velké skupiny osob předpovídá střední tepelný pocit člověka v místnosti. Podle O. Fanger je PMV index definován jako funkce rozdílu tepelného toku produkovaného lidským tělem a toku tepla, které tělu odebírá dané prostředí [26], což vychází z rovnice tepelné rovnováhy lidského těla (viz 3.1.2). V mírném prostředí se totiž termoregulační systém člověka automaticky pokusí modifikovat teplotu kůže vylučováním potu a udržovat tak tepelnou rovnováhu. Pro hodnocení se používá sedmibodová stupnice tepelných pocitů. Její rozpětí je od hodnoty -3 do +3, kde 0 je neutrální (komfortní) pocit, kladná čísla představují pocity od mírného tepla do horka, zatímco záporná čísla směřují od mírného chladu k pocitu zimy.

V ukazateli je fyziologická odpověď termoregulačního systému statisticky vztažena k výsledkům posouzení vlastního tepelného pocitu. PMV lze vypočítat pro různé kombinace metabolismu, izolace oděvu, teploty vzduchu, střední radiační teploty, rychlosti vzduchu a vlhkosti vzduchu. Ukazatel PMV je pochopitelně odvozen pro podmínky ustáleného stavu a neumí pracovat s velkými výkyvy okolních podmínek. Pokud však dochází k mírnému kolísání

jedné nebo více proměnných, musí být k hodnocení použity časově vážené průměry proměnných za jednu předchozí hodinu. Pro použití je také potřeba, aby se hlavní parametry výpočtu pohybovaly v daném rozmezí (viz Tabulka 4).

ČSN EN ISO 7730 [41] určuje maximální podíl nespokojených osob podle kategorie budovy, pro ukazatel PMV je to:

- kategorie A: $\pm 0,2$
- kategorie B: $\pm 0,5$
- kategorie C: $\pm 0,7$

Tabulka 4: Rozmezí veličin pro aplikaci PMV indexu [41]

Název veličiny	Označení veličiny	Min	Max	Jednotka
Hodnota metabolismu	M	46	232	W/m ²
		0,8	4	met
Tepelný odpor oděvu	I _{cl}	0	0,31	m ² ·K
		0	2	clo
Teplota vzduchu	t _a	10	30	°C
Střední radiační teplota	t _r	10	40	°C
Parciální tlak vodní páry	p _a	0	2700	Pa
Rychlost proudění vzduchu	v _{ar}	0	1	m/s

Parametr PMV lze podle české legislativy [41] stanovit jedním z následujících způsobů:

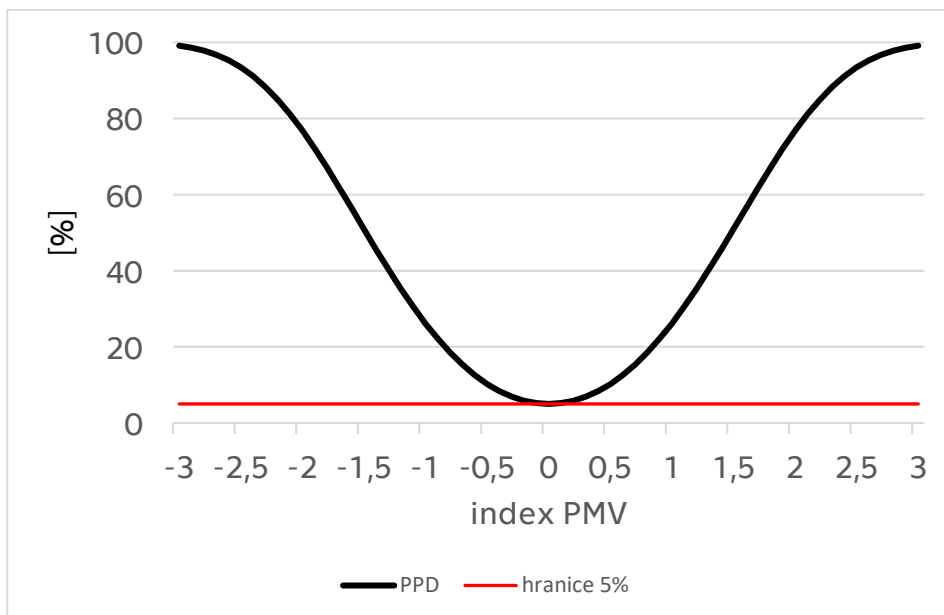
- **Z rovnice dle výpočetního modelu. Každý použitý program je třeba verifikovat dle přílohy D (tabulka č. 2) normy ČSN EN ISO 7730;**
- **Z přílohy E – normy ČSN EN ISO 7730, kde jsou uvedeny tabulky hodnot PMV pro různé kombinace činnosti, oděvu, operativní teploty a relativní rychlosti proudění vzduchu;**
- **Měřením za pomoci integrovaného čidla (ekvivalentní a operativní teploty).**

3.1.2.3 Predicted Percentage of Dissatisfied – index PPD

Ukazatel PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) předpovídá procentuální podíl nespokojených osob s tepelným prostředím. Pokud známe hodnotu indexu PMV, pak se podle normy ČSN EN ISO 7730 [41] hodnota PPD vypočítá jako:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) [\%]$$

Stanovit hranice tepelné pohody tak, aby vyhovovaly všem, je reálně nemožné, a to kvůli individuální fyziologii každého člověka, rozdílným izolačním vlastnostem různých oděvů, ale velký vliv má především i současné nastavení organismu, který se přizpůsobuje klimatu, kterému je dlouhodobě vystaven. Ve stejných podmínkách se bude vždy nacházet skupina lidí, kterým bude příliš chladno, a naopak ti, kterým se bude zdát místnost příliš temperovaná. Vyplývá to i z grafu funkce PMV (Obr. 9) kde pro PMV 0 je PPD roven 5 %.



Obr. 9: Graf závislosti PPD a PMV

Norma ČSN EN ISO 7730 [41] určuje maximální podíl nespokojených osob podle kategorie budovy. Pro ukazatel PPD je to:

- kategorie A: <6 %
- kategorie B: <10 %
- kategorie C: <15 %

Za vyhovující prostředí lze považovat takové, ve kterém bude alespoň 85 % všech uživatel spokojeno, což odpovídá rozsahu PMV od -0,7 do 0,7.

3.2 SOUČASNÉ ZPŮSOBY HODNOCENÍ VĚTRÁNÍ

Definice účinnosti větrání se objevila už v polovině dvacátého století, kdy vyvstala potřeba porovnávání jednotlivých systémů větrání a popisovala schopnost vzduchotechnického systému odvádět kontaminanty od osob v místnosti [43]. V současnosti se ovšem od větracích systémů očekává více než tato vlastnost a pro vzájemné srovnání jsou proto důležité tyto aspekty a hodnotící systémy [43]:

- Účinnost výměny vzduchu
- Účinnost odvodu kontaminantů
- Účinnost ochrany uživatelů
- Tepelný komfort

Všechny tyto aspekty jsou popsány v kapitolách níže, tepelný komfort je podrobněji rozebrán již v kapitole 3.1.2.

3.2.1 ÚČINNOST VÝMĚNY VZDUCHU

Výměna vzduchu za hodinu

Základním parametrem výpočtu účinnosti výměny vzduchu je výměna vzduchu za hodinu (h^{-1}), která popisuje, kolikrát se za hodinu vymění vzduch v místnosti. Tento parametr by byl postačující pouze v prostředí s dokonale unifikovanou výměnou vzduchu.

Stáří vzduchu (age of air/total air age)

Stáří vzduchu (age of air) je index, který poukazuje na čas, za který se čerstvý vzduch dostane na určité místo, přičemž bodem nula na časové ose je vyústka. Celkové stáří vzduchu (total air age) bere v potaz i recirkulaci vzduchu a na vyústce tak už není počítána nulová hodnota, ale bere se v potaz celý vzduchotechnický systém.

Účinnost výměny vzduchu

Účinnost výměny vzduchu, jak jí popsal Sandberg [44] je poměr mezi ideální distribucí vzduchu definovanou podle objemově průměrovaného stáří vzduchu pístového toku (volume-averaged air age of piston flow) a reálným objemově průměrovaným stářím vzduchu v místnosti. Index ale nebere v potaz rozložení zdrojů škodlivin ani uživatelů v rámci místnosti. Proto byla účinnost výměny vzduchu revidována a byla přidána hustota obsazenosti (occupied density) [45].

Indexy SVE (Scale for Ventilation Efficiency)

SVE indexy 1-6 patří mezi jedny z možných způsobů hodnocení účinnosti vzduchotechnických systémů založených na matematické simulaci (autoři S. Kato a S. Murakami [46] [47]).

Tabulka 5: Popis indexů SVE 1-6

Index	Popis	Původ
SVE1	Průměrná koncentrace škodlivin v místnosti	[46] 1988
SVE2	Průměrný poloměr oblasti šíření znečištění od zdrojů (dosah šíření škodlivin)	[46] 1988
SVE3	Normalizované stáří vzduchu, nebo normalizovaná koncentrace, pokud se předpokládá jednotný zdroj	[46] 1988
SVE4	Oblast vlivu zdrojů vzduchu	[47] 1994
SVE5	Oblast vlivu odvodních prvků	[47] 1994
SVE6	Zbývající životnost vzduchu v daném bodě (založená na časově obráceném sledování proudění)	[47] 1994

Dostupnost přiváděného vzduchu

Velká část indexů srovnávání systémů větrání pracuje s ustáleným prostředím. Aby bylo možné zahrnout i dynamickou složku, byl vytvořen index dostupnosti přiváděného vzduchu (Accessibility of supply air), který se používá například u systémů nouzového větrání v budovách. Index tak zahrnuje i časovou složku.

3.2.2 ÚČINNOST ODVODU KONTAMINANTŮ

Koncentrace škodlivin

Koncentrace škodlivin je opět základní hodnota, snadno vypočitatelná z intenzity zdroje znečištění, výměny vzduchu a koncentrace dané škodliviny v přiváděném vzduchu. Opět je to ovšem jen teoretický popis ideálního uniformního prostředí, který ve skutečnosti nenastává.

Účinnost větrání

Účinnost větrání (Ventilation efficiency) je základním indexem, který porovnává konkrétní popisovaný systém se směšovacím větráním, a to v účinnosti odvodu škodlivin od osob a je možné jí určovat pro celé místnosti, nebo pro konkrétní místa.

Dostupnost zdroje znečištění

Jako protiklad indexu dostupnosti čerstvého vzduchu byl navržen i index dostupnosti zdroje znečištění (Accessibility of contaminant source), který hodnotí dopad konkrétních zdrojů na měřený bod v prostoru a čase.

3.2.3 Účinnost ochrany uživatelů

Účinnost ochrany uživatelů se řeší převážně z pohledu větrání využívající systém chráněných pobytových zón (Protected occupied zone ventilation) a pro věrohodné porovnání s ostatními systémy. Jako hlavní index hodnocení je zde účinnost ochrany uživatelů (Protection efficiency).

3.2.4 CELKOVÉ SROVNÁNÍ SYSTÉMŮ

ADPI (The Air Diffusion Performance index)

ADPI je jeden z nejrannějších indexů pro nestejnorodé prostředí, který reaguje na potřebu vzájemného srovnání různých systémů větrání. Autoři: Koestel a Tuve jej poprvé uveřejnili už v roce 1955 [48]. Systémy větrání jsou hodnoceny na základě míry průvanu, který vytváří v pobytové zóně. Hraje zde tedy svou roli proudění vzduchu, i jeho teplota.

ADI (Air distribution index) a ADI_{New}

Pokročilejší způsob, ADI – Index distribuce vzduchu, na systémy větrání pohlíží z hlediska odvodu kontaminantů, odvodu tepelné zátěže a tepelného komfortu [49]. ADI a ADI_{New} se pak principiálně liší modelem tepelného komfortu, kde ADI počítá s uniformním prostředím (používá se jedno zónový model tepelného komfortu, například indexy PMV/PPD), zatímco ADI_{New} dokáže hodnotit i prostředí neuniformní a využívá více uzlové systémy měření prostředí [43].

3.3 SOUČASNÉ APLIKACE OSOBNÍHO VĚTRÁNÍ

3.3.1 INTEGRACE V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH

S pokročilou distribucí vzduchu se dnes setkáváme nejčastěji v dopravních prostředcích, a to od osobních automobilů až po letadla. Výraznou aplikaci personalizovaného větrání lze vysvětlit několika podstatnými faktory, kterými se dopravní prostředky podstatně odlišují od budov.

Jako první lze jmenovat podstatně menší objem vzduchu na jednotlivé uživatele, než jsme zvyklí u budov, a tedy rychlejší znečištění exhalacemi a pachy způsobujícími diskomfort. Vyšší je i podíl prosklených ploch v kabině, který spolu s nízkými izolačními schopnostmi dopravních prostředků, vnitřními zisky od technologií a osob a výraznou konvekcí během pohybu způsobuje podchlazení, či přehřívání interiéru. Odpovědí na oba problémy bylo nutně osobní větrání, které je schopné výrazně snížit, nebo zcela eliminovat diskomfort způsobený těmito faktory. Zároveň je aplikace chlazení a vytápění vzduchem technologicky snadná.

Podstatnou výhodou pro aplikaci pokročilé distribuce je poměrně jednoznačná definice místa, na kterém se uživatel dopravního prostředku po většinu doby nachází, a tak i snadná predikovatelnost jeho chování. Současná sedadla jsou velmi dobře ergonomicky uspořádaná a utvořená pro co největší komfort, s čímž se pojí relativně nízká variabilita pozic, které uživatel může zaujmout. V dané situaci je tedy poměrně snadné odhadnout, kam směřovat přiváděný vzduch.

Další podstatnou výhodou je vyšší koncentrace uživatelů a blízkost zdrojů energie i zdrojů čerstvého vzduchu, což ve srovnání s budovami podstatně zkracuje potřebné rozvody vzduchu.

3.3.1.1 Osobní přeprava

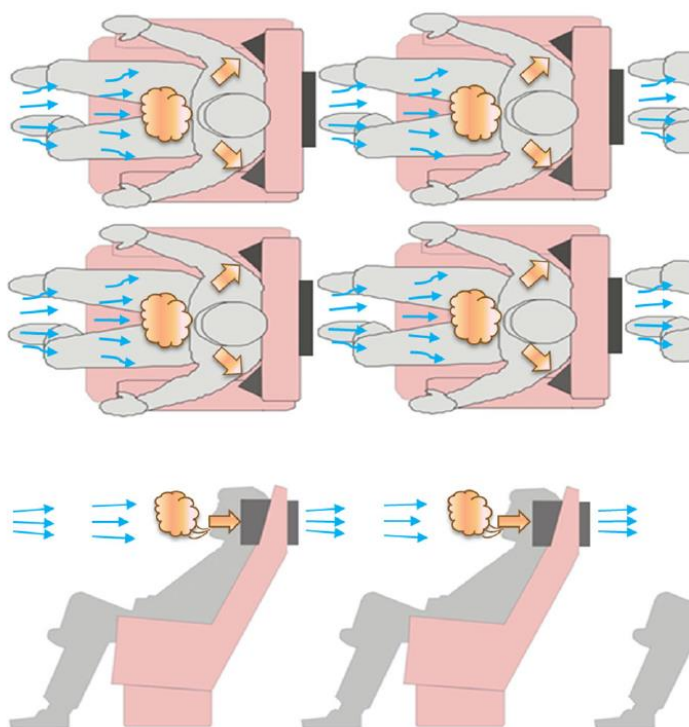
Automobilový průmysl jako jeden z prvních začal osobních vyústek využívat a nelze se tedy divit, že v současnosti disponuje jedním z nejrozvinutějších systémů pokročilé distribuce vzduchu. Dnes je běžné, že si každý uživatel samostatně může zvolit vlastní nastavení teplotních podmínek i množství přiváděného vzduchu na jednotlivé části těla podle dané situace a vlastních preferencí. A není se čemu divit, řízení vozidla vyžaduje vysoké soustředění a diskomfort řidiče toto soustředění snižuje, což u řízení (na rozdíl třeba od kancelářské činnosti) může mít fatální následky. V prostředí automobilu je také mnohem obtížnější (vzhledem k malému objemu vzduchu, vysokým rozdílům teplot okolních ploch a relativně vysokým vnitřním ziskům) udržet kvalitní vnitřní prostředí [50].

Větrání automobilů ovšem ukazuje i na nešvar, který s sebou pokročilá distribuce vzduchu přináší, tedy špatné nastavení a s tím spojené riziko zdravotních komplikací. Pokud uživatel není poučen a nevhodně zvolí množství a teplotu vzduchu, může docházet k několika negativním jevům:

- Vysychání očí
- Podchlazení a následná ‚ztuhlost‘ svalů
- Podchlazení dýchacích orgánů a respirační problémy

3.3.1.2 Hromadná doprava

Hromadná doprava, tedy především letadla a autobusy se liší od osobních aut větším prostorem a množstvím lidí uzavřených v jedné zóně. Vzhledem k tepelným ziskům častěji hrozí přehřívání a významným faktorem je množství vydýchaných škodlivin, pachů, ale také šíření infekcí v rámci zóny. Letadla jsou v řešení pokročilejší než jiné prostředky hromadné dopravy, a to převážně proto, že není možné využívat přirozené větrání a třída komfortu je obvykle řádově vyšší. Varianty pokročilé distribuce vzduchu se tak pohybují od běžných personalizovaných dýz, po složité systémy větrání v sedadlech, či opěrkách hlavy, které přímo odsávají vydýchaný vzduch od každého uživatele [51] [52].



Obr. 10: Osobní větrání s lokálním odtahem v prostorách dopravních prostředků [1].

3.3.2 INTEGRACE V BUDOVÁCH

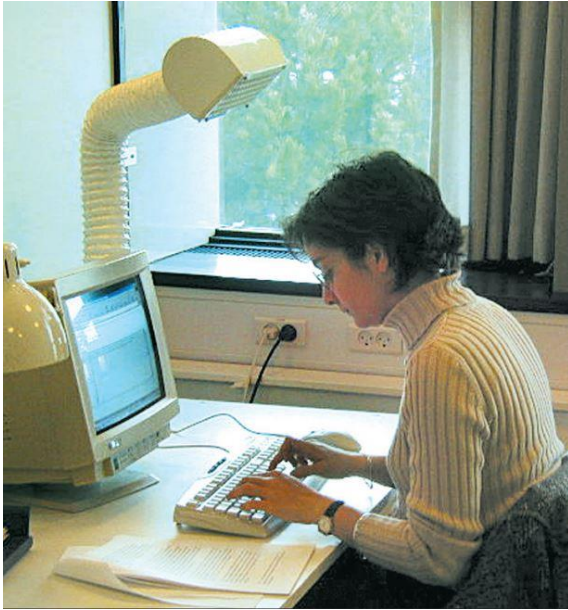
V budovách je zastoupení personalizovaného větrání výrazně nižší než u dopravních prostředků. Normy a předpisy stanovují jednoznačně výměnu vzduchu v celém prostoru a personalizace větrání v běžném objektu je tedy motivována převážně uživatelským komfortem. Instalace tak lze nalézt převážně v luxusních objektech, v místech, kde lze jen obtížně provést distribuci jinak, kde je zvýšené riziko přenosu infekcí, nebo kde se klade důraz na výkon a co nejnižší chybovost při práci. Nejčastěji pak nalézáme reálnou instalaci (nebo alespoň zájem o ní) v provozech, které splňují všechny či většinu zmíněných podmínek. Velká část z níže uvedených systémů však zatím neopustila prostory vědeckých laboratoří.

3.3.2.1 Personalizované větrání zabudované v pracovním místě

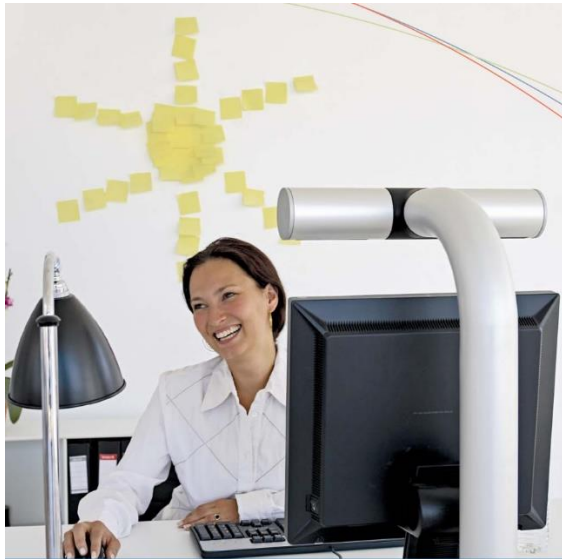
V práci trávíme velké množství času a obvykle navíc v poměrně velkém kolektivu lidí, kteří fungují jako zdroj škodlivin a možných infekcí. Kvalita vnitřního prostředí má zde dopad nejen na vlastní pohodu člověka, ale také na jeho zdraví a produktivitu. Proto je právě zde aplikace personalizovaného větrání poměrně vhodná a výhodná jak pro zaměstnance, tak pro zaměstnavatele. Vzhledem k platné legislativě a standardům zatím bylo možné využít jej pouze jako doplněk centrální vzduchotechniky, i tak se ale dají nalézt funkční aplikace.

Existují dva základní principy aplikace personalizovaného větrání do pracovních míst. Jsou to systémy napojené na centrální vzduchotechniku, které přivádí přímo upravený vzduch, a systémy, které využívají vzduch z místnosti, ale s nasáváním v blízkosti zdroje čerstvého vzduchu [53], například tedy v kombinaci s vytěšňovacím větráním.

Jedny z prvních reálných prototypů koncových prvků personalizovaného větrání využívaly pohyblivý koncový prvek nad monitorem osobního počítače [54] [55] (viz Obr. 11). Na základě těchto studií pak bylo vytvořeno komerční řešení společností Exhausto, které dodalo efektivnímu větrání i kvalitní kancelářský design (Obr. 12) [56]. Z komerčního hlediska však tento produkt nebyl zcela úspěšný a v současné době není na trhu nabízen.



Obr. 11: Jeden z prvních prototypů koncových prvků pro personalizované větrání [55]



Obr. 12: Personalizované větrání společnosti Exhausto [12]



Obr. 13: Čelní pohled na produkt společnosti Exhausto [56]

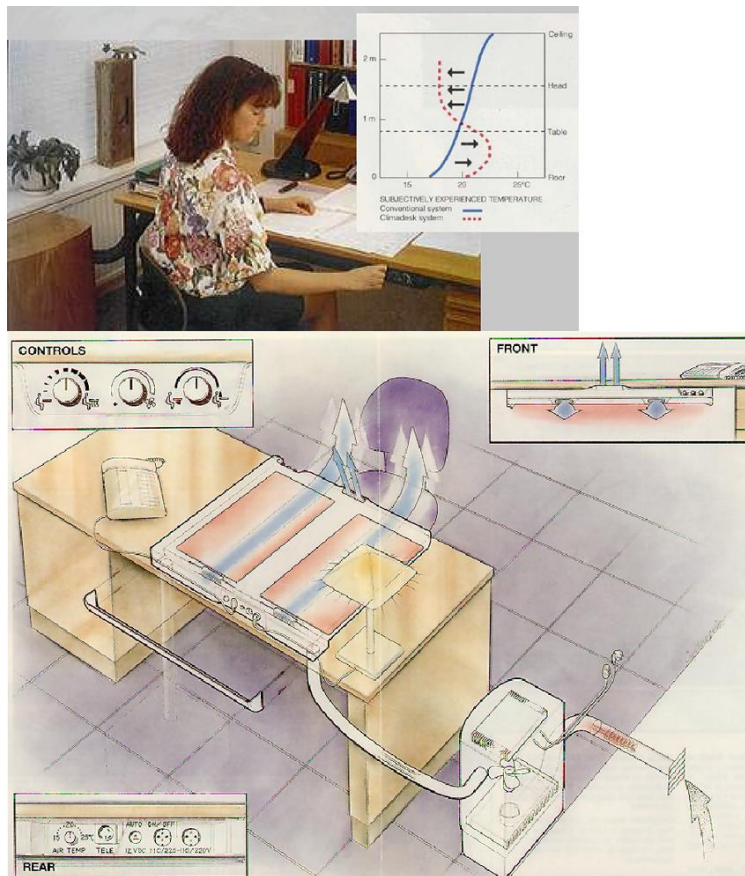
Příčin neúspěchu tohoto systému bylo více. Zcela určitě se do něj promítla poměrně vysoká cena a autor práce je přesvědčen, že koncept byl na svou dobu až příliš pokrokový, neboť v té době zdaleka nebyla problematika kvality vnitřního prostředí dostatečně známa laické veřejnosti. Odpovídají tomu i instalace, které byly aplikovány převážně ve společnostech s dostatečnými prostředky a vysokými nároky na výkon zaměstnanců. Ale vzhledem k tomu, že k tomuto tématu je velmi obtížné získat konkrétní zdroje, jedná se převážně o spekulaci autora na základě osobních rozhovorů s autory řešení.

S odlišným způsobem větrání přišel projekt TaskAir®, který integroval přívody vzduchu do kancelářských prostor podobně, jako je tomu u osobních automobilů, tedy formou nastavitelných vyústek (Obr. 14). Tento systém byl využitelný jak pro kanceláře, tak pro veřejné budovy, například knihovny, čítárny, nebo studovny. Napojení na centrální rozvody vzduchu bylo obvykle ke stropním rozvodům a bylo integrované v samotném nábytku. Přívody vzduchu pak vytvářely určité osobní nastavitelné zóny a přiváděly do nich kolem 35 % celkového objemu vzduchu. Zde se však autorovi nepodařilo narazit na skutečnou realizaci a společnost přestala reálně komunikovat s virtuálním světem v únoru 2014. Teoreticky je ovšem tento systém dostupný na webu australského dodavatele uci.com.au.



Obr. 14: Systém personalizovaného větrání projektu TaskAir® [57]

Ještě jiným způsobem problematiku řeší systém ClimaDesk [58] (Obr. 15), který namísto připojení na centrální systém distribuce vzduchu upřednostňuje lokální klimatizační jednotku pro každé pracovní místo. Následná distribuce vzduchu je pak uskutečňována skrze široký úzký kanál instalovaný pod deskou stolu.

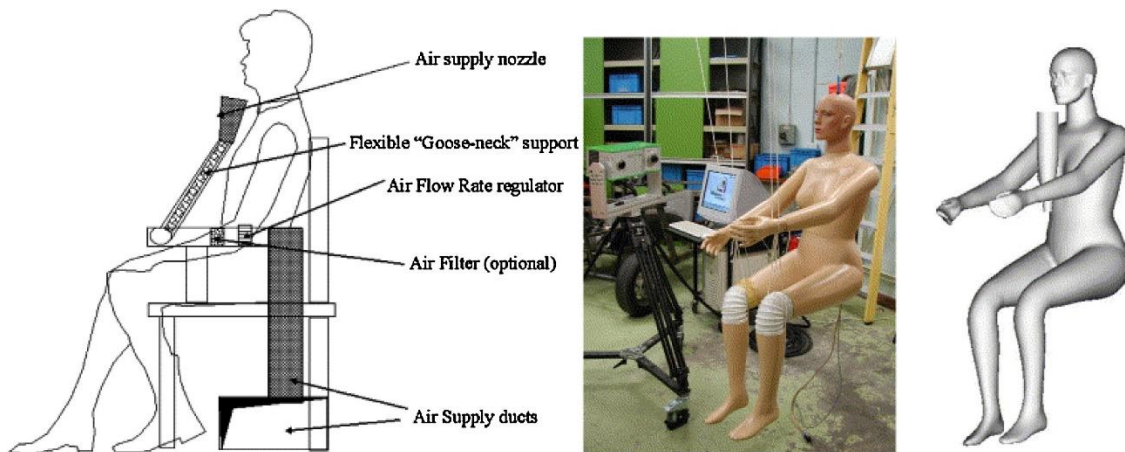


Obr. 15: Schéma systému ClimaDesk [58]

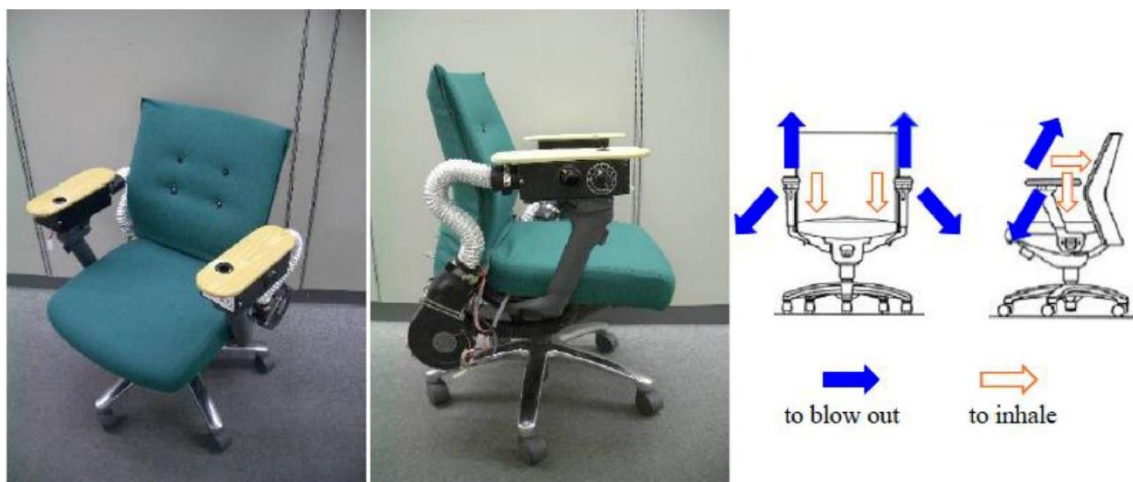
3.3.2.2 Personalizované větrání integrované do židle

Větrání zabudované v židli je dalším příkladem integrace přívodu čerstvého vzduchu (případně odvodu exhalací) do mobiliáře místností. Různí autoři pojmají tuto problematiku různým způsobem a kladou si i odlišné cíle. Na Obr. 16 je tak židle pouze přivádějící vzduch do dýchací zóny, ve druhé variantě na Obr. 17 pak židle jednak vzduch přivádí, ale zároveň také odvádí škodliviny vytvářené lidským tělem. Posledním typem je pak větraná matrace pro kancelářskou židli, která škodliviny pouze odvádí a může tak například sloužit jako doplněk personalizovaného větrání, který by nadále zamezoval šíření škodlivin a chorob [20] [59] [60]. Tyto systémy však zatím nejsou uzpůsobeny ke komerčnímu využití.

Základní problematika větrání u židlí je ta, že se jedná o relativně mobilní kus nábytku, který je jen velmi obtížně připojitelný na energie, případně zdroj čerstvého vzduchu. Zařízení personalizovaného větrání tak zásadně snižují mobilitu, a tedy i komfort využívání židlí ve svém původním účelu.



Obr. 16 Personalizované větrání v područce kancelářské židle [61]



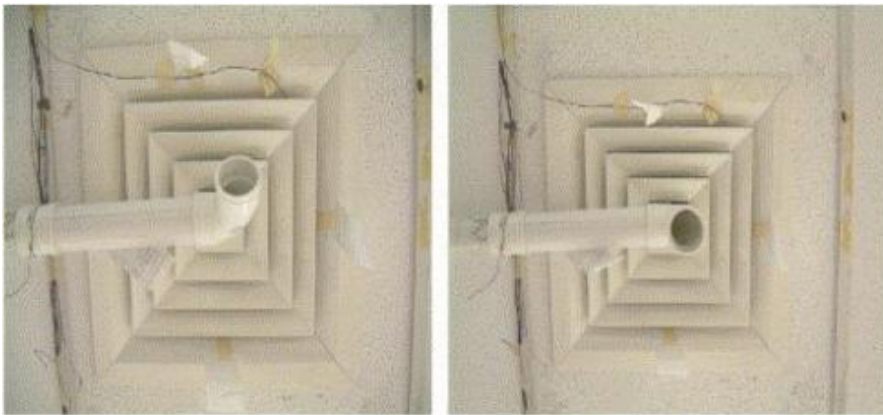
Obr. 17 Větrání zabudované v kancelářské židli [62]



Obr. 18: větraná matrace pro odsávání škodlivin z osobní zóny [59]

3.3.2.3 Stropní vyústky personalizovaného větrání

Systém personalizovaných stropních vyústek vytváří osobní zónování větrání bez potřeby zásadně prodlužovat potrubní vedení vzduchotechniky, nebo měnit rozvržení pracoviště. Má také pouze minimální vizuální dopad na uživatele. Na Obr. 19 lze vidět zkušební systém využívající trysky a kombinující toto osobní větrání se směšovacím větráním. Aby však toto větrání bylo efektivní, je potřeba poměrně vysokých ústových rychlostí vzduchu na vyústce, což může způsobovat pocit průvanu, lokálního diskomfortu a negativně se může projevit i na hluku [63].

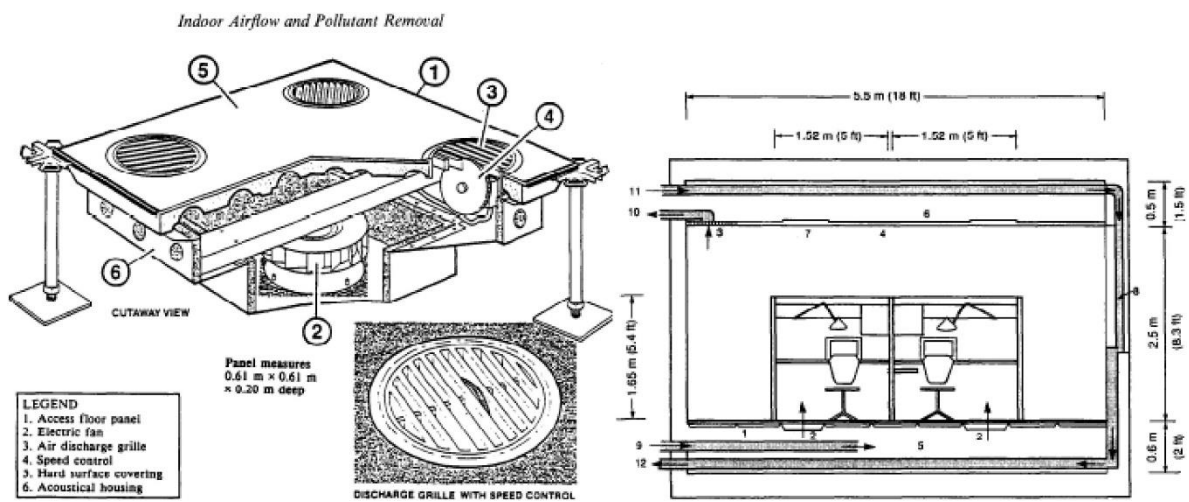


Obr. 19: Systém personalizovaných stropních vyústek v kombinaci se směšovacím větráním [64]

3.3.2.4 Podlahové systémy personalizovaného větrání

Podlahové systémy opět můžeme rozdělit do více skupin. Nejjednodušším systémem podlahového personalizovaného větrání jsou samostatné přívodní vyústky, které využívají podlahový meziprostor jako plenum box. Tyto vyústky jsou pak uživatelsky nastavitelné co do směru a množství vzduchu a je tak možné ovládat prostředí uživateli blízké [43].

Druhou variantou jsou pak mechanické systémy, které mají vlastní ventilátor a jsou tedy ovladatelné elektronicky. Kapacita vzduchu je zde pochopitelně o něco vyšší, než u vyústek založených na přetlaku mezi podlahovým meziprostorem a místností, ale ventilátor je vždy zdrojem hluků a vibrací, což může mít spíše negativní důsledky [65] [66].



Obr. 20: Mechanické podlahové vyústky

3.3.2.5 Hlediště

Hlediště kin, konferenčních či koncertních sálů jsou z hlediska distribuce vzduchu vždy problematické. Mezi hlavními parametry takových provozů můžeme zmínit velké množství lidí na velmi malém prostoru a potřebný komfort diváka. Zásadní je ale i velmi přesně definovaná pozice předpokládaného uživatele. Principem se tak hlediště velmi podobá dopravním prostředkům, jen s mnohem omezenějším prostorem pro umístění vyústek.

Výhodnost systému personalizovaného větrání je v podobném prostoru zřejmá a snad i proto vznikla první velká instalace personalizovaného větrání u nás ve velkém kongresovém sále pražského Kongresového centra. Zde jsou vyústky umístěné v zadní části sedadel a směřují tak na diváka v následující řadě.

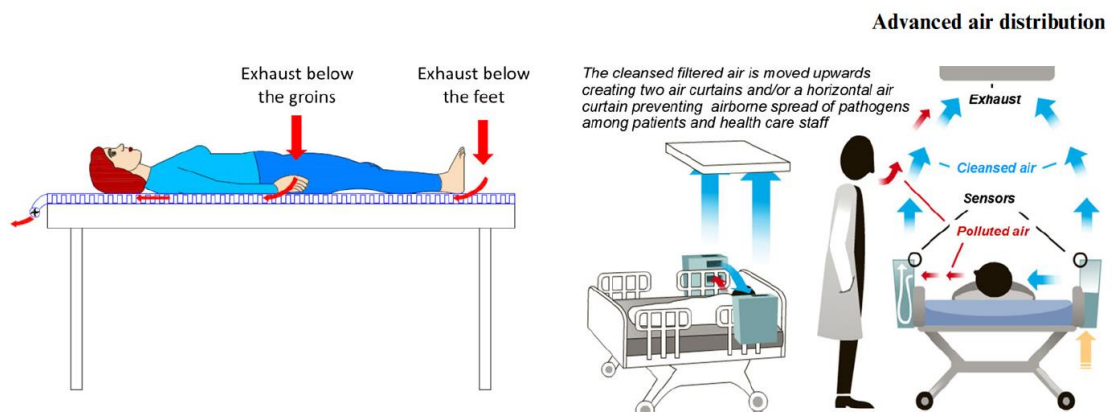


Obr. 21: Pohled do hlavního sálu Kongresového centra na Vyšehradě [67]

3.3.2.6 Nemocniční prostředí

Vzhledem k výraznému pozitivnímu dopadu osobního větrání na zamezení šíření infekcí se jeví jeho použití v nemocničním prostředí jako velmi efektivní [18] [68]. Nemocniční pokoje mají podstatně vyšší výměny vzduchu, aby bylo šíření infekčních látek co nejmenší, cena úpravy a distribuce vzduchu je tak pro směšovací větrání poměrně vysoká a vhodné použití osobního větrání vykazuje i velký potenciál úspor.

V zásadě existují dva přístupy osobního větrání, které je možné v nemocničním prostředí použít a které prokazatelně snižují riziko přenosu nemocí. Jedním je integrace personalizovaného větrání do nemocničních lůžek (Obr. 22), které zaručuje přívod čerstvého i odtah infekčního vzduchu při podstatně nižších průtocích. Druhou (i komplementární) variantou je personální větrání nošené zaměstnanci (Obr. 23), které je schopné nasávat okolní vzduch, za pomoci filtrů a desinfekce (např. UV lampa) podstatně snížit množství živých virů a bakterií a následně tento upravený vzduch přivádět přímo do dýchací zóny uživatele například pomocí headsetu [1] [69]. Obě varianty vykazují vysokou míru ochrany uživatelů před infekcí, ačkoliv je pochopitelné, že kompletní vybavení nemocnic těmito zařízeními je v tuto chvíli velmi finančně náročné, z hlediska vývoje technologií jsou ale obě zařízení ověřena mnoha studiemi [19] [21] a připravena k širšímu využití.



Obr. 22: Personalizované větrání nemocničních lůžek [1]



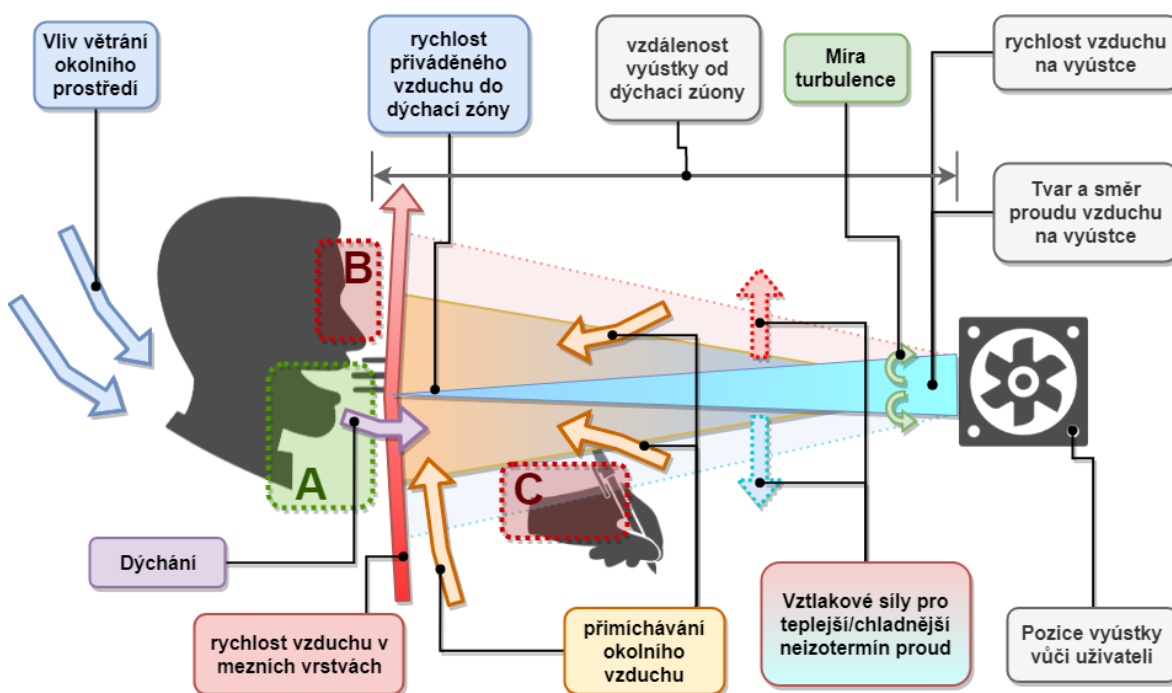
Obr. 23: Personální zařízení pro snížení rizika přenosu infekcí [1]

3.4 VNĚJŠÍ VLIVY NA EFEKTIVITU PERSONALIZOVANÉHO VĚTRÁNÍ

Na rozdíl od centrálního větrání, kde se lokální vlivy na vnitřní prostředí ve většině případů zcela zanedbávají, u osobního, a zvláště pak u personalizovaného větrání jsou zásadně důležité a mají velký vliv na návrh i následné fungování a užívání. Důvodem je právě důraz na efektivitu distribuce přiváděného čerstvého vzduchu. Se zvyšující se vzdáleností personalizované vyústky od dýchací zóny uživatele se zvyšuje riziko, že proud čerstvého vzduchu nedorazí do požadované zóny, ale bude odkloněn. V lepším případě se sníží účinnost větrání, v horším případě proud vzduchu postihne zóny, pro které vyšší rychlosti proudění přinášejí rizika a diskomfort, například oči, nebo ruce v pracovní pozici na stole.

Mezi vlivy, které jsou pro efektivitu personalizovaného větrání zásadní, jsou hlavně lokální zdroje proudění. Pokud pomineme jiné složky větrání (přirozené větrání, okolní vyústky nebo lokální ventilátory), jsou hlavní komplikací konvekční proudy, které vznikají kolem těles s rozdílnou povrchovou teplotou. Mezi takové prvky patří nejrůznější přístroje využívané při práci, ale důležitým zdrojem konvekčních proudů je i lidské tělo [70] [71] [72] [73], které má sice mnohdy nižší rozdílné teploty, ale o to větší plochu přenosu tepla.

Vztlakové síly hrají roli také při neizotermním proudění na vyústkách, kde podstatně ovlivňují směřování proudu čerstvého vzduchu a tím i zasaženou zónu lidského těla.

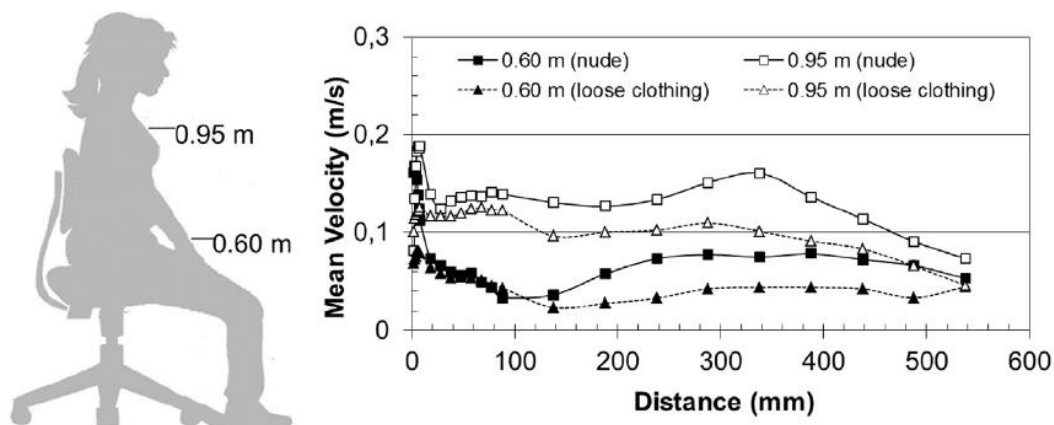


Obr. 24: Vlivy působící na výslednou efektivitu personalizovaného větrání [43] [55]. A – Dýchací zóna; B – Zóna očí (riziko vysychání očí při vyšších rychlostech); C – Zóna pracovního prostředí rukou (riziko tepelného diskomfortu při vyšších rychlostech, nebo nižších teplotách) (Zdroj: Autor).

3.4.1 MEZNÍ VRSTVY LIDSKÉHO TĚLA

3.4.1.1 Teorie konvekčních mezních vrstev

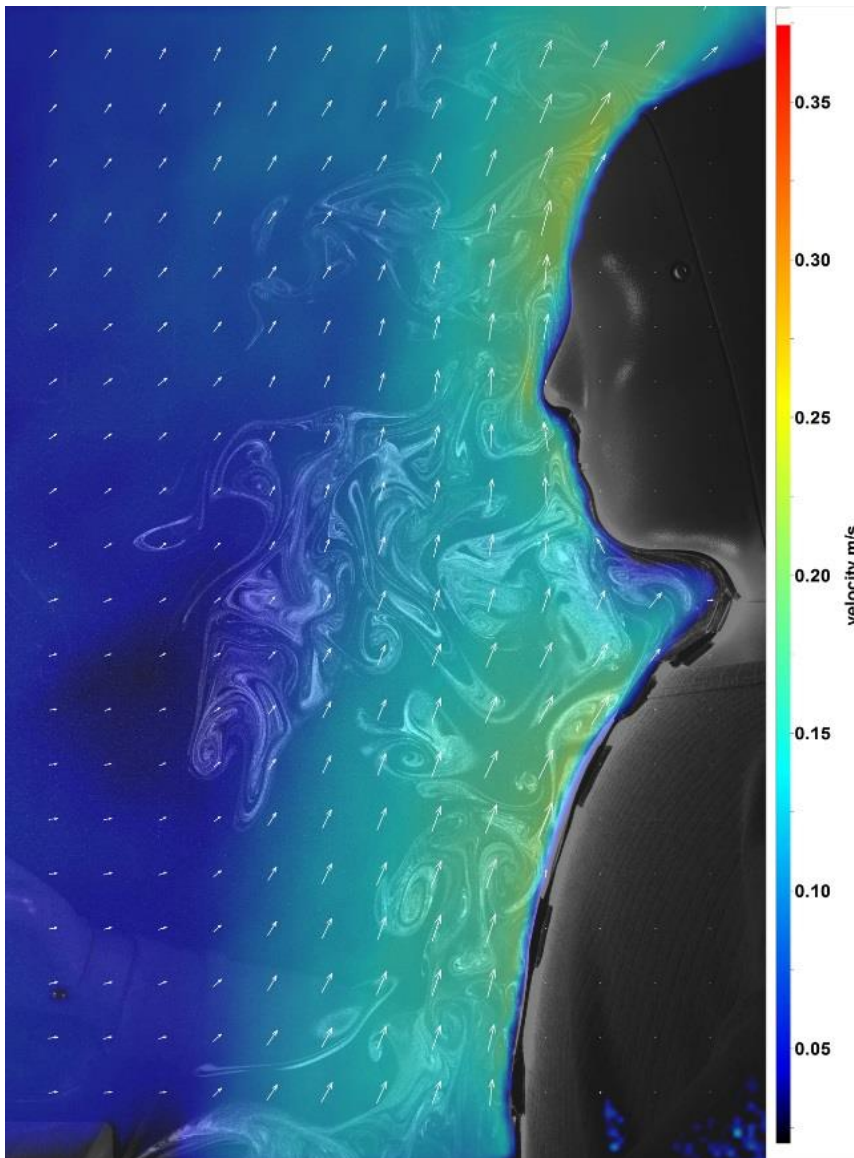
Konvekční mezní vrstvy lidského těla (angl. ‚convective boundary layers‘) jsou stoupavé proudy založené na vztakových silách, které vznikají ohříváním vzduchu v blízkém okolí povrchu lidského těla a oděvu. Teplý vzduch posléze stoupá vzhůru a vytváří stoupavé proudy, které u stojící osoby začínají u kotníků, rozvíjejí se dále okolo trupu a následně vytváří nad hlavou takzvaný tepelný chochol (angl. ‚thermal plume‘) [70] [71] [72] [73] [74]. Rychlost proudění vzduchu v mezních vrstvách závisí na rozdílu teploty povrchu těla a okolního vzduchu, způsobu větrání (směr pohybu vzduchu v místnosti buď rychlost podporuje, nebo naopak snižuje [71]) a pochopitelně oblečení, které má vliv na povrchovou teplotu i možnosti proudění vzduchu. Maximální rychlost však dosahuje až 0,25–0,3 m/s [71] [73]. Na Obr. 25 lze vidět vazbu rychlosti v konvekčních vrstvách na vzdálenost od člověka ve dvou různých výškách a dvou různých stavech oblečení [73]. I přes relativně vysoké rychlosti (proudění vzduchu o rychlosti 0,25 m/s je obecně bráno jako průvan) proudění vzduchu v konvekčních vrstvách obvykle nevnímáme, protože teploty vzduchu jsou velmi blízké teplotě povrchu těla, a tudíž nevzbuzují pocit chladu (rozdíl teplot je pro detekci proudění okolo těla zásadní).



Obr. 25: Rychlost proudění vzduchu v konvekčních vrstvách lidského těla sedící osoby ve dvou výškách (0,6 a 0,95 m) a dvou stavech (nahá a oblečená postava) podle A. Melikova [73].

Tyto konvekční vrstvy mají negativní dopad na vnímání vnitřního prostředí, protože do dýchací zóny člověka přivádějí ohřátý vzduch, znečištěný o škodliviny a pachy produkované lidským tělem a škodliviny v blízkosti podlahy (například škodliviny uvolňované z koberců, chemického čištění, z materiálů podlah). Celkově tak vnímáme vzduch z těchto vrstev jako méně kvalitní než vzduch, který je reálně v našem okolí. Mnohdy tak pozitivně vnímáme třeba průvan, který tyto vrstvy naruší.

Na Obr. 26 je pak zachyceno měření termálního manekýna pomocí PIV anemometrie (viz kapitulu 4.1.1 pro podrobnější vysvětlení), které zachycuje proudění vzduchu okolo pracující sedící osoby v běžném pracovním prostředí (teplota okolí 25 °C) a obvyklém oděvu (hodnota 1 clo). Je zde zachycena rychlost proudění v různé vzdálenosti od povrchu těla a z měření je patrné, že rychlosti v extrémech dosahují skutečně až 0,25 m/s. Místa s nejvyšší rychlostí jsou pak vzhledem k velkým plochám (hrudník) a vyšším teplotám holé pokožky (hlava) právě okolo jeho dýchací zóny. Toto proudění pak má zásadní vliv i na vzduch, který se do dýchací zóny snažíme přivést pomocí personalizovaného větrání.



Obr. 26 Vlastní měření mezních vrstev [75]

3.4.1.2 Vliv konvekčních vrstev na distribuci čerstvého vzduchu

Kromě transportu škodlivin mají konvekční vrstvy druhý výrazný negativní efekt. Při distribuci čerstvého vzduchu interagují s okolním prouděním, a zvláště u systémů personalizovaného větrání, kde přívodní prvky spoléhají na malé objemy transportované na krátkou vzdálenost, a tedy menšími rychlostmi, velmi negativně ovlivňují efektivitu distribuce. Například studie prof. A. Melikova [73] z Dánské Technické Univerzity ukazuje, že při úspěšném omezení, nebo úplném přerušení proudů v hraničních vrstvách vykazuje personalizované větrání násobně vyšší účinnost. V dané studii byla naměřena efektivita distribuce vzduchu 30 % (tedy 30 % čerstvého vzduchu z vyústky personalizovaného větrání se dostalo do dýchací zóny), pokud byly konvekční vrstvy plně rozvinuté, zatímco při jejich přerušení pohyblivou deskou ve výšce břicha, nebo odsáváním ve stejném místě efektivita distribuce vzrostla na 90 %.

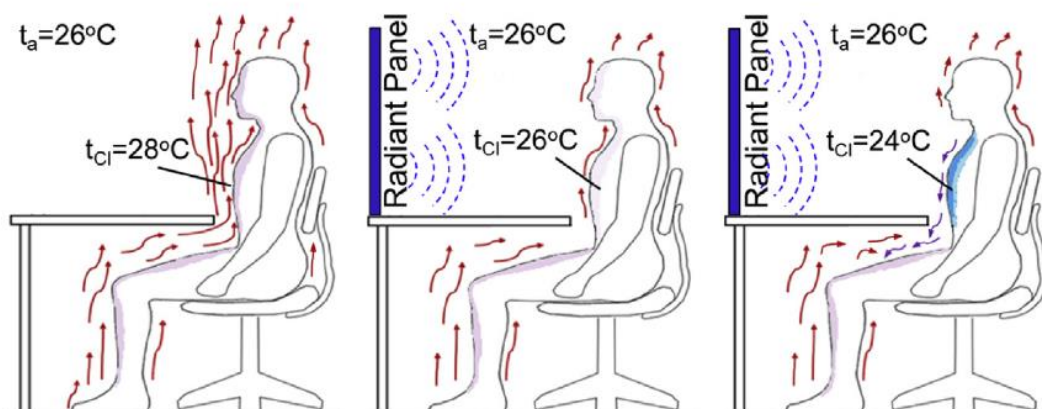
3.4.1.3 Možnosti přerušení konvekčních vrstev

Abychom docílili efektivní distribuce vzduchu, je žádoucí, abychom konvekční vrstvy co nejvíce omezili. Přístupů, jak toho docílit, je několik a jsou založené na tom, jak tyto vrstvy vznikají a dostávají se do dýchací zóny. V ukázkách níže jsou popsány jednotlivé známé možnosti:

Snížení teploty povrchu těla

Vzhledem k tomu, že konvekční vrstvy vznikají rozdílem teplot mezi lidským tělem a okolním vzduchem, je nasnadě, že snížením povrchové teploty dojde k omezení, zastavení, nebo dokonce otočení konvekčních proudů. Povrchovou teplotu pak lze snížit pomocí sálavých panelů jako na Obr. 27 ve studii A. Melikova [73], případně i pomocí dostatečného proudění chladného vzduchu [72].

A.K. Melikov / *Building and Environment* 91 (2015) 70–77



Obr. 27 Narušení či otočení mezních vrstev pomocí sálavých panelů [73]

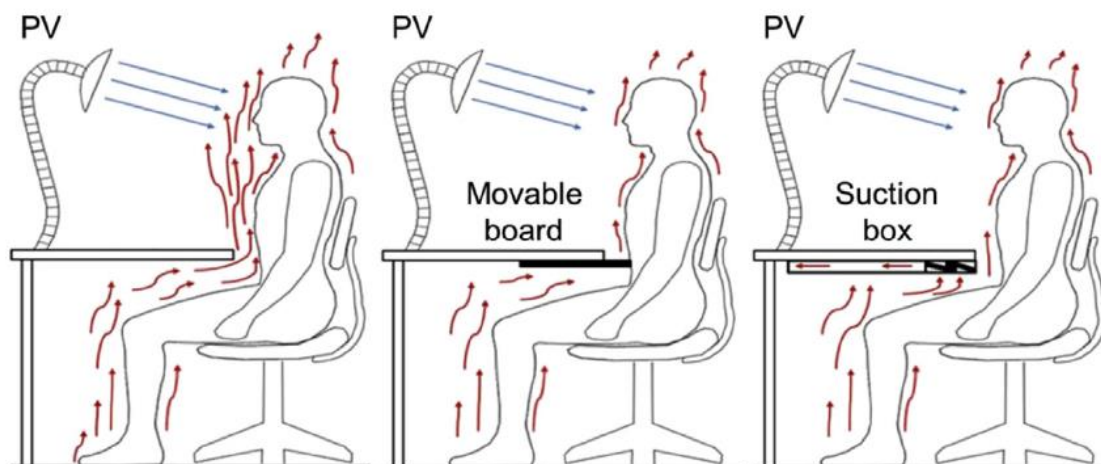
Snížení teploty povrchu těla však může přinést diskomfort v oblasti tepelné pohody a pocitu teplotní nerovnováhy. Přílišné snižování pak může mít i neblahé

zdravotní následky a je proto vždy důležité zachovat vhodnou míru chlazení. Komplikací je pak i výrazné zasažení rukou při běžné kancelářské práci a stínění sálavé složky například monitorem.

Fyzické přerušení mezních vrstev

Další variantou omezení rychlosti proudění v mezních vrstvách je fyzické zabránění tomuto proudu pokračovat od spodní části těla k té horní. Studie A. Melikova [73] k tomu využívá dva systémy: posuvnou desku, která vytváří jemný tlak na břicho a tím zamezuje proudění do dýchací zóny a nasávání znečištěného vzduchu v úrovni desky stolu, které tento vzduch rovnu odvádí pryč od uživatele. V obou případech jsou odděleny konvekční vrstvy spodního a horního těla, což podstatně snižuje rychlost vzduchu v dýchací zóně a tím i efektivitu přivádění čerstvého vzduchu.

A.K. Melikov / *Building and Environment* 91 (2015) 70–77

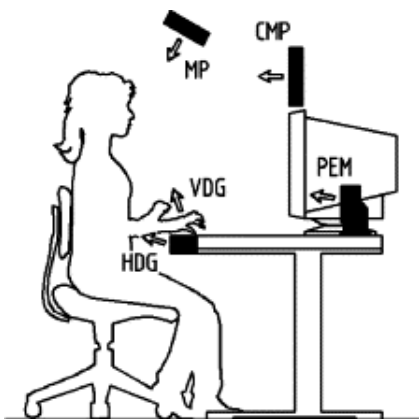


Obr. 28 Fyzické přerušení mezních vrstev pomocí posuvné desky (uprostřed), nebo odsávání (vpravo) [73]

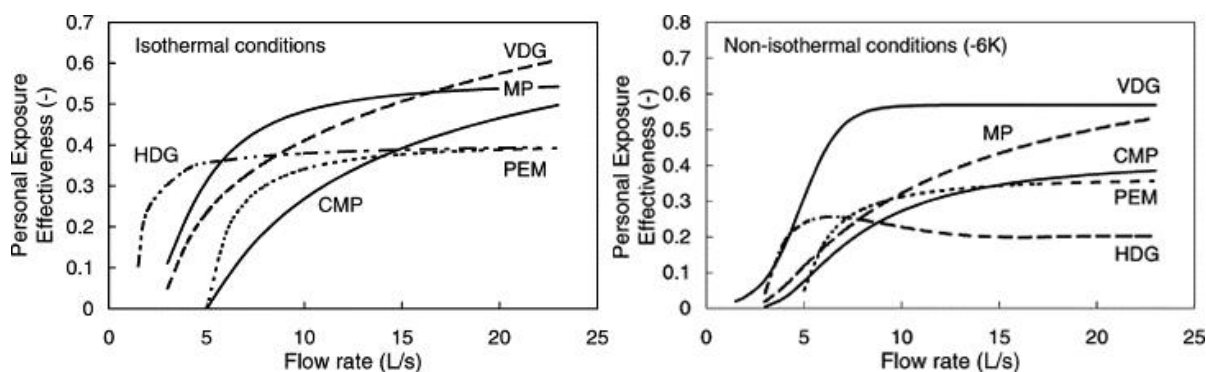
Z hlediska praktického použití je pak první možnost sice technicky velmi nenáročná, ale může způsobovat při používání fyzický diskomfort, který by negativně vyvážil kladné přínosy personalizovaného větrání. Druhá varianta se zdá podstatně vhodnější, zde je však úskalí běžné instalace hlavně technické řešení a případný další hluk, který by další ventilátor mohl způsobovat.

3.4.2 EFEKTIVITA DISTRIBUCE VZDUCHU NA ZÁKLADĚ POZICE VYÚSTEK

Pozice vyústek v rámci pracovního místa zásadně určuje způsob, jakým bude probíhat distribuce čerstvého vzduchu a také účinnost přívodu čerstvého vzduchu do dýchací zóny. Konkrétním srovnáním pěti různých koncových prvků se zabývala studie vedená A. Melikovem [76]. Práce dokázala, že jednotlivé koncové prvky se významně liší v závislosti na průtoku vzduchu, a to jak u izotermního proudění, tak ještě více u neizotermního proudění (teplota přiváděného vzduchu byla o 6 °C nižší, než teplota okolí). Z výsledků je patrné, že velmi nízké průtoky nemají téměř žádný efekt na kvalitu nadechovaného vzduchu. Nejdříve se narůstající průtok projevil u horizontální břišní vyústky (HDG), a to při průtoku okolo 5 m³/h, dále se projeví vyústky, které byly principiálně blíže uživateli, tedy pohyblivý panel nad monitorem (MP) a vertikální břišní vyústka (VDG), největší průtok pak vyžadují vzdálenější vyústky umístěné nad a vedle monitoru (PEM a CMP) a to přibližně 20 m³/h. Tento trend přesně sleduje schopnost pronikání proudu vzduchu skrze mezní konvekční vrstvy.

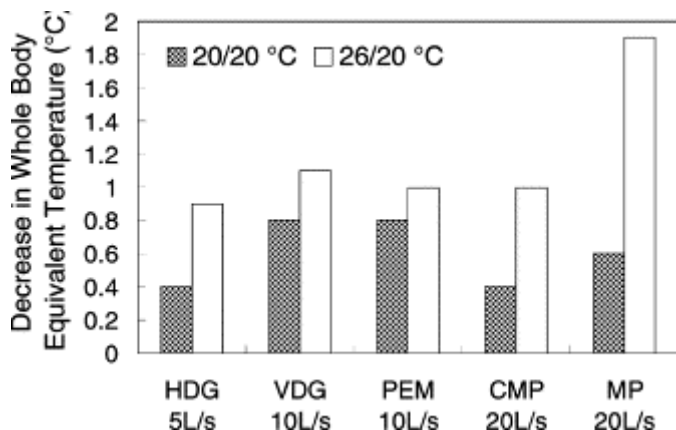


Obr. 29: Pozice měřených koncových prvků. MP – pohyblivý panel nad monitorem; CMP – panel na monitoru počítače; PEM – vyústky po stranách monitoru; VDG – vertikální vyústka v oblasti břicha; HDG – horizontální vyústka v oblasti břicha.



Obr. 30 Vliv pozice výustek na efektivitu distribuce pro izotermní proudění (vlevo) a pro přiváděný vzduch chladnější o 6 °C (vpravo) [76]. Vertikální osa zobrazuje efektivitu větrání, zatímco horizontální průtok vzduchem vyústkou (5 l/s je ekvivalentní 18 m³/h). MP – pohyblivý panel nad monitorem; CMP – panel na monitoru počítače; PEM – vyústky po stranách monitoru; VDG – vertikální vyústka v oblasti břicha; HDG – horizontální vyústka v oblasti břicha.

Po dosažení průtoku mezi 20 a 70 m³/h se nárůst kvality vzduchu většinou rychle zpomaluje a ustaluje na konkrétní hladině typické pro daný koncový prvek. Každý typ vyústky se tak jeví vhodný pro jinou situaci. Vyústky začínající na nízkém průtoku budou efektivní z hlediska kvality vzduchu, ale z hlediska tepelné pohody mohou mít své limity [55], neboť neumožňují dostatečné průtoky vzduchu a mohou ochlazovat povrch těla jen lokálně, což je patrné na Obr. 31, kde je vidět pokles ekvivalentní teploty lidského těla při použití různých typů vyústek. Aby mělo srovnání vypovídající schopnost, jsou pro jednotlivé přívodní prvky použity jiné průtoky (18 m³/h pro nejbližší, 36 m³/h pro střední vzdálenost a 72 m³/h pro nejbližší). Srovnání je provedeno pro izotermní i neizotermní proudění.



Obr. 31: Pokles ekvivalentní teploty lidského těla při použití různých typů vyústek ve svém optimálním průtoku [76]. MP – pohyblivý panel nad monitorem; CMP – panel na monitoru počítače; PEM – vyústky po stranách monitoru; VDG – vertikální vyústka v oblasti břicha; HDG – horizontální vyústka v oblasti břicha.

3.4.3 VLIV TVARU VYÚSTKY NA EFEKTIVITU VĚTRÁNÍ

Tvar vyústky má také podstatný vliv na množství vzduchu přiváděné do dýchací zóny. Tento efekt je opět spojen s překonáváním mezních vrstev a změnou rychlosti proudění mezi vyústkou a cílovou zónou. Dosah proudu při tom závisí hlavně na tom, jak moc je proud během cesty rozptýlen. Rozptýl proudu je pak závislý na nejmenší hodnotě průřezu trysky a turbulencích, které tryska vyvolává [77] [72].

Při stejném průřezu pak má největší dosah tryska s kruhovým průřezem [69], která je ideální z hlediska překonávání konvekčních vrstev, ale má oproti tomu pouze velmi malou cílovou zónu. Je tak využitelná ideálně v případě, že přesně víme, kde se bude nacházet dýchací zóna (sedadla dopravních prostředků, divadla, kina), nebo je vyústka velmi snadno nastavitelná. V případě, že má uživatel více možností pohybu (kancelářská práce), hrozí podstatně riziko, že tryska zcela mine svůj cíl a z nejvyšší efektivity bude ta nejnižší. Proto je vhodné uvažovat při návrhu i s těmito lidskými faktory.

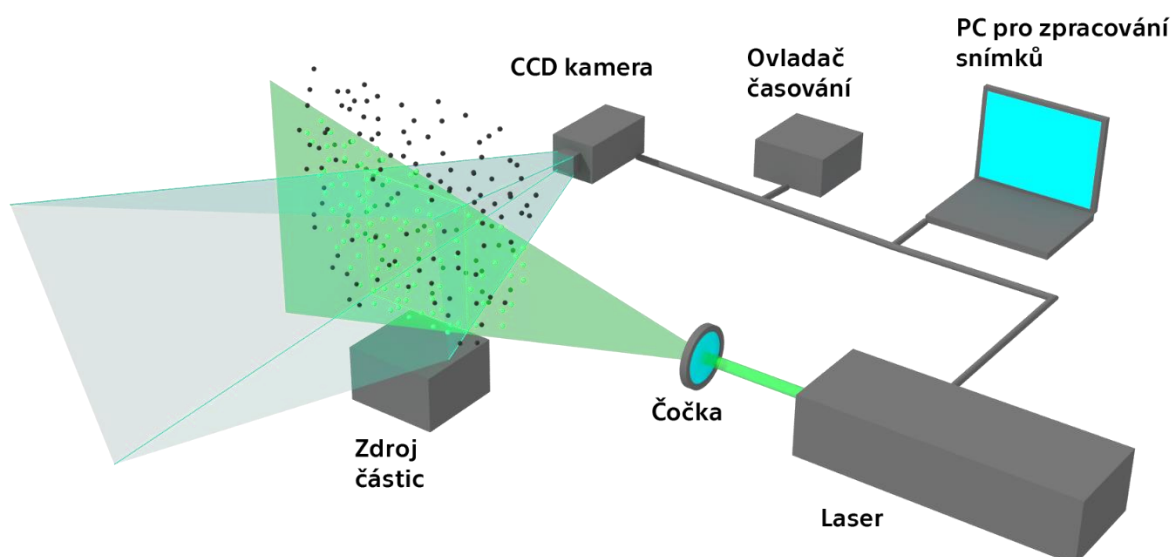
4 POUŽITÉ METODY

V rámci výzkumu a posuzování vzduchotechnických systémů existuje mnoho prověřených metodik. Jejich rozdělení je podle měřítka, fáze vývoje a využitých nástrojů. Obecně lze jmenovat tyto běžně používané metodiky: analytické modely, empirické modely, experimenty v malých měřítkách, plnorozměrové experimenty, vícezónové síťové modely, zónové modely a modely CFD (Computational fluid dynamics – Počítačová dynamika tekutin) [43].

4.1 ANALYTICKÉ METODY

4.1.1 MĚŘENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU (PIV)

K měření proudění vzduchu byla použita laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry – dále PIV), což je nedestruktivní způsob měření vektorového pole rychlostí v plynu či kapalině. K měření vektorového pole je použito částic o různé velikosti rozptýlených do měřené oblasti a laserové roviny, která částice osvětluje. Osvětlené pole částic je pak snímáno citlivou CCD nebo CMOS kamerou, která je schopná zachytit dva rychle po sobě jdoucí obrazy. Pomocí vzdálenosti, kterou dané částice mezi dvěma snímky urazí je poté počítána rychlost proudění v daném místě.



Obr. 32: Schéma typického zapojení systému PIV. Kamera a laser jsou přesně synchronizovány pomocí ovladače časování a data jsou odečítána do počítače, kde je prováděna analýza vektorového pole. (Zdroj: autor)

Částice

Pro PIV se používají částice, o kterých lze předpokládat, že co nejméně ovlivní proudění měřené substance. Částice se dělí podle použití v různých substancích a podle velikosti. V našem případě, kdy měřenou substancí byl vzduch, byly použity olejové bublinky, které se snadno vytváří a pouze minimálně zanášejí měřené zařízení. Velikost částic je daná měřeným rozsahem a rozlišením kamery, je doporučeno, aby při měření částice zabírala velikost jednoho pixelu na snímané ploše. Menší částice se jen velmi těžko analyzují, větší částice mají tendenci rušit snímek zbytečným přесvícením svého okolí.

Laserová rovina

Pro osvětlení scény je nejčastěji používáno pulzního laseru, běžně se jedná o Nd:YAG laser. Aby nedocházelo k rozmazání částic na snímku kamery, je potřeba, aby laserový impulz byl co nejkratší, a tedy i co nejpresněji synchronizovaný s kamerou. Vzhledem k potřebě dvou snímků velmi rychle po sobě jsou často používány dva zdroje s pulzem časovaným ve velmi krátkém intervalu. Interval časování je závislý na rychlosti proudění – čím rychleji se pohybuje, tím musí být kratší. U příliš malého pohybu částic mezi oběma snímky by nebylo možné analyzovat vektor rychlosti, naopak při příliš vzdálené pozici částic pak není možné správně určit pro oba snímky odpovídající částice.

Vzhledem k použití dvou zdrojů je také velmi důležité obě laserové roviny správně zaostřit a srovnat, aby nedošlo ke zkreslení. Zaostření, a tedy šířka laserové roviny pak ovlivňuje, kolik částic bude laserem osvětleno v jednom záběru.

Zřejmým limitem PIV, který se projevil v našem měření, je fakt, že laserová rovina nesmí být přerušena pevnou překážkou.

Kamery

Rozmístění a vzdálenost kamer určuje, jak velké pole a s jakou přesností je možné pomocí PIV měřit. Při použití dvou kamer snímajících stejné pole lze s jistou přesností měřit i vektorové pole v rovině kolmé k laserové rovině. V našem případě zařízení obsahovalo dvě kamery a ty byly nejčastěji použité k rozšíření měřeného pole. Rozmístění kamer je v dalších kapitolách pro každé měření zobrazeno na přiloženém schématu.

4.1.2 OBJEKTIVNÍ MĚŘENÍ VNÍMÁNÍ TEPELNĚ VLNKOSTNÍHO MIKROKLIMATU POMOCÍ TERMÁLNÍHO MANEKÝNA

Pro objektivní měření vnímání tepelně vlhkostního mikroklimatu byl použit termální manekýn Newton. Jedná se o tepelný i fyzický model člověka v životním měřítku. Termální manekýn vytváří tepelné pole okolo lidského těla srovnatelné s člověkem a dokáže změřit, jak jsou jeho jednotlivé povrchy ochlazovány. V práci byl používán dvěma způsoby: pro měření ustáleného teplotního pole okolo sedící a pracující osoby a pro objektivní měření tepelně vlhkostního mikroklimatu.

Manekýn typově odpovídá muži s průměrnou postavou. Má polohovatelné klouby v ramenu, loktech, kolenou, bedrech a krku. Manekýn je složen ze 36 nezávisle měřených teplotních zón, každá zóna je vybavena topným tělesem a měřením povrchové teploty. Mikroprocesory hlídají udržování nastavené povrchové teploty a výkon, který je potřeba na její udržení pak ukazuje, jak moc jsou jednotlivé plochy ochlazovány.

Základní parametry:

- Výška: 175 cm
- Hmotnost 30 kg
- Rozsah měření teplot: -20 až +50 °C
- Rozsah relativní vlhkosti prostředí 0 až 100 %
- Maximální tepelný výkon povrchu těla 800 W/m²

Maximální odchylky čidel termálního manekýna:

- teplotní čidla $\pm 0,1$ °C
- čidlo relativní vlhkosti ± 3 %
- tepelný tok ± 1 %

Vyhodnocení vnímání tepelné vlhkostního mikroklimatu:

Pro posouzení vlivu na tepelný komfort pro jednotlivé měřené zóny termálního manekýna byla použita metodika [10] používající pro zobrazení hodnoty TMS (thermal manikin sensation), konkrétně TMS_z (thermal manikin zone sensation) odpovídající běžné používanému PMV indexu pro danou měřenou zónu na klasické škále -3 (velmi chladno) až 3 (velmi teplo).

4.2 PREDIKČNÍ METODY

4.2.1 CFD SIMULACE

Pod počítačovou dynamikou tekutin můžeme rozumět v podstatě jakýkoliv pokus o výpočetní analýzu dynamických dějů v tekutinách a plynech. Jedná se obvykle o způsob dynamického řešení Navier-Stokesových rovnic pomocí počítače. Rovnice pocházejí již z roku 1822, ale až v polovině 20. století bylo možné přistoupit k reálným komplexním strojním výpočtům.

CFD se často používá při komplexních návrzích, kde měření nedokáže zajistit uspokojivé výsledky, je příliš drahé, nebo by měření samotné příliš ovlivnilo měřenou situaci. Typickým příkladem mohou být prototypy velkých strojů, kde je vytvoření reálného prototypu velice drahé a kde má aerodynamika nebo chování kapalin podstatný vliv na samotný návrh. Tedy například lodní, letecký, či automobilový průmysl, kde se kromě aerodynamiky vnějšího pláště modelují například vstřikovací trysky motorů, lodní šrouby apod. Vytvořit komplexní vektorovou mapu fyzickým měřením je v podstatě nemožné i když riziko simulace je vždy v nepřesnosti, jejíž míra se špatně rozpoznává. V kontextu budov pak používáme simulace k analýze proudění v interiéru i exteriéru, a to buď lokální modely (např. okolo vyústky), nebo modely celkového proudění v místnosti.

Výhody a využití CFD jsou poměrně zřejmé. Matematický model musí vypočítat dění v celém objemu a následně je tedy možné každou část modelu analyzovat. Naopak při fyzickém měření jsme odkázáni na umístění sond, které samy mohou měření ovlivňovat, je jich omezený počet a stoprocentní nemusí být ani jejich spolehlivost. Pokud dokážete program skutečně velmi dobře ovládat, tvorba matematického modelu vám nezabere zdaleka tolik času, jako tvorba modelu fyzického. Zvláště pokud se jedná o velké objekty, nebo dokonce budovy. Nutno ale říct, že pokud nejsme schopni model porovnat se skutečností, nebudeme nikdy schopni zcela určitě říci, že vypočtené hodnoty jsou správné.

Z předchozího vyplývají i limity CFD simulací. Matematický model vždy bude počítat s určitým zjednodušením, jinak ani nejlepší počítač nedokáže výsledek dopočítat. Při zjednodušení lze však jen velmi obtížně předvídat, s jakou chybou či odchylkou model pracuje a jestli není opomenut nějaký klíčový jev, který celou situaci výrazně ovlivní. Výslednou nepřesnost může ovlivnit malé rozlišení výpočetní sítě, nevhodně zadané parametry materiálů, vstupní podmínky, samotný 3D model zařízení, případně i rozdíly v míře detailů jednotlivých prvků. Vyladit model tak, aby skutečně fungoval, jak má, zabere velmi mnoho času a mravenčí práce. A výsledek stejně nelze zcela počítat jako správný, pokud situaci není možné ověřit fyzickým experimentem. CFD je tak častěji spíše nástrojem předběžného odhadu a způsobem, jak volit mezi více podobnými variantami.

Výpočetní software

Na trhu existuje bezpočet programů, které se simulací proudění tekutin zabývají. Liší se jak ve využití, tak v ceně, uživatelském rozhraní a částečně i ve výpočetním jádru, i když principy výpočtů jsou u většiny z nich velmi podobné. CFD lze často počítat i skrze vložené moduly programů, které jinak slouží k jiným účelům, například DesignBuilder, nebo SolidWorks. Jednotlivé programy se liší i svou robustností a přístupem k licencím a potřebnému výpočetnímu hardware. Dnes tak lze kromě desktopových programů používat programy browserové, které využívají výpočetní kapacity vzdálených serverů, případně i jako jednoduché mobilní aplikace. Obvykle se lze řídit pravidlem, že čím jednodušší je uživatelské rozhraní, tím méně má uživatel vliv na děje, které se ve výpočtu odehrávají a tím hůře si lze poradit s obtížnějšími problémy. Stejně tak čím je výpočet jednodušší a hardwarově méně náročný, tím trpí jeho přesnost a stoupá možnost odchylky od skutečnosti. Je ale vždy vhodné volit takový program, který nám dá ku vloženému úsilí adekvátní míru přesnosti výpočtu.

Typickým příkladem je například OpenFOAM, open source výpočetní jádro, které je zdarma, velmi přizpůsobitelné a také extrémně náročné na plné ovládnutí, protože jeho ovládnutí je založeno na programování v konzoli a vytvoření fungujícího modelu je zapotřebí spousta času a zkušeností. Profesionální programy jako je Ansys FLUENT nebo COMSOL mají stále velmi dobré vlastnosti a snaha je i o co nejpřívětivější uživatelské rozhraní. Jejich cena je však zcela na jiné úrovni. Nakonec jsou tu moduly a zjednodušené programy, které často zvládne nastavit i relativní laik. Ovšem reálná kontrola toho, zda je výsledek správný, je buď velmi obtížná, nebo zcela nemožná, často nelze provést ani podrobnější úpravy vlastností modelu či výpočetních cest. Ne vždy je ovšem vysoká přesnost podstatná a časová úspora u zjednodušených programů bývá značná.

Princip výpočtu

První věcí, co je potřeba udělat, pokud máme komplikovaný spojitý problém, kterým proudění a dynamické síly rozhodně jsou, je rozložení na menší díly, které umíme samostatně popsat v matematických rovnicích. Velikost dílů je daná potřebnou přesností a danými fyzikálními vztahy. Rozdělení celku na samostatné spočitatelné části nazýváme diskretizací. Na snímcích dále si vysvětlíme jednotlivé metody a možnosti běžně využívané diskretizace. Pokud už máme konečné množství prvků, je potřeba určit pro každý z nich rovnice, které se budou v daném prvku počítat. Složitost rovnic a jejich vzájemné vazby jsou dané situací a tím, které fyzikální jevy do výpočtu musíme zahrnout. Nejčastěji se u dynamiky tekutin setkáme s Navier-Stokesovými rovnicemi.

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j}}_{\text{Setrvačné síly}} = \underbrace{-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right]}_{\text{Plošné síly}} + \underbrace{\rho a_i + F_i}_{\text{Hmotnostní (objemové) síly}}$$

tlakové síly
(normálové napětí)

třecí (viskózní) síly
(tečné napětí)

např.
gravitační síla

ostatní síly
- odstředivá
- elektromagnetická
- ...

Obr. 33: Popis Navier-Stokesovy rovnice [78]

Následující krok je zadat počáteční podmínky výpočtu. Tedy hodnoty, na kterých je výpočet stavu zahájen. Zde je nutné říct, že čím blíže jsou vstupní parametry blíže realitě, tím rychleji výpočet proběhne a tím je i větší šance, že výpočet bude úspěšně dopočítán. Vstupní parametry lze získat několika způsoby. Buď měřením, výpočtem, odhadem, nebo také často předběžnou hrubší simulací. Z výchozího bodu poté začíná samotný výpočet rovnic. Vzhledem k tomu, že se jedná o výpočet s mnoha dynamickými proměnnými, je potřeba provádět nespočet iterací, než je možné dojít k nějakému skutečnému řešení. V ideálním případě každý další iterační krok snižuje chybu výpočtu a přibližuje se tedy výsledku až do chvíle, kdy je chyba pro danou situaci zanedbatelná. V tu chvíli lze říci, že výsledek simulace může mít vypovídající hodnotu. Velmi často se však stane, že se výpočet zasekne na bodě, ve kterém se mu nedaří chybu dále snižovat, nebo jí naopak znovu navyšuje. Příčinou mohou být špatně zvolené výchozí podmínky, nedostatečný počet prvků (hrubá výpočetní síť), nebo mnoho dalších chyb, které lze jen těžko generalizovat. Avšak jedna z velmi matoucích věcí na některých CFD programech je to, že zobrazí vypočítané hodnoty, i když nebylo možné dopočítat výsledné správné řešení. Takové výsledky mohou být od reality skutečně velmi vzdálené a není možné je zaměnit se správným výpočtem. Ovšem i pokud řešení dojde k cíli, nemusí být výsledek správný, pokud je model nevhodně nastavený.

Modely turbulence

V dynamice tekutin hraje naprosto zásadní roli způsob proudění. Existují dva typy proudění, laminární a turbulentní, které definuje Reynoldsovo číslo. Oba typy proudění a míra turbulence hrají velkou roli v modelech, a hlavně výsledcích, a to nejen samotným tvarem proudu, ale také mísením, přenosem tepla a interakcí s okolními povrchy. Turbulentní proudění se skládá z různě velkých turbulentních

vírů. Velké víry mají většinu energie a postupně se rozpadají na menší a menší, až se energie nejmenších vírů přemění v teplo.

Je zřejmě pochopitelné, že pro výpočet je významně jednodušší proudění laminární, kde není nutné víry počítat. Je ale velmi důležité si včas ověřit, jestli je možné takový výpočet použít pro danou situaci, protože většina inženýrských aplikací bývá spíše v mezích turbulentního proudění.

Řešení rovnic turbulence [79]:

- **Přímá numerická simulace**
 - Direct Numerical Simulation (DNS)
 - Počítá se celé spektrum vírů všech měřítek.
 - V praxi spíše nepoužitelná
- **Metoda velkých vírů**
 - Large Eddy Simulation (LES)
 - Velké víry počítány přímo, malé modelovány.
 - Výpočetně méně náročné než DNS, ale pouze pro nízká Re čísla
- **Reynoldsova metoda časového středování Navierových-Stokesových rovnic**
 - Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
 - URANS (Unsteady-RANS) pro použití časově závislých simulací
 - Statistické modely turbulence
 - Řešení středovaných Navier-Stokesových rovnic
 - Modelování vírů všech měřítek
 - Používáno na průmyslové aplikace – Nejsnazší pro výpočet
 - Nemodeluje vývoj malých poruch
 - nespolehlivé modelování přechodu do turbulence a odtržení mezní vrstvy
- **L-VEL a yPlus**
 - Počítá vířivou viskozitu pouze na základě vzdálenosti od nejbližší zdi (wall distance)
 - Nejméně výpočetně náročný, nejméně přesný
- **Spalart-Allmaras**
 - Navržený pro letecké aplikace (obtékání stěn)
 - Rychlé a relativně přesné výpočty při vhodném použití (velké tlakové rozdíly)
 - používá Boussinesquovu hypotézu
 - Užití: obtékání těles (křídla, letadla, lodě, ...)
- **Standard k-ε**

- Počítá kinetickou energii turbulence (k) a míru rozptylu (ϵ)
- Stabilní, často užívaný v běžných technických výpočtech
- Nevhodný pro nízká Reynoldsova čísla
- Vhodný pro počáteční výpočty, výpočty proudění kolem složitých tvarů, volné proudění
- **RNG k- ϵ (renormalization group method)**
 - Podobný jako standard k- ϵ , ale rozšířený o vířivý tok, rychlé toky (napětí) a místní přechodové toky
 - Vhodný pro výpočet vírového pole za tělesy, proudění v difuzorech a ventilátorech
- **Standard k- ω**
 - Počítá specifickou míru rozptýlení kinetické energie
 - Vhodný pro modelování proudění v blízkosti stěn
 - Problematický (nestabilní) ve volném proudu mimo smykové vrstvy
 - Nízká Reynoldsova čísla
 - Přesnější pro modelování ohybů v proudech, modelování trysek, samostatných proudů apod.
 - Hůře konverguje, je velmi citlivý na počáteční podmínky
 - Lépe predikují záporný tlakový spád, mezní vrstvy a odtržení proudění
- **Shear-Stress Transport (SST) k- ω model**
 - Kombinuje v sobě model k- ω (blízko stěn) a k- ϵ (v prostoru)
 - Poměrně robustní a stabilní
- **Reynolds-stress Model**
 - Přesné výpočty pro různé typy proudění (od přechodového k vysoce turbulentnímu)
 - Vhodný pro složité 3D toky, zakřivená potrubí, cyklóny, proudění u stěny
 - Nevýhoda: velká časová náročnost výpočtu (7 rovnic)

Postup při tvorbě CFD modelu

V první části je skutečně podstatné definovat, co chceme simulací zjistit, a jestli je simulace skutečně tím správným prostředkem, jak k výsledku dojít. Dále je nutné určit, které fyzikální jevy nám do modelu vstupují, co vše nám ovlivní výsledek a bude tak třeba do modelu zahrnout. A pochopitelně také, jaká hodnota bude výsledkem simulace. Jakkoliv to zní banálně, pokud nedokážeme jasně určit, jaký výsledek nám má simulace dát, bude se s modelem velmi obtížně pracovat.

Dále je potřeba si uvědomit kterou část geometrie je nutné počítat v plném rozsahu. Často lze zvolit jen omezený výsek geometrie, který je stejný, či symetrický. Každý kus, který nemusíme počítat nám výpočet zjednoduší a sníží tak nároky na čas a výpočetní techniku. S geometrií zásadně souvisí vytvoření vhodné sítě. Síťování modelu hodně vychází z použitého software a lze jen obtížně generalizovat.

Vzhledem ke geometrii a zkoumanému modelu je pak podstatné určit správný model turbulence. Nevhodné zvolení může způsobit selhání výpočtu a nemožnost dobrat se řešení, ale i pokud řešič výsledek dopočítá, může být výsledek zcela mimo realitu, což ale často lze jen těžko ověřit. Stanovením vhodných vstupních dat do modelu je možné ušetřit množství starostí a trápení. Je proto vhodné věnovat tomu dostatek pozornosti.

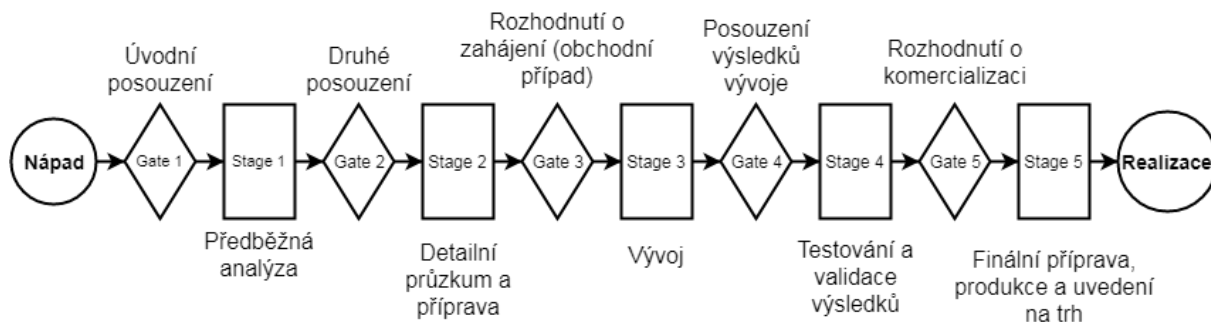
Poslední fází je pak výpočet a jeho kontrola. Kontrolu správnosti je potřeba provádět vždy, ideální je i verifikovat model pomocí korespondujících naměřených dat. Pokud nějaké hodnoty nesesí s hypotézou nebo naměřenými výsledky, je potřeba ponořit se zpět do modelu a hledat, kde se pravděpodobně vyskytla chyba. Častou chybou jsou kromě nevhodných modelů turbulence špatně zadané vstupní podmínky, zanedbané fyzikální vztahy (okolí modelu, gravitační síly apod.), příliš hrubá nebo špatně navržená síť, nebo špatně zadané materiálové vlastnosti. Je také potřeba dát pozor na měřítko. Krychle o straně jeden metr a jeden centimetr se bude chovat zcela odlišně. Až pokud jsme schopni model ověřit, můžeme o výsledku tvrdit, že je relevantní.

4.3 METODA VÝVOJE: STAGE-GATE

Stage-gate, neboli metoda fází a bran, je jeden ze známějších a rozšířenějších organizačních postupů při vývoji nových produktů. Tato metoda se skládá z aktivit, jednotně nazývané „fáze“ (stages) a kontrolních bodů, tedy „bran“ (gates). V jednotlivých fázích vždy probíhají konkrétní dané činnosti a brány jsou pak rozhodovacím bodem, kde se vyhodnocují získaná data, a rozhoduje se, jakým směrem se bude následující fáze ubírat, případně jestli je celý proces životaschopný a není potřeba ho zastavit. Ve větších projektových skupinách obvykle v procesech fází fungují tvůrčí vývojové týmy, a v jednotlivých branách poté rozhoduje management.

Každá fáze má obvykle přesně dané informace a nástroje pro její úspěšné dokončení, zatímco pro brány jsou definovány otázky a specifikace, s nimiž jsou výsledky předchozí brány porovnávány [80] [81].

Typický proces fází a bran lze vidět na Obr. 34.



Obr. 34: Obvyklé fáze a brány Stage-gate metody [81]

5 HOLISTICKÁ ANALÝZA SYSTÉMŮ PERSONALIZOVANÉHO VĚTRÁNÍ

Vzhledem k tomu, že existuje poměrně široká škála různých systémů větrání, a ještě širší škála jejich aplikací, bylo potřeba vytvořit klíč, kterým by bylo možné určit vhodnou aplikaci pro konkrétní situace, případně bylo možné jednotlivé systémy vzájemně porovnávat. Bohužel neexistuje jednotný systém porovnávání účinnosti systémů větrání, který by byl vhodný pro porovnání všech systémů a jejich konkrétních aspektů. K dispozici není ani široká paleta reálně naměřených dat, zvláště u těch systémů, které zatím nejsou široce využívány. Holistická analýza, která byla v rámci práce vytvořena, je tak založena na nashromážděných informacích z odborné literatury a pokouší se dát do vzájemných souvislostí jednotlivé aspekty větrání. Je však v principu spíše rozšířenou multikriteriální analýzou, neboť podrobnější hodnocení by vyžadovalo i podrobnější vstupy, tedy podrobné matematické modely, nebo empirické měření na místě, což se již vymyká účelu této analýzy. Pro zjednodušení tak nejsou zahrnuty ani parametry daného prostoru, což znemožňuje získat konkrétní výsledky zvláště u ekonomických analýz, ale vzhledem k tomu, že na trhu systémy osobního větrání ještě zásadním způsobem nefigurují, tyto analýzy by byly v tuto chvíli stejně poměrně nepřesným odhadem.

Přáním autora je však navázat na tuto analýzu podrobnějším výpočtovým softwarem, který by dokázal pracovat s konkrétními čísly a technologiemi a bylo by tak možné projekční praxi přinést vhodný rozhodovací nástroj v otázkách aplikace personalizovaného větrání.

5.1 SYSTÉM HODNOCENÍ

Vzhledem k tomu, že systém hodnocení je koncipován jako rozšířená multikriteriální analýza, je založen na šestibodové škále (viz níže), která kvantifikuje výhodnost řešení v konkrétní situaci. Výsledkem je pak kromě celkového hodnocení posuzovaného systému také podrobnější bodové hodnocení, které popisuje jednotlivé hodnocené parametry dané soustavy a je tak možné se komplexněji rozhodovat o vhodnosti aplikace. Vzhledem k tomu, že hodnotící škála nemá objektivní měřítko, je možné jí použít pouze ke srovnání více systémů mezi sebou. Systém s nejvyšším počtem bodů je pak hodnocen nejlépe.

Aby byl výsledek přehledný, hodnocené parametry systémů personalizovaného větrání jsou rozděleny do tří základních kategorií. První podstatnou kategorií je vliv na vnitřní prostředí. Analýza vychází ze vzájemných vztahů rozebraných v kapitole 3.1 a dává je do provázaných hodnocených souvislostí. Druhou v dnešní době podstatnou složkou hodnocení je kategorie vlivu na spotřebu energie vzduchotechnického systému a případné možnosti úspory energií. Zde je zahrnuta jak spotřeba energie na dopravu vzduchu (ventilátory), tak energie na úpravu vzduchu, tedy klimatizaci prostor. Poslední kategorií, jsou investiční náklady. Jedná se určitě o podstatnou informaci, pokud budeme přemýšlet o aplikaci systémů personalizovaného větrání, ale pro skutečnou ekonomickou analýzu je bohužel v tuto chvíli extrémní nedostatek podkladů (dané systémy větrání nejsou dostupné na trhu), navíc se výsledky mohou výrazně lišit podle typu budovy, do které jsou instalovány. Investiční náklady uvedené v této analýze jsou tak jen v principu spíše podpůrným indikátorem k doplnění komplexního obrazu o jednotlivých systémech.

Váha kritérií

Samostatné hodnocení váhy jednotlivých kritérií je důležitým prvkem komplexních multikriteriálních analýz a reflektuje různou důležitost jednotlivých částí hodnocení u různých provozů. V některých případech je logické dát podstatně vyšší váhu kvalitě vnitřního prostředí, jinde bude mnohem důležitější úspora energií, nebo investiční náklady. Výpočetní nástroj předpokládá možnost samostatné personalizace váhy jednotlivých kritérií ve třech hlavních kategoriích.

Váhy kritérií v podkategoriích vychází primárně z analýzy jednotlivých vlivů a míry zapojení podkategorií do celkového vlivu na dané vyšší kritérium. I tyto váhy je možné oslabovat či posilovat podle požadavku daných provozů, ale jejich základní hodnoty nejsou srovnatelné a jsou ve vzorcích uvedeny numericky.

Hodnotící skupiny a škála

Jednotlivé volby personalizace větrání se pak dají rozdělit do několika základních rozlišitelných skupin. Těmto skupinám a jejich vlivům na jednotlivé kategorie hodnocení se následně věnují další kapitoly. Vzhledem k tomu, že identifikujeme šest hlavních skupin personalizovaných systémů, je i škála určena jako šestibodová stupnice.

Skupiny:

- Systémy pro osobní přizpůsobení teploty
- Systémy pro osobní distribuci vzduchu
- Systémy pro cirkulaci a filtraci vzduchu v rámci pracovního místa
- Míra osobního nastavení prostředí
- Zpětná vazba na vzduchotechnický systém
- Komplementární vzduchotechnický systém

Základní vztah pro výpočet celkového hodnocení:

Základní vztah pro výpočet celkového hodnocení je obecným váženým průměrem ze všech tří hlavních kategorií. Tato rovnice je v menších obměnách použita i u podkategorií.

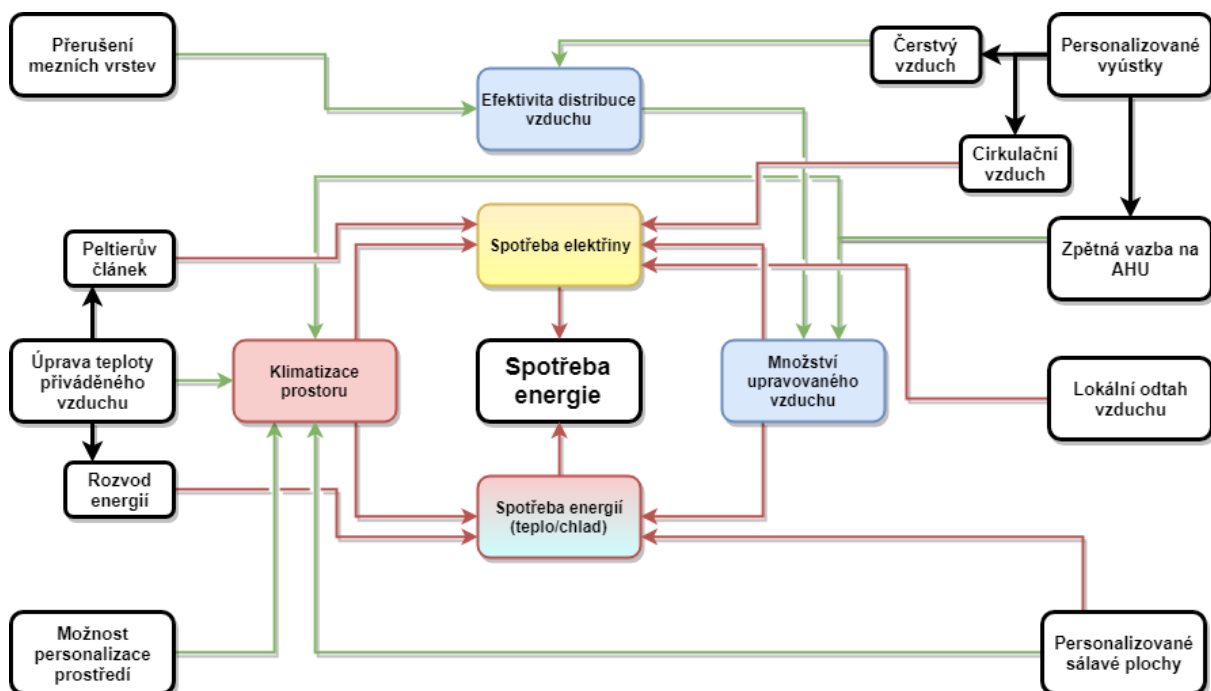
$$K = \frac{K_{QS} \times k_{QS} + K_{IEQ} \times k_{IEQ} + K_{CS} \times k_{CS}}{k_{QS} + k_{IAQ} + k_{CS}}$$

Kde:

- K = Celkové hodnocení
- K_{QS} = Kritérium úspory energií
- k_{QS} = Váha kritéria úspory energií
- K_{IEQ} = Kritérium vnitřního prostředí
- k_{IEQ} = Váha kritéria vnitřního prostředí
- K_{CS} = Kritérium investičních nákladů
- k_{CS} = Váha kritéria investičních nákladů

5.1.1 KATEGORIE ÚSPOR ENERGIE

Téměř každý z výše uvedených systémů a zařízení má svůj pozitivní či negativní vliv na cenu provozu jednotky personalizovaného větrání. Ať už se jedná o elektřinu nutnou na provoz ventilátoru, energie na ohřev či chlazení prostředí, či naopak pozitivní dopady na energie potřebné k provozu budovy. Zde se jedná hlavně o úsporu množství čerstvého vzduchu na osobu při použití efektivní distribuce vzduchu, celkové množství přiváděného vzduchu daného nižší obsazeností místnosti, nebo možností snížení spotřebovaných energií na vytápění a chlazení celého objemu místnosti v případě lokální úpravy. Jednotlivé vlivy systémů na provozní náklady jsou uvedeny na Obr. 35, kde pozitivní vlivy jsou zobrazeny zelenou a negativní vlivy červenou barvou.



Obr. 35: Vlivy na provozní náklady v holistické analýze, pozitivní vlivy jsou zobrazeny zelenou a negativní vlivy červenou barvou (zdroj: autor).

Základní vztah pro výpočet kategorie:

$$K_{QS} = \frac{Q_0 \times 1 + Q_A \times 0,7 + Q_E \times 0,5}{2,2}$$

Kde:

- K_{QS} = Kritérium úspory energií
- Q_0 = Kritérium úspory energie na provoz
- Q_A = Kritérium úspory energie na úpravu vzduchu; snížení váhy na 0,7 reflektuje sekundární pozici faktoru a množství vstupních parametrů

- Q_E = Kritérium úspory energií na vytápění a chlazení; snížení váhy na 0,5 reflektuje sekundární pozici faktoru a porovnání účinnosti centrální a lokální úpravy vzduchu

Úspora energie na provoz Q_O

Elektrická energie je v analýze brána primárně pro potřebu ventilátorů, případně na prvky upravující teplotu v případě, že je zde elektřina jediným zdrojem (např. Peltierovy články). Od ostatních energií je v principu oddělena kvůli ceně a koeficientu primární energie, který je horší, než u konvenčních zdrojů (plyn, tepelná čerpadla apod.) a způsobem rozvodů, které jsou ale jednodušší než u jiných energonositelů.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$Q_O = 6 - [p_{O0} + p_{O.HC} + p_{O.LVent} + \max(p_{O.CVent})]$$

Kde:

- p_{O0} = Srovnávací bod 0
- $p_{O.HC}$ = Spotřeba energie lokálních jednotek pro ohřev a chlazení
- $p_{O.LVent}$ = Spotřeba energie lokálních jednotek na ventilátory
- $p_{O.CVent}$ = Spotřeba energie na ventilátory centrálních jednotek

Úspora energie na úpravu vzduchu Q_A

Množství upravovaného vzduchu je dnes kritickým místem možných úspor. V předchozích kapitolách bylo řešeno, jaký vliv na množství upravovaného vzduchu má efektivita distribuce, případně možnost upravit jeho množství v poměru k obsazenosti prostoru a tato pravidla jsou v analýze vyhodnoceny.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$Q_A = 6 - (p_{A0} + \sum p_{A.Eff})$$

Kde:

- p_{A0} = Srovnávací bod 0
- p_A = Parametry efektivity distribuce vzduchu

Úspora energií na vytápění a chlazení Q_E

Klimatizace prostoru, tedy nastavení teploty vzduchu v místnosti má v principu velmi zásadní vliv na tepelný komfort uživatelů a jejich hodnocení kvality vnitřního prostředí. V předchozích kapitolách ovšem bylo poukázáno na možnost snížit potřebu energie na úpravu teploty vzduchu, pokud využíváme personalizované výústky, které vytváří osobní zónu okolo uživatele. Dokázán byl i vliv samotné

možnosti úpravy prostředí na spokojenost uživatelů, a tedy možnost méně upravovat okolní teplotu při zachování stejné spokojenosti s vnitřním prostředím.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

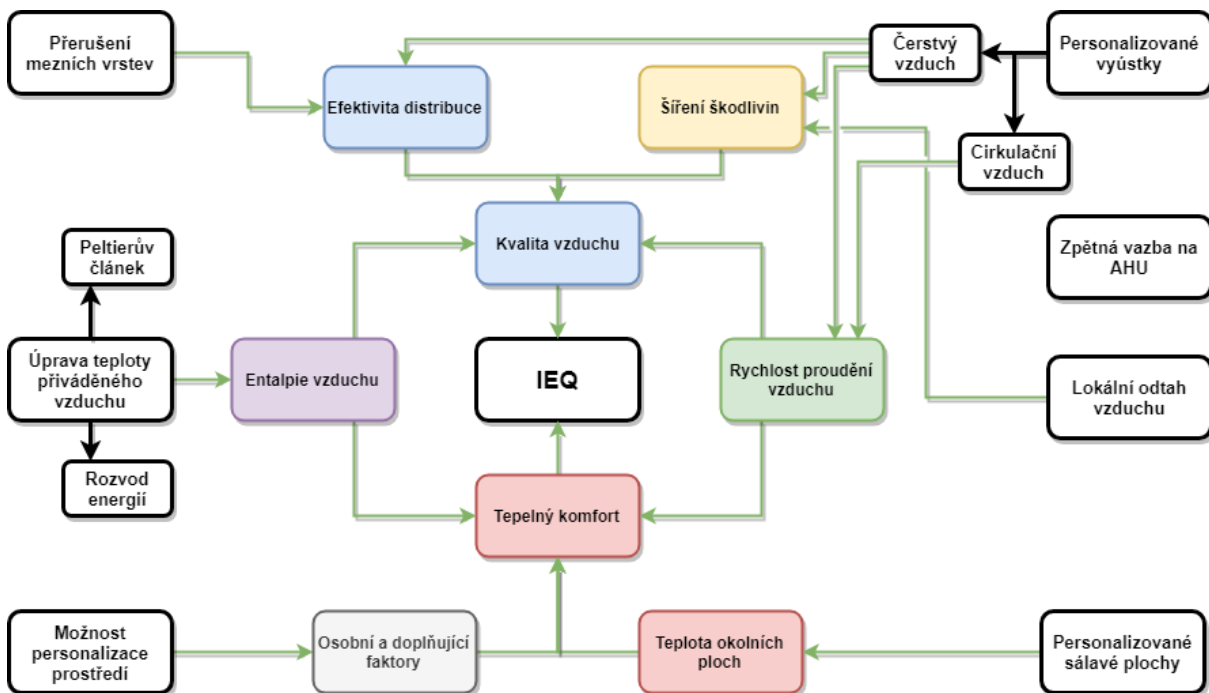
$$Q_E = 6 - (p_{E0} + p_{E,R})$$

Kde:

- p_{E0} = Srovnávací bod 0
- $p_{E,R}$ = Parametry požadavků na centrálně generované vnitřní prostředí

5.1.2 KATEGORIE VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

Vzhledem k tomu, že personalizované větrání by mělo primárně sloužit ke zvýšení kvality vnitřního prostředí pro uživatele, je toto kritérium první a nejsilněji zastoupené. Z parametrů vnitřního prostředí jsou pak hodnoceny ty, na které má personalizované větrání přímý a prokázaný vliv. Výčet těchto vlivů se zakládá na analýze v kapitolách 3.1.1 a 3.1.2 a jeho podrobná struktura vztahů je zaznamenána na Obr. 36.



Obr. 36: Vlivy na kvalitu vnitřního prostředí v holistické analýze (zdroj: autor).

Základní vztah pro výpočet kategorie:

$$K_{IEQ} = \frac{I_{AQ} \times 1 + I_{TC} \times 1 + I_{Av} \times 0,6 + I_{Ac} \times 0,3}{2,9}$$

Kde:

- K_{IEQ} = Kritérium vnitřního prostředí
- I_{AQ} = Kvalita přiváděného vzduchu
- I_{TC} = Kvalita tepelného komfortu
- I_{Av} = Kvalita proudění vzduchu na daném pracovním místě; snížení váhy na 0,6 reflektuje sekundární pozici faktoru a množství vlivů.
- I_{Ac} = Kvalita akustického mikroklimatu; snížení váhy na 0,3 reflektuje fakt, že se jedná o samostatnou složku prostředí a vyvažuje její vliv vůči ostatním složkám prostředí.

Kvalita přiváděného vzduchu I_{AQ}

Kvalita přiváděného vzduchu má zcela jednoznačný vliv na vnímanou kvalitu prostředí. Je ovlivněna jednak složkami, které uživatel přímo vnímá – koncentrace CO_2 , odérů, těkavých látek apod., tak i těmi, které nevnímá, ale mají zásadní vliv na jeho zdraví. Tedy přenášené infekční či zdraví škodlivé látky. Pokud je systém personalizovaného větrání napojen na centrální vzduchotechniku, je kvalita vzduchu odkázaná na procento přiváděného čerstvého vzduchu a úpravu vzduchu cirkulačního. Pokud jednotka využívá interiérový vzduch, je pak kvalita vzduchu daná úpravami v jednotce samotné, a to skrze filtry, UV záření, či další zařízení.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$I_{AQ} = p_{AQ0} + p_{AQ}$$

Kde:

- p_{AQ0} = Srovnávací bod 0
- p_{AQ} = Parametry kvality přiváděného vzduchu

Kvalita tepelného komfortu I_{TC}

Jak už bylo uvedeno v předchozích kapitolách na tepelný komfort má kromě teploty vzduchu vliv také rychlosti proudění, případně zdroje tepla a chladu v jeho okolí, které mohou být nahodilé (chladné plochy oken, elektrická zařízení apod.), nebo cílené (sálavé panely, personalizované sálavé prvky apod.).

U personalizovaných systému ovlivňujících tepelný komfort lze rozlišit ty, které jej upravují pomocí teploty přiváděného vzduchu, a ty které využívají lokálních sálavých či konvekčních zařízení. Dále pak můžeme rozlišit zdroje energií, a to na tři hlavní v současnosti používané typy: lokální elektrický, lokální kompresorový a centrální – tedy napojený na systém chlazení či vytápění budovy.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$I_{TC} = p_{TC0} + \max(p_{TC.LVent}; p_{TC.CVent}) + p_{TC.TC}$$

Kde:

- p_{TC0} = Srovnávací bod 0
- $p_{TC.LVent}$ = Parametry tepelného komfortu lokálním (osobním) větráním
- $p_{TC.CVent}$ = Parametry tepelného komfortu centrálním systémem větrání
- $p_{TC.TC}$ = Parametry možností lokální přizpůsobení teploty

Kvalita proudění vzduchu na daném pracovním místě I_{Av}

Rychlost proudění vzduchu má zásadní vliv jak na vnímanou kvalitu vzduchu, tak na tepelnou pohodu člověka. Je to jeden z klíčových parametrů, kterým personalizované větrání může na uživatele působit. Vliv proudění vzduchu však nelze považovat za lineární, nižší hodnoty rychlosti proudění nemají podstatný efekt, ten začíná prudce narůstat při možnosti narušit konvekční vrstvy lidského těla. Následné zvyšování se však přesouvá do negativních vlivů, protože ohrožuje tepelnou pohodu pocitem průvanu.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$I_{Av} = p_{Av0} + \sum p_{Av}$$

Kde:

- p_{Av0} = Srovnávací bod 0
- p_{Av} = Parametry kvality proudění vzduchu na pracovním místě ze všech zdrojů

Kvalita akustického mikroklimatu I_{Ac}

Většinu parametrů vnitřního prostředí osobní větrání ovlivňuje pozitivně, kde ovšem může mít negativní dopad je akustické mikroklima, a to především díky osazování ventilátorů (případně kompresorového chlazení) v osobním prostoru uživatele. Svůj podíl ale obvykle mají i vyústky v blízké vzdálenosti. Celková váha vlivu akustického mikroklimatu je v základu snižena pro obvyklé podmínky na 40 %, v provozech se zvýšenou náročností na akustické mikroklima lze tuto hodnotu manuálně zvýšit.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

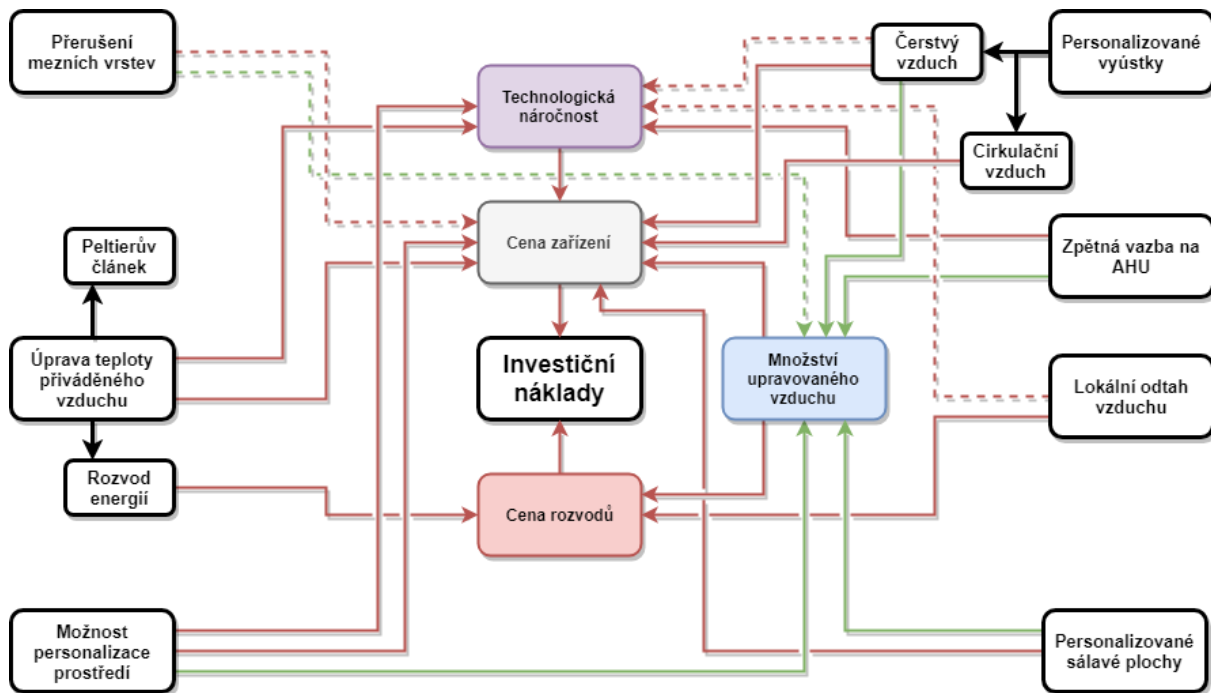
$$I_{Ac} = 6 - (p_{Ac0} + \sum p_{Ac})$$

Kde:

- p_{Ac0} = Srovnávací bod 0
- p_{Ac} = Parametry akustického výkonu z jednotlivých zdrojů

5.1.3 VLIVY NA INVESTIČNÍ NÁKLADY SPOJENÉ S INSTALACÍ SYSTÉMU

Vysoké investiční náklady jsou mnohdy parametrem, který aplikaci personalizovaných systémů limituje. Náročnost instalace je spojená především s napojením systému na přívod čerstvého vzduchu, energií, a samozřejmě také s každou samostatnou lokální jednotkou. Celkové vazby jsou zobrazeny na Obr. 37.



Obr. 37: Vlivy na investiční náklady v holistické analýze, pozitivní vlivy jsou zobrazeny zelenou a negativní vlivy červenou barvou. Méně zásadní dopady pak jsou zobrazeny přerušovaně (zdroj: autor).

Základní vztah pro výpočet kategorie:

$$K_{CS} = \frac{C_{AD} \times 1 + C_{EQ} \times 1 + Q_{ED} \times 0,5}{2,5}$$

Kde:

- K_{CS} = Kritérium úspory investičních nákladů
- C_{AD} = Investiční náklady na soustavu distribuce vzduchu
- C_{EQ} = Investiční náklady na zařízení
- C_{ED} = Investiční náklady na distribuci energií; snížení váhy na 0,5 reflektuje fakt, že se jedná o jednorázovou investici a vyvažuje tak důraz na úsporu provozních nákladů.

Investiční náklady na soustavu distribuce vzduchu C_{AD} :

Distribuce vzduchu je náročná jak investičně, tak prostorově a technologicky, zvláště pokud se jedná o lokální distribuce do personalizovaných jednotek. Investiční náklady s ní spojené jsou pochopitelně v úzké vazbě k systému větrání, který je používán a k množství distribuovaného vzduchu. U personalizovaného větrání může jít o velmi komplexní systémy, ovšem vzhledem k možné vysoké efektivitě distribuce je možné, že přepravované objemy budou podstatně menší. V takovém případě vliv na investice nemusí být tak náročný, jak by se mohlo na první pohled zdát.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$C_{AD} = p_{AD0} + p_{AD.Local} + p_{AD.Central}$$

Kde:

- p_{AD0} = Srovnávací bod 0
- $p_{AD.Local}$ = Parametry investičních nákladů na distribuci vzduchu k lokálním jednotkám
- $p_{AD.Central}$ = Parametry investičních nákladů na centrální distribuci vzduchu

Investiční náklady na zařízení C_{EQ} :

Nutnost osazovat u personalizovaného větrání pracoviště lokálními jednotkami je jejím velkým handicapem při porovnávání pořizovacích nákladů. Zvláště u systémů, které mohou kromě distribuce i upravovat teplotu a množství přiváděného vzduchu. Lze říci, že čím větší komfort bude v budově nastaven, tím dražší jednotlivá zařízení budou. Opět je ale možné část investičních nákladů snížit právě sníženým množstvím vzduchu a alokací některých prvků (chlazení, vytápění) do lokálních jednotek, čímž je možné snížit cenu jednotek centrálních systémů.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$C_{AEQ} = p_{EQ0} + \sum p_{EQ}$$

Kde:

- p_{AD0} = Srovnávací bod 0
- p_{EQ} = Parametry investičních nákladů na veškerá zařízení (centrální i lokální jednotky, zařízení pro úpravu prostředí apod...)

Investiční náklady na distribuci energií C_{ED} :

Investiční náklady na distribuci energie pro vzduchotechniku jsou oddělenou kategorií od nákladů na rozvody vzduchu převážně z důvodů plánovaného budoucího rozšiřování analýzy o podrobnější výpočty. Distribuce energie je hodně závislá na použitých systémech a možných zdrojích v konkrétních budovách.

V hodnocení je vyjádřena rovnicí:

$$C_{ED} = p_{ED0} + p_{ED.Cooling} + p_{ED.Heating} + p_{ED.Elect}$$

Kde:

- p_{ED0} = Srovnávací bod 0
- $p_{ED.Cooling}$ = Parametry investičních nákladů na distribuci chladu k VZT
- $p_{ED.Heating}$ = Parametry investičních nákladů na distribuci tepla k VZT
- $p_{ED.Elect}$ = Parametry investičních nákladů na distribuci elektřiny k VZT

5.2 VÝPOČETNÍ SOFTWARE

Pro aplikaci výše zmíněných rovnic byl vytvořen výpočetní software v programu Microsoft Excel. Tato tabulka slouží k odhadu dopadu různých systémů personalizovaného větrání na jednotlivé hodnocené kategorie.

Parametry konkrétních systémů jsou zadávány skrze jednoduchý zaškrtačací seznam, výsledkem je pak relativní hodnocení systému v dané konfiguraci. Systémy personalizovaného větrání je možné porovnávat vzájemně, či s dnes běžně aplikovaným směšovacím větráním, a to buď samostatně, nebo v komplementu.

Výsledkem je pak komplexní porovnání systémů v síťových grafech, zohledňující jednotlivé kategorie i principy, s možností vybrat vhodný systém podle stanovených priorit.

5.2.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

V rámci výpočetní tabulky jsou parametry rozděleny do jednotlivých částí podle technologií (Obr. 38), které je zajišťují, a které jsou na sobě závislé. Samostatnou částí je centrální vzduchotechnika, která je častým komplementem osobního větrání a má přímý dopad na některé provozní stavy. Je zde také rozlišeno, jestli by se centrální vzduchotechnika instalovala nově, nebo jestli je instalace osobního větrání prováděna do již stávající budovy s funkčním systémem vzduchotechniky.

<input type="checkbox"/>	Osobní přizpůsobení teploty
Typ	<input type="checkbox"/> Peltier <input type="checkbox"/> Lokální kompresorové <input type="checkbox"/> Centrální napojení
<input type="checkbox"/>	Osobní větrání
<input type="checkbox"/>	PV - čerstvý vzduch
Vzdálenost	<input type="checkbox"/> Vzdálený přívod (např. strop) <input type="checkbox"/> Středně vzdálený přívod (vedle monitoru) <input type="checkbox"/> Blízky přívod (např. břišní vyústka) <input type="checkbox"/> Osobní přívod (přímo do dýchací zóny)
	<input type="checkbox"/> Lokální ventilátor <input type="checkbox"/> Snížené množství vzduchu na osobu <input type="checkbox"/> Přerušení mezních vrstev
<input type="checkbox"/>	PV - Cirkulace
	<input type="checkbox"/> Filtrace
<input type="checkbox"/>	Možnost nastavení přiváděného vzduchu
<input type="checkbox"/>	Množství vzduchu podle přítomných
<input type="checkbox"/>	Centrální vzduchotechnika
	<input type="checkbox"/> Již v provozu

Obr. 38: Jednotlivé parametry specifikující systémy osobního větrání použité pro analýzu.

Vzhledem k tomu, že se jedná skutečně o základní tabulku hodnocení systémů, nejsou zde zahrnuty parametry daného prostoru, což limituje její využití k přesným výpočtům. Takto přesné výpočty by ovšem (jak bylo uvedeno výše), kvůli nedostatku dat k přesné analýze nebyly relevantní. Jedná se tedy primárně o aplikaci technologií do hypotetické referenční místnosti.

Referenční místností je open-space kancelář, kde většinu plochy zabírají pracovní místa vybavená případným zvoleným systémem personalizovaného větrání (místa s dlouhodobým pobytem osob), část plochy je pak určena jako komunikace (místa s krátkodobým pobytem osob). Výpočet předpokládá obsazenost prostoru přibližně 70 % v denním průměru.

5.2.2 VÝPOČETNÍ PROSTŘEDÍ

Účelem výpočetního prostředí je přiřadit každému ze zvolených parametrů adekvátní hodnotu multikriteriální analýzy. Vzorce pro výpočet daného parametru jsou komplexní a dynamicky reagují na vzájemné vazby jednotlivých zvolených technologií.

Zásadní roli zde hraje očekávané množství přiváděného vzduchu na osobu při různých druzích větrání ve vazbě na efektivitu distribuce vzduchu, na to navazuje potřeba energie i velikost distribučních sítí, očekávané výkony lokálních i centrálních systémů pro tvorbu vnitřního prostředí i dopady možnosti ovlivnit prostředí v osobním prostoru.

Hodnoty pro multikriteriální analýzu jsou odhadem dopadu jednotlivých prvků a vzájemných kombinací systémů na jednotlivé hodnocené kategorie v referenční místnosti. Jak výpočetní prostředí vypadá je znázorněno na Obr. 39.

Název: <input type="text" value="MV"/>		Celkové hodnocení																		
		Úspornost energií			Kvalita vnitřního prostředí				Úspornost investičních nákladů											
Vážený průměr		4,32			0,97				6,00											
Váha argumentu		1,00			1,00				0,60											
Suma argumentu		5,7			0				6											
Váha argumentu		1			0,5				1											
		0,3	5,5	0	1	6	0	6	6	0	0	6	0	0	6	0	0	6	0	
<input type="checkbox"/>	Osobní přizpůsobení teploty																			
<input type="checkbox"/>	Typ																			
<input type="checkbox"/>	Pellier	1,5	0																	
<input type="checkbox"/>	Lokální kompresorové	1	0																	
<input type="checkbox"/>	Centrální napojení	1	0																	
<input type="checkbox"/>	Osobní větrání																			
<input type="checkbox"/>	PV - čerstvý vzduch	3,5	0	5	0															
<input type="checkbox"/>	Vzdálenost																			
<input type="checkbox"/>	Vzdálený přívod (např. strop)	3		4																
<input type="checkbox"/>	Středně vzdálený přívod (vedle monitoru)	3		3																
<input type="checkbox"/>	Bližký přívod (např. bříšní výústka)	2,5		2																
<input type="checkbox"/>	Osobní přívod (přímo do dýchací zóny)	2,5		2																
<input type="checkbox"/>	Lokální ventilátor	0,5		0																
<input type="checkbox"/>	Snížení množství vzduchu na osobu																			
<input type="checkbox"/>	Přerušování mezních vrstev			0	0															
<input type="checkbox"/>	PV - Cirkulace	0,5		0																
<input type="checkbox"/>	Filtrace	0,2		0																
<input type="checkbox"/>	Možnost nastavení přiváděného vzduchu																			
<input type="checkbox"/>	Množství vzduchu podle přítomných																			
<input type="checkbox"/>	Centrální vzduchotechnika	3		0																
<input type="checkbox"/>	Již v provozu																			

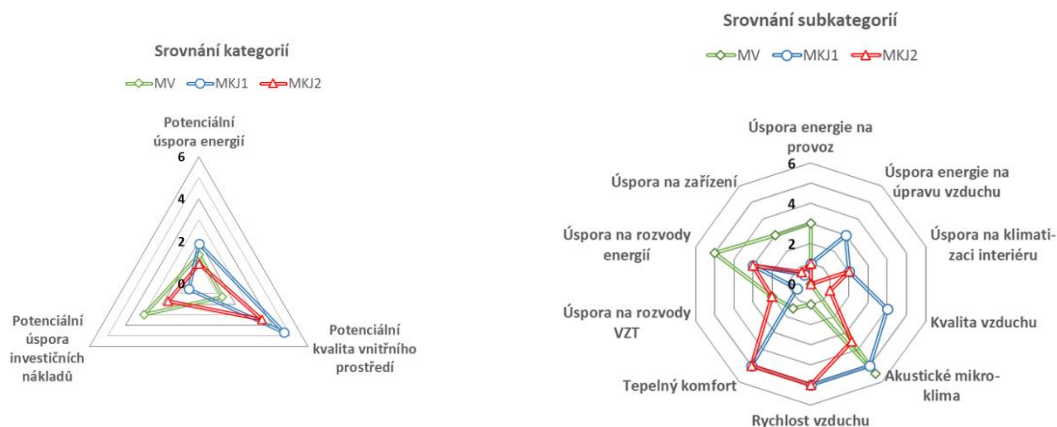
Obr. 39: Celkový pohled na výpočetní tabulku

5.2.3 VÝSTUPY HODNOCENÍ

Výstupem výpočetní tabulky jsou konkrétní numerické koeficienty pro jednotlivé kategorie a subkategorie, na jejichž základě lze zhodnotit pozitivní či negativní dopad daného systému personalizovaného větrání. Tabulka v současnosti umožňuje porovnání až tří různých systémů, které lze samostatně zadefinovat a pojmenovat. Výsledky jsou kromě numerické hodnoty zobrazeny i v síťovém grafu. Škála hodnocení je od nuly (nejhorší), po šest (nejlepší).

Na Obr. 40 lze vidět výsledky porovnání dvou personalizovaných systémů zmíněných dále v této práci (MKJ 1 a MKJ 2) a centrálního směšovacího větrání (MV), podrobněji popsané v následující kapitole.

		Potenciální úspora energií			Potenciální kvalita vnitřního prostředí				Potenciální úspora investičních nákladů			Celkové hodnocení
Var1:	MV	1,36			1,29				3			1,71
Var2:	MKJ1	1,86			4,66				0,54			2,98
Var3:	MKJ2	0,91			3,47				1,7			2,44
		Úspora energie na provoz	Úspora energie na úpravu vzduchu	Úspora na klimatizaci interiéru	Kvalita vzduchu	Akustické mikro-klima	Rychlost vzduchu	Tepelný komfort	Úspora na rozvody VZT	Úspora na rozvody energií	Úspora na zařízení	
Var1:	MV	3	0	0	0	5,5	1	1,5	2	5	3	
Var2:	MKJ1	1	3	2	4	5	5	5	0,7	3	0,55	
Var3:	MKJ2	1	0	2	1	3,5	5	5	2	3	0,75	



Obr. 40: Zobrazení výsledného porovnání tří odlišných systémů větrání

5.2.4 PŘÍKLAD HODNOCENÍ

5.2.4.1 Systémy

K demonstraci využití analýzy byly využity tři systémy. Základem pro posuzování a prvním systémem bylo klasické směšovací větrání, za další dvě varianty byly zvoleny dva odlišné typy personalizovaného větrání, jeden s přívodem čerstvého vzduchu, druhý systém byl založený na úpravě interiérového vzduchu. Oba systémy využívají možnost lokální úpravy teploty a personalizace.

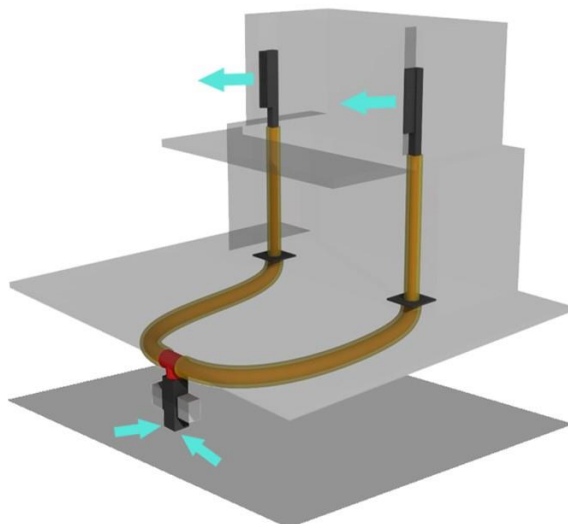
Pro porovnání byly nastaveny váhy jednotlivých kritérií takto:

- Kritérium úspory energií: váha 1
- Kritérium kvality vnitřního prostředí: váha 1
- Kritérium investičních nákladů: váha 0,5; váha je snížena s ohledem na to, že jde o jednorázovou investici a její vliv na celkové náklady bude nižší, než náklady na provoz objektu

(Jedná se o příklad využití váhy kritérií podle priorit)

Popis jednotlivých systémů

- **Systém 1: Pouze směšovací větrání (MV – mixing ventilation)**
 - Centrální úprava vzduchu
 - Klasický přívod ze směšovacích vyústek (například vířivé anemostaty)
- **Systém 2: Komplexní systém personalizovaného větrání s přívodem čerstvého vzduchu (MKJ 1 – mikro klimatizační jednotka typ 1)**
 - Personalizované větrání jako komplement centrálního přívodu vzduchu
 - Personalizovaná vyústka s přívodem čerstvého vzduchu
 - Zpětná vazba na centrální vzduchotechnickou jednotku (možnost úpravy množství vzduchu podle přítomných osob a teploty podle lokálního nastavení)
 - Snížené množství přiváděného vzduchu na osobu kvůli efektivní distribuci
 - Lokální úprava vzduchu pomocí Peltiérových článků
 - Snížená potřeba klimatizace prostoru kvůli lokální úpravě a personalizaci prostředí



Obr. 41: Schéma systému 2; systém je podrobněji rozebírán v kapitole 6 (zdroj: autor).

- **Sytém 3: Lokální cirkulační jednotky pro úpravu vzduchu (MKJ-2 – mikro klimatizační jednotka typ 2)**
 - Personalizované větrání jako komplement centrálního přívodu vzduchu
 - Personalizovaná vyústka s úpravou interiérového vzduchu
 - Filtrace znečištění interiérového vzduchu
 - Zpětná vazba na centrální vzduchotechnickou jednotku (možnost úpravy množství vzduchu podle přítomných osob a teploty podle lokálního nastavení)
 - Lokální úprava vzduchu pomocí Peltiérových článků
 - Snížená potřeba klimatizace prostoru kvůli lokální úpravě a personalizaci prostředí



Obr. 42: 3D model MKJ-2; systém je podrobně rozebírán v kapitole 7 (zdroj: autor).

5.2.4.2 Výsledky analýzy

Numerické a grafické zobrazení výsledků analýzy lze vidět na Obr. 43, Obr. 44 a Obr. 45. Lze z nich jednoduše přečíst mnoho základních informací o jednotlivých systémech.

System 1: Směšovací větrání (MV)

Je variantou s nejnižším celkovým hodnocením, přestože má lepší hodnocení v úspoře energií než MKJ-2 a je nejlepší co se týče investičních nákladů. Primárně ztrácí na kvalitě vnitřního prostředí, a to hlavně co se týče kvality přiváděného vzduchu, tepelného komfortu a rychlosti vzduchu na pracovních místech.

System 2: MKJ-1

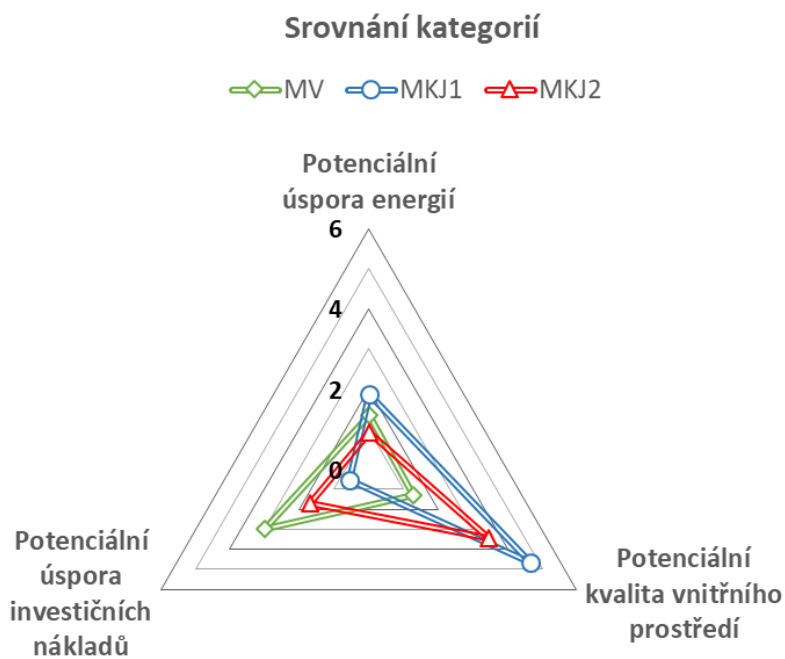
Zařízení má nejlepší hodnocení, a to hlavně zásluhou vysoké kvality vnitřního prostředí (přívod čerstvého vzduchu, nastavení) a nejvyšším potenciálem na úsporu energií (efektivita distribuce, možné snížení potřeby na klimatizaci interiéru). Cenou jsou však vysoké investiční náklady, a to hlavně co se týče rozvodů VZT a ceny jednotlivých zařízení.

System 3: MKJ-2

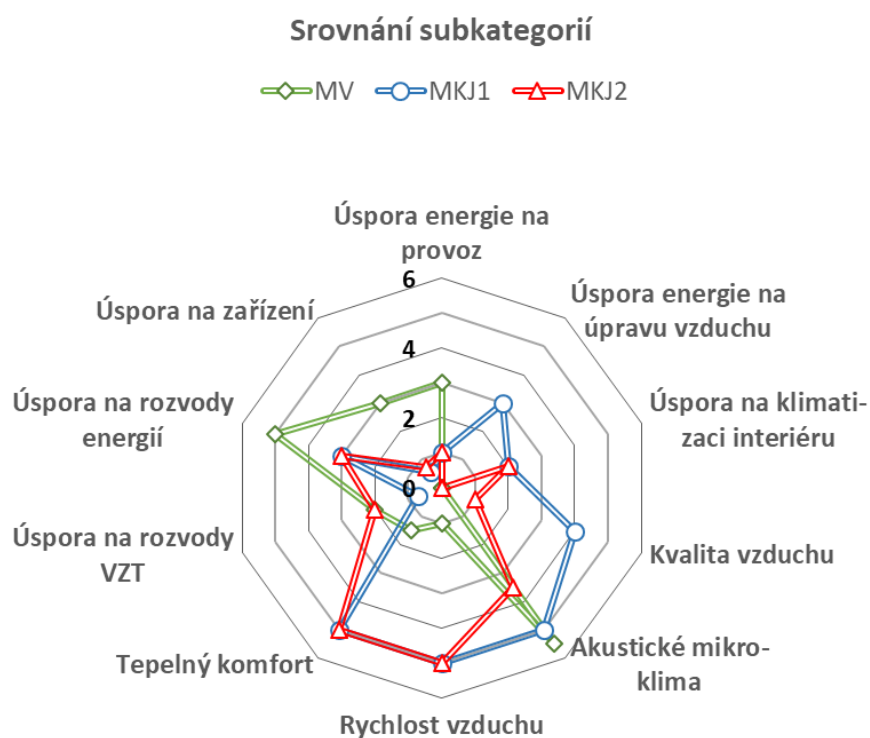
Jednotka je navržena principálně na zvýšení kvality vnitřního prostředí, v čemž vykazuje dobrých výsledků (i když ne tak dobrých, jako MKJ-1). Cenou jsou však opět vyšší pořizovací náklady a u této jednotky i o něco vyšší energie na provoz, která je převážně daná energií na provoz jednotlivých lokálních zařízení. Vzhledem k tomu, že není možné snížit množství přiváděného čerstvého vzduchu, není u tohoto systému zásadní prvek potenciálních úspor na centrální vzduchotechnice ani jejím provozu.

		Potenciální úspora energií			Potenciální kvalita vnitřního prostředí				Potenciální úspora investičních nákladů			Celkové hodnocení
Var1:	MV	1,36			1,29				3			1,71
Var2:	MKJ1	1,86			4,66				0,54			2,98
Var3:	MKJ2	0,91			3,47				1,7			2,44
		Úspora energie na provoz	Úspora energie na úpravu vzduchu	Úspora na klimatizaci interiéru	Kvalita vzduchu	Akustické mikro-klima	Rychlost vzduchu	Tepelný komfort	Úspora na rozvody VZT	Úspora na rozvody energií	Úspora na zařízení	
Var1:	MV	3	0	0	0	5,5	1	1,5	2	5	3	
Var2:	MKJ1	1	3	2	4	5	5	5	0,7	3	0,55	
Var3:	MKJ2	1	0	2	1	3,5	5	5	2	3	0,75	

Obr. 43: Numerické vyhodnocení systémů



Obr. 44: Grafické srovnání kategorií



Obr. 45: Grafické srovnání subkategorií

6 VÝVOJ SYSTÉMU PERSONALIZOVANÉHO VĚTRÁNÍ PRO ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU (MKJ-1)

6.1 PODROBNOSTI PROJEKTU

6.1.1 ZADÁNÍ

Projekt pro řízení letového provozu byl zaměřen na analýzu a řešení problémů vnitřního prostředí v sálu letových dispečerů (dále ATS sál), který je koncipován jako otevřený prostor s řadou oddělených pracovišť. Projekt byl zadán v souvislosti s plánovanou rekonstrukcí vnitřního zařízení a úpravou celkového uspořádání sálu. Tematicky byl projekt rozdělen do tří základních částí:

I. Analytická část

Analytická část byla zaměřena na posouzení současné situace a identifikaci problémů s vnitřním prostředím v rámci sálu. Pro toto posouzení bylo použito měření podmínek vnitřního prostředí přímo v sále a dotazníkového průzkumu mezi uživateli.

II. Posouzení variant řešení

V druhé části bylo úkolem navrhnout a posoudit možné varianty rozložení jednotlivých pracovišť v rámci místnosti tak, aby bylo dosaženo co nejlepších podmínek vnitřního prostředí, hlavně z hlediska vzájemného ovlivňování jednotlivých pracovišť.

III. Vývoj větrání pracoviště

Třetí fáze měla za cíl přizpůsobit jednotlivá pracoviště i okolní systémy tak, aby dokázaly zajistit co nejlepší vnitřní prostředí, a to na základě nového návrhu pracovního místa, který vznikl a vyvíjel se společně s projektem.

6.1.2 PRACOVNÍ TÝM

Na projektu se podílel tříčlenný pracovní tým, rozdělený podle jednotlivých fází projektu. Vedoucím pracovního týmu byl prof. Karel Kabele, který současně jako školitel vedl tuto práci. Výstupy ostatních členů týmu jsou ve zprávě pouze citovány, aby byl odlišen vlastní přínos autora. Konkrétní rozdělení bylo následující:

Prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

Vedl pracovní tým a podílel se na všech třech fázích projektu.

Ing. Zuzana Veverková, CSc.

Podílela se převážně na dvou prvních částech projektu, tedy na analytické části a na posouzení variant dispozičního uspořádání.

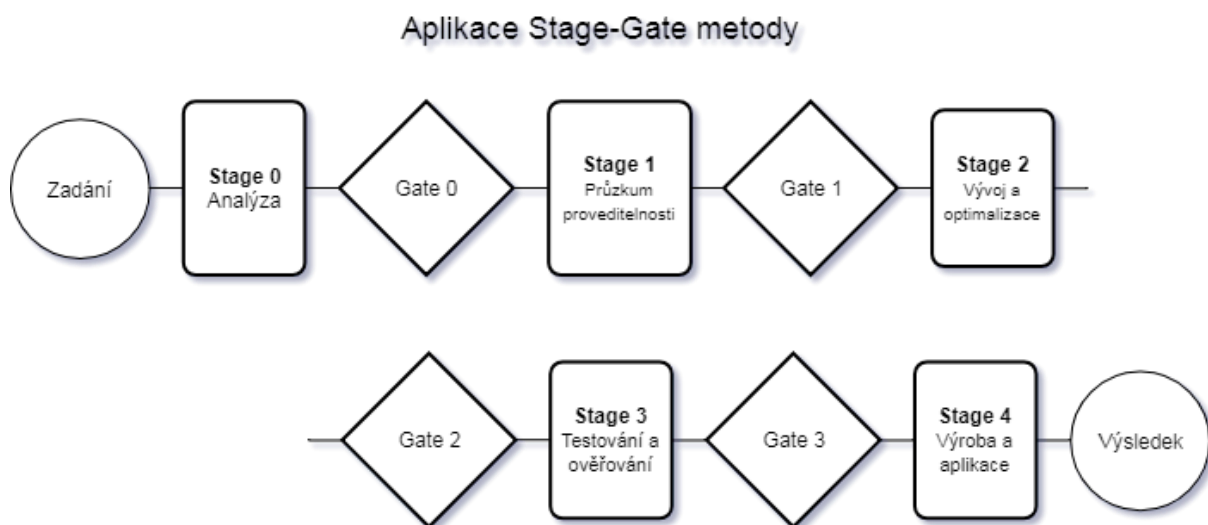
Ing. arch. Vojtěch Mazanec

Asistoval v první fázi projektu a pod vedením prof. Kabeleho měl primárně za úkol řešení třetí fáze projektu, tedy vývoj systému pro větrání pracoviště.

6.2 APLIKACE STAGE-GATE METODY

V této kapitole je popsána konkrétní aplikace stage-gate metody při vývoji tohoto systému personalizovaného větrání. Jednotlivé fáze systému stage-gate byly určeny tak, aby postupně zpřesňovaly návrh mikro ventilační jednotky pro osobní větrání a aby postupně vedly k finálnímu produktu.

Následující kapitoly jsou primárně kvůli stručnosti členěny podle rozdílného systému, avšak jsou odkazovány na jednotlivé fáze této metodiky.



Obr. 46 Stage-gate metoda – konkrétní aplikace pro vývoj jednotky. Viz kapitolu 4.3.

6.2.1 FÁZE 0: ANALÝZA

Prvotní nultá fáze obsahuje rešerši možných systémů, analyzuje požadavky prostředí, porovnává a posuzuje jednotlivé využitelné technologie z hlediska jejich proveditelnosti a vhodnosti pro danou aplikaci a z hlediska zlepšení sledovaných charakteristik. Výstupem nulté fáze práce je sestavení základního modelu MKJ, tedy ‚mikro klimatizační jednotky‘, který bude v základních principech splňovat potřebné parametry.

Činnosti

- rozbor požadavků a prostředí
- výběr řešení
- rozbor možných technologií
- základní model systému
- Ověření metodik

Použité metody:

- Měření na místě
- Dotazníkový průzkum
- Rešerše
- Měření full-scale modelu
- CFD simulace

6.2.1.1 Brána 0: zhodnocení proveditelnosti

Bránou je ověření principiální funkčnosti ideje systému. Na průchod touto branou byly stanoveny tyto otázky:

- Odpovídá navržený systém na detekované problémy?
- Jsou zvolené technologie aplikovatelné na MKJ?
- Je základní zvolený design funkční?

6.2.2 FÁZE 1: ZÁKLADNÍ VÝVOJ SYSTÉMU

Fáze 1 měla za cíl rozvinutí a optimalizaci předchozího modelu do funkčního prototypu, který by splňoval základní návrhové parametry, bude tedy schopen dodat dostatek vzduchu a energie, aby splnil analýzou dané požadavky.

Činnosti:

- Prototyp vytvořený pomocí rapid prototyping
- Měření výkonu a analýza závislostí
- Řízení teploty a množství vzduchu
- Základní rozvržení vyústek a implementace do pracovního místa

Použité metody:

- 3D modelování
- CFD simulace
- Fyzické měření full-scale modelu

6.2.2.1 Brána 1: zhodnocení funkčnosti

Na průchod touto branou byly stanoveny tyto otázky:

- Splňuje navržené tělo MKJ požadované parametry?
- Lze zvolené rozvržení vyústek aplikovat do pracovního místa?

6.2.3 FÁZE 2: OPTIMALIZACE

Tato fáze měla za cíl podrobně rozebrat a optimalizovat jednotlivé vlivy na výkon a efektivitu MKJ, analyzovat proudění vzduchu z vyústek a optimalizovat tvar difuzorů a vytvořit funkční řídicí jednotku. Hlavní metodou pro tuto fázi bylo matematické modelování pomocí CFD.

Činnosti:

- Matematický model prvního prototypu pro CFD a jeho verifikace
- Testování dopadů jednotlivých komponentů na výkon a potřebu energie pomocí CFD a ověření nutných výkonů pro splnění daných požadavků a parametrů
- Optimalizace proudění z vyústek
- Volba komponent řízení

Použité metody:

- CFD simulace

6.2.3.1 Brána 2: zhodnocení výsledků optimalizace

Na průchod touto branou byly stanoveny tyto otázky:

- Jaké jsou aplikovatelné optimalizace jednotky?
- Jaký je ideální tvar vyústek?
- Jaký zvolit systém řízení jednotky?

6.2.4 FÁZE 3: ÚPRAVY PRO REALIZACI

V této fázi bylo prioritou aplikovat předchozí zjištění a vytvořit nejen funkční prototyp, ale zařízení, které bude mít veškeré potřebné parametry k následnému převedení do provozu. Hlavní bylo přesně stanovit rozmístění systému a aplikace jednotlivých částí do pracovního místa. Dále bylo třeba ověřit, zda systém má reálný dopad na kvalitu vnitřního prostředí na pracovišti. Primární metodou bylo 3D modelování, 3D tisk, měření s termálním manekýnem a PIV anemometrie.

Činnosti:

- Rozbor možných umístění jednotky
- Optimalizace dílů pro realizaci
- Výroba reálného prototypu
- Ověření vlivu na tepelný komfort
- Úprava nedostatků

Metody:

- 3D modelování
- 3D tisk
- Měření vlivu na tepelný komfort s termálním manekýnem
- Měření a ověření obrazu proudění

6.2.4.1 Brána 3: Ověření proveditelnosti

Na průchod touto branou byly stanoveny tyto otázky:

- Jaké je finální umístění a tvar jednotky?
- Jaký je reálný dopad systému na tepelný komfort?
- Je technicky možné navrženou jednotku vyrábět?

6.2.5 FÁZE 4: FINÁLNÍ PODOBA A OCHRANA DUŠEVNÍHO VLASTNICTVÍ

Poslední podstatnou fází bylo zajistit ochranu duševního vlastnictví a určit postup a technologii výroby finálního prototypu.

Činnosti:

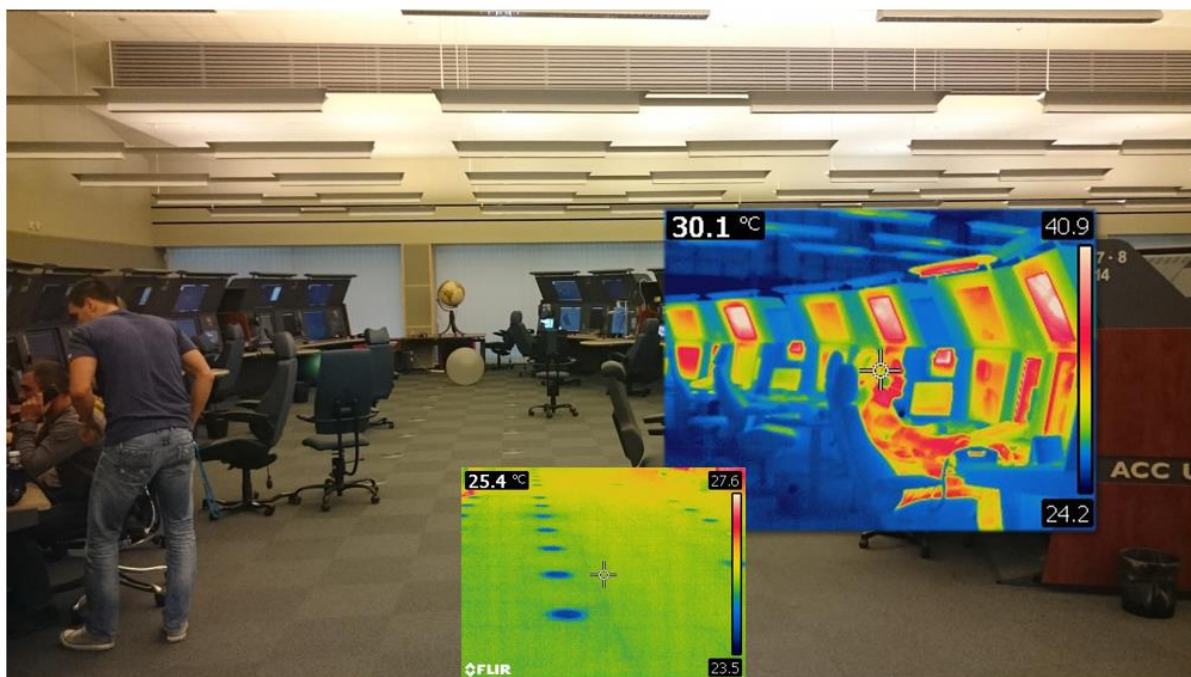
- Finální podoba zařízení
- Ochrana duševního vlastnictví
- Možnosti realizace

6.3 ANALÝZA ATS SÁLU

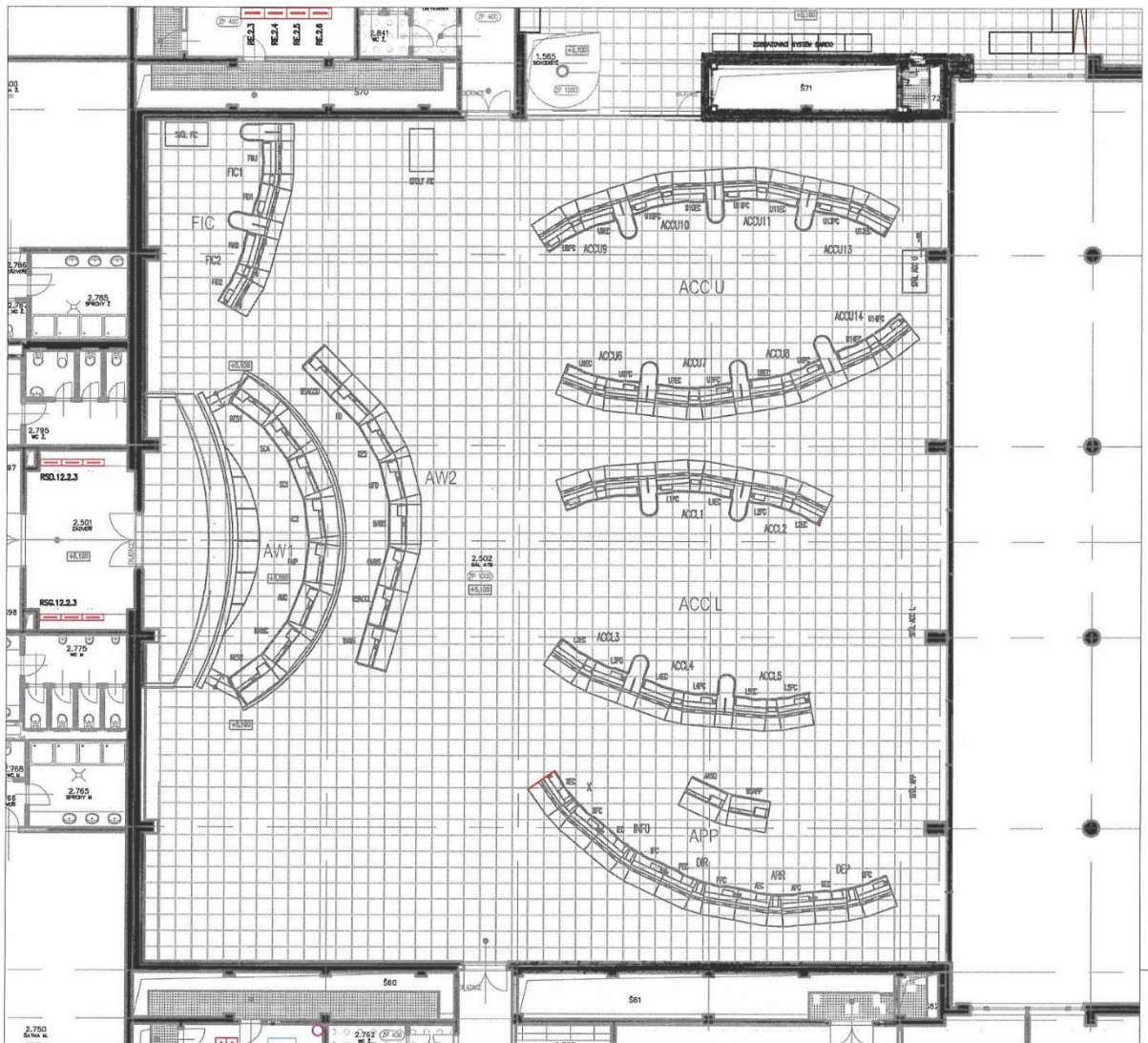
Analýza sálu patřila do přípravné nulté fáze stage-gate metody, která měla za úkol připravit podklady pro samotný vývoj zařízení (6.2.1).

6.3.1 POPIS ATS SÁLU

ATS sál řešený v projektu je v půdoryse přibližně čtvercového tvaru s volnou dispozicí. Ze tří stran jsou do sálu vstupy z vedlejších prostor a poslední strana je prosklená. Po většinu doby provozu je však prosklení zataženo (lze vidět na Obr. 47). Sál samotný je rozdělený do sekcí, které vymezují pracovní místa. Vzhledem k jejich tvaru a velikosti tvoří vizuální a akustickou bariéru a pocitově sál rozdělují v mírně zakřivených obloucích, které jsou způsobeny vzájemným napojením pracovišť. Obvykle jsou ještě pracovní místa spojena do dvojic, oddělených od sebe výběžkem desky a klínem, v kterém jsou umístěny technologie. Současné půdorysné uspořádání sálu je zobrazené na Obr. 48.



Obr. 47: Řízení letového provozu: pohled do ATS sálu doplněný o snímky z termokamery, ukazující jednotlivé zdroje tepla. Na podlaze je vidět chladné vyústky distribuující čerstvý chladný vzduch [82].



Obr. 48: Půdorys ATS sálu v současném rozložení pracovních míst [82].

6.3.1.1 Vzduchotechnický systém

Sál ATS je vybaven celkovou klimatizací pracovního prostoru, kterou zajišťují dvě sestavné klimatizační jednotky (jedna jednotka tvoří kompletní zálohu); v sestavě přívodní části je klapka, filtr, rotační rekuperátor, směšovací komora, vodní ohřivač, vodní chladič, přívodní ventilátor a parní zvlhčovač. Odvodní část jednotky je tvořena klapkou, filtrem a odvodním ventilátorem. Každá z jednotek je umístěna v jiné strojovně. Pro každou strojovnu je (pro všechna zařízení v ní umístěná) společné nasávání čerstvého vzduchu žaluzií z fasády a znehodnocený vzduch je odváděn společným potrubím nad střechu objektu. Každá z jednotek je navržena na celkový průtok vzduchu 39400 m³/hod s podílem čerstvého vzduchu 4500 m³/hod. Tepelný výkon každé VZT jednotky je 48 kW, chladicí výkon 160,2 kW.

Přívod upraveného vzduchu je řešen vířivými podlahovými výstřiky rozmístěnými v půdorysu místnosti s ohledem na stávající nábytek. Přívod

vzduchu do vyústek je skrze zdvojenou podlahu sloužící zároveň jako plenumbox. Podle údajů z projektu VZT by rychlost proudění vzduchu měla být „maximálně 0,1 m/s ve výšce 10 až 50 mm nad rovinou podlahy“.

Odtah vzduchu je řešen potrubím s vyústkami umístěnými v meziprostoru nosné konstrukce stropu nad podhledem, rychlost vzduchu ve výšce hlavy sedící osoby by dle projektu neměla překročit 0,2 m/s. Vzduch ze sálu proudí k odsávacímu potrubí přes mříže osazené v podhledu – ve svislých částech výškových odskoků podhledu. Odsávání odvodního vzduchu je navrženo jedním potrubím napojeným přes uzavírací klapky na obě jednotky.

Vzduchotechnické zařízení je řízeno centrálním řídicím systémem nastavením teploty přívodního vzduchu, tlaku ventilátorů a polohy směšovací klapky s kontrolou údajů z 6 párů čidel teploty, umístěných ve výšce cca 2,2 m po obvodě prostoru ATS sálu. Popis vychází ze závěrečné zprávy projektu [82].

6.3.1.2 Specifika provozu v ATS sále

Vzhledem k tomu, že pro specifický provoz sálu byla vypracována odborná studie dle čl. 2.4.UZ, je vhodné uvést pasáže z této zprávy pomocí citace z tohoto odborného textu, protože parafrázování by mohlo vést ke zkreslení skutečností.

Významnou skutečností je, že práce jednotlivých osob neprobíhá izolovaně, jde o složitý provoz s úzkou provázaností jednotlivých specialistů (při výkonu jedné specializace je třeba průběžně pracovat, resp. mít přehled o řadě dalších faktorů). Téměř ve všech případech vykonávaných prací jsou tak kladeny vyšší nároky na spolehlivost kooperace a komunikace v pracovních diádách (event. triádách), dále pak na celkovou koordinaci.

Neopominutelnou okolností je skutečnost, že u většiny osob na pracovištích sálu ATS bude jejich práce vykonávána ve vnucené pracovní poloze vsedě, což přináší specifické nároky na ergonomické řešení pracovního místa.

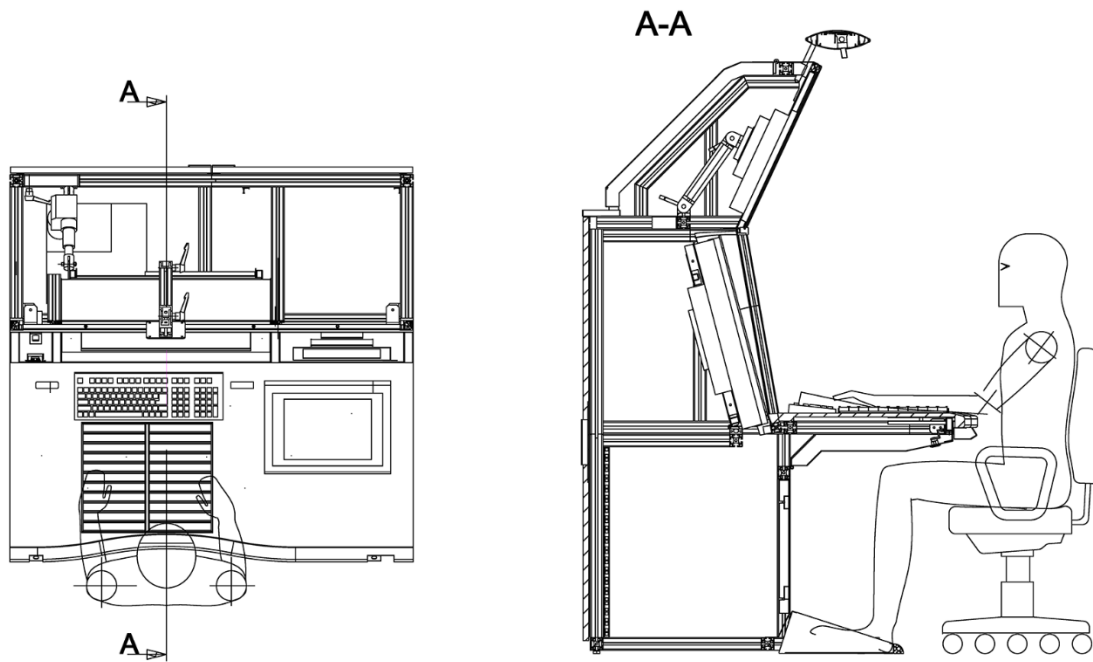
U většiny profesí jednotlivých sektorů lze pracovní režim charakterizovat vyšším stupněm nepravidelnosti a se zvláštním uspořádáním, souvisejícím s potřebami nepřetržitého provozu (a tedy i z této okolnosti vyplývajícího vnuceného tempa). Tato okolnost vyžaduje vysokou míru adaptace na tento typ režimu, jedná se o zátěž z hlediska běžného pracovního komfortu člověka. Střídání různých typů směn, nepravidelné nástupy, noční práce se zvýšenými nároky na udržení bdělosti a reaktivitu pracovníka představují z hlediska adaptability a zdraví zátěžovou situaci; jde o narušení přirozených biorytmů. Tato okolnost se promítá i do podoby tzv. mimopracovní zátěže, kdy mu výkon profese v různých typech směn přináší změnu

životního stylu, tj. celou řadu omezení – včetně často pouze částečné participace na rodinném, společenském životě.

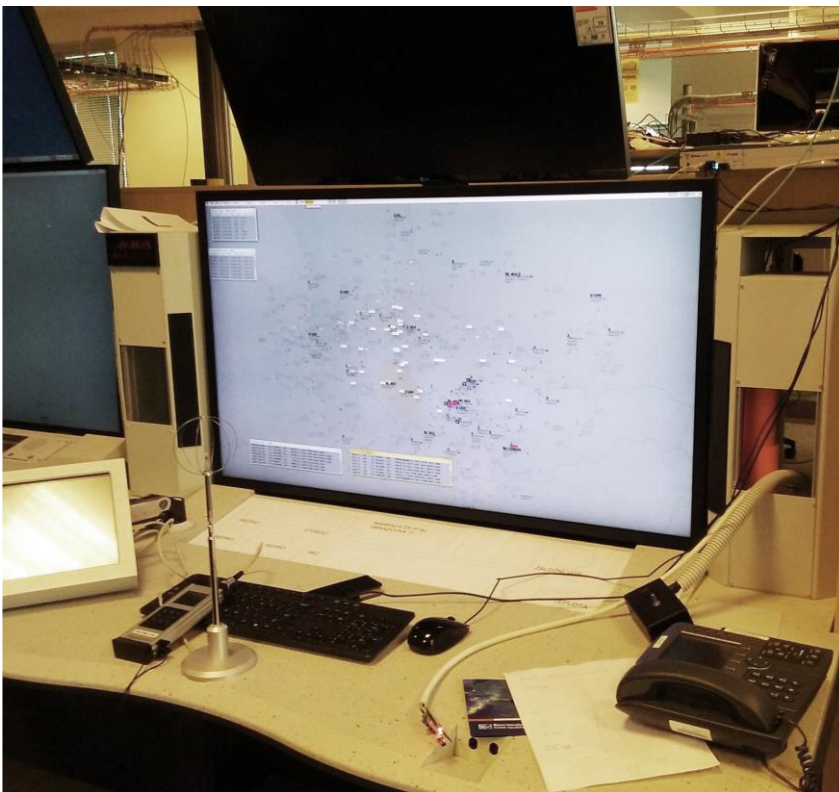
Z hodnocení práce lze jednoznačně vyvodit, že práce specialistů prováděná v sále ATS je z mnoha hledisek mimořádně náročná a za určitých okolností by mohla vést z hlediska vlivu na zdraví např. k nadměrnému stresu, neurotizaci až k určitému poškození zdraví (u dopravních profesí je mnohonásobně prokázáno, že víceleté působení stresorů z práce a pracovního prostředí, či nevhodná organizace práce a zdravotně nepřiměřený režimu práce a odpočinku se odráží především ve zvýšeném počtu kardiovaskulárních chorob). Je zcela jasné, že diskomfort, resp. neodpovídající pracovní podmínky u těchto specialistů povedou jednak k ovlivnění jejich zdravotního stavu, avšak primárně budou mít negativní vliv na kvalitu práce (nadměrná únava, zhoršený výkon, chybovost, úbytek pracovní motivace).

6.3.1.3 Popis pracovního místa

Pracovní místo letových dispečerů je koncipováno jako složitý technologický a ergonomický celek, který musí zajišťovat pohodlné, rychlé a přehledné ovládání celého systému. Pracovní místo je zázemím pro celou řadu datových i silových technologií napojených na centrální komunikační kanály s velkou mírou rizika rušení a poškození. Řada technologií je z důvodu rizika selhání zálohovaná, či dublovaná. Systém personalizovaného větrání zabudovaný do tohoto prostředí proto musel respektovat veškeré systémy, silovou elektřinu a rozvody uvnitř samotného pracovního místa. Samotný koncept tohoto zařízení pak vznikl v součinnosti a kritice přímo od budoucích uživatelů.



Obr. 49: Půdorys a řez pracovním místem letového dispečera podle nového návrhu [82].



Obr. 50: Pohled na nový návrh pracovního místa letového dispečera doplněný o postranní technologické boxy [82].

6.3.2 MĚŘENÍ A ANALÝZA DAT ATS SÁLU

Předmětem této fáze zakázky bylo seznámení se se sledovaným pracovištěm a jeho specifiky, pracovním procesem, stávajícím technickým řešením sledovaného prostoru, technickými systémy pro zajištění požadované kvality vnitřního prostředí a dosud provedenými posudky a studiiemi.

Po seznámení se s problematikou a prostudování podkladů bylo provedeno kontrolní měření vybraných parametrů vnitřního prostředí s cílem zjištění skutečného objektivního průběhu sledovaných parametrů. Současně byl proveden dvoustupňový dotazníkový průzkum mezi pracovníky obou sálů, kdy první část dotazníku (A) byla zaměřena na vyjádření okamžitých pocitů z prostředí v době objektivního měření parametrů vnitřního prostředí a druhá část dotazníku (B) byla zaměřena na vyjádření dlouhodobých pocitů z pracovního prostředí.

Dotazníkový průzkum v kombinaci s naměřenými daty byl použit pro identifikaci problémových oblastí ve stávajícím řešení sálu [82]¹.

¹ Text přímo vychází ze závěrečné zprávy projektu [82] zpracované celým zmíněným týmem.

6.3.2.1 Měření sálu

Měření bylo zaměřeno na zjištění skutečných parametrů vnitřního prostředí v těsné blízkosti pracovního místa a v prostoru sálu, vizuální monitoring pohybu osob v sále, zjištění skutečných parametrů odváděného vzduchu a kontrolní měření venkovního prostředí. Hodnoty naměřené přístroji zpracovatele byly doplněny hodnotami získanými z řídicího systému budovy. Měření probíhalo v celkem šesti místech, vyznačených na Obr. 51. Měřené veličiny v jednotlivých měřicích místech jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 7). Časový krok měření byl 5 minut.

V průběhu měření byly cíleně provedeny změny v nastavení klimatizačního zařízení s cílem zjistit vliv změny parametrů vzduchotechnického zařízení na vnímanou kvalitu prostředí. Měněna byla teplota přiváděného vzduchu a poloha směšovací klapky. Celkem bylo v průběhu měření provedeno sedm experimentů, označených písmeny A až G. Experimenty se vztahovaly k výchozímu nastavení provozních parametrů vzduchotechniky viz Tabulka 6.²

Tabulka 6: Popis jednotlivých experimentů

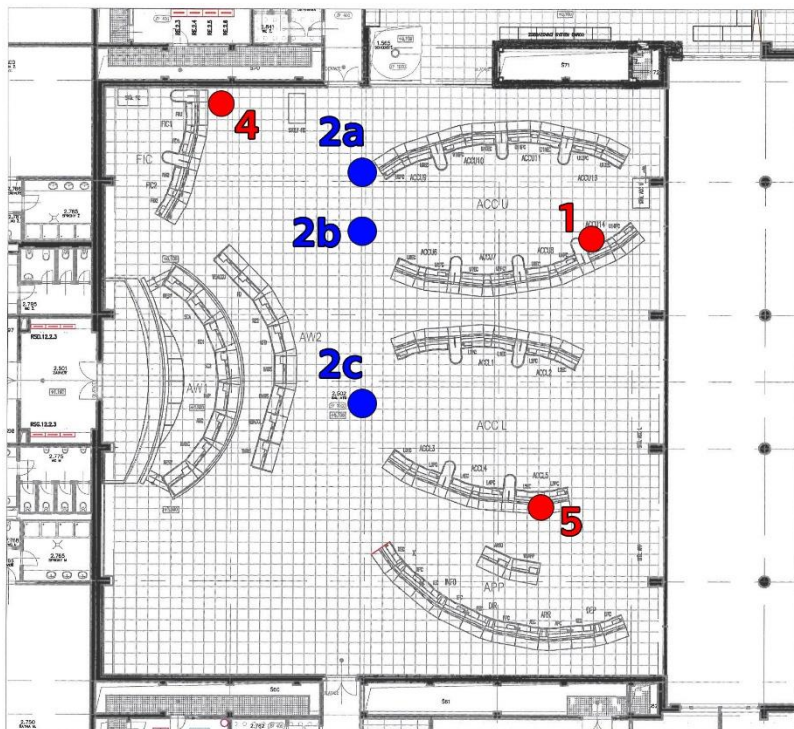
Exp.	Časové rozmezí	Popis	Klapka
A	15.9. 7:30 17.9. 7:30	normální provoz s provětráváním	50/70
B	17.9. 7:30 19.9. 7:30	snížení teploty o 1 °C (z 24 °C na 23 °C)	50/70
C	19.9. 7:30 21.9. 7:30	Stále snížení teploty o 1 °C (z 24 °C na 23 °C)	30/100
D	21.9. 7:30 22.9. 7:30	teplota zpět o 1°C (na 24°C)	50/70
E	22.9. 7:30 23.9. 12:00	22.9.2015 v 7:49 VZT zvýšila o 1 °C na 25 °C 22.9.2015 v 10:00 VZT snižuje o 0,5 °C na 24,5 °C 22.9.2015 ve 22:30 VZT snižuje o 0,5 °C na 24 °C	50/70
F	23.9. 12:00 28.9 11:00	23.9.2015 od 12h VZT postupně snižuje t o 0,1 °C, běží režim 50/70, ale bez snížení t při provětrávání o 0,5 °C na 30 minut 24.9. v 0:13h dosáhla t = 22,5 °C, snižování skončilo – režim 50/70 pokračuje, ale opět bez snížení t při provětrávání o 0,5 °C na 30 min 28.9. v 11h zvyšování teploty - končí režim 50/70	30/100
G	28.9. 11:00 2.10. 7:00	28.9. v 11h zvyš. teploty, končí režim 50/70, pokračuje režim 0 28.9. v 11:42h zvýšeno až na 24 °C – stále režim 0 28.9. v 14:54h t = 23,5 °C – režim 35 28.9. 15 – 16h t = 24 °C – režim 35 28.9. od 16h do 29.9. 12:42h t = 23,5 °C – režim 35 29.9. 12:48h – 16:24h t = 24 °C – režim 35 29.9. 16:36h do 2.10. 6:12h t = 23,5 °C – režim 35	0/35

² Text přímo vychází ze závěrečné zprávy projektu [82] zpracované celým zmíněným týmem.

6.3.2.2 Měřené body a veličiny

Tabulka 7: Měřené veličiny v daných bodech [82].





Měřené veličiny	Místo měření							
	1	2a	2b	2c	3	4	5	6
	Sál ATS pracoviště ACC	Nad podhledem sálu odtah vzduchu	Nad podhledem sálu odtah vzduchu	Nad podhledem sálu odtah vzduchu	Exteriér	Sál ATS celý prostor	Sál ATS pracoviště APP	Sál ATS u podlahy
Teplota vzduchu	x	x	x	x	x		x	x
Operativní teplota	x							
Vlhkost	x	x	x	x	x		x	
Rychlost proudění vzduchu	x							x
CO ₂		x	x	x				
Formaldehyd		x	x	x				
VOC		x	x	x				
Časoběrná videokamera						x		
Hladina akust. tlaku	x							
Magnetická indukce	x							



Obr. 51: Půdorysné zobrazení měřených bodů [82].

6.3.2.3 Použité přístroje

Tabulka 8: Použité přístroje

Název	Popis	Obrázek
<p>Thermal Comfort Data Logger 1221 od firmy Bruel and Kjaer (dnes Innova)</p>	<p>Kombinovaný analyzátor a datalogger Thermal Comfort Data Logger 1221 od firmy Bruel and Kjaer (dnes Innova) vybavený 6 snímači ve dvou modulech - Comfort Module (teplota vzduchu v rozsahu -20-100° C, rychlost proudění vzduchu, vlhkost vzduchu) a Heat Stress Module (teplota vzduchu v rozsahu -40-150° C, výsledná teplota kulového teploměru, sálání). Pro měření parametrů vnitřního prostředí byla použita tato čidla/tyto sondy: proudění vzduchu, vlhkost, teplotní asymetrie, teplota vzduchu a operativní teplota.</p>	
<p>Datalogger R3120 Comet System, s.r.o</p>	<p>Datalogger měřící teplotu a vlhkost vzduchu</p>	
<p>Sound Level Meter Type 2236 firmy Bruel and Kjaer (dnes Innova)</p>	<p>Měření hladiny akustického tlaku</p>	
<p>Milli Gauss Meter GU-3001</p>	<p>Měření magnetické indukce</p>	
<p>Photoacoustic Multi-gas Monitor INNOVA 1412 (od firmy Innova Air Tech Instruments A/S),</p>	<p>Teplota vzduchu, dále odběr vzorků ve 3 místech pro měření vlhkosti, CO₂, formaldehydu a VOC (těkavých organických látek)</p>	

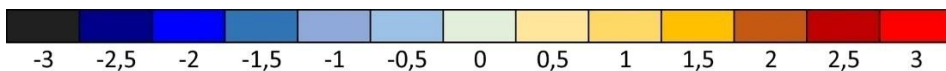
BRINNO TLC200 PRO	Časosběrná kamera	
SwemaAir 300 Tectra a.s	Anemometr se žhaveným vlákem, rozsah 0,05-3,0 m/s.	
Testo 540	Luxmetr	

6.3.2.4 Dotazníkový průzkum

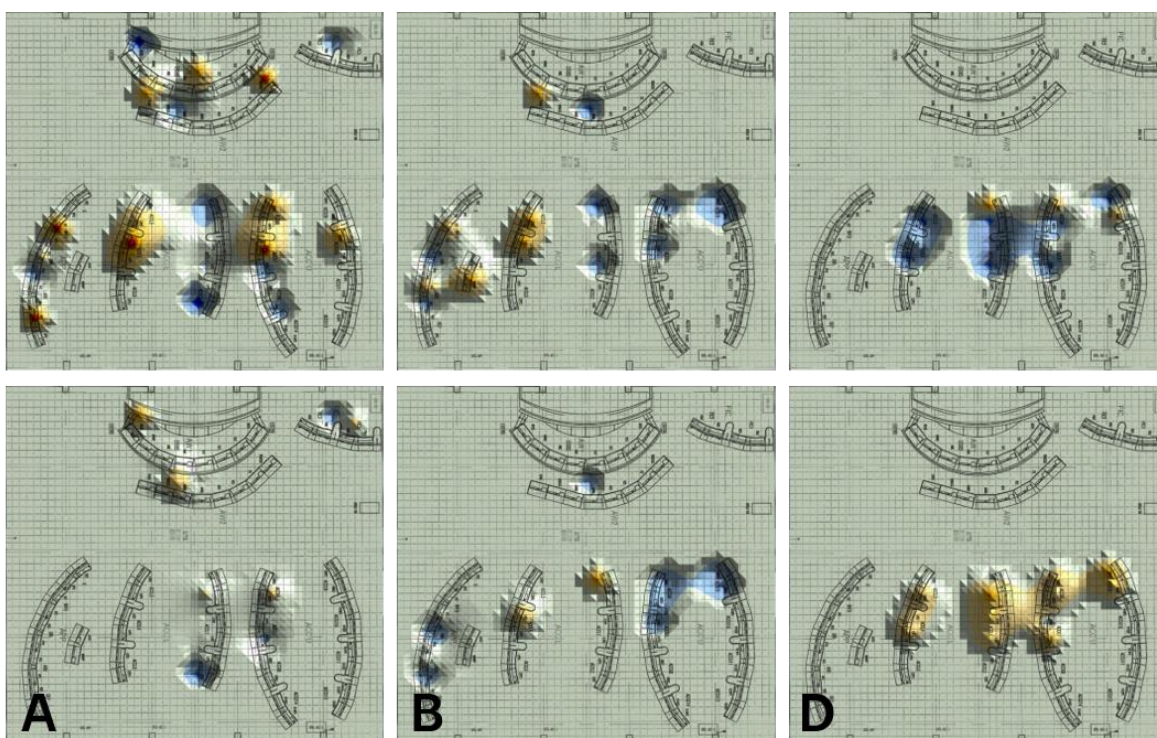
Současně s měřením fyzikálních veličin byl proveden dvoustupňový dotazníkový průzkum mezi pracovníky sálu. První část dotazníku (označená jako dotazník A) byla zaměřena na vyjádření okamžitých pocitů z prostředí v době objektivního měření parametrů vnitřního prostředí. Tyto dotazníky byly vyplňovány opakovaně bezprostředně po pracovní směně a celkem jich bylo v průběhu měřeného období odevzdáno 196. Druhá část (označená jako dotazník B) sloužila k vyjádření dlouhodobých pocitů z pracovního prostředí. Dotazníky B byly vyplňovány každým pracovníkem pouze jednou a bylo jich celkově 65. Podrobnější vyhodnocení dotazníkového průzkumu lze nalézt v příloze.

6.3.2.5 Prostorové grafy

Pro grafické vyhodnocení souvislostí bylo kromě statistik použito i časoprostorového zobrazení na 3D grafech, které mělo za úkol přiřadit odpovědi z dotazníků v daném časovém intervalu ke konkrétním pracovním místům na půdorysu sálu. Prostorové grafy byly vyhodnoceny pro jednotlivé experimenty i jednotlivé dotazníkové odpovědi. Bylo tak možné vyhodnotit účinky vzduchotechniky na jednotlivé pozice v rámci sálu. Grafy jsou zobrazeny v barevné škále od -3 do +3 (viz Obr. 52).



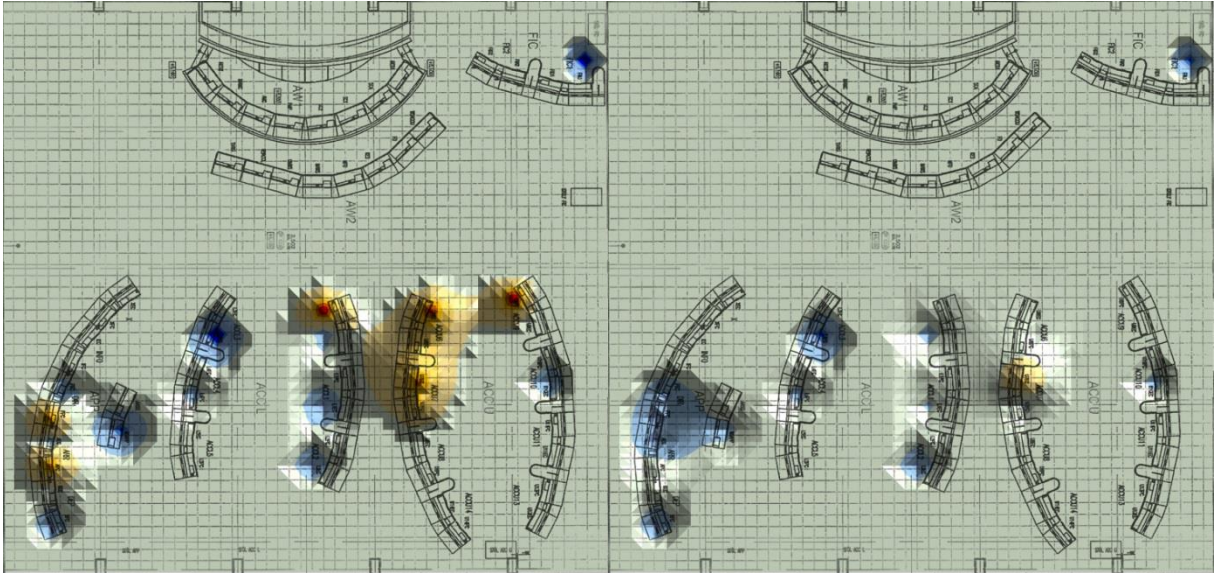
Obr. 52: Barevná škála používaná pro prostorové grafy [82].



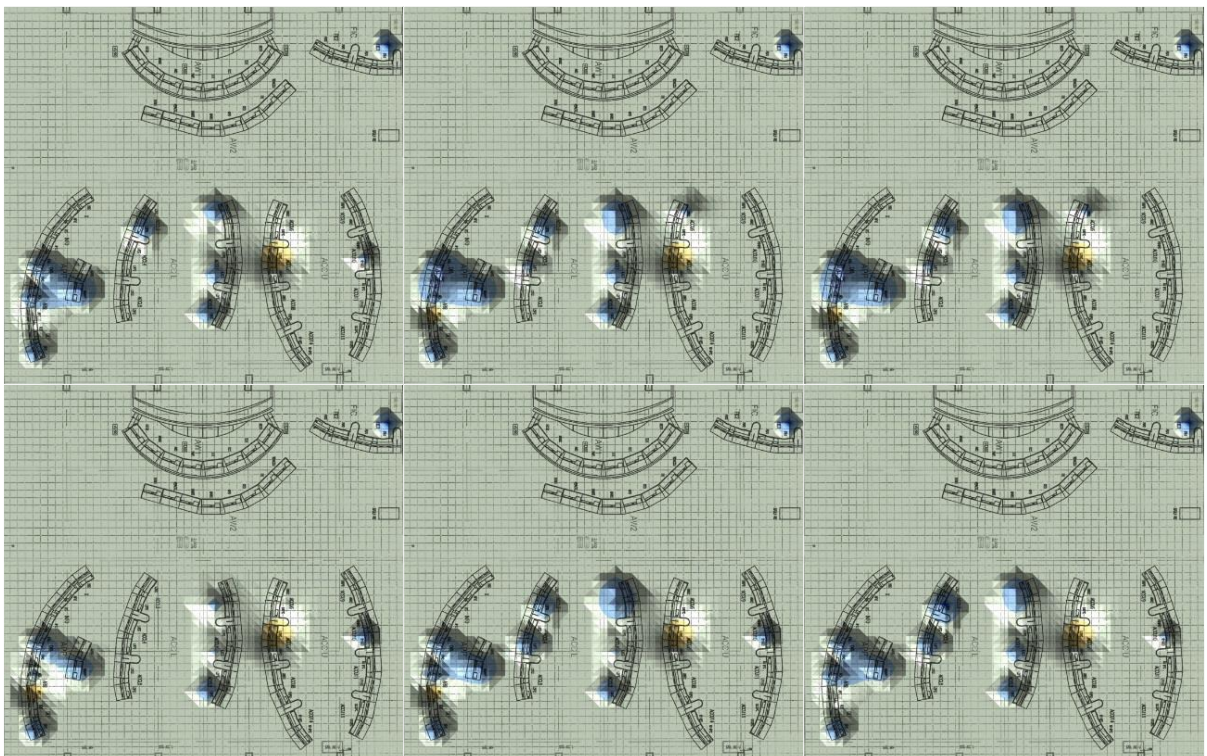
Obr. 53: Zobrazení spokojenosti s teplotou (horní řada, ve škále nespokojen-spokojen) a celkového tepelného pocitu (dolní řada, ve škále chlad-teplo) pro tři experimenty (A, B, D) [82].

Kompletní prostorový graf pro experiment F

Na Obr. 54 a Obr. 55 je pak zobrazena kompletní sestava grafů pro experiment F, která ukazuje závislost spokojenosti i tepelného pocitu na jednotlivých místech a v jednotlivých zjišťovaných zónách (hlava, ramena, záda, hrudník, ruce, nohy).



Obr. 54: Spokojenost s teplotou (vlevo, škála nespokojený - spokojený) a celkový tepelný pocit (vpravo, škála chlad - teplo) [82].



Obr. 55: Dílčí tepelné pocity (škála chlad-teplo) pro jednotlivé části těla. Horní řada zprava: hlava, ramena, záda; spodní řada zprava: hrudník, ruce, nohy [82].

6.3.2.6 Identifikace problémů z hlediska kvality vnitřního prostředí

Na základě analýzy naměřených dat a odpovědí uvedených v dotaznících byly identifikovány problémové oblasti sálu ATS z hlediska vnitřního prostředí. Nutno zmínit, že měření a průzkum okamžitého stavu byl prováděn v přechodném období na přelomu září a října, kdy nebyly extrémní venkovní podmínky. Závěry z měření tak není možné jednoznačně zevšeobecnit na období celého roku. Některé subjektivní závěry i pro letní období je však možné odvodit z dotazníkového průzkumu B.

Následující závěry přímo vycházejí či přímo citují závěrečnou zprávu projektu [82].

Závěry z měření a dotazníkového průzkumu sálu v oblasti tepelně-vlhkostního mikroklimatu:

Stávající VZT zařízení dokáže udržovat teplotu a vlhkost vzduchu v místnosti v okolí prostorových termostatů v nastavené hodnotě. Rozdíl mezi teplotou vzduchu přiváděného, v dýchací zóně a odváděného potvrdil, že v měřeném období je výkon vzduchotechnického zařízení dostatečný pro odvedení tepelné zátěže z daného prostoru.

Prostorové rozložení teploty v horizontální rovině nevykazuje významnější odchylky a z reakcí uživatelů nevyplývá žádná extrémně nepříznivá pozice v prostoru sálu. Na druhou stranu, tento způsob distribuce vzduchu je příčinou poměrně velkých vertikálních teplotních rozdílů mezi úrovní kotníků a hlavy, kdy v tomto přechodném období pro dosažení vnitřní teploty 23,5 °C byla teplota přiváděného vzduchu 16 až 24 °C, což bylo příčinou nespokojenosti u významného počtu respondentů. Problém je též v oscilaci teploty přiváděného vzduchu. Amplituda se mění v závislosti na nastavení směšovací klapky a teploty (experimenty A-E velká, F-G malá). Tepelný komfort uživatelů tak významně ovlivňuje teplota přiváděného vzduchu.

Experimenty prokázaly, že uživatelé jsou velmi citliví na změnu teploty. Zvýšení teploty z 23,5 °C na 25 °C např. zapříčinilo stížnosti vedoucí k předčasnému ukončení experimentu a snížení teploty vzduchu v prostoru na původní hodnotu. Toto potvrzuje náročnost práce.

Tepelný komfort ovlivňuje i rychlost proudění vzduchu. Stížnosti jsou na vysokou rychlost proudění vzduchu v blízkosti vyústek (ve výšce 0,15 m - 1,5 až 1,8 m/s; ve výšce 0,5 m cca 0,5 m/s) a nízkou rychlost proudění vzduchu v dýchací zóně (cca 0,1 m/s). Hodnoty u podlahové vyústky byly naměřeny za běžného provozu dne 21. 9. 2015 v 8:16 h (provozní stav E) a výrazně převyšují hodnoty udávané v projektu (max.

0,1 m/s). Hodnoty změřené v oblasti dýchací zóny pracoviště jsou naopak velmi nízké, což je způsobeno vzájemným umístěním vyústek, pracovní desky a polohy hlavy pracovníka. Přívod vzduch z podlahy je odstíněn pracovní deskou, a tak v oblasti hlavy vzduch prakticky neproudí, zatímco mezi konzolami je rychlost proudění ve vertikálním směru vyšší. Tyto skutečnosti ještě umocňují teplotní rozdíl a přispívají tak k diskomfortu v této oblasti.

V letním období se v dotaznících objevily stížnosti na příliš nízké teploty, což patrně souvisí s výše uvedenými problémy s teplotou a rychlostí přiváděného vzduchu.

Příznivě je vnímáno vyhřívání pracovní desky stolu.

Závěry z měření a dotazníkového průzkumu sálu v oblasti kvality vzduchu:

V průběhu měření byla měřena kvalita vzduchu na odtahu z místnosti ve třech místech půdorysně od sebe vzdálených. Naměřené hodnoty tak indikují nikoliv stav v dýchací zóně, který vnímají uživatelé, ale maximální hodnoty odváděného vzduchu. V měřeném období byla v odváděném vzduchu naměřena průměrná koncentrace CO₂ cca 1100 ppm s maximální hodnotou 1603 ppm (jednorázově v jednom měřeném místě) a minimální 875 ppm. Tyto hodnoty indikují, že množství vzduchu je přiměřené a krátkodobý lokální výskyt maximální hodnoty není zásadní problém.

Přesto, že celkové množství vzduchu je dle předpisů dostatečné, část respondentů si stěžuje na jeho kvalitu. Nejčastější stížnost je na kvalitu vzduchu, zejména na „umělý“ a „vydýchaný“ vzduch (95,6 %) s pocitovou absencí vzduchu čerstvého. Ke znečištění vzduchu CO₂ a dalšími škodlivinami (VOC – těkavé organické látky) totiž dochází postupně při obtékání člověka vzduchem, nejvíce však v dýchací zóně. Zajistíme-li dostatečnou rychlost proudění vzduchu kolem člověka (0,1 až 0,2 m/s), pak se škodliviny odvádějí a vzniká pocit komfortu. V tomto případě zřejmě nastává problém související již s výše uvedeným – malá rychlost proudění vzduchu v dýchací zóně nestačí odvést škodliviny produkované člověkem a nastává pocit vydýchaného vzduchu.

Měření VOC a formaldehydu neprokázalo žádné extrémní hodnoty, což indikuje skutečnost, že vybavení místnosti již tyto látky neprodukuje. Výjimkou byla situace dne 29. 9. 2015 v 11:35 h, kdy došlo k více než dvojnásobnému zvýšení koncentrace formaldehydu i VOC a 15. 9. 2015 ve 13:50 h, kdy došlo k téměř čtyřnásobné koncentraci VOC

ve středu místnosti. Příčinou mohou být úklidové prostředky nebo např. silný parfém.

Kvalita vzduchu ovlivňuje práci většiny dotazovaných dlouhodobě negativně (68,7 %)

6.4 NÁVRH ŘEŠENÍ

Základní rozbor problému a návrh primárního způsobu řešení je součástí nulté fáze metody stage-gate (6.2.1), která předchází základnímu vývoji systému.

6.4.1 SHRNUTÍ ZJIŠTĚNÝCH NEDOSTATKŮ

Z měření a dotazníkových průzkumů byly vyvozeny komplexní závěry, ze kterých bylo potřeba identifikovat konkrétní nedostatky, které je možné vyřešit pomocí instalace vhodného systému pro úpravu vnitřního prostředí. Ve shrnutí se hlavní nedostatky dají popsat těmito body:

- **Rychlost proudění vzduchu na pracovních místech je v dýchací zóně příliš nízká, vyšší je naopak při zemi v okolí vyústek, kde negativně ovlivňuje tepelný komfort končetin**
- **Kvalita vzduchu na pracovních místech je hodnocena často negativně**
- **Kvalita vzduchu negativně ovlivňuje práci dispečerů**
- **Tepelný komfort je vnímán velmi rozdílně, a to jak ve vztahu k individuálním preferencím, tak pozicím v rámci místnosti a vertikální stratifikaci teplot**
- **Vnímány jsou jak příliš vysoké teploty, tak teploty příliš nízké, i v rámci jednoho časového úseku**

6.4.2 KONCEPT NÁVRHU

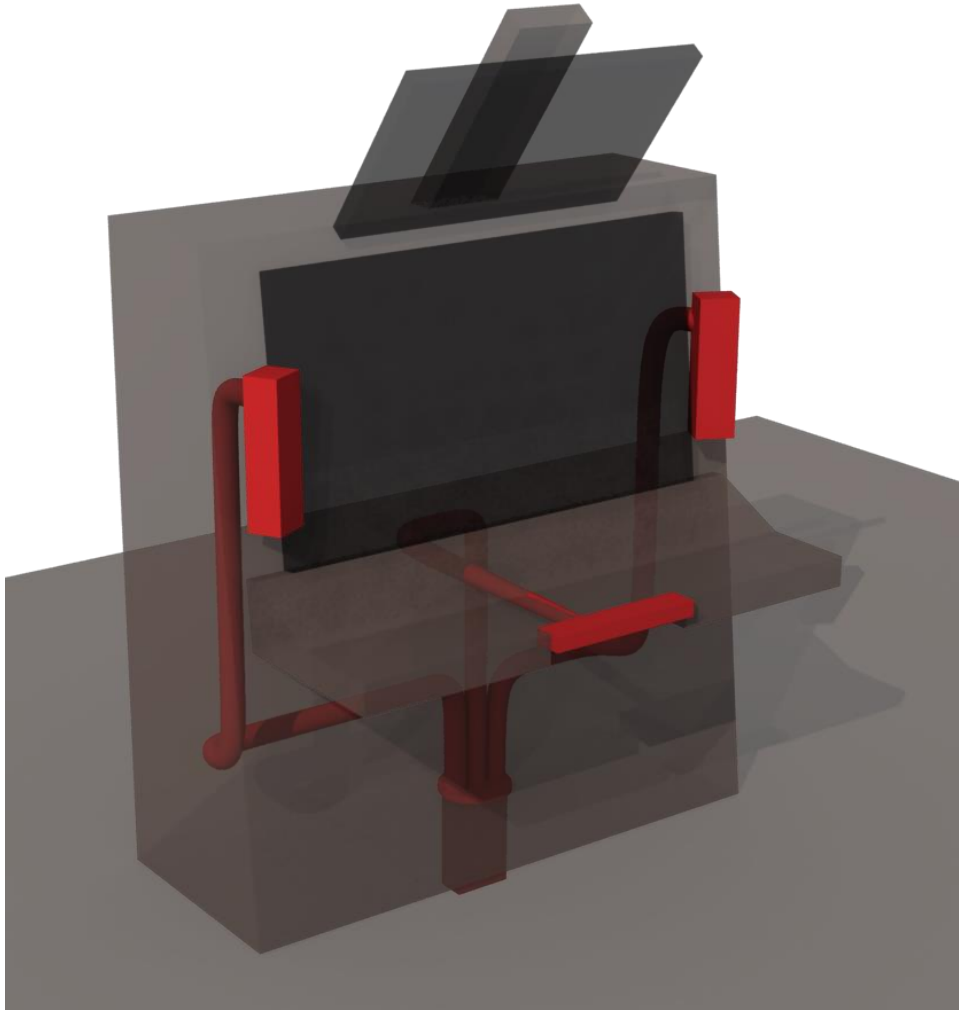
Návrh řešení kvality vnitřního prostředí nutně musel reflektovat dvě hlavní roviny: distribuci čerstvého vzduchu do dýchací zóny, která by řešila problém s vnímanou kvalitou vzduchu a tepelný komfort, který každá osoba hodnotí rozdílně a je tedy potřeba dát uživatelům možnost částečně si upravit teplotu ve své osobní zóně. Přičemž je nutné brát v potaz to, že někteří uživatelé budou chtít zároveň vzduch ohřívat, zatímco jiní chladit. Již vyhřívaná pracovní deska z tohoto pohledu hodnocena pozitivně, není to však řešení dostatečné.



Obr. 56: Odpověď návrhu na zjištěné nedostatky

Jako vhodné řešení byl vybrán systém personalizovaného větrání, který na obě složky dokáže odpovídat. Navrhované zařízení by mělo být schopno přivádět čerstvý vzduch z prostoru zdvojené podlahy sálu do dýchací zóny uživatelů, a převést i tak část potřeby chladícího výkonu, která by méně zasahovala v oblasti dolních končetin.

Ke správnému fungování bylo potřeba vytvořit samostatnou malou vzduchotechnickou jednotku, která dokáže upravit množství přiváděného vzduchu do dýchací zóny a také vhodně přizpůsobit jeho teplotu. Koncept návrhu a odpověď na obě problematiky je zobrazen na Obr. 56.



Obr. 57: Konceptní návrh zabudování vyústek a těla jednotky do pracoviště:

6.4.3 UMÍSTĚNÍ JEDNOTKY A VYÚSTEK

Jak už bylo popsáno výše, návrh musí striktně respektovat limity pracovního místa, které je samo o sobě komplexní technologií. Jako ideální se jeví dislokovat samotnou jednotku pod podlahu místnosti, aby se omezilo rušení technologií pracovního místa. V samotném pracovním místě tak bude pouze distribuční soustava, která již upravený vzduch přivede k distribučním prvkům, vhodně zabudovaným do pracovního místa. I zde je ovšem potřeba reflektovat pozice jednotlivých zařízení a technologií a omezení, která pracovní místo přináší. Teoreticky možné se tak jeví umístění distribučních prvků po stranách hlavního monitoru, v pracovní desce, případně využít horní přívod.

6.4.3.1 Varianty a limity rozložení vyústek

Při navrhování vyústek personalizovaného větrání jsme měli za cíl implementovat co nejefektivnější a zároveň co nejvariabilnější systém větrání. Základem pro návrh rozložení vyústek byla studie prof. Melikova [76], která rozebírá efektivitu distribuce vzduchu z jednotlivých pozic zdroje proudění (tyto vlivy jsou

podrobněji rozebrány v kapitole 3.4.2). Podle této studie jsme tedy napřed seřadili možnosti distribuce podle efektivity a možnosti implementovat je do pracovního místa.

Umístění nad monitorem

Varianta nad monitorem je prezentována jako nejefektivnější způsob distribuce a využívá jí jeden z nejznámějších produktů personalizovaného větrání, který se dostal na širší trh. Riziko je ale větší rychlost proudění ve výšce očí, což by mohlo v konečném důsledku způsobit jejich vysušování, a tedy případný diskomfort a zdravotní rizika. Ještě výrazněji by to mohlo působit ve specifickém prostředí dispečerů, kteří mají druhý pomocný monitor umístěný v podobném sektoru. Limitem je také napojení této vyústky na distribuční soustavu, které by se pravděpodobně neobešlo bez vizuálního rušení.

Umístění po stranách monitoru

Varianta po stranách monitoru vychází jako efektivní způsob a je možné jej i snadno implementovat do konstrukce pracovního místa. Vyniká taky poměrně velkou variabilitou v případě, že bude možné vyústku částečně směřovat v horizontální rovině, případně se proudění podaří vhodně roztáhnout po větším prostoru pracovního místa.

Umístění ve formě břišní vyústky

Břišní vyústka je dalším efektivním způsobem, jak přivádět vzduch do dýchací zóny. Její umístění má výhodu velmi krátké vzdálenosti, kterou je potřeba k dýchací zóně překonat a má tedy vysokou efektivitu i při malých průtocích. Poměrně velký je i vliv případné úpravy teploty vzduchu. Nevýhodou je ovšem velká fixace na pozici, ve které se pracovník nachází, protože při jiném než standardním posazení (což je v daném prostředí poměrně obvyklé) efektivita výrazně klesá. Další komplikací je poměrně složitá implementace do pracovního místa a nevhodná interakce s vyhříváním pracovního místa.

Výběr varianty vyústek

Varianty rozložení byly komplexně diskutovány jak s budoucími uživateli systému, tak s techniky, kteří vyvíjí nové řešení pracoviště dispečera. Pro pokračování vývoje bylo nakonec vybráno umístění po stranách monitoru, a to kvůli vhodným podmínkám instalaci přívodních prvků i napojení na jednotku pod podlahou. Umístění nad monitorem bylo kvůli aplikaci dvou velkoplošných monitorů nad sebou konstrukčně příliš náročné. Břišní vyústka zase vykazovala nízkou variabilitu a při spojení s obtížnější implementací se nejevila jako efektivní.

Varianty možných typů vyústek

Po výběru umístění bylo potřeba navrhnout i tvar vyústky, a tedy i proudu vzduchu, který bude použit pro distribuci. Vyústky byly navrženy dvě po stranách s primárním směřováním ke středu stolu, kde je očekávána pozice pracovníka.

Přiváděný vzduch tak musí mít dostatečnou rychlost, aby překonal vzdálenost přibližně 750 mm a dostal se skrze konvekční vrstvy do dýchací zóny. Horním limitem je však komfort uživatele, který nesmí být negativně ovlivněn pocitem přílišného proudění, nebo prochládání jednotlivých částí těla. Optimalizace tvaru výústek byla provedena v další části projektu.

6.4.4 ZDROJ TEPLA A CHLADU

Vzhledem k požadavku na lokální úpravu teploty vzduchu v personalizované jednotce bylo potřeba vybrat vhodný zdroj tepla a chladu. Limitem byly opět technologie pracovního místa, možnost přívodu různých druhů energie (teplonosné médium, silová elektřina), cena zařízení a prioritně také hluk.

Možností výroby tepla a chladu pro jednotlivé personalizované jednotky se nabízelo několik. V první řadě bylo možné využít dnes poměrně typický kompresorový systém, schopný vyrábět teplo i chlad, jinou a moderní možností jsou termoelektrické Peltierovy články a poslední relevantní možností, která aplikaci obou energií umožňuje, bylo napojit jednotky na centrální dodávku teplonosného média. Všechny zmíněné technologie mají své výhody a úskalí, která bylo nutné vzít v potaz při rozhodování.

Při rozhodování byla použita tabulka pro posuzování personalizovaných systémů, s jasně definovanými prioritami. Ta následně vyloučila použití kompresorového chlazení kvůli zvýšené akustické zátěži. Po diskuzích s partnery projektu pak byla vybrána varianta Peltierových článků, vzhledem k sníženým možnostem vést teplonosné kapaliny v prostoru zdvojené podlahy. Termoelektrické články byly vybrány i přes jejich relativně nízkou účinnost.

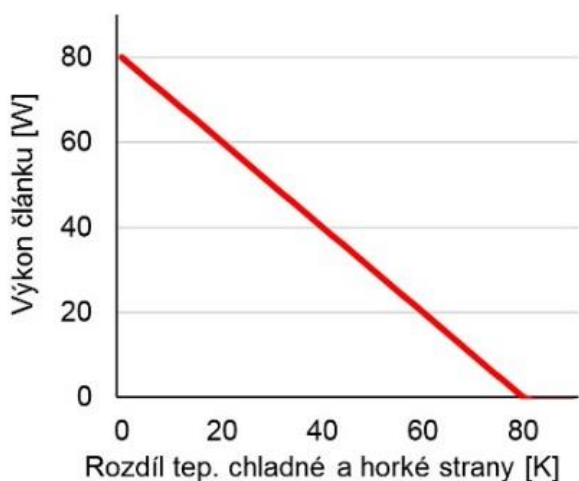
Specifika termoelektrických článků

Peltierovy články využívají fyzikální jev objevený již na počátku 19. století, popisující změnu teploty na dvou kovech zapojených v sérii do obvodu stejnosměrného elektrického proudu. Při vhodném využití lze vytvořit součástku, která při zapojení do obvodu přenáší teplo z jedné své strany na stranu druhou. Polovina článku se tedy ochlazuje, a druhá se zahřívá. Pouhým prohozením pólů je pak možné tyto strany vyměnit.

Výhodou Peltierova článku je, že prakticky podobný efekt jako reversní tepelné čerpadlo generuje bez nutnosti jakékoliv pohyblivé části, což zaručuje při správném provozu vysokou životnost a článek nevytváří žádný hluk. Vzhledem k výkonům také zabírá minimum prostoru.



Obr. 58: Princip fungování Peltierova článku za použití polovodičů P a N. (Zdroj: Autor)



Obr. 59: Obvyklá závislost výkonu článku při stejném příkonu (a tedy i účinnosti) na rozdílu teplot na Peltierově článku. Zdroj: Technické listy použitých prvků.

Mezi zásadní limity tohoto řešení však patří hlavně výrazná závislost účinnosti na rozdílu teplot na obou stranách článku a generování vysokého výkonu na relativně malou plochu. Se zvyšujícím se rozdílem teplot účinnost i výkon lineárně klesají až k nule (Obr. 59). Zároveň je článek zahříván i relativně výrazným Joulovým teplem, které generuje proud procházející součástkou. Peltierův článek tak vždy generuje více tepla než chladu.

Klíčem k udržení rozumné účinnosti je tedy udržení nízkého teplotního rozdílu, je tedy potřeba dosažení rychlého odvodu tepla a chladu a ideálně co nejnižší potřeby teplotního gradientu při aplikaci. Při udržení ideálních podmínek provozu je pak možné účinnost těchto článků srovnávat s účinností kompresorových tepelných čerpadel.

6.4.5 PARAMETRY VÝSTUPNÍHO VZDUCHU

Pro koncept jednotky bylo potřeba stanovit základní parametry, které by jednotka měla splňovat, a to především co se týče rozsahu nastavení množství přiváděného vzduchu a teploty přiváděného vzduchu, z čehož vyjde následně i potřebný výkon Peltierových článků potřebný pro provoz.

Objem přiváděného vzduchu byl zvolen na základě doporučených normových hodnot. Ačkoliv se předpokládá vyšší efektivita distribuce, a tedy i nižší potřeba čerstvého vzduchu, z hlediska naplnění legislativních požadavků bylo považováno za vhodné zvolit jako základní parametr přiváděného vzduchu 25 m³/h [14]. Tento základní parametr je pak rozšířen pro variabilitu nastavení na hodnotu 50 m³/h, která jednak zohledňuje potřeby zvýšeného soustředění na práci a jednak zohledňuje potřebný přenášený tepelný výkon (při relativně nízké tepelné kapacitě vzduchu) při ohřevu a chlazení. Množství vzduchu bude dále revidováno během optimalizace, kde bude určeno vhodné funkční rozmezí.

Změna teploty vzduchu je určena na základě předpokládaného dopadu na tepelný komfort. Při maximálním výkonu by tak teplota přiváděného neměla klesnout pod 18 °C a ideálně ne více, než o 4 K od teploty okolního prostředí. Z hlediska působení na tepelný komfort lze odhadnout, že při změně ekvivalentní teploty o ±3 K je spokojeno až 99 % uživatelů [83]. Zvýšení teplotního rozdílu na 4 K na výústce má primárně za cíl reflektovat míru smísení s okolním vzduchem během trasy. Pokud k tomuto rozdílu pak přičteme předpokládané ztráty tepla či chladu v rozvodech, je vhodné, aby jednotka byla schopná měnit teplotu v rozsahu minimálně 6 K v obou směrech.

Konkrétní předpokládané požadované hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce (Tabulka 9).

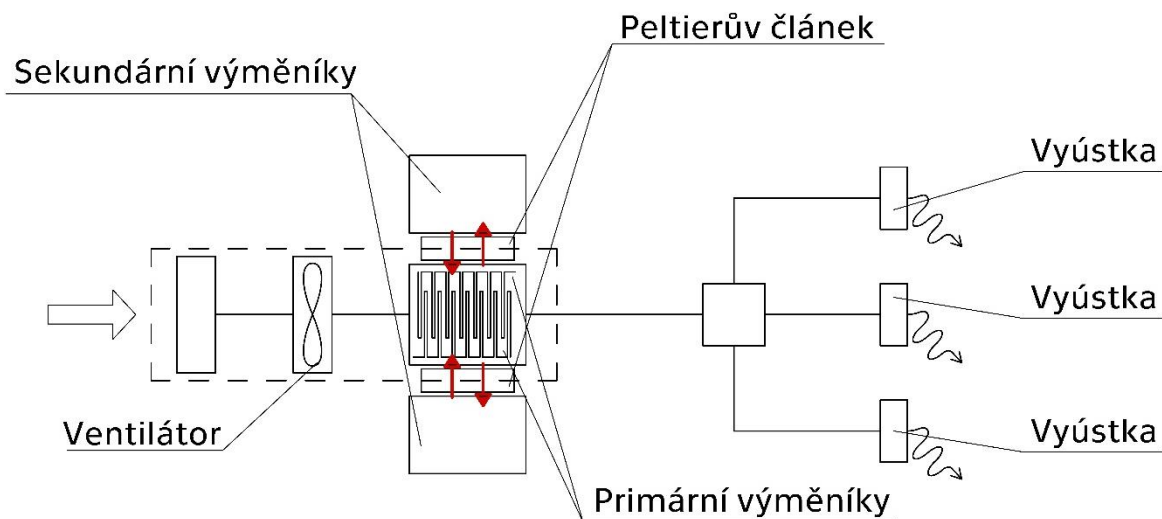
Tabulka 9: Požadované parametry vstupního a výstupního vzduchu

Vlastnosti vzduchu					
Veličina		jednotka	Vstup do MKJ	Výstup Ohřev	Výstup Chlazení
Teplota vzduchu	t_{air}	[°C]	23,5	29,5	17,5
Rozdíl teploty	dt_{air}	[°C]	--	6	-6
Objemový průtok	V	[m ³ /h]	50	51	49
Hustota vzduchu	ρ	[kg/m ³]	1,17	1,14	1,19
Relativní vlhkost vzduchu	rh	[%]	50	35	72
Hmotnostní průtok	m	[kg/s]	0,016	0,016	0,016
entalpie	H	[kJ/kg]	47,3	53,4	41,1
Potřebný výkon Peltierova článku	Q	[W]	--	98	-98

6.4.6 VÝSLEDNÉ SCHÉMA KONCEPTU MKJ 1

Jak už bylo psáno výše, navržený systém personalizovaného větrání počítá s přiváděním čerstvého vzduchu k uživateli a jeho úpravě o ± 4 °C na vyústce a ± 6 °C v jednotce. Vzhledem k tomu, že čerstvý vzduch je v současnosti přiváděn skrze zdvojenou podlahu a podlahové vyústky, je možné využít tento přívod i pro personalizované větrání. K překonání tlakových ztrát na výměnících a v rozvodech a k úpravě množství přiváděného vzduchu slouží v konceptu ventilátor, který nasává vzduch ze zdvojené podlahy a distribuuje dále do jednotky. Koncept jednotky obsahuje Peltierovy články opatřené vnějšími a vnitřními výměníky tepla, přičemž vnitřní (primární) výměníky slouží k převádění žádané energie (tepla či chladu) do přiváděného vzduchu, zatímco vnější (sekundární) výměníky slouží k odvádění druhé části energie do prostředí zdvojené podlahy. Vzhledem k principu Peltierova článku je dopad tohoto konceptu na tepelnou bilanci objektu teoreticky neutrální, rozdíl bude pouze v Joulovském teple přidaném články (teplo vznikající elektrickým tokem skrze články mimo termoelektrický jev).

Upravený vzduch by měl být nadále distribuován skrze tři personalizované vyústky (pokud možno) a to dvě vyústky po stranách a jednu vyústku břišní. Rozvržení vyústek je dané různou efektivitou těchto vyústek při různých průtocích (kdy břišní vyústka má vysokou efektivitu přiváděného vzduchu při menších průtocích, ale menší potenciál chlazení, zatímco postranní vyústky mají efekt přesně opačný) a tedy výrazným komplementárním účinkem.



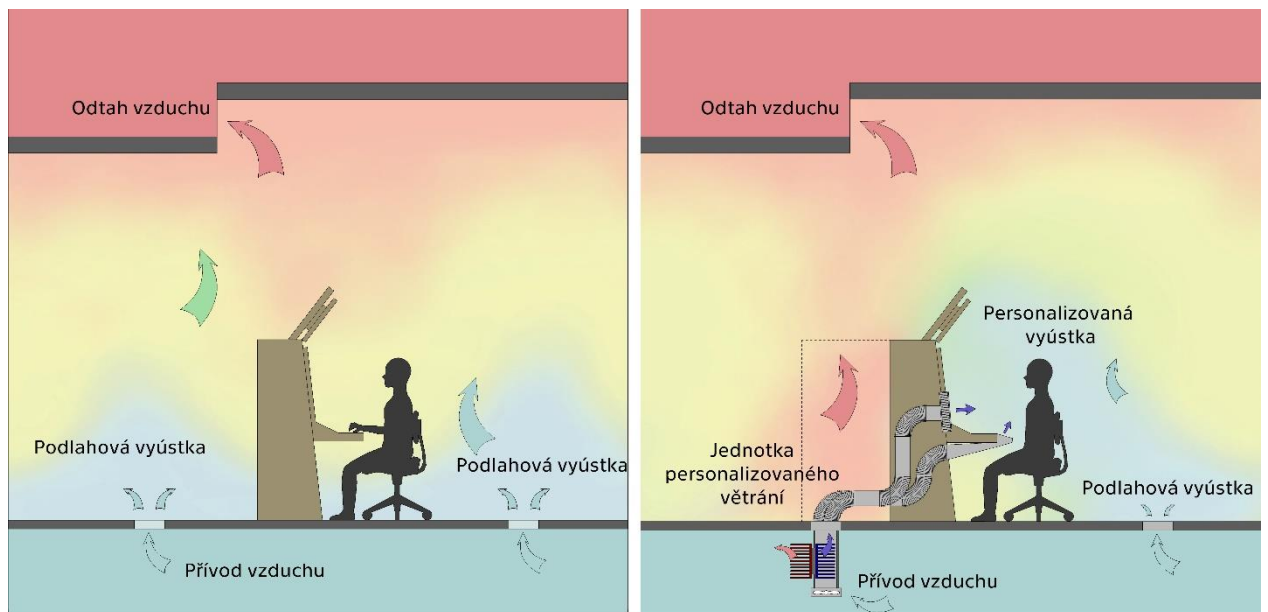
Obr. 60: Konceptní schéma systému jednotky

6.4.1 OČEKÁVANÉ PŮSOBENÍ NA VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ

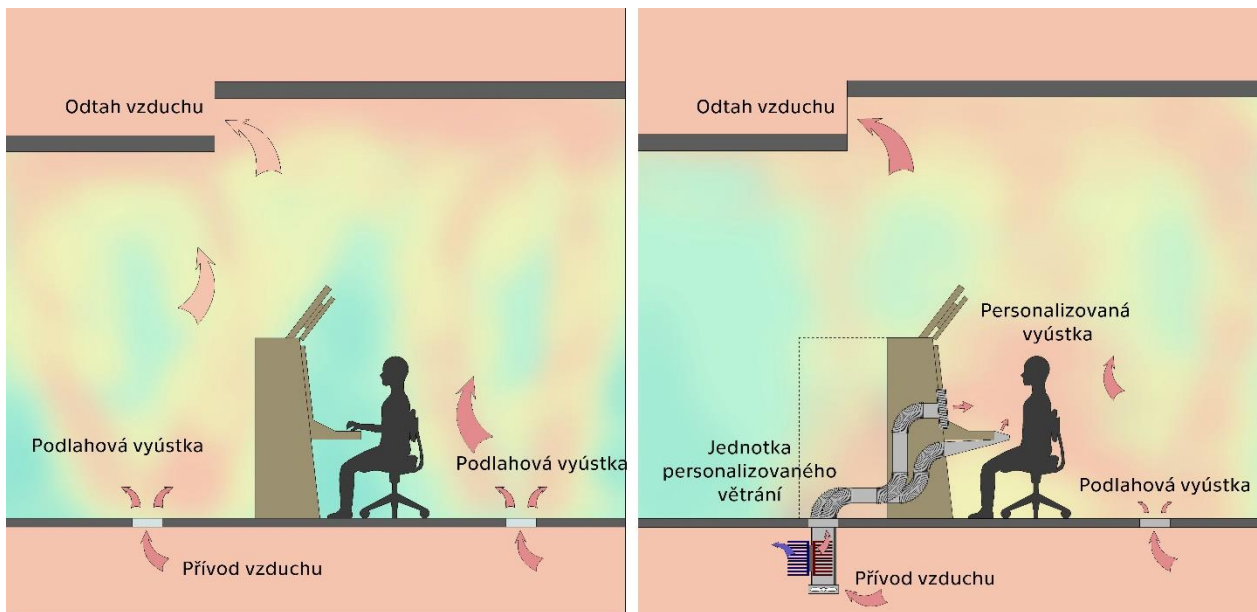
Pro ukázkou toho, jaký je předpokládaný vliv jednotky personalizovaného větrání na vnitřní prostředí byla vytvořena hypotetická teplotní mapa současného a navrhovaného stavu pro dva základní režimy, tedy chlazení interiéru v letním období, a vytápění místnosti v zimním období. Presentovány jsou varianty pouze souběhu jednotky a centrální vzduchotechniky, je ovšem velmi pravděpodobné, že obě zařízení budou pracovat i v opačných režimech (tedy například v režimu chlazení centrální vzduchotechniky si uživatel bude přiváděný vzduch dohřívat, aby zamezil chladnému diskomfortu). Z Obr. 61 a Obr. 62 je patrné, jak se personalizované větrání podílí na zlepšení vnitřního prostředí v zóně pracovního místa.

V letním období jde převážně o vyrovnání vertikálního teplotního gradientu a chladu v nižších výškových polohách, v zimním období pak o nasměrování proudu čerstvého vzduchu do dýchací zóny.

Oba případy předpokládají snížení množství vzduchu přiváděného podlahovými výústky a převedení hlavního zdroje čerstvého vzduchu do personalizovaných výústek.



Obr. 61: Působení na vnitřní prostředí v režimu chlazení. (Zdroj: Autor)



Obr. 62: Působení na vnitřní prostředí v režimu vytápění. (Zdroj: Autor)

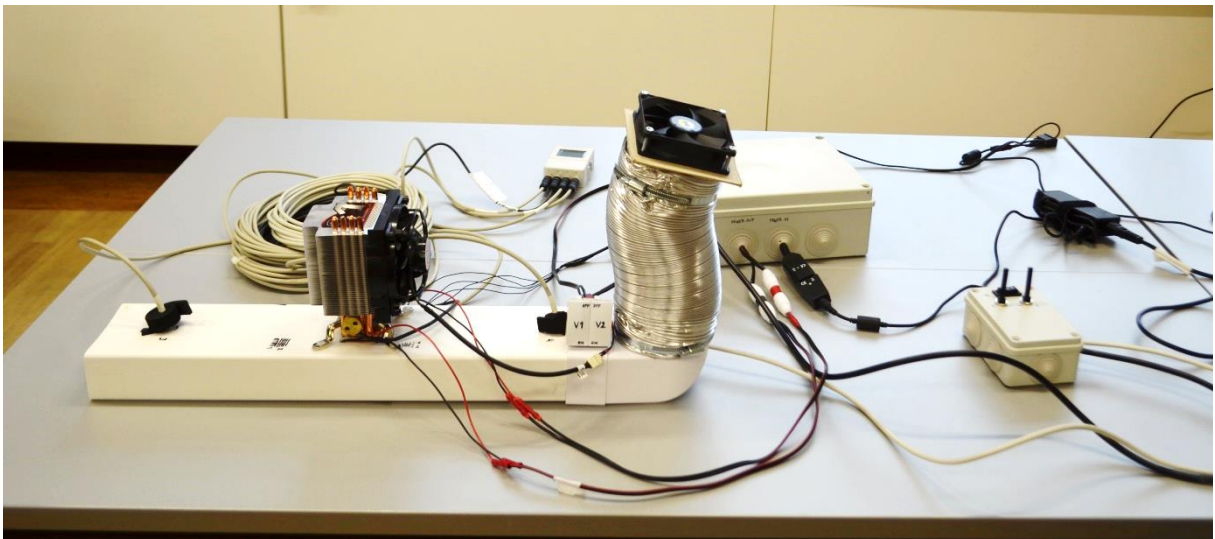
6.5 PROTOTYP PRO ANALÝZU PROVEDITELNOSTI

Aby bylo možné potvrdit výběr vhodné technologie, bylo potřeba ověřit předpokládanou konstrukci praktickým měřením a výkony zařízení. Kromě celkového ustáleného stavu při režimu ohřívání i chlazení bylo potřeba zjistit náběhové časy zvolené technologie a reakční dobu v krátkodobém časovém horizontu a její chování a stabilitu v delších časových úsecích.

6.5.1 KONSTRUKCE PROTOTYPU

Konstrukce nultého prototypu měla za cíl ověřit reálné fungování zvolené technologie v praxi, prototyp je tak zaměřen na termoelektrický modul a jeho efektivní řízení. Zařízení se skládá z Peltierova článku s tepelnými výměníky instalovaném na pravoúhloú plastovou trubku o rozměrech 110 x 55 milimetrů, hlavní ovládací skříň, osobního ovládací panelu a přívodního ventilátoru. Vnější (sekundární) výměník je zde podstatně větší než vnitřní výměník a obsahuje tepelné trubice, protože zvláště v režimu chlazení jím bylo potřeba odvést podstatně více energie.

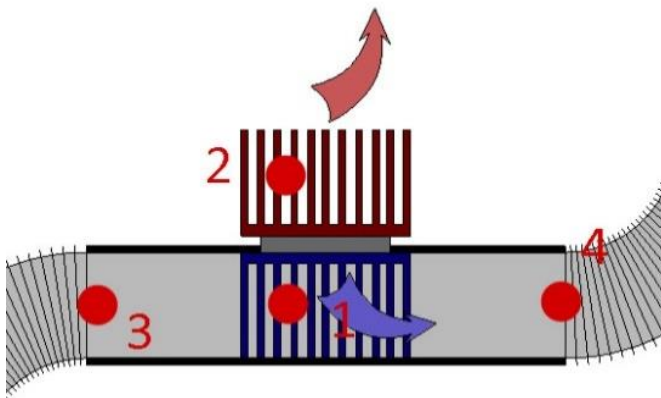
Peltierovy články jsou řízeny dvěma řídicími moduly v hlavní ovládací skříni, odděleně pro řízení ohřevu a chlazení (zařízení s možností regulovat ohřev i chlazení najednou nebylo na trhu dostupné). Moduly upravují příkon článků na základě výstupní teploty vzduchu, která je nastavitelná pomocí potenciometru. Přepínání mezi oběma režimy a vypnutí přístroje se v tomto prototypu provádí pomocí třípolohového spínače. Výsledná podoba zařízení je zobrazeno na Obr. 63.



Obr. 63: Základní prototyp jednotky [84].

6.5.2 MĚŘENÍ PROTOTYPU

Primární měření bylo prováděno pomocí dataloggeru s čtyřmi teplotními čidly, a zařízením pro měření napájení. Poloha teplotních čidel je zobrazena na Obr. 64. Měřena byla teplota nasávaného vzduchu (3), teplota vzduchu na výstupu (4) a teplota obou výměníků co nejbližže termoelektrickému článku (1, 2). Teplota okolního prostředí se pohybovala okolo 22 °C, průtok vzduchu odpovídal přibližně 35 m³/h. Příkon Peltierova modulu byl od 0 do 40 W. Cílem měření bylo zjistit maximální výkon zařízení, snížení či zvýšení teploty vzduchu v jednotlivých režimech a schopnost regulace udržet stabilní teplotu. Měření probíhala v hodinových cyklech.

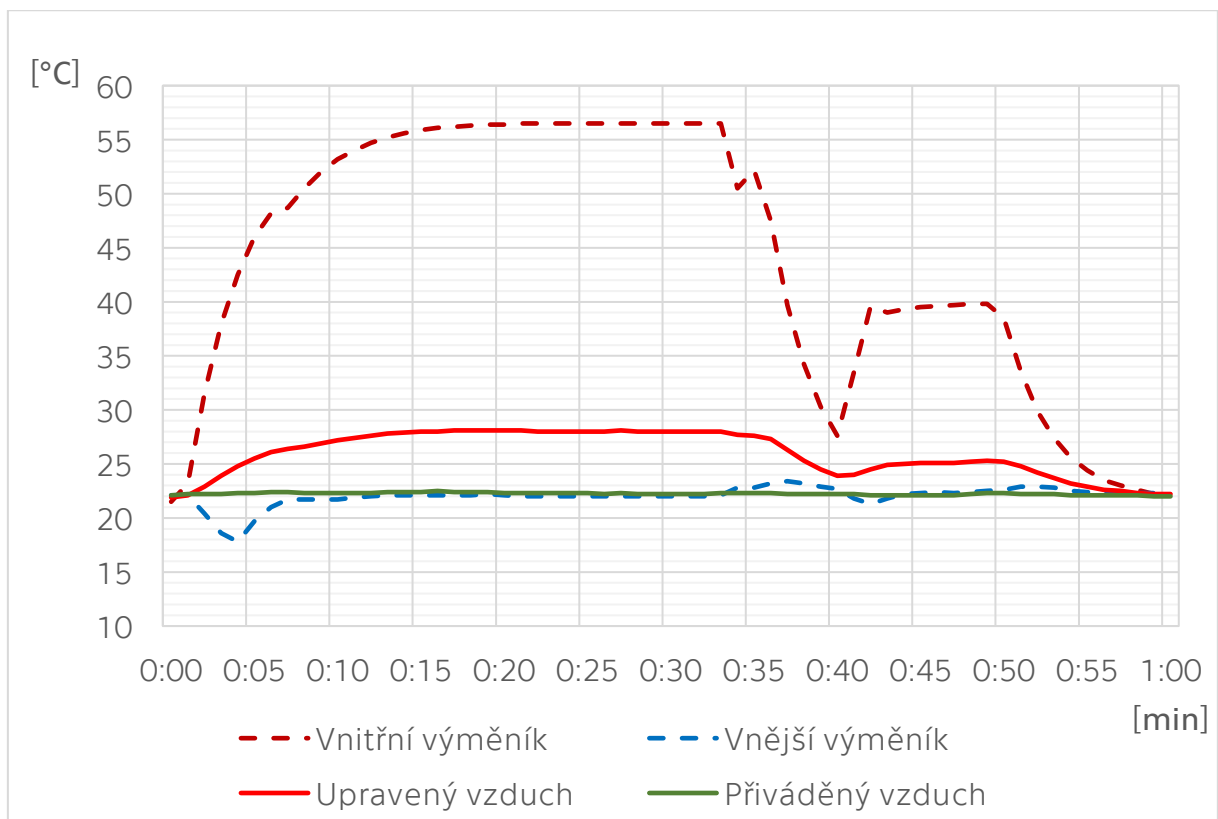


Obr. 64: Rozložení měřených bodů [84]; (1) teplota primárního výměníku, (2) teplota sekundárního výměníku, (3) teplota nasávaného vzduchu, (4) teplota upraveného vzduchu..

Výsledky měření v režimu ohřevu

Zařízení bylo spuštěno v druhé minutě cyklu na maximální výkon a přibližně po patnácti minutách dosáhlo svého maxima a ustálilo se na teplotě 28 °C upravovaného vzduchu. Vnitřní výměník v tu dobu měl okolo 56 °C, což je poměrně vysoká hodnota, která svědčí o malé ploše výměníku vzhledem k předpokládanému výkonu. Vnější výměník odváděl chlad bez nejmenších problémů a držel svoji teplotu po počátečním zakolísání na 22 °C.

V 0:33 byl systém snižen na minimum a 0:40 nastaven na teplotu upravovaného vzduchu 25 °C. Z grafu lze vidět, že reakce systému je velmi rychlá a pružná, ale zároveň je schopna udržet stabilní požadovanou teplotu v dlouhodobém horizontu. S lepším vnitřním výměníkem by bylo pravděpodobně možné dosáhnout významně vyšších teplotních rozdílů i účinnosti Peltierova článku (nižší rozdíl teplot na teplé a chladné straně). Nicméně zařízení splňuje požadavek na minimální úpravu teploty vzduchu o 6 °C.

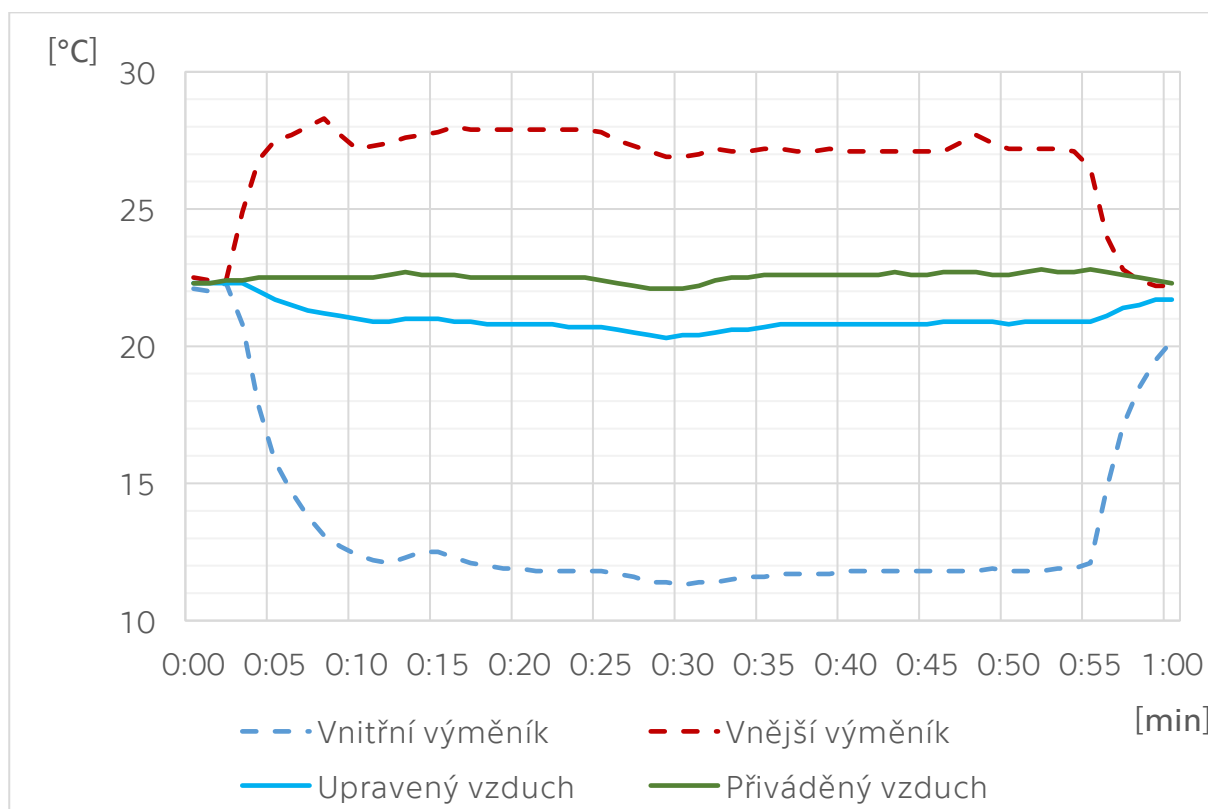


Obr. 65: Graf měření náběhu a výkonu jednotky v režimu vytápění (zdroj: autor)

Výsledky měření v režimu chlazení

V režimu chlazení byla jednotka v druhé minutě nastavena na maximální výkon, který kvůli malé výkonové kapacitě nebyl snižován jako u předchozího měření. U chlazení je patrná mnohem větší vazba na teplotu přiváděného vzduchu, kdy regulace drží pouze rozdíl teplot. Je to způsobené tím, že požadovaná teplota přiváděného vzduchu vůbec nebyla dosažena. Maximálního výkonu však bylo dosaženo dříve než u ohřevu, a to přibližně deset minut po spuštění. Lze pozorovat také výrazně větší teplotní rozdíl směrem k vnějšímu výměníku, a to až o 6 °C.

Změřený rozdíl teplot přiváděného vzduchu tak není dostatečný.



Obr. 66: Graf měření náběhu a výkonu jednotky v režimu chlazení (zdroj: autor)

Závěr měření

Z výsledků je patrné, že chladicí výkon jednotky je nižší než výkon ohřevu. Na maximální výkon bylo možné ochladit vzduch o přibližně 2 °C (zatímco zvýšit teplotu se podařilo až o 6 °C). Teplota vnitřního chladiče je ovšem velice nízká, pohybuje se okolo 12 °C, nedostatek výkonu je tedy celkem určitě způsoben nedostatečnou plochou výměníku a při nahrazení tohoto dílu by se mohl chladicí výkon zvýšit. Nízká teplota chladiče je riskantní i z hlediska kondenzace, protože se pohybuje pod hranicí rosného bodu.

6.5.3 CFD MODEL

Prvotní CFD model byl volen nejen pro vyhodnocení základních dat, ale primárně pro ověření metodiky a výpočetních možností pro použití v dalších oddílech práce. Tento model tak sloužil jako seznámení se softwarem pro CFD modelování a obsahuje nepřesnosti, které byly v pozdějších simulacích podstatně vylepšeny. Simulace byla vytvořena v programu COMSOL Multiphysic.

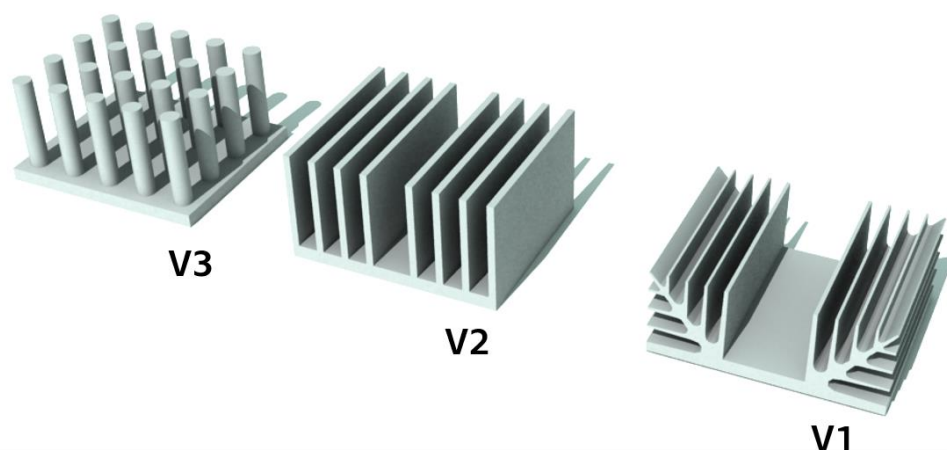
Cíle modelu

Cílem této CFD simulace byl rozbor efektivit tří typů vnitřních výměníků, při použití stejného vnějšího výměníku a stejného Peltierova článku. Model zachycuje tepelné toky, přenos energie do proudícího vzduchu a účinnost jednotky při použití tří různých výměníků, vzhledem k tomu, že účinnost Peltierova článku klesá se vzrůstající teplotou (zvyšujícím se rozdílem teplot na chladné a teplé straně).

Nastavení modelu

Pro výpočet byl zvolen matematický model laminárního proudění, zahrnující přenos tepla v tekutinách i pevných látkách, a to primárně z důvodu nízké výpočetní kapacity. Radiace byla kvůli zjednodušení modelu zanedbána, protože její předpokládaný vliv v relativně rychlém proudění byl minimální. Zanedbán byl prozatím i vliv ochlazování stěnami potrubí, vzhledem k tomu, že pro posouzení výměníků neměl zásadní vliv. V poslední řadě byly zanedbány i ztráty skrz samotný termoelektrický článek, protože vzhledem k jeho fungování bylo obtížné je přesně stanovit. Matematický model Peltierova článku v této simulaci nepočítal s konstantním příkonem, ale konstantním výkonem, což neodpovídá realitě ani požadavkům jednotky. Řešení však bylo na úrovni znalostí ovládání software v danou dobu.

Matematický model systému byl volen pro vnitřní část potrubí obsahující výměník tepla. Potrubí má průřez 110 x 55 mm a 500 mm délku. Model počítal s nižší variantou rychlosti proudění, tedy 1 m/s. Výměnu tepla zajišťují tři různé výměníky standardních tvarů a velikostí, které budou popsány níže. Je počítáno s tím, že všechny tvary jsou vyrobeny ze stejného materiálu, tedy hliníku. Termoelektrický článek má velikost 40 x 40 mm, jeho vnější teplosměnný povrch je pak počítán o tloušťce 2 mm. Mezi chladičem a článkem je umístěna teplovodivá vrstva pasty o tepelné vodivosti 2 W/(m·K).



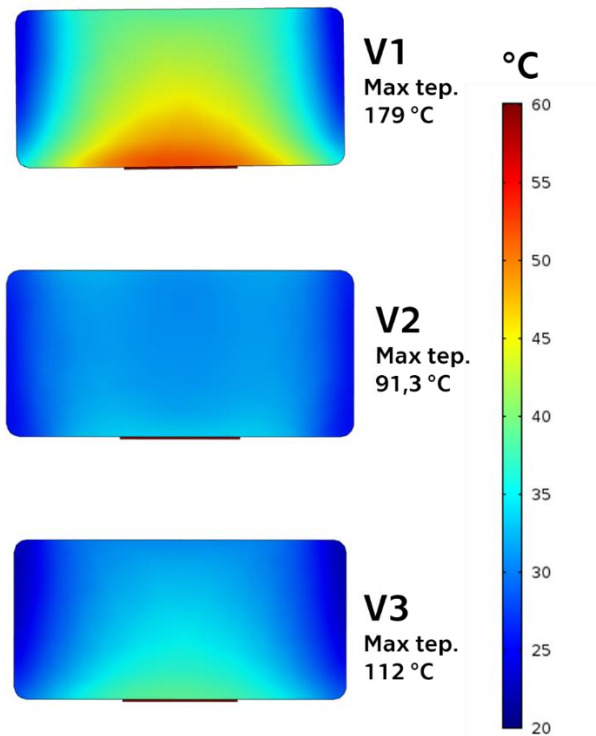
Obr. 67: Typy výměníků použité v simulaci (Zdroj: autor)

Zkoumána byla převážně rychlost proudění a teplota, a její rozložení v průřezu potrubí. Důležitým aspektem byla efektivita přenosu tepla do proudícího vzduchu, která je daná ustálenou nejvyšší teplotou termoelektrického článku. Provozní teplota má totiž velký vliv na jeho celkovou efektivitu a při přehřívání také na degradaci okolních prvků.

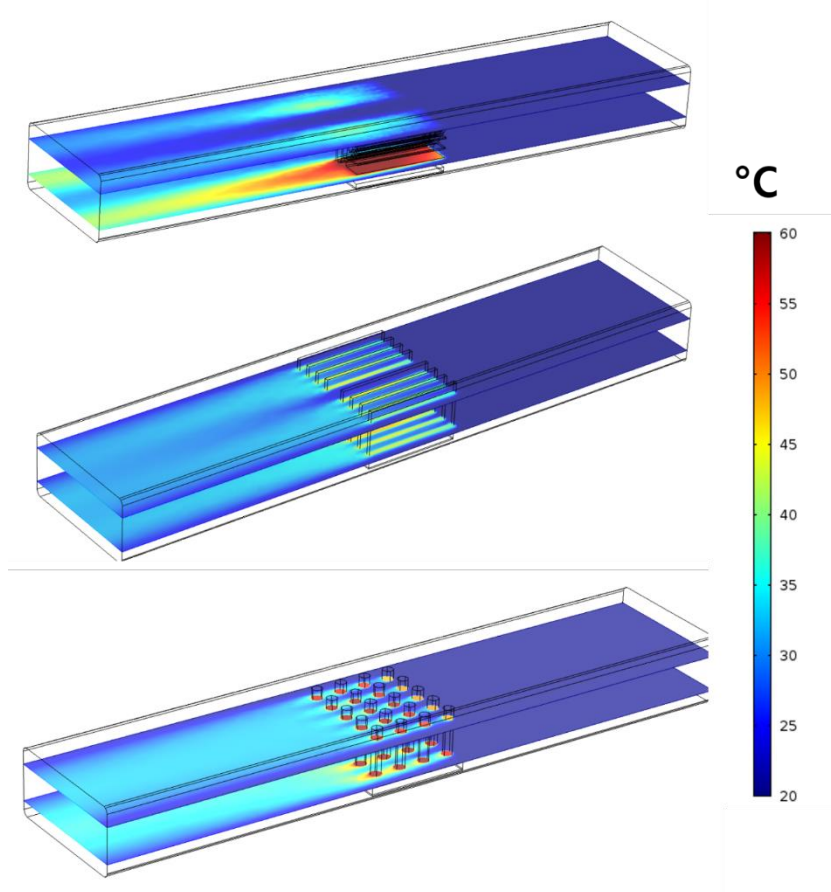
Ve výpočtu byly použity tři typy chladičů, jeden pinový a dva žebrové, z nichž jeden má žebra kolmá k podstavě a druhý má žebra větvená s výraznější částí bez žeber uprostřed. Všechny tři typy jsou zobrazeny na Obr. 67.

Výsledky simulace

Výsledky simulace ukazují teploty a rychlosti proudění při konstantním výkonu Peltierova článku 70 W. Vzhledem ke konstantnímu výkonu je hlavním hodnotícím kritériem teplota, na kterou se článek ohřeje, přičemž čím vyšší je, tím horší je charakteristika daného výměníku. Teploty pro výstupní profil a ve 3D zobrazení jsou na Obr. 68 a Obr. 69.



Obr. 68: Teplotní pole na výstupním průřezu (zdroj: autor).



Obr. 69: Výsledky simulace ve 3D pohledu (odshora: V1, V2, V3) (zdroj: autor).

Závěry simulace

Při porovnání všech tří variant dojdeme k závěru, že nejvhodnější se jeví chladič V2 – tedy s příčným žebrováním, a to ve všech hodnocených bodech. Rozložení teploty, rychlost i efektivita se zdá být nejlepší. V úvahu pak připadá i chladič V3, pokud by z nějakého důvodu nebylo možné předchozí použít. Výměník současně využívaný (tedy varianta V1) je v hodnocení významně nejslabší, což podporuje i fyzické měření prototypu.

Studie také ukázala na chybu měření skutečného prototypu, protože v současnosti je teplotní sonda umístěná uprostřed spodní stěny, která má podle CFD modelu velmi nevyovídající hodnotu o celkovém profilu teploty vzduchu.

Model však počítá pouze s laminárním prouděním a v případě turbulencí dochází k výraznějšímu mísení vzduchu, kdy by se výsledky zobrazovaly s menšími teplotními rozdíly ve výstupním profilu a pravděpodobně by se jinak chovalo obtékání výměníku V2. I tak ale model splnil cíle, hlavně v uchopení metody CFD modelování.

6.5.4 ZHODNOCENÍ PROVEDITELNOSTI

Zhodnocení proveditelnosti je nultou branou, která předchází dalšímu vývoji. Na základě konstrukce prototypu, měření a provedení CFD simulace bylo prokázáno, že navržený koncept je funkční a při správné aplikaci je možné, aby splňoval požadované parametry. Obě měření pak prokázala nutnost dostatečného odvodu tepla z Peltierových článků, a to jak na straně primární (vnitřní), tak sekundární (vnější). Odvod tepla a chladu a jeho přenos do okolního prostřední zásadním způsobem ovlivňuje výkon Peltierových článků, celkovou účinnost zařízení a výslednou teplotu.

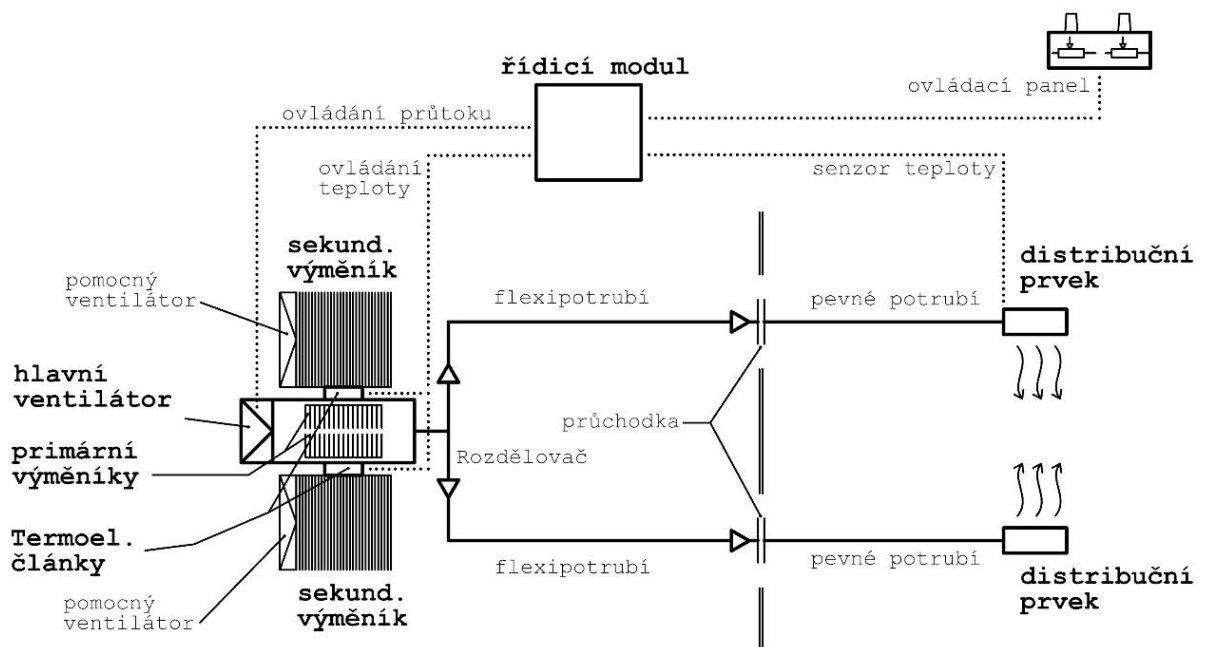
6.6 NÁVRHY A OPTIMALIZACE JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ SYSTÉMU

Během analýzy proveditelnosti a prvotního návrhu (fáze a brána 0 metody stage-gate) byl upřesněn celkový návrh zařízení a blíže specifikovány jednotlivé komponenty. Zařízení bylo rozděleno na jednotlivé funkční celky, které v dalších fázích prošly samostatně optimalizací a různými stádii vývoje až k finálnímu prototypu. V této kapitole je shrnuta fáze 1 a fáze 2 stage-gate metody, protože je pro přehlednost vhodnější zabývat se samostatně jednotlivými komponenty a jejich postupným vývojem.

K optimalizaci bylo použito matematického modelování proudění (CFD simulace) i fyzického měření (teploty, průtoky, PIV anemometrie). Podrobná cesta optimalizace jednotlivých funkčních celků je rozdělena do podkapitol. Podrobné funkční schéma pak vidíme na Obr. 70.

Konkrétní samostatně řešené celky jsou:

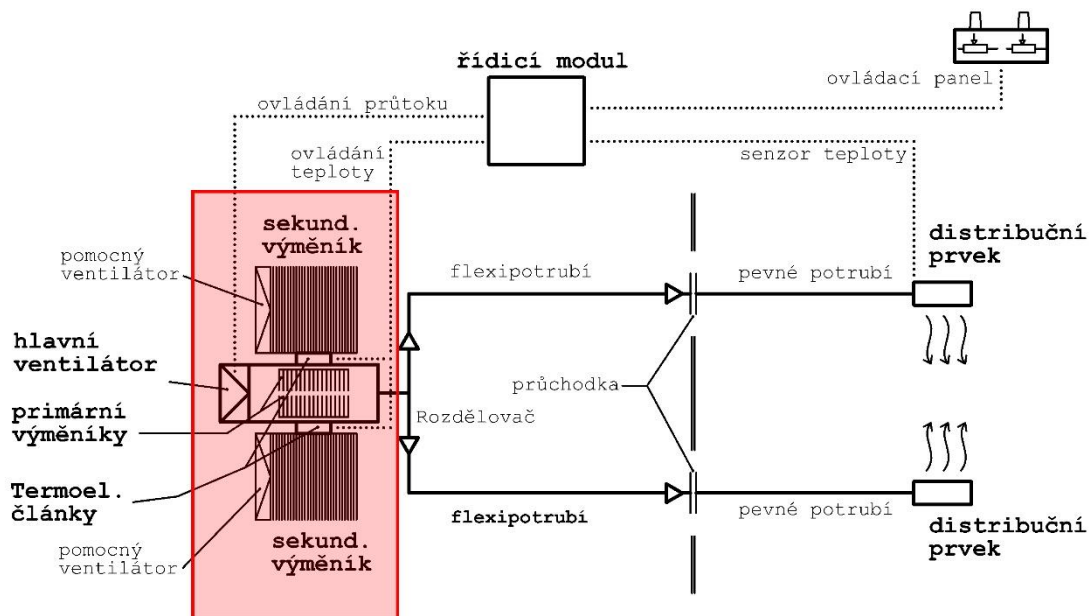
- **Tělo jednotky s Peltierovými články, výměníky a hlavním ventilátorem**
- **Koncové distribuční prvky**
- **Distribuční soustava**



Obr. 70: Výsledné funkční schéma systému personalizovaného větrání (zdroj: autor).

6.6.1 TĚLO JEDNOTKY

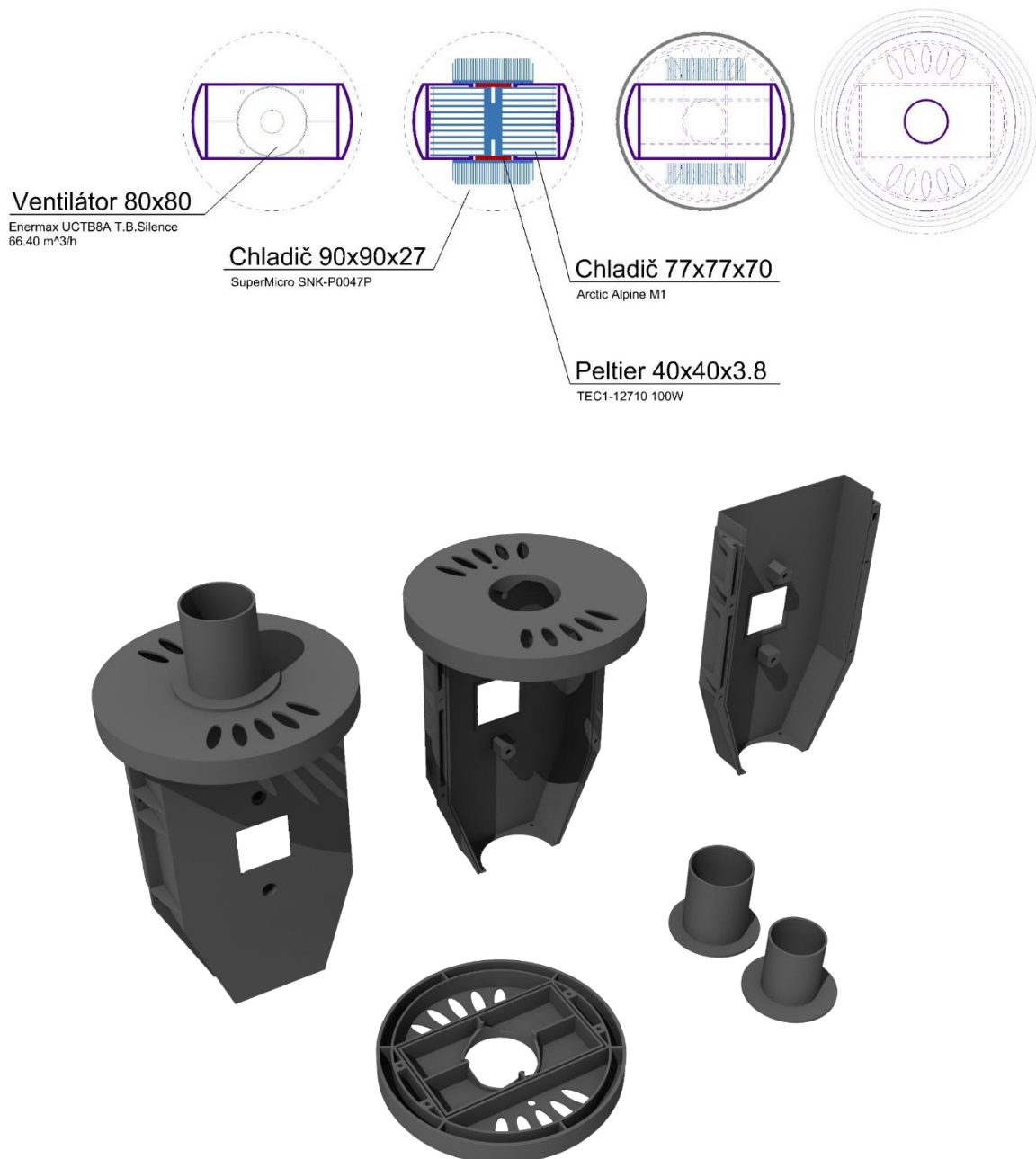
Takzvané tělo jednotky, tedy hlavní část pro úpravu vzduchu, se skládá z hlavního ventilátoru, který nasává vzduch ze zdvojené podlahy, primárních tepelných výměníků, směřujících do přiváděného vzduchu, dvou Peltierových článků a sekundárních tepelných výměníků, odvádějících teplo či chlad z druhé strany článků do prostoru zdvojené podlahy. Původní návrh zde počítal s tím, že odvod tepla a chladu ze sekundárních výměníků zprostředkuje relativně rychlé proudění vzduchu ve zdvojené podlaze, kde byla v řešeném případě měření zjištěna rychlost proudění v rozmezí 1-2 m/s, připadalo ale v úvahu využít i sekundární ventilátory na zvýšení konvekce, a tedy vyšší efektivitu odvodu tepla. Jejich instalaci však bylo potřeba ověřit a odůvodnit, neboť se jedná o případný další elektrický příkon a potažmo tepelný výkon (při vyšším počtu jednotek nikoliv zanedbatelný).



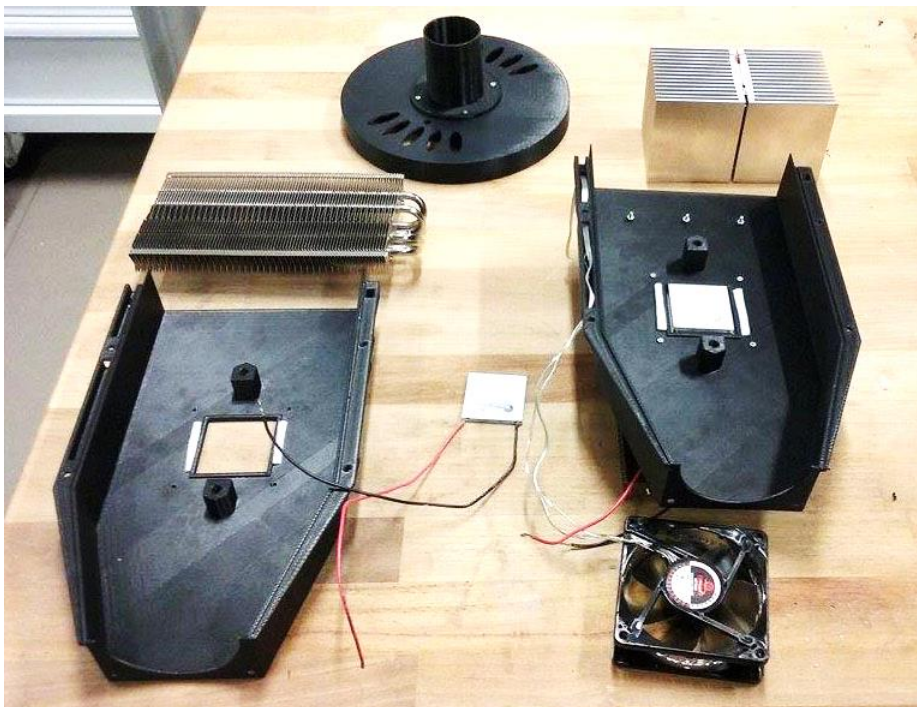
Obr. 71: Označení řešené části

6.6.1.1 Původní návrh

Původní koncept těla jednotky byl navržen pro lokální nahrazení podlahových výústí, základní disk tak průměrem vychází z konstrukce těchto výústek a schovává tělo jednotky pod podlahou. Vzduch se v disku dělí na hlavní proud pro personalizované větrání (vnitřní otvor s nástavcem na hadici) a vnější otvory, které přivádějí dále část vzduchu do místnosti a vzhledem k poloze mají i za cíl zvýšit konvekci okolo sekundárních výměníků. Koncept a 3D lze vidět na Obr. 72, prototyp před sestavením pak na Obr. 73.



Obr. 72: Řezy těla jednotky ve čtyřech výškách (nahore) a model jednotky připravený pro 3D tisk (dole) (Zdroj: autor)



Obr. 73: Jednotlivé díly jednotky před složením (zdroj: autor).

6.6.1.2 Optimalizace pomocí CFD simulací

Cílem optimalizace pomocí CFD modelu bylo dvojí. V první řadě bylo potřeba ověřit chování jednotky v kritických situacích, které by mohly vést při testech ke znehodnocení prototypu, v druhé řadě pak otestovat různé vnější vlivy na účinnost celého systému, které by byly pro samostatné prototypování konstrukčně velmi komplikované nebo neefektivně drahé. Bylo také třeba identifikovat potenciální problémová místa uvnitř jednotky, kde není technicky možné provést měření na prototypu.

Kritickými prvky MKJ z hlediska teplotního namáhání jsou materiál pláště a samotné Peltierovy články. Materiál pláště je polykarbonát-ABS, který bez deformací vydrží teplotu 96 °C. Používaný Peltierův článek by neměl překračovat teplotu 90 °C. Vnitřní výměník je hliníkový, jeho teplotní limity daleko přesahují limity ostatních součástí. Jako vnější výměník slouží chladič využívaný pro chlazení elektronických komponent, osazený tepelnými trubicemi k odvedení tepla či chladu do systému lamel.

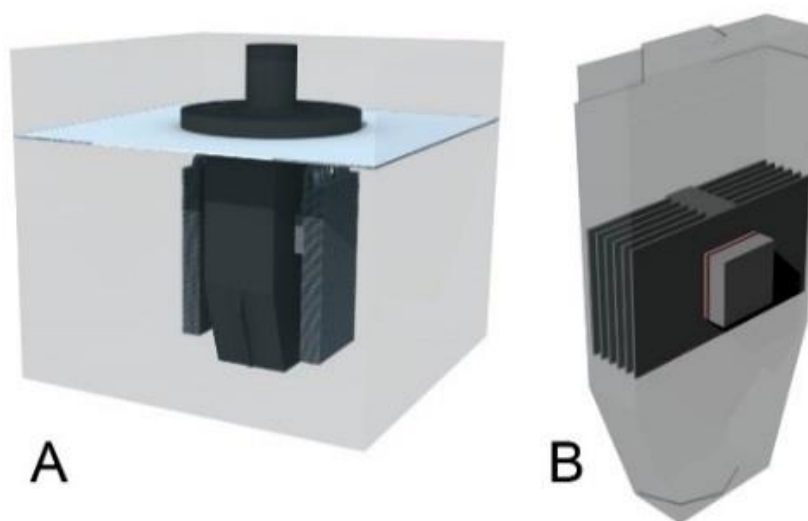
Optimalizací se podrobně zabýval autorův článek na konferenci Simulace budov a techniky prostředí 2016, který následně v rozšířené verzi vyšel v časopisu VVI 2017 [85].

Výpočetní model

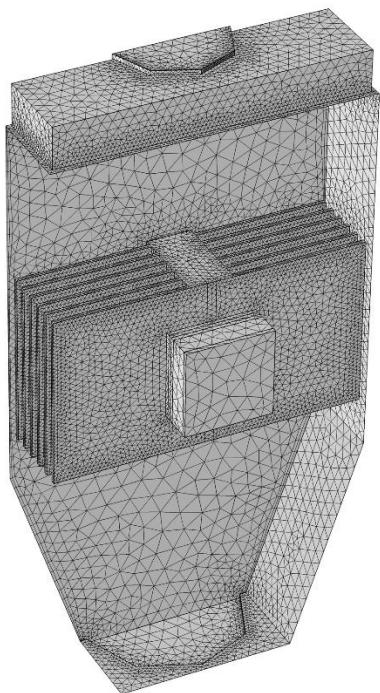
Pro modelování a simulaci daného problému byla zvolena metoda CFD, umožňující výpočet teplotních a rychlostních polí uvnitř jednotky. Jako simulační nástroj byl použit program COMSOL Multiphysics.

Původní záměr obsahoval matematický model celého zařízení (Obr. 74Obr. 74/A), kvůli náročnosti výpočtu a omezeným kapacitám výpočetní techniky však bylo třeba model významně zjednodušit. K prvnímu zjednodušení byl využit fakt, že úloha je symetrická, a bylo tak možné počítat pouze polovinu celého prvku. Nepřesnost, která tímto zjednodušením pravděpodobně vznikla, je velmi nízká. I přesto byl však model velmi náročný, převážně kvůli složité technologii a geometrii vnějších výměníků. Zde jsme využili skutečnosti, že existuje fyzický prototyp, a nahradili konstrukci vnějších výměníků výpočtově jednodušším prvkem, který obsahoval reálné naměřené výkonové parametry vnějšího výměníku. Model byl tak zaměřen na detailní analýzu vnitřku jednotky. V souvislosti s tímto zjednodušením byl zanedbán i přenos tepla sáláním z vnějšího povrchu skříně jednotky a sdílení tepla stěnou skříně jednotky bylo uvažováno pouze v závislosti na tepelném odporu stěny a rozdílu teploty vzduchu v jednotce a konstantní teploty vzduchu v okolí. Výsledný model je vidět na Obr. 74/B. Na konferenci bylo v diskusi poukázáno na fakt, že bylo možné hodnotit i pouze čtvrtinu jednotky (pět osová souměrnost) a ušetřit tak další část výkonu. S touto výtkou nelze než souhlasit.

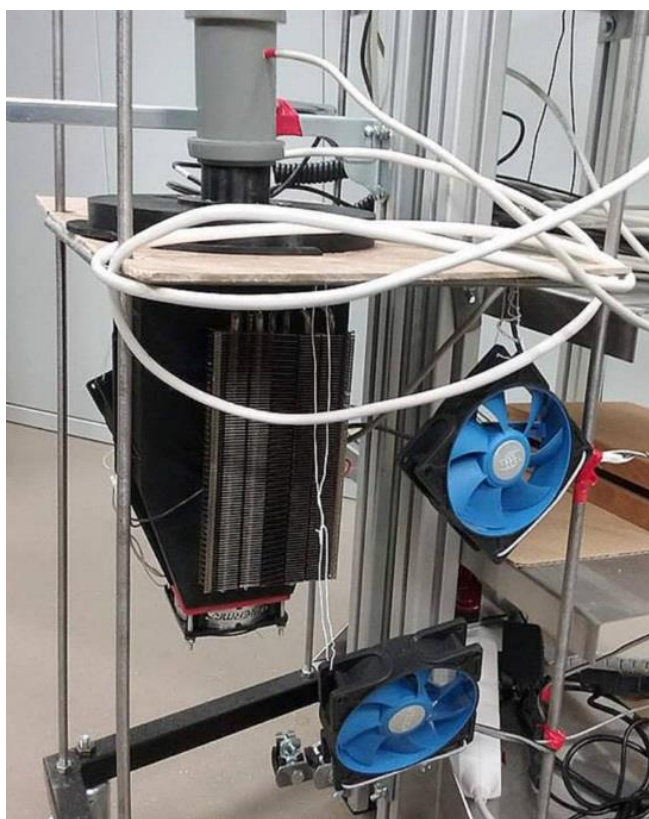
Dalším prvkem, který bylo třeba namodelovat, byl samotný Peltierův článek. Jeho reálný chladičový výkon je závislý na rozdílu teplot chladné a teplé strany, v modelu tedy musely být osazeny virtuální senzory, které během výpočtu monitorovaly tyto teploty a upravovaly hodnotu výkonu.



Obr. 74: Původní (A) a zjednodušený (B) model, použitý pro výpočet [85].



Obr. 75: Síť použitá pro výpočet CFD [85].



Obr. 76: Měření prototypu pro kalibraci modelu [85].

Příkon zařízení je podle měření konstantní, a je důležité uvést, že článek reálně vytváří více tepla než chladu, přičemž hodnota výkonu se nemění s rozdílem teplot (vychází právě z příkonu zařízení) a způsobuje, že samotný článek, ze kterého není teplo odváděno, se velmi rychle celý zahřívá.

Vnitřní výměník byl modelován podle skutečné geometrie a materiálových vlastností. Pro výpočet byla použita čtyřstěnná síť se zahuštěním okolo výměníku a hran. Síť obsahovala 1 815 271 buněk a lze jí podrobně vidět na Obr. 75. Vliv turbulence byl modelován modelem L-VEL, což je algebraický model, který počítá vírovou viskozitu v závislosti na lokální rychlosti proudění a vzdálenosti od stěn. Je to model nejméně výpočtově náročný, ale poskytuje dostatečnou přesnost právě ve vnitřním proudění okolo výměníku [86].

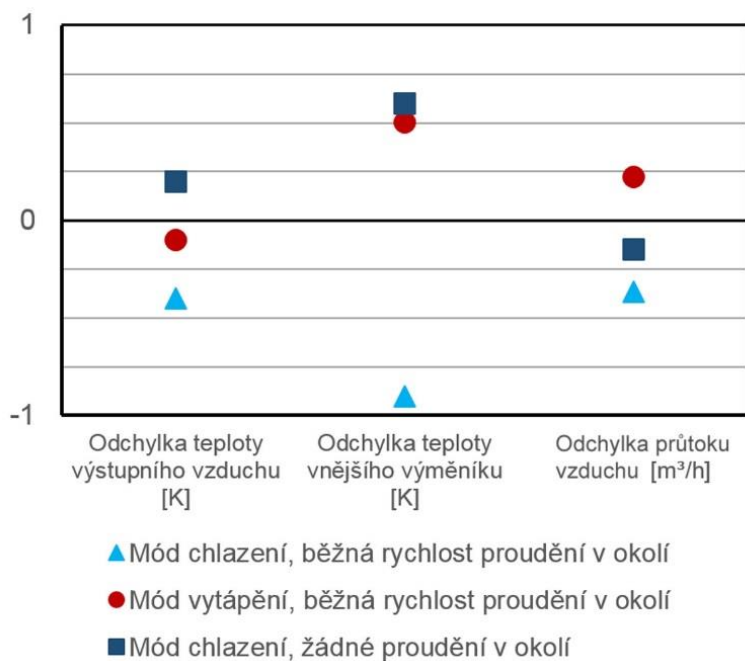
Přestup tepla je tak počítán na základě intenzity turbulence, rychlosti proudění, rozdílu teplot a materiálových vlastností látek.

Kalibrace modelu

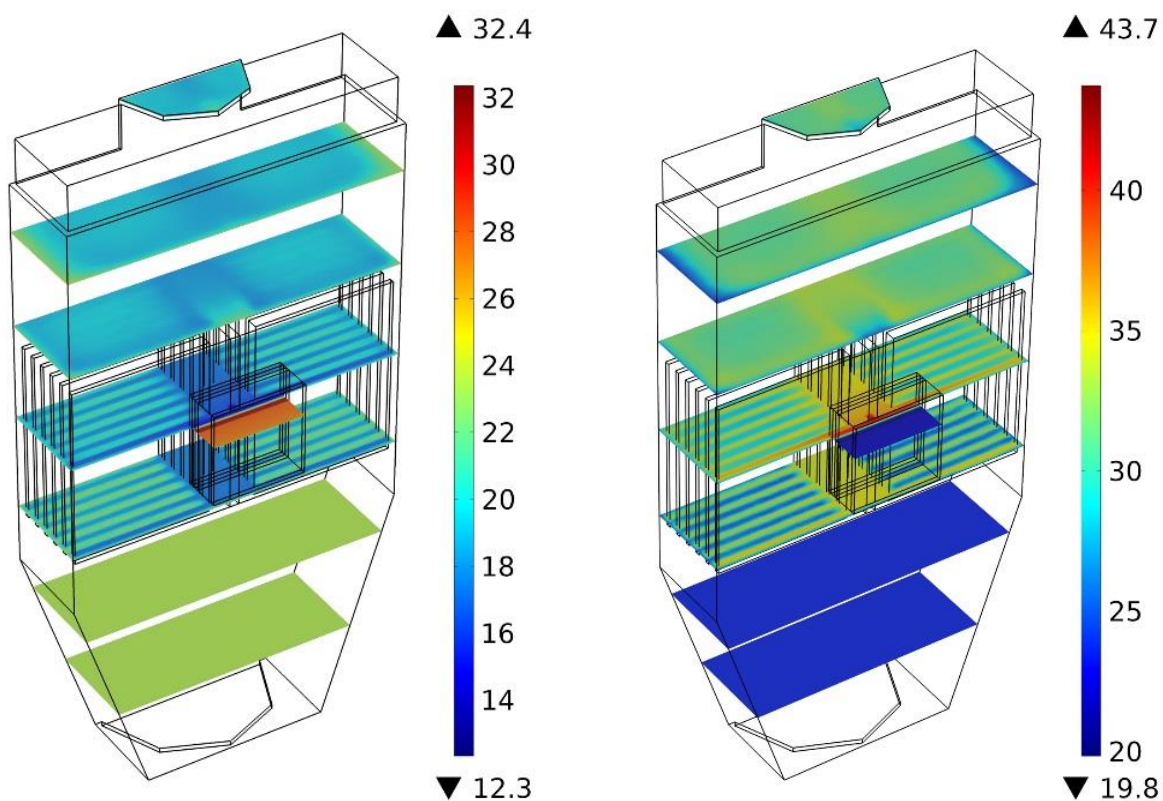
Kalibrace modelu byla provedena na základě série měření prototypu. Měření bylo prováděno dataloggerem COMET se čtyřmi sondami měřícími teplotu vzduchu na vstupu a výstupu jednotky a teplotu povrchu vnitřního a vnějšího výměníku. Rychlost proudění vzduchu na výstupu z jednotky byla měřena termoanemometrem. V okolí zařízení bylo umístěno několik ventilátorů simulujících proudění vzduchu ve zdvojené podlaze a jeho působení na vnější výměníky. Ventilátory byly nastaveny tak, aby rychlost proudění odpovídala reálně naměřeným hodnotám. Měřicí stolice s prototypem MKJ je zobrazen na Obr. 76.

Z ustáleného stavu pak byly odvozeny výchozí hodnoty pro kalibraci matematického modelu v jednotlivých provozních stavech. Byly využity tři provozní stavy:

- **mód chlazení, běžná rychlost proudění v okolí**
- **mód vytápění, běžná rychlost proudění v okolí**
- **mód chlazení, žádné proudění v okolí**



Obr. 77: Výsledky kalibrace modelu, odchylka měření jednotlivých stavů [85].



Obr. 78: Vlevo: Výsledek výpočtu teploty pro kalibraci: Mód chlazení, běžná rychlost proudění v okolí. Vpravo: Výsledek výpočtu teploty pro kalibraci: Mód vytápění, běžná rychlost proudění v okolí. Škála označuje teploty ve °C v daném řezu [85].

Testované situace

Jak bylo zmíněno výše, situace, které jsme chtěli modelem otestovat lze rozdělit do dvou základních kategorií:

- **Bezpečnostní**
- **Návrhová**

Bezpečnostní simulace popisuje situace, které bylo vhodné před reálným měřením matematicky testovat, protože u nich hrozilo poškození jednotlivých součástí. Hlavním rizikem zde bylo možné přehřátí článku vlivem nedostatečného odvodu tepla vnějšími chladiči a kondenzace vlhkosti na vnitřních chladičích. Byly testovány tři nestandardní provozní stavy a jeden stav poruchový.

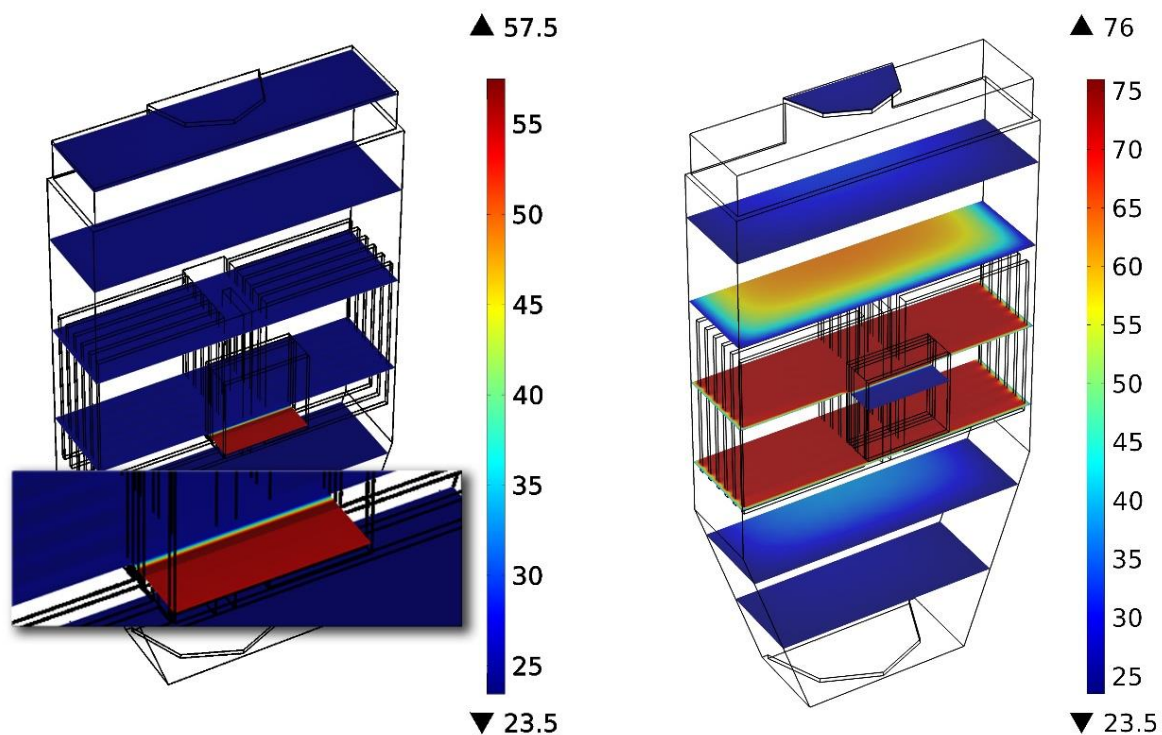
Návrhovou simulaci jsme použili k optimalizaci vlastností jednotky. Cílem bylo analyzovat dopad ovlivnitelných součástí na výkon zařízení. Byly to například síla vrstvy a kvalita teplovodivé pasty na spojích, zvýšení tepelného odporu pláště a zvýšení výkonu vnějších výměníků instalací vlastních ventilátorů.

Bezpečnostní simulace

Bezpečnostní simulace byly provedeny pro instalovaný výkon prototypu jednotky, tedy 70 W maximálního chladicího výkonu Peltierových článků. Při zvýšení výkonu by bylo pochopitelně třeba modely přepočítat s novými parametry.

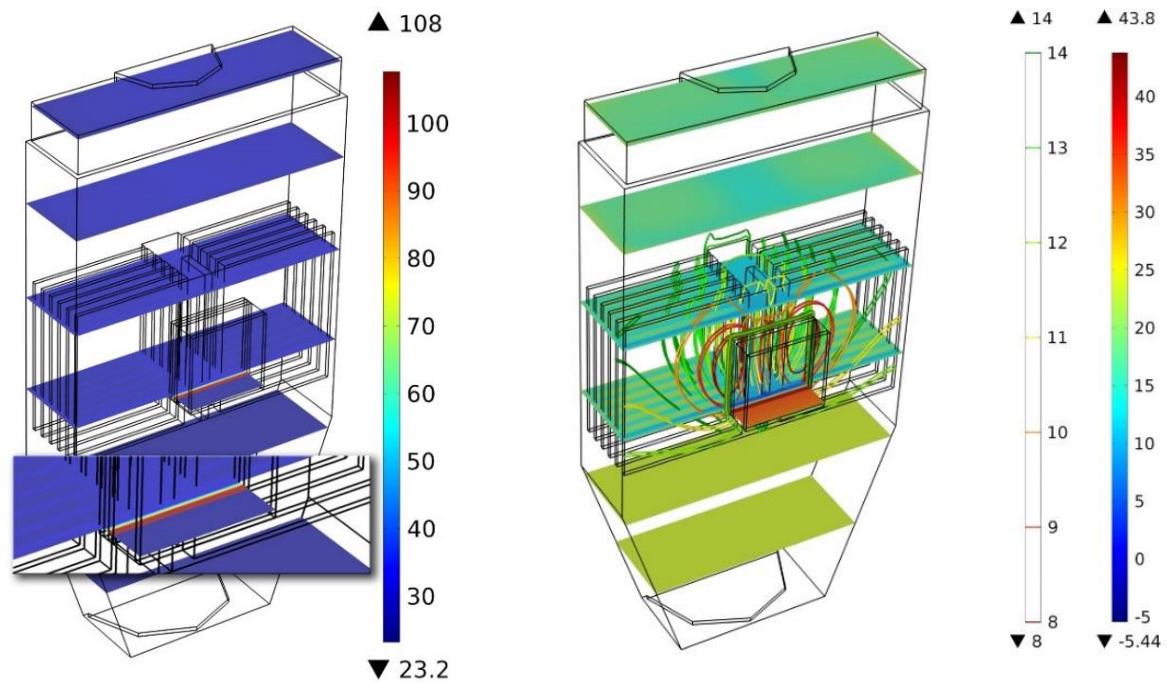
V první situaci jsme se věnovali možnosti výpadku centrální klimatizační jednotky, tedy situaci, kdyby vzduch okolo vnějších výměníků byl téměř nehybný, zároveň by však (ať už cíleně, nebo nedopatřením) jednotka pracovala na plný chladicí výkon, tedy by došlo k výraznému zahřívání vnějších výměníků. Výsledek lze vidět na Obr. 79 vlevo. Maximální teploty zde dosahují 57,5 °C, což se neblíží limitním hodnotám, a proto není třeba se obávat, že by se jednotka v takové situaci poškodila. Tato situace byla proto také použita pro ověření modelu a reálné měření výsledky potvrdilo.

Druhá testovaná situace počítala s opačným problémem, tedy jednotkou pracující na maximální topný výkon, ale při vypnutí či poruše ventilátoru MKJ – při nulovém tlaku na přívodu vzduchu do jednotky. V této situaci vzniká nebezpečí přehřátí jednotky z důvodu malého odvodu tepla z vnitřních výměníků. Výsledek lze vidět na Obr. 79 vpravo.



Obr. 79: Vlevo: Výsledek výpočtu v situaci bez proudění vzduchu okolo vnějších výměníků a plném chladicím výkonu (70 W). Vpravo: Výsledek výpočtu bez nuceného proudění uvnitř jednotky a plném topném výkonu jednotky. Škála označuje teploty ve °C v daném řezu [85].

Ani za takových podmínek nedošlo k přehřátí jednotky nad stanovenou bezpečnostní mez 90 °C, maximální teplota článku byla 75 °C, což znamená, že odvod tepla skrze plášť je dostatečný, aby podobná situace jednotku nepoškodila. Avšak energie je opět pouze mařena, a proto by bylo rozhodně vhodné, aby elektronika ovládání dokázala rozpoznat, že ventilátor není v provozu, a články byly automaticky odpojeny.



Obr. 80: Vlevo: Výsledek výpočtu při poruše vnějšího výměníku a plném chladicím výkonu (70 W). Škála označuje teploty ve °C v daném řezu. Vpravo: Výsledek při využití Peltierova článku o maximálním výkonu 100 W, linie vyznačují izotermy povrchových teplot výměníků s rizikem kondenzace tedy s teplotou výměníku mezi 8 a 10 °C. První stupnice označuje jednotlivé teploty izoterm ve °C, druhá stupnice pak teploty ve °C v daném řezu.

Třetí situace simulovala mechanickou poruchu vnějšího výměníku, tedy poškození jeho kotvení na jednotku (utržení či uvolnění přítlačných šroubů) a vznik úzké mezery mezi výměníkem a článkem. Tato situace se ukázala jako potenciálně nebezpečná, teploty na článku stoupají až na 108 °C. Z podobných důvodů bude třeba použít teplotní čidla u vnějších i vnitřních výměníků, která iniciují odpojení systému v případě podobné poruchy. Výsledky simulace jsou vidět na Obr. 80 vlevo.

Návrhové simulace

První návrhová simulace měla za cíl určit požadovaný výkon Peltierových článků pro dosažení konkrétních parametrů chladicího vzduchu. Na základě požadavků pro provoz byla stanovena extrémní požadovaná hranice, tedy výkon, který jednotka nepotřebuje pro dlouhodobý provoz, ale byl by krátkodobě použitelný pro komfort uživatele. Po započítání tepelných ztrát dalšími rozvody byla tato hranice stanovena na teplotní rozdíl 6 °C na výstupu z jednotky při objemovém průtoku 50 m³/h.

Testovány byly čtyři Peltierovy články s postupně rostoucím výkonem 68,8, 85, 100 a 120 W. Nejbližše požadované hodnotě vyšel článek s výkonem 100 W, kde při daném průtoku a vstupní teplotě 23,5 °C byla výstupní teplota 17,5 °C, což je hodnota skutečně velmi blízká stanoveným požadavkům. Simulace ukázala, že při tomto výkonu nedochází k přehřívání vnějšího výměníku, který se ustálil na průměrné teplotě 33,4 °C, ale výrazně klesne teplota vnitřního výměníku –

na teplotu od 11 do 14 °C. Pokud tuto hodnotu porovnáme s teplotami rosného bodu nasávaného vzduchu naměřenými pod podlahou, zjistíme, že na povrchu výměníku skutečně může nastat kondenzace vlhkosti. Z měřeného období by to bylo průměrně (hodnota je závislá na místě měření) v 10 % sledované doby. Výsledky výpočtu pro Peltierův článek o výkonu 100 W (tedy celého zařízení s výkonem 200 W) jsou vidět na Obr. 80 vpravo.

Druhá návrhová simulace se zabývala možností zlepšit vlastnosti jednotky zlepšením přenosu tepla mezi jednotlivými prvky zařízení. V současné verzi jednotky je použita teplovodivá pasta s tepelnou vodivostí 5,6 W/(m·K), a to v tloušťce přibližně 1 mm. Pasta jako taková je velmi dobré kvality, proto jsme, spíše než na změnu materiálu, zaměřili na tloušťku vrstvy. Simulace měla za úkol odhadnout, o kolik procent se zvedne výkon jednotky, pokud bychom tuto vrstvu lepším technologickým postupem dokázali snížit na 0,3 mm.

Výkon přenesený z článku přímo do vzduchu se skutečně zvětší, a to z 26,1 W na 27,7 W, což je nárůst o celých 6 % výkonu, což rozhodně není zanedbatelné zlepšení. Z výsledku je tak zřejmé, že se velmi vyplatí dbát na kvalitu provedení jednotlivých spojů.

Třetí návrhová simulace se týkala možnosti zateplit plášť zařízení 5 mm silnou vrstvou tepelně izolačního materiálu (extrudovaný polystyren) a zvýšit tak jeho odpor z 0,04 (K·m²)/W na 0,15 (K·m²)/W. V tomto případě byl využit režim chlazení, kde původní přenesený výkon byl 27,6 W a zateplením pláště došlo k jeho nárůstu na 29,4 W, tedy o 6,5 % výkonu jednotky.

Poslední experiment testoval využití ventilátorů připevněných k vnějším výměníkům, které by výrazně zvyšovaly jejich účinnost, čímž by byl snížen teplotní rozdíl článků, a tedy zvýšena jejich efektivita a schopnost přenést více energie do vnitřního výměníku. Jejich vliv však není tak veliký oproti standardní situaci, v níž už se předpokládá proudění vzduchu. Chlazení výměníků dokáže vylepšit efektivitu článků o 7 %, tedy z 27,6 W na 29,6 W. Rozdíl 2 W není malý, ale pokud vezmeme v úvahu, že ventilátory samy o sobě vyžadují příkon 1,9 W pro provoz, bilance je v podstatě nulová, nehledě na zvýšení hladiny akustického výkonu. Toto řešení tedy není v současném provozu efektivní, bylo by možné zvážit ho jako prevenci přehřívání, kdyby rychlost okolního vzduchu klesla pod očekávanou hranici, ale jinak ho nelze doporučit.

Aplikace výsledků simulací pro nový prototyp jednotky

Po provedených simulacích byl navržen nový prototyp jednotky, který měl lépe splnit návrhové parametry a zlepšit její efektivitu. Pro jeho návrh bylo využito získaných výsledků simulací.

Zabezpečení provozu jednotky

Vzhledem k tomu, že bezpečnostní simulace ukázaly zásadní riziko přehřátí článků při odtržení vnějšího výměníku, design nového prototypu řešil jeho pevnější ukotvení do pláště jednotky. Zatímco původní návrh počítal s kotvením šrouby do vnější stěny o tloušťce 2 mm, nový prototyp zpevňuje plášť poblíž místa kotvení ztužujícím žebrem a kotvicí bod je zesílen na tloušťku 6 mm.

Návrh také počítá s termostatickými vypínači, které rozpojí hlavní okruh Peltierových článků při překročení teploty 75 °C, což by mělo podchytit případné havarijní stavy.

Změny v návrhu jednotky

Abychom dosáhli blíže k návrhovým parametrům, bylo upraveno několik součástí MKJ. První úprava se týkala celkového příkonu jednotky. Zatímco původní jednotka využívala dva Peltierovy články, každý o maximálním příkonu 68,8 W, které nebyly schopny zabezpečit požadovanou výstupní teplotu vzduchu, nový prototyp následuje výsledky numerické simulace, která doporučuje dva články o příkonu 100 W. Spolu s Peltierovy články však bylo nezbytné vyměnit i vnější výměníky, protože se ukázalo, že původní typ neodváděl v režimu chlazení dostatek tepla pro efektivní provoz. Na vině byl nedostatečný tepelný tok tepelnými trubicemi, což simulace kvůli zjednodušení nebyla schopna postihnout.

Další změna se týkala využití ventilátorů na vnějších výměnících. Ačkoliv ze simulace vyplynulo, že při návrhových podmínkách je rychlost proudění vzduchu kolem vnějších výměníků dostatečná pro odvod tepla, byly zařazeny jako pojistný prvek pro případ poklesu rychlosti proudění vzduchu v dvojité podlaze – např. při snížení výkonu centrální vzduchotechnické jednotky nebo nestandardním umístění MKJ v prostoru dvojité podlahy. Ventilátory budou řízeny jednoduchým bimetalovým termostatem a sepnou se v případě, že teplota vnějších výměníků přesáhne 45 °C (vzhledem k vyšší produkci tepla, než chladu není nutné aktivovat ventilátory při módu vytápění, kdy vnější výměníky odebírají teplo z okolního vzduchu).

Třetí změna, která opět vycházela z výsledků simulace, bylo zlepšení tepelné vodivosti spojů Peltierova článku a obou výměníků. Původní sestava z velké části spoléhala na přenos tepla přes poměrně silnou vrstvu teplovodivé pasty a kvůli nevhodně řešeným spojům nebylo možné dosáhnout dobrého přitlaku na spojích. Nový design jednotky kladl důraz na co nejtenčí vrstvu pasty, a tudíž i dobrý přitlak, který umožnila jak změna kotvení výměníku vnějšího, tak úprava

kotvení výměníku vnitřního. Nový prototyp snižuje vrstvu teplovodivé pasty ze zhruba 1 mm na přibližně 0,2 – 0,3 mm, což prostup tepla významně zlepšuje.

Jediné, co ze simulovaných vylepšení jednotky v novém prototypu nebylo využito, je dodatečná tepelná izolace pláště jednotky, a to kvůli obtížné proveditelnosti a proto, že následný optimalizovaný tvar jednotky snižuje vliv této úpravy.

6.6.1.3 Závěr optimalizace

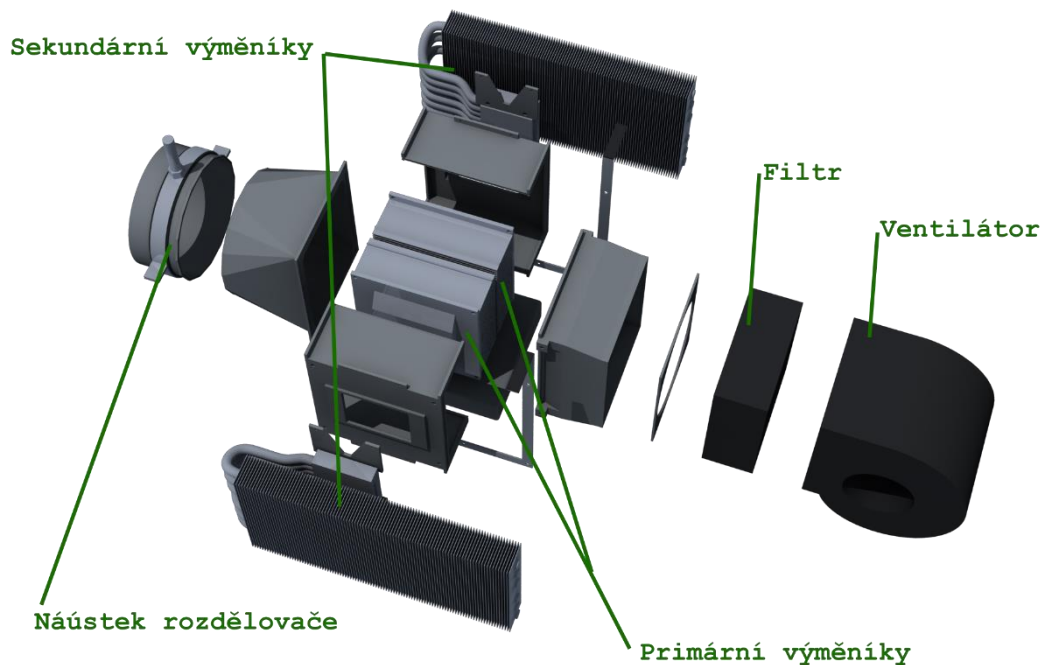
Celkově lze říci, že simulace jednotky přinesla za relativně krátký čas mnoho údajů, které by nebylo možné získat fyzikálním měřením buď proto, že by hrozilo poškození součástí, nebo by měření bylo nákladné. Výsledky simulace byly následně použity při vytváření nového prototypu jednotky.

Byly testovány limitní hodnoty a stavy jednotlivých částí během poruchy některé ze součástí systému. Byly také uskutečněny výpočty zaměřené na optimalizaci samotné jednotky a testovány možnosti zvýšit její efektivitu. Z modelovaných variant vychází, že velkou roli (až 6 % výkonu) hraje příliš silná vrstva teplovodivé pasty a možné nedokonalosti na spojích tento vliv jistě ještě prohlubují. Konstrukce nového prototypu tak byla upravena, aby umožnila dobré přítlaky jednotlivých součástí a snížila tak potřebné množství pasty a zlepšila kontakt styčných ploch. I mírné zlepšení tepelného odporu pláště přidáním 5 mm extrudovaného polystyrenu by podle výsledků mohlo přinést zvýšení výkonu až o 6,5 %, při poměrně nízké pořizovací ceně. Ovšem technická proveditelnost takové úpravy u nového prototypu byla vyhodnocena jako příliš komplikovaná vzhledem k možnému zisku. Simulace také ukázala, že instalace ventilátorů na vnější výměníky přinese za standardních návrhových podmínek jen malé zvýšení efektivity zařízení, které je navíc redukováno vlastním příkonem ventilátorů. Ventilátory tak byly namontovány pouze jako pomocné pro případ, že proudění okolo výměníků klesne pod návrhovou mez, nebo bude jednotka nepříznivě umístěna mimo změřené proudy vzduchu. Sepnutí ventilátorů je řízeno podle teploty výměníku.

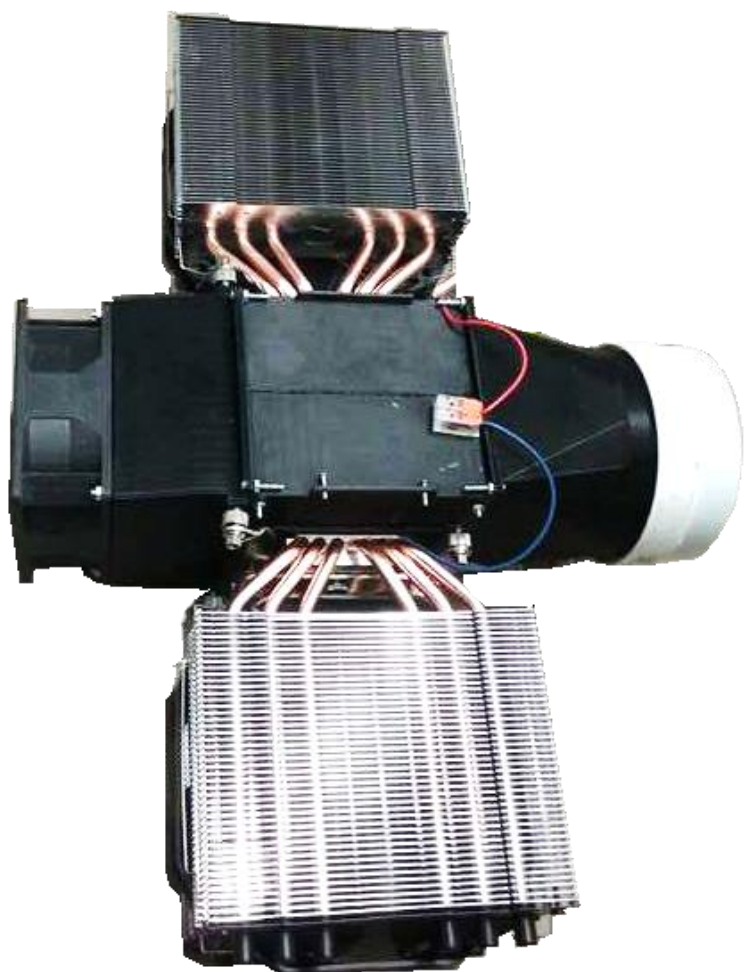
6.6.1.4 Optimalizovaná finální podoba těla jednotky

Změny v návrhu se projevily v jednotlivých konstrukčních částech nového návrhu těla. Změnily se však nejen tyto komponenty, ale celkové umístění těla jednotky. Během diskuze problematiky bylo dohodnuto, že umístění jednotky místo podlahových vyústí není preferováno, a to z hlediska pozice prostupu podlahou, tak akustickými parametry, kdy bylo považováno za vhodnější umístit jednotku zcela do prostoru zdvojené podlahy, ačkoliv tato varianta snižuje přístupnost technologií a možnost jednotky personalizovaného větrání servisovat.

Výsledný optimalizovaný model lze vidět na Obr. 81 a zkompleťovaný prototyp těla jednotky na Obr. 82.



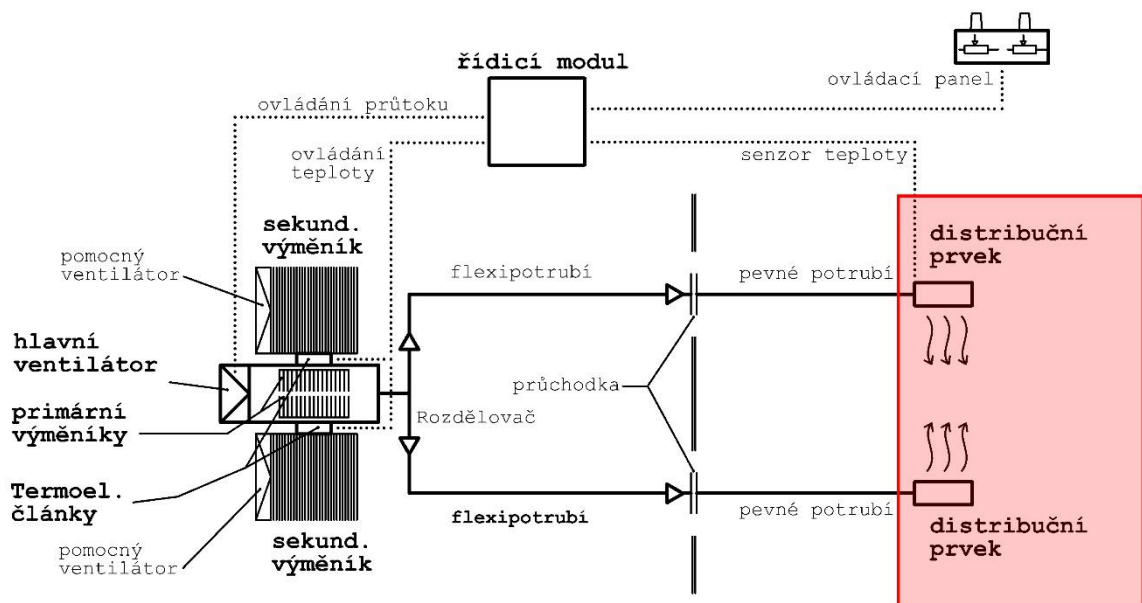
Obr. 81: rozložený model prototypu (sekundární výměníky neodpovídají finální zvolené variantě) (zdroj: autor).



Obr. 82: Prototyp po kompletacji (zdroj: autor).

6.6.2 VYÚSTKY

Vyústky personalizovaného větrání mají zásadní vliv na funkčnost celého systému a jejich návrh byl jednou z klíčových částí výzkumu. V první fázi bylo rozhodnuto, že nejvhodnější umístění vyústek, vzhledem k distribuci a technické komplikovanosti pracovního místa, bude umístění po stranách stolu, kde se v návrhu nacházel technologický pilíř s dostatečným prostorem pro vyústky i napojení na jednotku. Vzhledem k tomu, že prostřední část pracovního místa byla kvůli umístěným technologiím neprostupná pro přívod vzduchu, bylo nutné udělat vstup podlahou pod každou vyústkou. Rozdělení proudu vzduchu se tedy nachází přímo za jednotkou a k pracovnímu místu je přivedena samostatným kanálem. Umístění vyústek v pracovním místě lze vidět na Obr. 84. Prostor, který jsme v technologiích získali pro vyústku a její napojení je pak zobrazen na Obr. 85.



Obr. 83: Označení řešené části

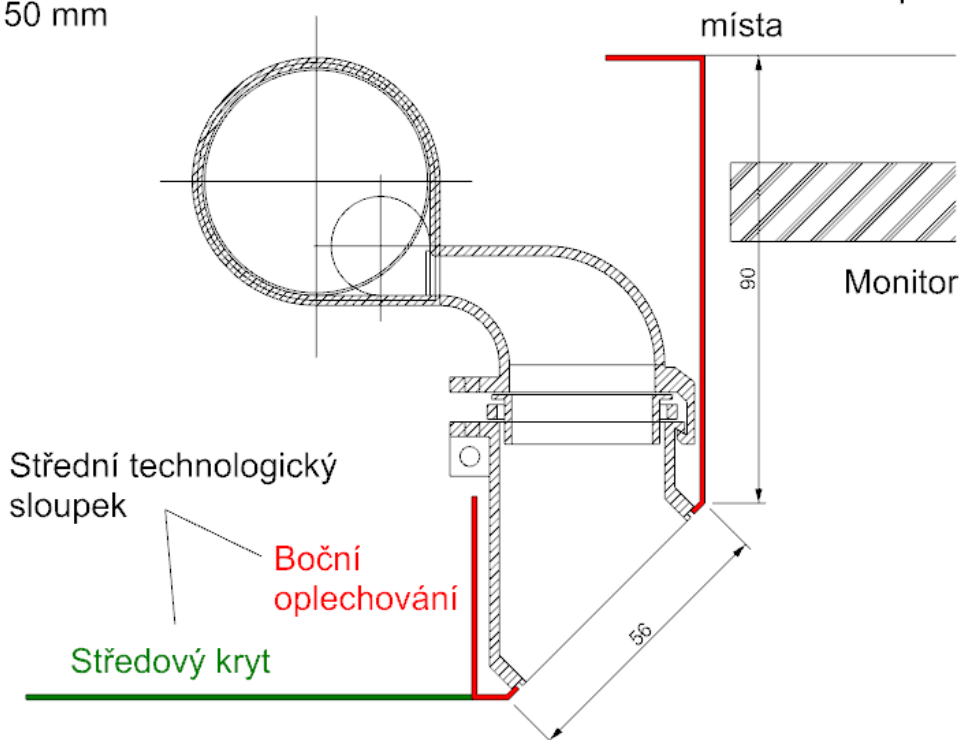
Poměrně velkou výzvou bylo převedení vertikálního směru proudění v přívodním potrubí do horizontální roviny, ideálně co nejrovnoměrněji po celém výškovém profilu. K tomuto účelu sloužilo postupné zužování profilu potrubí, které mělo za úkol převést postupně objem vzduchu do vyústky. Pro větší rovnoměrnost pak byla mezi vertikální a horizontální část vložena tlaková ztráta v podobě husté mřížky vytvořené na 3D tiskárně. Implementace do středového sloupku je znázorněna na Obr. 85, výsledný model napojení vyústky pak na Obr. 86.



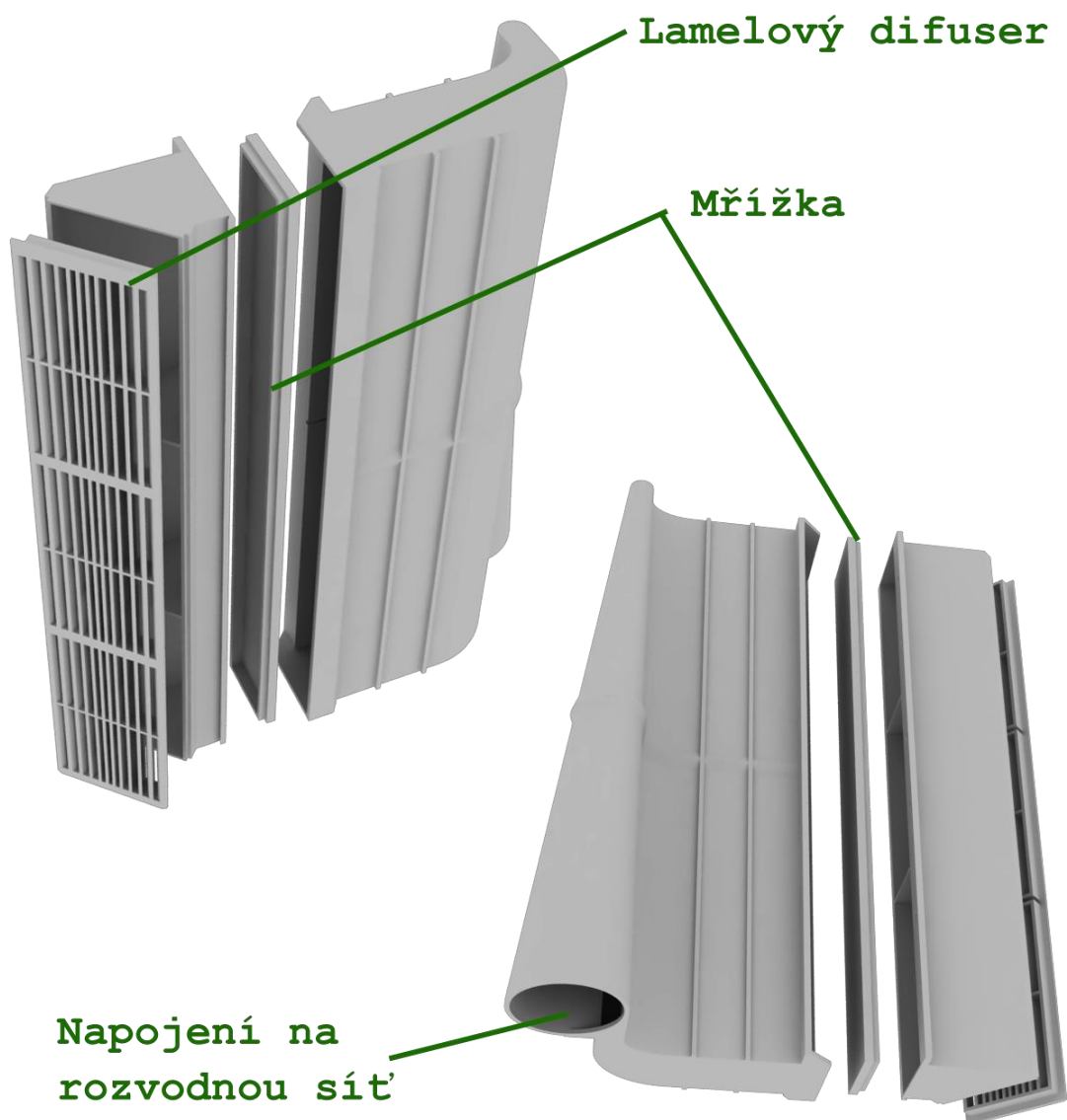
Obr. 84: Rozložení vyústek [82].

Napojení na přívod vzduchu
 $\varnothing 50$ mm

Zadní deska pracovního
 místa



Obr. 85: Prostor pro zabudování vyústky ve středovém sloupku (půdorysný řez). A znázorněný návrh napojení vyústky. Výsledný model měl kvůli technologiím (za středovým krytem) delší krček mezi kruhovým napojením a vnitřní mřížkou (zdroj: autor).

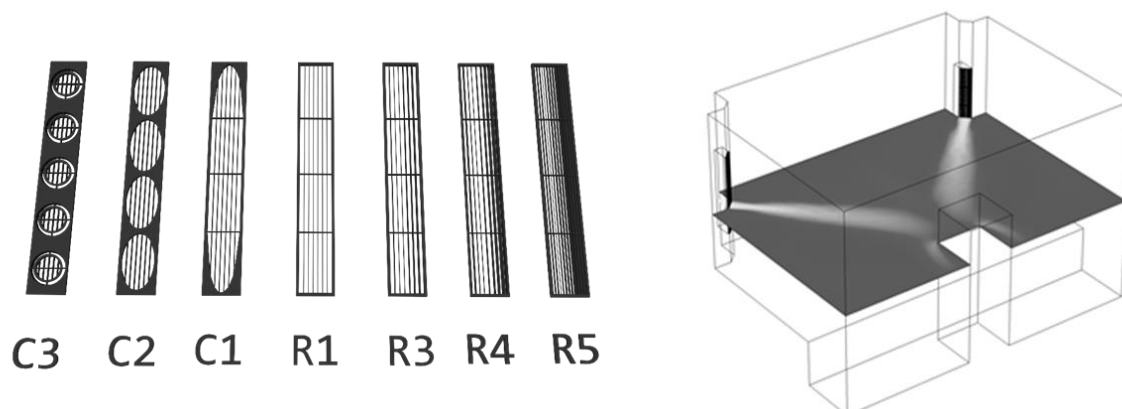


Obr. 86: Napojení vyústky na rozvodnou síť bylo vytvořeno díly vytvořenými na 3D tiskárně. Model je pro názornější ukázkou rozložený (zdroj: autor).

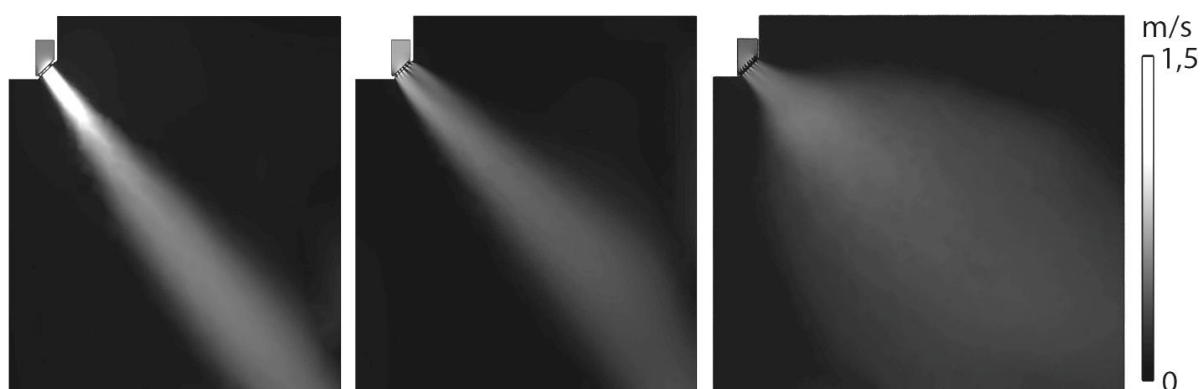
6.6.2.1 Varianty tvarů vyústek

Velmi zásadní dopad na efektivitu celého systému má tvar výsledného proudění z vyústek, protože (jak bylo zmíněno v kapitole 3.4) zásadním způsobem ovlivňuje distribuci vzduchu i možné negativní jevy. Z hlediska návrhu bylo potřeba vybrat systém s co nejširším záběrem na pracovní místo, aby se pokryla většina poloh, které může uživatel u pracovního místa zaujímat, ideálně s co nejrovnoměrnějším pokrytím.

Pro výběr ideálního tvaru vyústky i proudění jsme vytvořili řadu modelů pro 3D simulaci, které měly ověřit různé druhy proudění a jejich dopad na prostředí v místě užívání. Tato řada začínala u kruhových trysek, které mají velkou výhodu dlouhého dosahu proudu a tedy vysoké efektivity distribuce, za cenu možného diskomfortu a menšího rozptylu proudu, tedy i nižší variability pozice uživatele, pokračovala mezistupni k prosté obdélné mřížce s vertikálními rovnoběžnými lamelami, které mají střední rozptyl i dosah proudu, a končila u obdélných vyústek s od sebe se rozbíhajícími lamelami, které mají nejširší rozsah, ale zároveň teoreticky nejnižší rychlosti ve srovnávací rovině. Výběr z variant a obrázek simulovaného prostoru je vidět na Obr. 87.



Obr. 87: Testované varianty vyústek a jejich umístění v pracovišti [75].



Obr. 88: CFD simulace vyústek: kruhové trysky C3 (vlevo), obdélná vyústka s rovnoběžnými lamelami R1 (uprostřed), obdélná vertikální vyústka s rozbíhajícími se lamelami R5 (vpravo) [75].

Na obrázku Obr. 88 můžeme vidět výsledky CFD simulace pro různé tvary vyústek. Pro simulaci byl využit program COMSOL Multiphysic a ve srovnání šlo o izotermní proudění s předpokládaným průtokem $25 \text{ m}^3/\text{h}$ z jedné vyústky, a tedy $50 \text{ m}^3/\text{h}$ z celého systému, což je hodnota, která dané práci normově odpovídá. Pro volbu jsme vybrali dvě zásadní kritéria: šířku proudu, a tedy variabilitu polohy uživatele, a dostatečnou rychlost v dýchací zóně, kterou jsme stanovili na doporučených hodnotách mezi $0,15 - 0,25 \text{ m/s}$. Velikost a umístění instalačního prostoru byla stanovena konstrukčními možnostmi pracoviště. Využitelný světlý otvor vyústky tak odpovídal 300 mm výšky a 50 mm šířky.

Z řady typů vyústek nakonec nejlépe vyhovovala varianta R5 s vertikálními rozbíhajícími se lamelami, která při dostatečné rychlosti v dýchací zóně poskytovala nejširší proud vzduchu.

Výběr a modelování tvaru vyústky je podrobně popsán v článku autora na konferenci Klimatizace a Větrání z roku 2017 [75].

6.6.2.2 Interakce s konvekčními vrstvami

Kromě proudu vzduchu je zásadním prvkem funkčního systému personalizovaného větrání i interakce s konvekčními vrstvami lidského těla. Abychom ověřili, jak se bude chovat zvolené vyústka při různě nastavených rychlostech proudění z vyústky, byla použita PIV anemometrie (viz kapitolu 4.1.1) pro přesné změření obrazu proudění vzduchu kolem lidského těla. Pro prvotní ověření byl vytvořen prototyp jedné vyústky, který byl nasměrován v reálné vzdálenosti naproti termálnímu manekýnovi. Termální manekýn s nastavenou teplotou povrchu shodnou s lidským tělem simuloval sedící pracující osobu. Měření bylo prováděno v izotermním stavu, tedy zatím bez vlivu ohřevu či ochlazení vzduchu jednotkou.

Měření bylo rozděleno do tří částí. V první byla změřena samotná vyústka bez vlivu lidského těla. V druhém měření pak byl naopak změřen samotný termální manekýn a jeho mezní konvekční vrstvy vzduchu. Poslední měření pak měřilo vzájemnou interakci těchto dvou subjektů ve třech různých objemech proudění vzduchu, tedy ve třech různých ústových rychlostech vzduchu na vyústce.

Podrobně je měření rozebíráno v autorově článku v časopise VVI 6/2017 [72].

Nastavení PIV

Pro měření PIV byl použit systém se dvěma kamerami a laserem vytvářejícím měřenou rovinu. Pro první dvě měření (samostatné prvky), byla použita pouze jedna kamera, pro vzájemnou interakci pak byly využity kamery obě, aby byla rozšířena měřící plocha. Vzhledem k velikosti měřené plochy byly jako částice použity olejové bublinky o generovaném průměru 100–1000 nm, které jsou schopny projít všemi komponenty personalizovaného větrání. Pro měření konvekčních vrstev byl použit textilní difusor, který částice distribuoval rovnoměrně a při minimálních rychlostech k nohám manekýna. Měření však probíhala v situaci, kdy byly částičky rozptýleny v dostatečném množství ve vzduchu v měřené oblasti.

Pro měření vyústky pak byly částičky distribuovány před nasávací ventilátor jednotky.

V místnosti nebyl přítomen žádný další zdroj proudění vzduchu, rychlost proudění vzduchu na dvou kontrolních stanovištích se pohybovala v rozmezí 0,03–0,12 m/s. Teplota během měření se pohybovala v rozmezí 22,5–23,5 °C.

Pro výpočet byla použita průměrná rychlost z padesáti zachycených snímků.

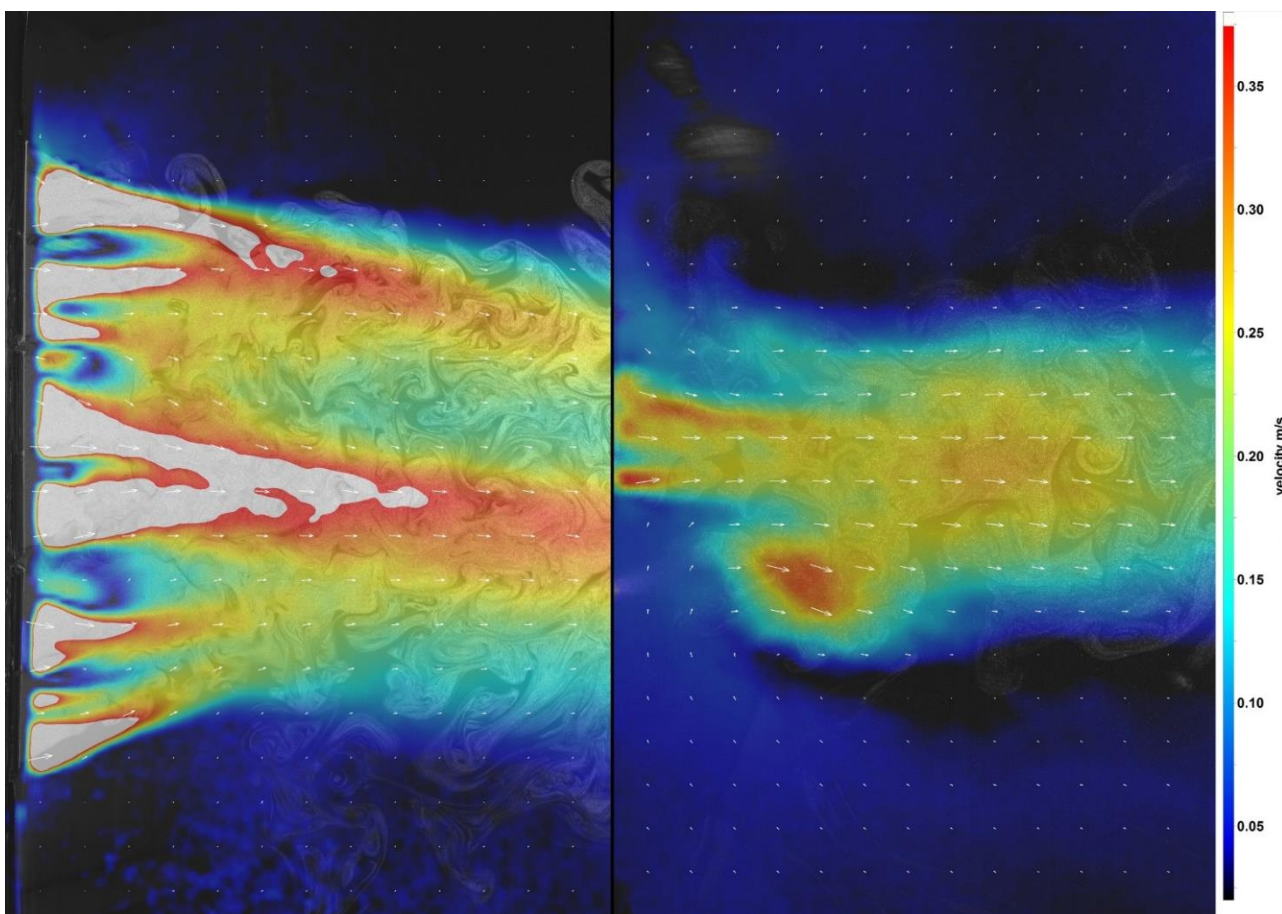
Nastavení termálního manekýna

Vzhledem k tomu, že konvekční vrstvy lidského těla přímo závisí na teplotním rozdílu mezi povrchem těla – potažmo oblečení – a okolním vzduchem, bylo potřeba nastavit termálního manekýna tak, aby se co nejvíce podobal podmínkám na daném pracovišti. Jeho oblečení tak bylo voleno tak, aby použitá hodnota c_{lo} co nejvíce seděla s hodnotou skutečných pracovníků. V tomto byl pro nás určující dotazníkový průzkum, kde oblečení bylo jednou z položek. Výsledná hodnota c_{lo} pak byla podle výsledků odhadnuta na 0,54.

Manekýn byl během měření nastaven na střední teplotu povrchu těla 35 °C a dýchání bylo vypnuto, aby nepůsobilo v naměřených hodnotách rušivě. Vliv dynamického profilu dýchání není zanedbatelný, ale v principu by bylo potřeba mnohem komplexnějšího měření.

Měření vyústek

V prvním měření byla změřena samostatná vyústka, aby bylo ověřeno proudění vybraného typu lamel. Byl použit průtok 25 m³/s, který odpovídá zvolenému maximu na vyústce. Měření proběhlo ve vertikální i horizontální rovině a výsledky jsou patrné na Obr. 89. Měření částečně ověřilo simulaci, bylo ovšem zjištěno, že rovina, ve které se na simulaci proud vzduchu roztahuje do šíře má v prvních 12 cm od vyústky klesající tendenci a je tak velmi těžké jí zachytit vodorovnou rovinou. S vyšší vzdáleností se proud vzduchu vyrovnává do horizontální roviny. Tento rozdíl je patrně způsoben zjednodušením simulované vyústky, která počítá s rovnoměrnějším prouděním před samotným lamelovým difusorem. Proudění vzduchu je však i podle měření relativně konstantní ve vertikální rovině, kde byla obava z nerovnoměrného převodu dynamiky vzduchu z vertikálního na horizontální směr.

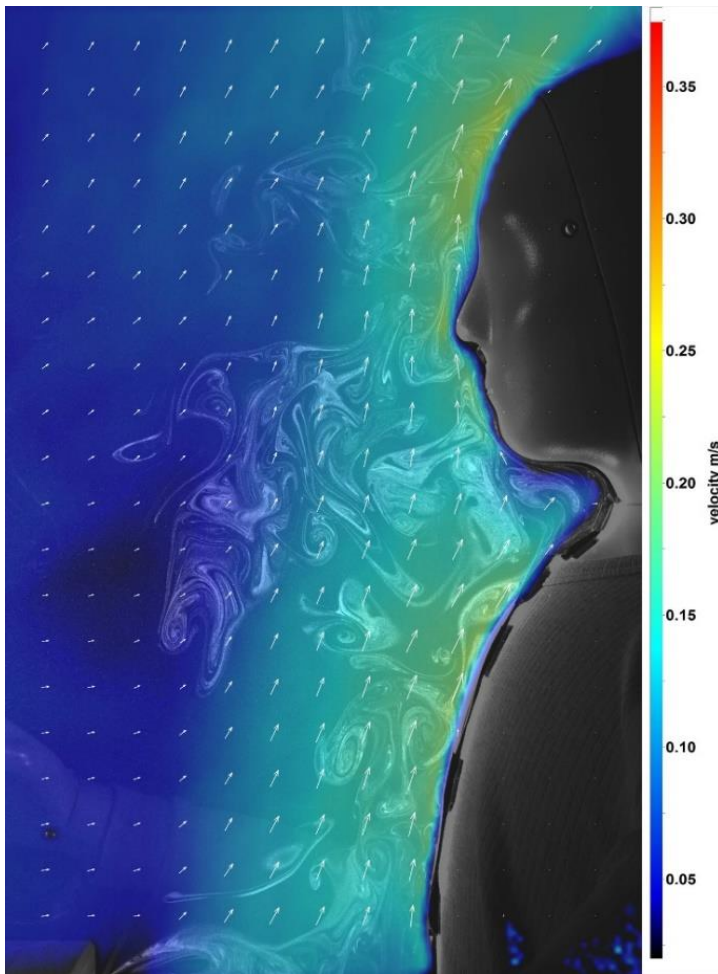


Obr. 89: PIV anemometrie vyústky, rozložení proudu vzduchu ve vertikální rovině (vlevo) a horizontální rovině (vpravo) [72].

Měření konvekčních vrstev

Druhé měření bylo zaměřeno na samotné konvekční vrstvy kolem termálního manekýna. Měřeno bylo ustálené pole proudění okolo hypotetické osoby sedící u pracovního stolu. Výsledky jsou patrné na Obr. 90.

Celkově se změřená rychlost proudění vzduchu okolo sedící osoby pohybuje v rozmezí 0,1-0,25 m/s, což odpovídá měřením publikovaným v odborné literatuře. Šíře proudu vzduchu je u sedící osoby přibližně 10 cm v oblasti hrudníku se zužující se tendencí s dalším stoupáním (okolo 7 cm ve výšce očí). Ta je dána z velké části i deskou stolu, která je od trupu vzdálená cca 12 cm. Nejrychleji proudící vzduch je v oblasti vysokého teplotního gradientu, tedy v oblasti hrudníku, obličeje a čela. V těsné blízkosti povrchu zde proudění dosahuje zmiňovaných 0,25 m/s. Vliv na proudění však mají i nohy a ruce. Nohy ovlivňují převážně proudění vzduchu mezi deskou a trupem a podporují proudy vznikající okolo těla, ruce pak vytvářejí méně výrazné proudění, které je ovšem mimo měřenou rovinu.

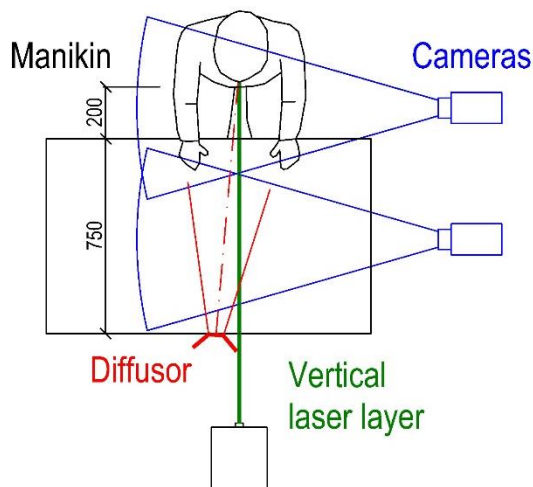


Obr. 90: PIV měření samostatných konvekčních vrstev okolo termálního manekýna [72].

Měření interakce proudů vzduchu

Třetí měření mělo za úkol změřit vzájemnou interakci dvou předchozích měřených proudů vzduchu. Vyústka a manekýn byly postaveny do vzájemné pozice, která umožňovala vytvářet vzájemnou interakci podobnou budoucímu stavu, a zároveň vyvíjet světelnou rovinu ve směru proudění až k manekýnovi. Laserový zdroj tedy musel být v zákrytu za vyústkou a ideálně kolmo k sedící postavě. Na Obr. 91 lze vidět vzájemnou polohu jednotlivých měřených i měřících prvků. Kamery jsou nastaveny tak, aby rozšiřovaly měřené pole.

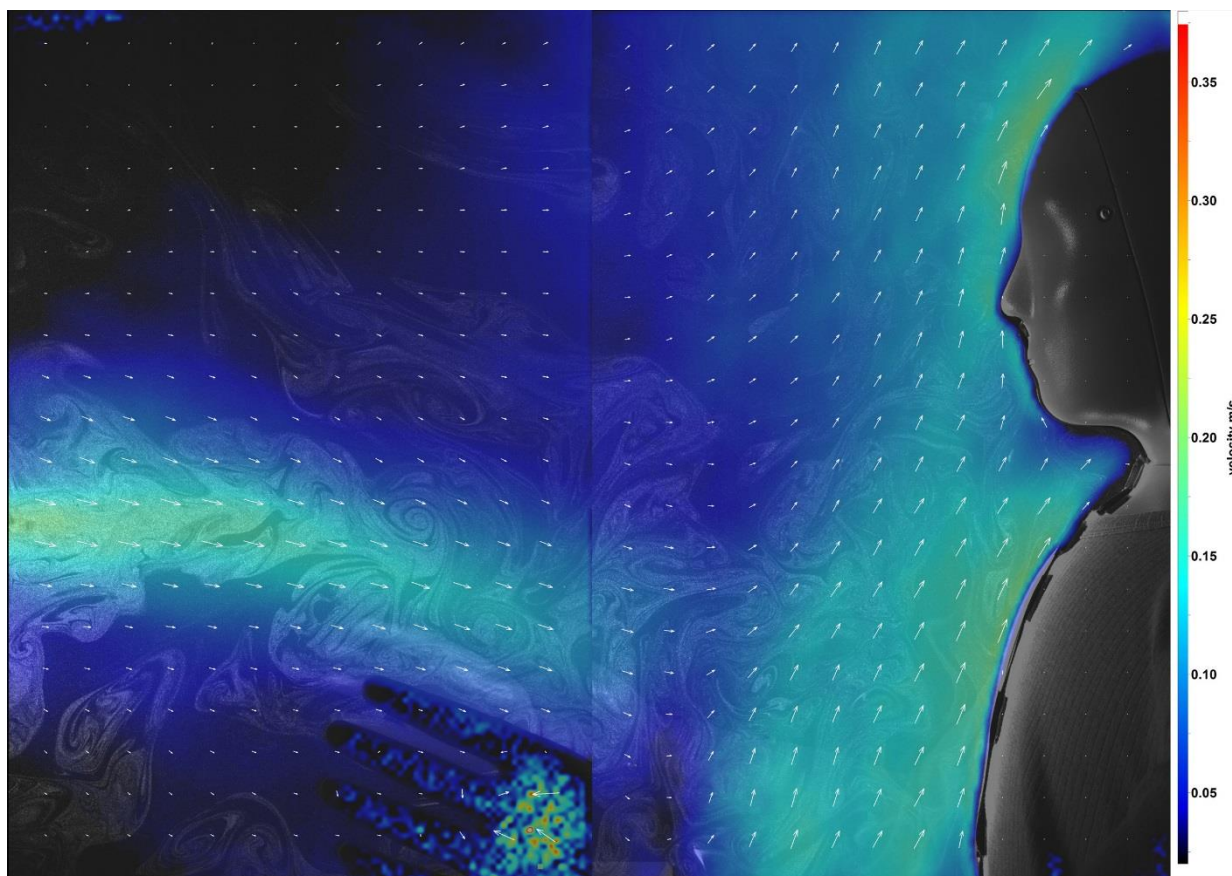
Vyústka byla postavena 900 mm od hrudníku manekýna, měřený rozsah byl 600 mm od manekýna. Samotná vyústka tak bohužel není v záběru kamer.



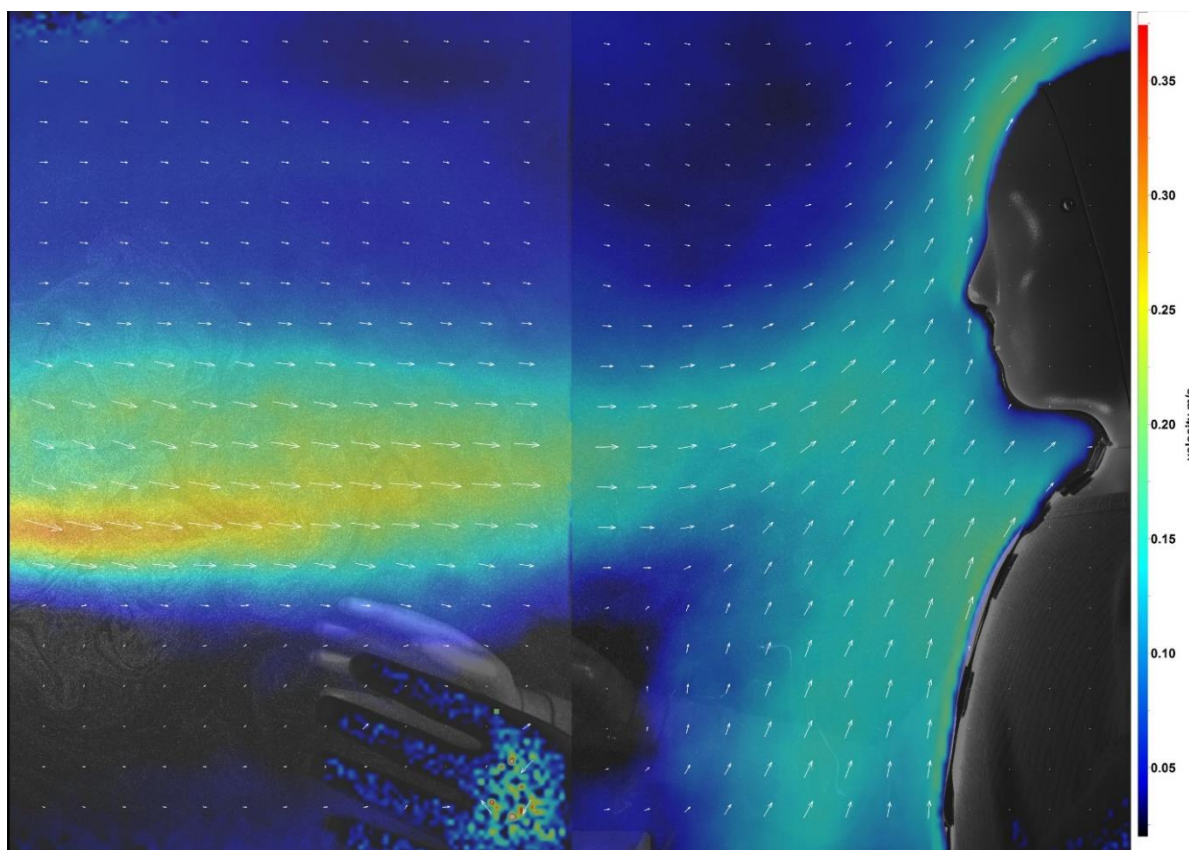
Obr. 91: Zobrazení vzájemné pozice měřících a měřených prvků pro měření interakce vyústky a konvekčních vrstev lidského těla [72].

S daným nastavením byly proměřeny tři stavy proudění vzduchu, lišící se množstvím vzduchu proudícího z vyústky, a tedy i ústovou rychlostí. Výsledkem měření měl být i odhad vhodného rozsahu proudění, který bude ve finálním systému nastavitelný, aby byly eliminovány zcela neekonomické stavy.

Nejnižším měřeným stavem bylo $15 \text{ m}^3/\text{h}$, což odpovídá rychlosti jádra proudu vzduchu přibližně $0,18 \text{ m/s}$ v hraniční vzdálenosti 600 mm od manekýna. Na Obr. 92 je patrné, že toto proudění je relativně pomalé a v blízkosti manekýna jsou rychlosti přiváděného vzduchu nižší než rychlosti konvekčních vrstev. Nastává tak situace, kdy velká část přiváděného vzduchu nedosáhne dýchací zóny, naopak je smíchána s vertikálním prouděním a odváděna nad uživatele. V takovém případě je větrání velmi neefektivní.

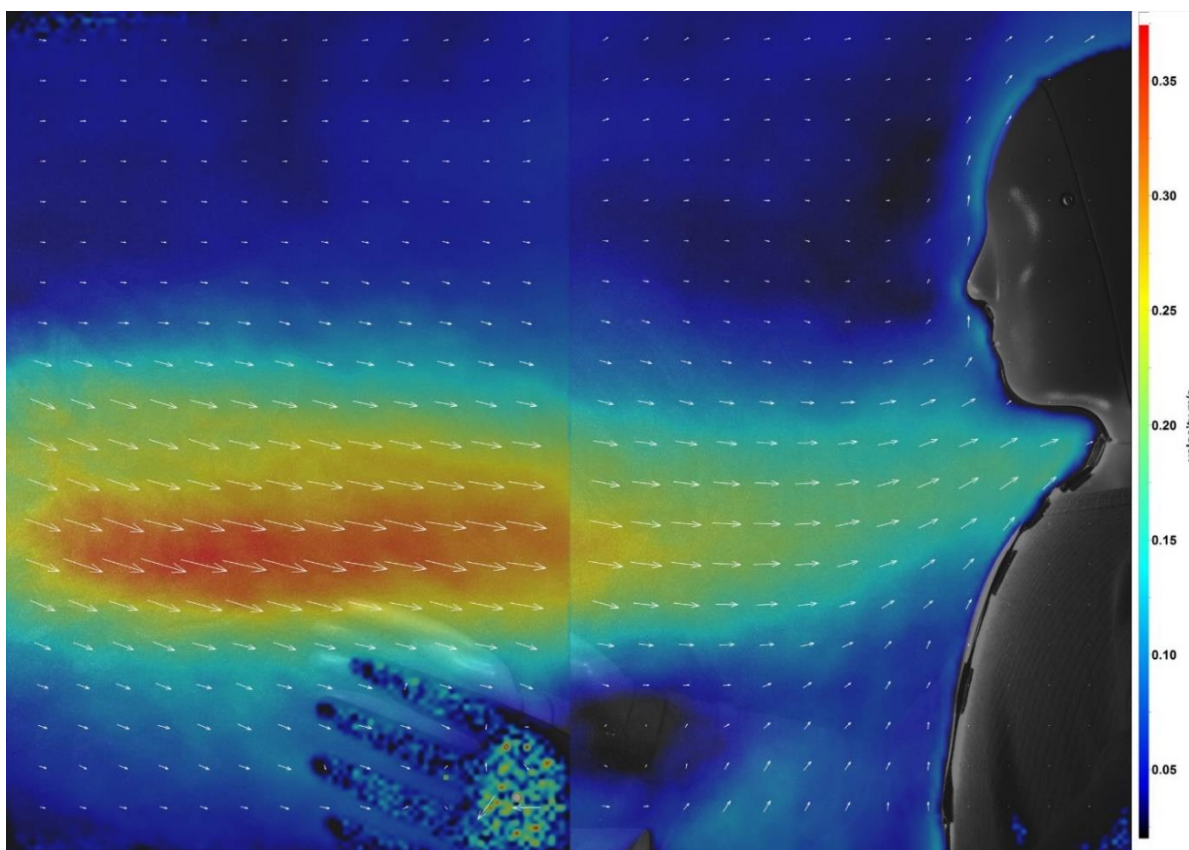


Obr. 92: Interakce mezi prouděním při průtoku vzduchu na vyústce 15 m³/h [72].



Obr. 93: Interakce mezi prouděním při průtoku vzduchu na vyústce 25 m³/h [72].

Významně lépe je na tom výsledek z měření průtoku $25 \text{ m}^3/\text{h}$, který odpovídá rychlosti přibližně $0,28 \text{ m/s}$ na hranici měřené roviny. Rychlosti v dýchací zóně jsou zde velmi srovnatelné u obou proudů a dochází tak zde k vyššímu průniku čerstvého vzduchu. Ačkoliv se jedná o lepší výsledek, bylo by vhodnější směřovat proud vzduchu pod dýchací zónu, aby výsledný vektor zasáhl hlavně oblast mezi hrudníkem a bradou, odkud jej stoupavé proudy vynesou do dýchací zóny. V současné situaci bude pravděpodobně určité riziko zasažení zóny očí přiváděným proudem vzduchu.



Obr. 94: Interakce mezi prouděním při průtoku vzduchu na vyústce $30 \text{ m}^3/\text{s}$ [72].

Třetí stav měřil proudění vzduchu vyšší, než bylo plánované maximum. Průtok byl nastaven na $30 \text{ m}^3/\text{h}$, což odpovídalo $0,38 \text{ m/s}$ v počáteční rovině (na výsledcích je patrné, že hlavní proud se v závislosti na rychlosti generuje ve větší vzdálenosti od vyústky). Výsledky lze vidět na Obr. 94 a na první pohled můžeme sledovat výrazně sníženou rychlost mezních vrstev. Toto snížení je způsobené výrazným poklesem povrchové teploty převážně v oblasti hrudníku, který je zasažen prouděním vzduchu ve vyústkách. Toto výrazné snížení rychlosti v konvekčních vrstvách je v souladu s odbornou literaturou, v některých studiích byla diskutována možnost snížení rychlosti v konvekčních vrstvách i za použití chladných sálavých panelů [71].

Proud vzduchu z vyústek díky sníženému vlivu konvekčních vrstev snadno zasahuje dýchací zónu a z hlediska efektivity personalizovaného větrání by mohl být považován za ideální. Takto vysoké proudění vzduchu (až $0,2 \text{ m/s}$) spolu

se sledovaným ochlazením v oblasti hrudníku a krku by však v delším časovém horizontu pravděpodobně způsobovalo výrazný tepelný diskomfort a zdravotní riziko z lokálního prochladnutí, z celkového pohledu se tedy jedná o méně vhodnou možnost.

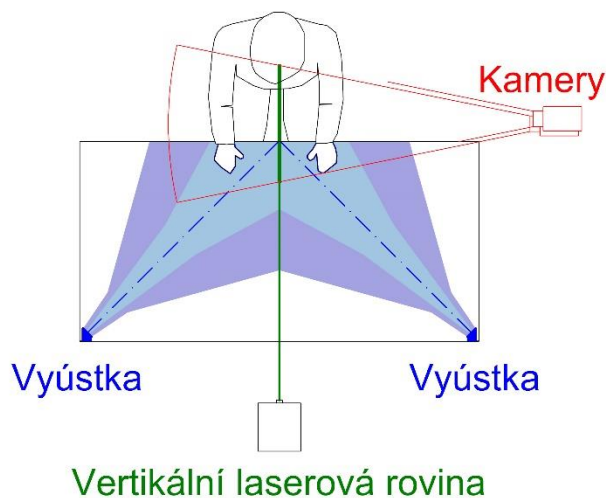
6.6.2.3 Výsledné obrazy proudění z obou vyústek

Celkový obraz proudění z obou vyústek byl měřen pro dva hlavní návrhové stavy, plný výkon 50 m³/h a poloviční výkon 25 m³/h a pro tři hlavní návrhové teploty: izotermní proudění, režim ohřevu vzduchu s teplotou na vyústce o 4 K vyšší a režim chlazení s teplotou o 4 K nižší, jak to odpovídá návrhovým parametrům.

Měření bylo nastaveno shodně s předchozím měřením, ovšem rozložení jednotlivých prvků bylo pozměněno tak, aby odpovídalo reálné instalaci (Obr. 95).

Proudění z vyústek je zde nastaveno tak, aby se osa proudů vzduchů potkávala na hraně stolu a následně se proudy spojily a pokračovaly kolmo k ose těla uživatele. Toto je velmi dobře vidět na snímcích z PIV, kde se oproti předchozímu měření hlavní proud skládá v prostoru před manekýnem.

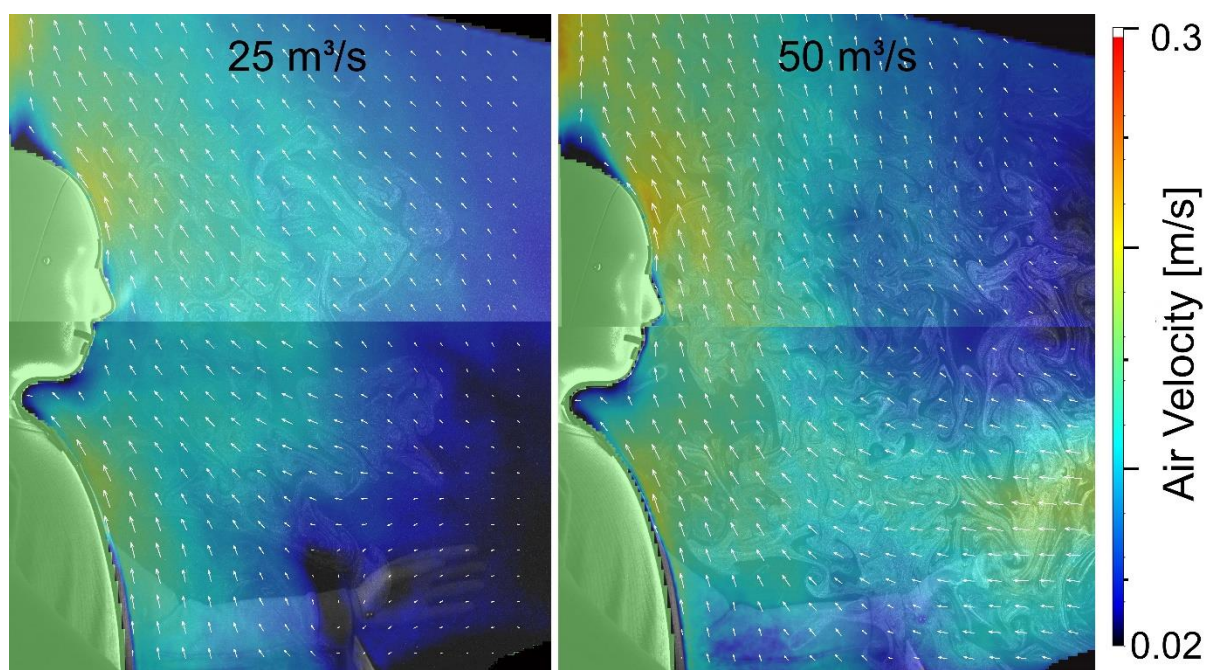
Zároveň s obrazem proudění zde byl pomocí manekýna měřen i dopad na tepelný komfort, který je uvedený v kapitole 6.7.1.



Obr. 95: Schéma měření proudění z obou vyústek [87].

Režim izotermní

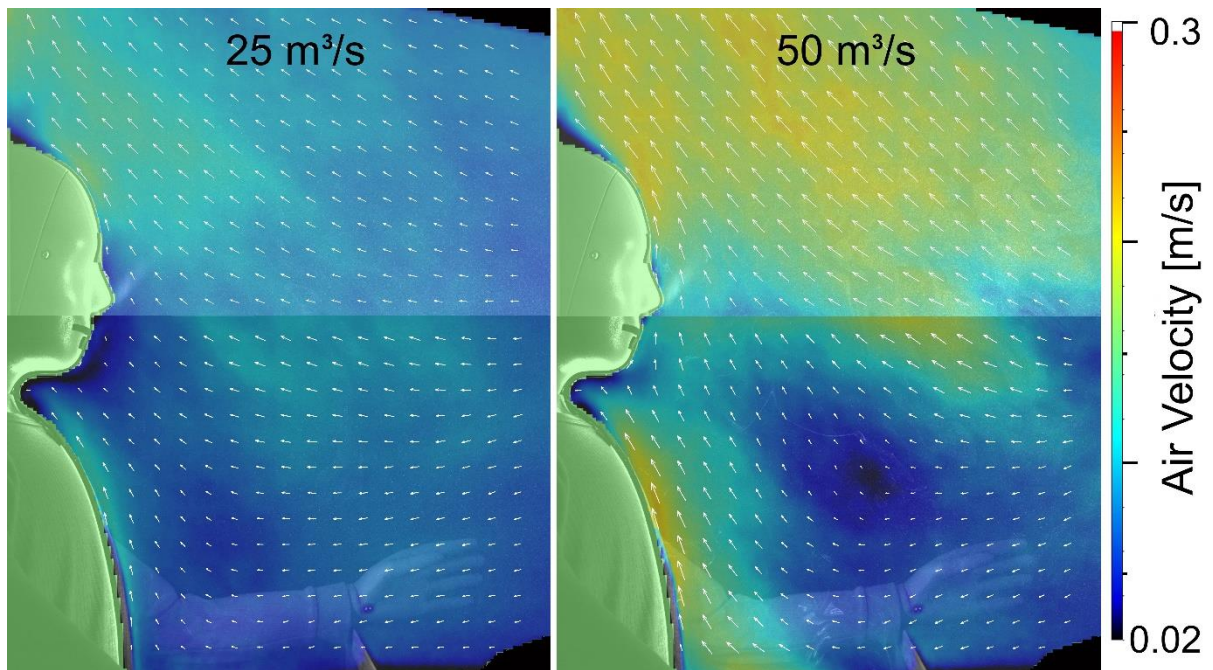
Izotermní režim v zásadě odpovídá návrhovému stavu. V obou měřeních se proudy potkávají a skládají u hrany stolu a poté je jednotný proud distribuován k dýchací zóně. Jak už bylo demonstrováno dříve, u menšího z přiváděných objemů vzduchu je efektivita distribuce snížena interakcí s konvekčními vrstvami, ovšem jeví se stále v efektivní rovině. V druhém případě je zřejmé, že velká část čerstvého vzduchu skutečně působí v dýchací zóně. V obou uvedených případech rychlost vzduchu nepřekračuje limitní hodnotu pro pocit průvanu a zůstává ve vhodném rozmezí 0,1-0,2 m/s. Vzhledem k tomu, že rychlost obou proudů se setkává až uprostřed stolu, i obvyklé pracovní zóny rukou jsou zde uchráněny vyšších rychlostí vzduchu, které se sice v případě vyššího objemu přiváděného vzduchu přibližují diskomfortním hodnotám, ovšem lze očekávat, že uživatel si případně nastaví hodnotu někde mezi těmito dvěma stavy a přizpůsobí proudění vzduchu své vlastní potřebě.



Obr. 96: Obráz proudění z obou vyústek v izotermním režimu pro 25 a 50 m³/h [87].

Režim ohřevu

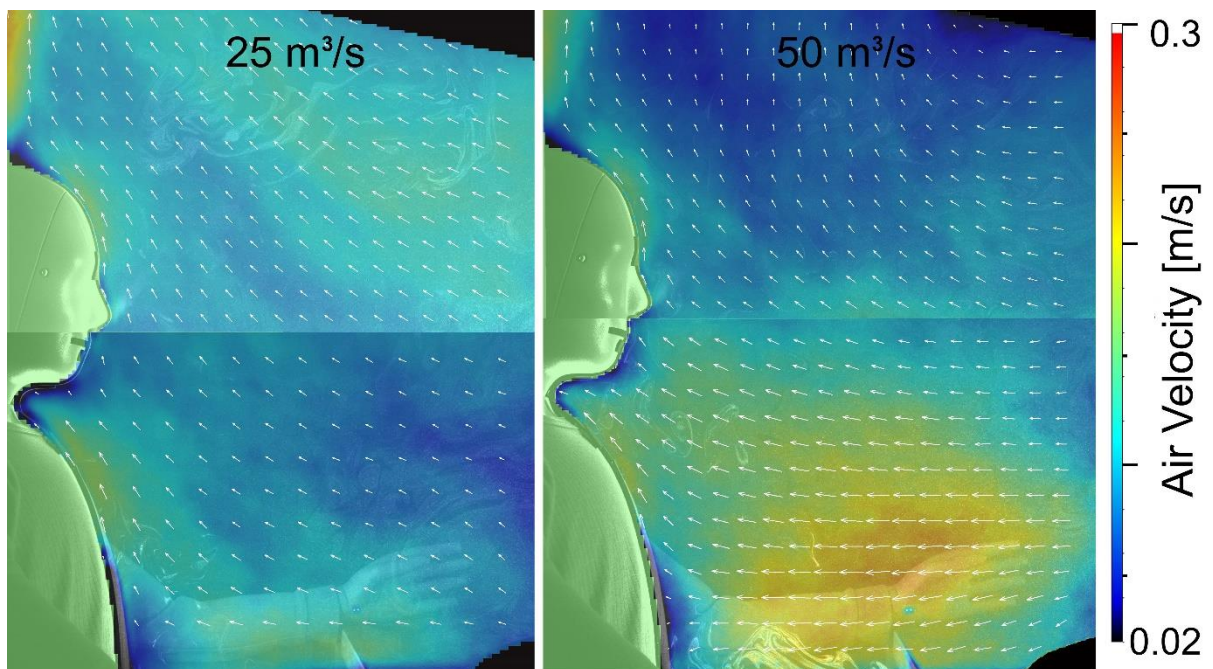
V režimu ohřevu byl použit přiváděný vzduch o teplotě 28 °C, tedy o 4 K vyšší než vzduch v místnosti. Na Obr. 97 lze vidět výraznou stoupavou tendenci teplého vzduchu, která se zdaleka nevyvíjí tak pozitivně, jako v předchozím měření. V obou případech je proud vzduchu generován příliš vysoko a namísto dýchací zóny zasahuje primárně obličej a oči, což lze označit spíše za jev negativní. Zde je rychlost proudění až příliš vysoká, okolo 0,22 a 0,25 m/s, což by mohlo působit pocit průvanu. Tento stav je daný hlavně poměrně dlouhou vzdáleností mezi vyústkou a uživatelem, nižší ústovou rychlostí vzduchu na vyústce a primárně horizontálním směřováním proudu v izotermním režimu.



Obr. 97: Obráz proudění z obou vyústek v režimu ohřevu vzduchu pro 25 a 50 m³/h [87].

Režim chlazení

Oproti předchozímu stavu je v režimu chlazení vzduch přirozeně směřován dolů a zasahuje uživatele v oblasti hrudníku. Změna výšky oproti izotermnímu stavu není tak výrazná, protože dalšímu klesání zabraňuje deska stolu. Ovšem je patrné, že omezením klesání proudu vzduchu je zvýšena rychlost v místě, kde se proudy setkávají, a to až na 0,25 m/s při vyšším objemu přiváděného vzduchu. Spolu s tím, že je přiváděn vzduch chladnější, pak tato situace způsobuje chladný diskomfort převážně v zóně rukou.



Obr. 98: Obráz proudění z obou vyústek v režimu chlazení pro 25 a 50 m³/h [87].

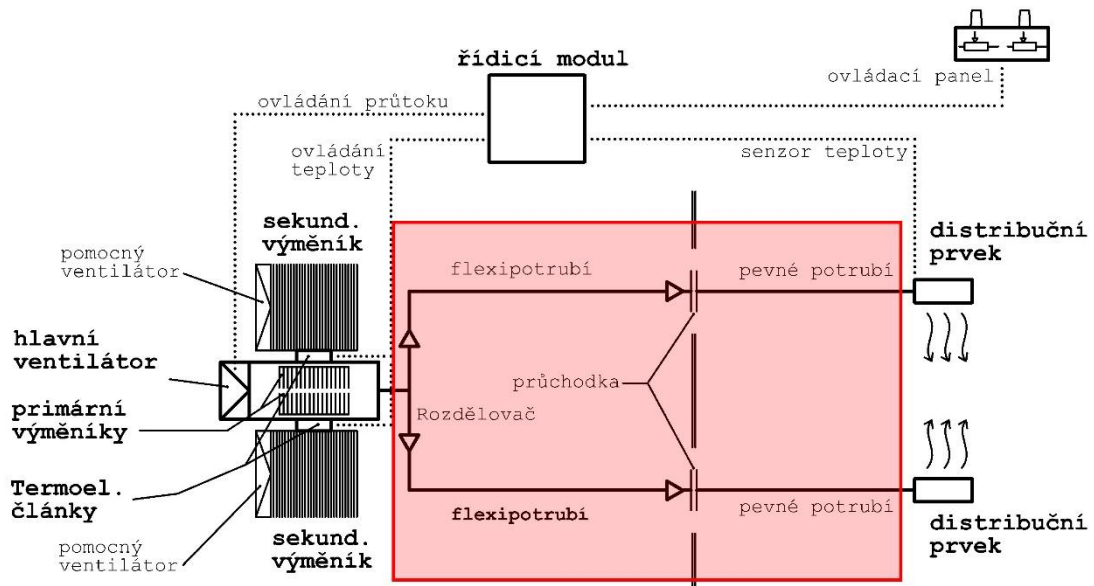
Lze však říci, že při nižším průtoku vzduchu je efektivita personalizovaného větrání vyšší než u izotermního proudění, protože chladný vzduch výrazně snižuje rychlost v konvekčních vrstvách a čerstvý vzduch se tak snadněji dostane do dýchací zóny.

6.6.2.4 Diskuze návrhu vyústek

Měření prokázala, že při izotermním proudění vyústky fungují očekávaným vhodným způsobem. Bohužel při úpravě teploty mají vztlakové síly podstatně větší dopad, než bylo předpokládáno a rychlost proudění není dostatečná, aby jejich působení vyrovnala a nasměrovala vzduch do zamýšleného prostoru. Největší problém lze vidět v režimu vytápění a menších rychlostech, kdy proud vzduchu zcela uživatele mívá. Přestože při chlazení pokles vzduchu distribuci vzduchu spíše zlepšuje, nízká poloha proudění nad deskou stolu může mít výrazně negativní vliv na tepelný komfort v zóně rukou.

V rámci projektu MKJ-1 bohužel nebylo v dalších kapacitách vyústky dále upravit. Optimalizace tak nastala až pro navazující projekty, kde byly vyústky upraveny tak, aby proud vzduchu byl co nejméně závislý na teplotě a objemu přiváděného vzduchu. Tohoto záměru se pro jednotku MKJ-2 podařilo dosáhnout a daný tvar vyústky lze snadno aplikovat i pro jednotku MKJ-1.

6.6.3 ROZVODNÁ SÍŤ



Obr. 99: Označení řešené části

Rozvodná síť systému má za úkol propojit jednotku s vyústkami za cenu, pokud možno, co nejnižších tlakových a tepelných ztrát. Dále je možné jí využít k částečnému utlumení akustického tlaku hlavního ventilátoru jednotky.

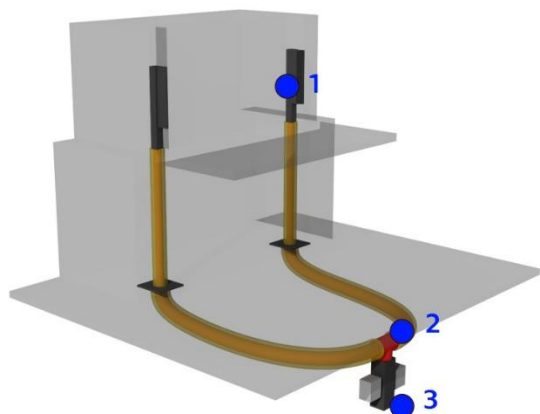
Síť lze rozdělit na dva úseky, kde část pod podlahou je z flexibilního izolovaného potrubí s akusticky pohltivými vlastnostmi (v prototypu potrubí sonoflex) a část nad podlahou z pevného plastového potrubí opatřeného tepelnou izolací.

Tabulka 10: Útlum zvuku rozvodného systému. Zdroj: výrobce

Vložený útlum na 1 m hadice								
Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB(A)	10,5	17,5	23	19	15	11	14	8,5

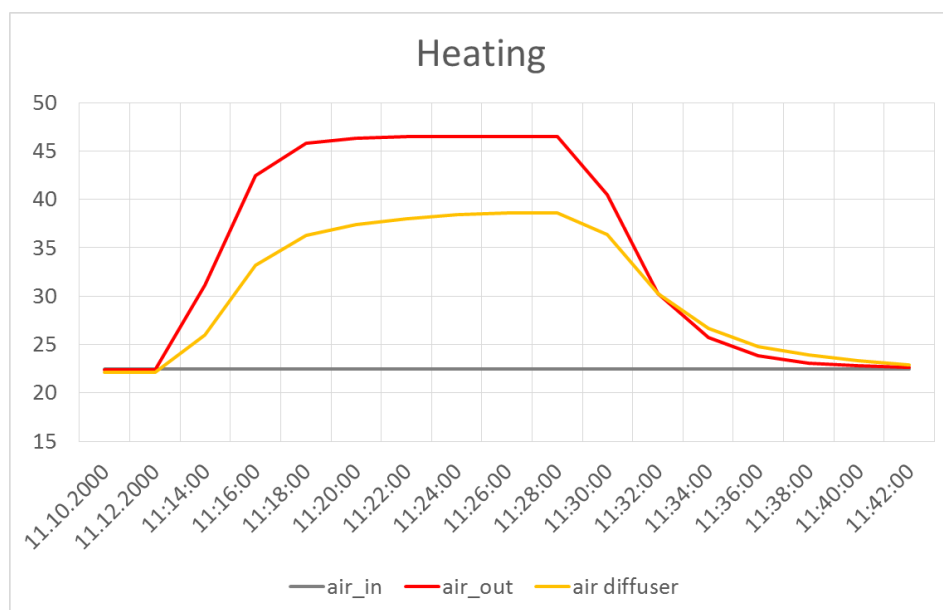
Odhadovaná tlaková ztráta při rozvodném systému s délkou hadice 1,5 m (očekávaná délka vzhledem k poloze jednotek a pracovního místa) je 1,4 Pa pro flexibilní hadici a 3,3 Pa pro pevné potrubí. Dohromady tedy činí odhadovaná tlaková ztráta rozvodné sítě 4,7 Pa.

Tepelné ztráty distribuční sítě byly měřeny při maximálním výkonu pro režim vytápění i chlazení. Měření bylo provedeno na třech místech dataloggerem Comet, měřená místa jsou zobrazena na Obr. 100.

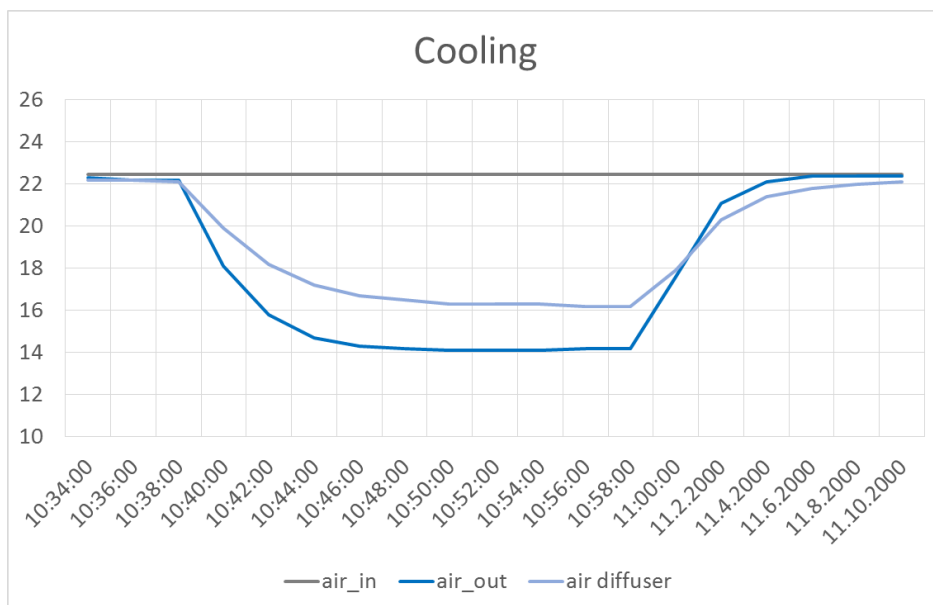


Obr. 100: Rozložení teplotních senzorů (zdroj: autor).

Výsledky měření jsou zobrazeny na Obr. 101 a Obr. 102. V obou případech je podstatný vliv akumulace potrubí reagující na teploty. V případě extrémně vysokých (mimo optimální rozsah) i nízkých teplot je tepelná ztráta mezi 23-35 % rozdílu teploty, distribuční soustava tudíž splňuje parametry předpokládané při návrhu jednotky. Dostatečný je i výkon jednotky v obou režimech.



Obr. 101: Měření tepelných ztrát v potrubí v režimu vytápění (zdroj: autor).



Obr. 102: Měření tepelných ztrát v potrubí v režimu chlazení (zdroj: autor).

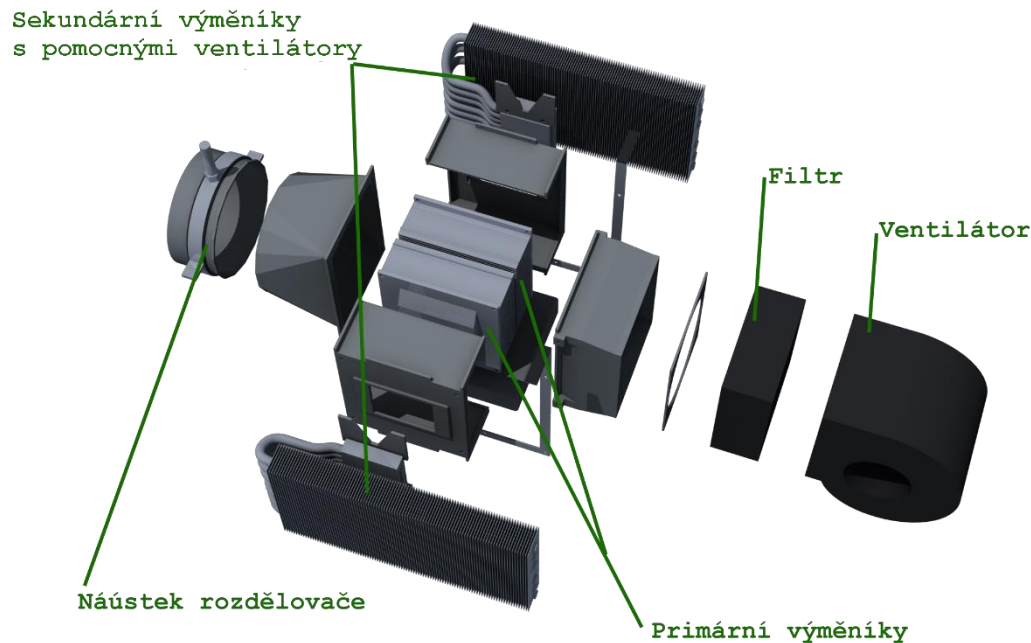
6.7 ZÁVĚREČNÁ PODOBA SYSTÉMU

Jednotka MKJ-1 prošla během fáze 1 a 2 stage-gate metody výraznými optimalizačními změnami. V této kapitole se tedy dostáváme do fáze 3, úpravy pro realizaci. Je zde popsán výsledný stav a změřené jednotlivé výkonové parametry. Byl také změřen vliv na celkový tepelný komfort na pracovišti.



Obr. 103: Kompletně smontovaný systém MKJ-1 (mezi jednotkou a odbočkou je vložený měřící kus) (zdroj: autor).

6.7.1 TĚLO JEDNOTKY



Obr. 104: Popis finální verze těla jednotky (zdroj: autor).

Tělo mikro klimatizační jednotky je vyrobeno z plastových dílů, na které jsou osazeny primární a sekundární výměníky. Plastové díly jsou z termoplastů odolávajících minimálně 96 °C a je možné je vyrobit pomocí 3D tisku, případně lisováním. Mezi výměníky jsou umístěny komerčně vyráběné termoelektrické články využívané k úpravě teploty. Na vstupní části jednotky je umístěn radiální ventilátor s volným nasáváním z podlahového meziprostoru. Variabilně je možné za ventilátor umístit filtrovací díl. Na výstupu z jednotky je spojka umožňující napojení potrubí rozvodné sítě.

Teplo z primární strany termoelektrického článku je přes primární (vnitřní) výměník odváděno do upravovaného vzduchu, který je dále distribuován do rozvodné sítě. Teplo ze sekundární strany článku je skrze sekundární výměníky mařeno do okolního prostoru. Sekundární výměník je navržen tak, aby při běžném provozu pro odvod tepla postačila přirozená konvekce, pro extrémní provozní podmínky, kdy přirozená konvekce nepostačuje, jsou na sekundárních výměnících instalovány pomocné axiální ventilátory spínané teplotním čidlem. Termoelektrické články chladí i ohřívají změnou polarity napájení a výkon je regulován změnou vstupního napětí.

Elektronický řídicí modul je umístěn na skříni jednotky a zajišťuje napájení termoelektrických článků, hlavního ventilátoru a pomocných ventilátorů. Napájení modulu je 24 V stejnosměrného napětí. Modul je ovládán dvěma potenciometry

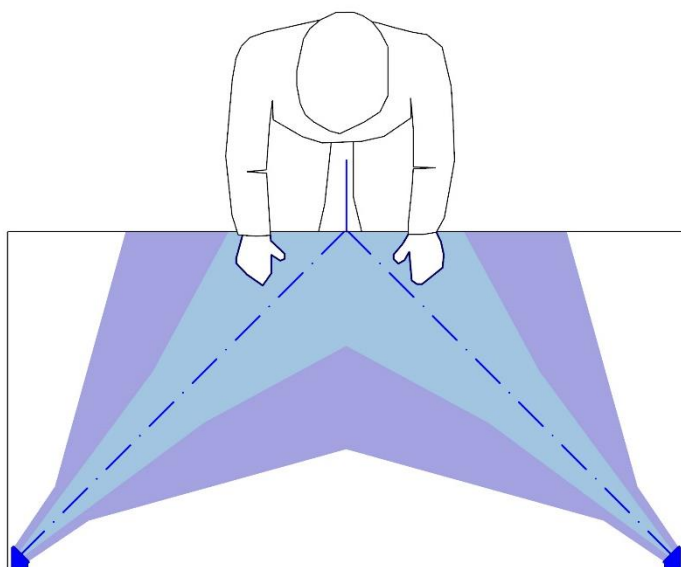
zabudovanými v pracovním místě, variabilně je možné osadit display ukazující teplotu přiváděného vzduchu. Senzor teploty přiváděného vzduchu je umístěn ve vyústce. Pro řízení pomocného ventilátoru je využíváno vratného termostatu spínaného při překročení 45 °C. Termostaty jsou umístěny na vnějších výměnících v blízkosti termoelektrického článku.

6.7.2 ROZVODNÁ SÍŤ

Rozvodná síť se skládá z flexibilního a pevného potrubí. Flexibilní potrubí je napojeno na jednotku přes rozdělovač a umožňuje variabilní umístění jednotky vůči pracovišti. Potrubí je tepelně izolováno a má zvukově tlumící vlastnosti, jedná se o běžně používaný komerční výrobek. Flexibilní potrubí je ukončeno průchodkou konstrukcí, na kterou navazuje pevný díl potrubí připevněný k nábytku. Pevné potrubí je tepelně izolované a ukončené krátkým flexibilním dílem umožňujícím přesnou rektifikaci a napojení na distribuční prvky.

6.7.3 DISTRIBUČNÍ PRVKY

Distribuční prvky jsou navrženy pro zajištění optimálního obrazu proudění v pracovní oblasti. Jsou provedeny z plastu a využívají možnosti 3D tisku. Vyústky se nacházejí v obou vzdálenějších rozích pracovního místa a jsou směřovány do středu k uživateli (Obr. 105). Vyústky využívají systém lamel k optimalizaci a rozptýlení proudu vzduchu.

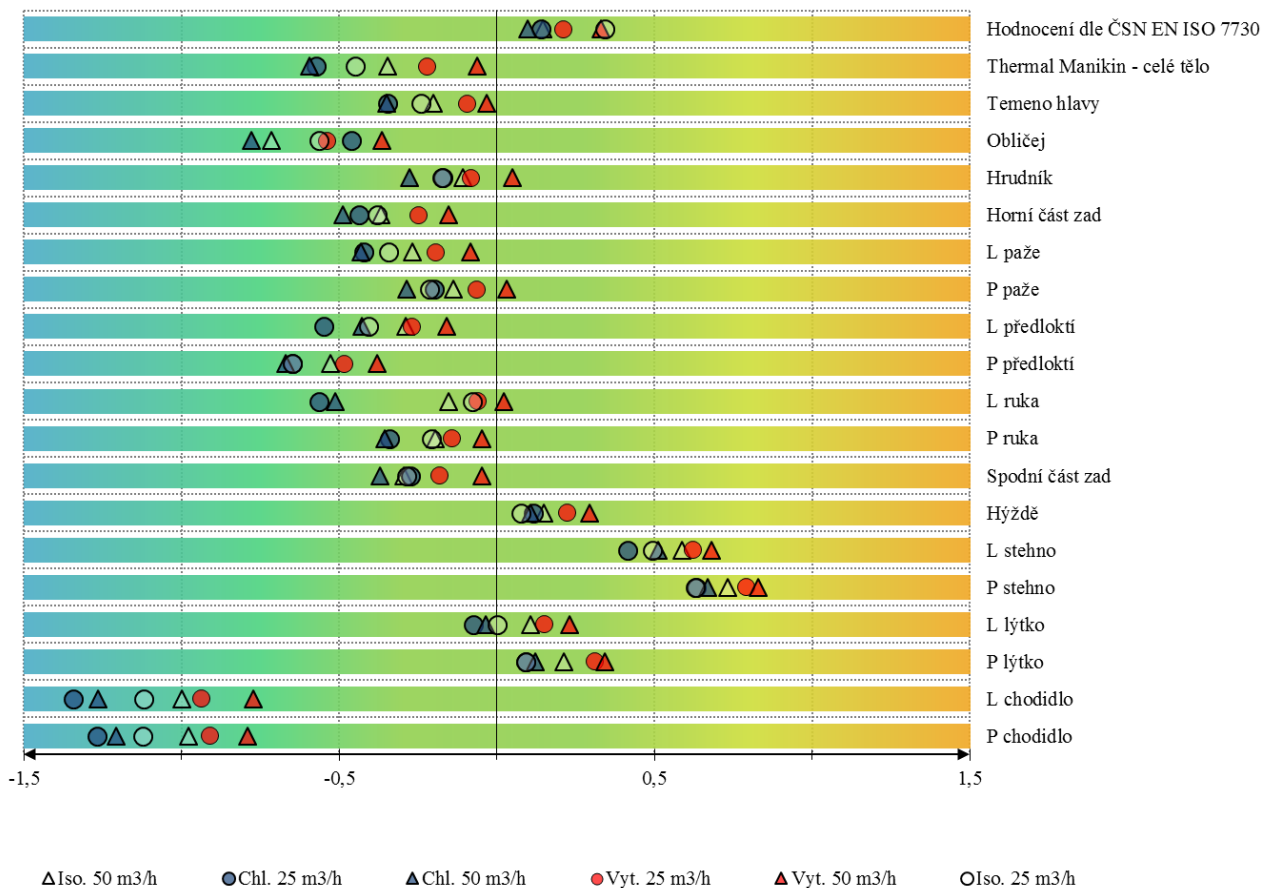


Obr. 105: Umístění vyústek a směřování proudu vzduchu (zdroj: autor).

6.7.1 VLIV NA TEPELNÝ KOMFORT

Vliv na tepelný komfort byl měřen pomocí termálního manekýna (viz kap. 4.1.2). Pro měření tepelného komfortu bylo použito šest měřených stavů, shodných s měřením v kapitole 6.6.2.3, tedy průtoky vzduchu 25 a 50 m³/h a stav izotermní (teplota přiváděného vzduchu shodná s teplotou interiéru), stav ohřevu (teplota přiváděného vzduchu o 4 K vyšší než teplota interiéru) a stav chlazení (teplota přiváděného vzduchu o 4 K nižší než teplota interiéru).

Pro posouzení vlivu na tepelný komfort pro jednotlivé měřené zóny termálního manekýna byla použita metodika [10] používající pro zobrazení hodnoty TMS_z (thermal manikin zone sensation), konkrétně TMS_z (thermal manikin zone sensation) odpovídající běžné používanému PMV indexu pro danou měřenou zónu na klasické škále -3 (velmi chladno) až 3 (velmi teplo). Zobrazení na Obr. 106 z této škály využívá na horizontální ose pro přehlednost pouze hodnoty mezi -1,5 a 1,5. Vertikální osu pak zaujímají jednotlivé pojmenované zóny.



Obr. 106: Dopad na tepelný komfort v jednotlivých měřených zónách při izotermním proudění (bílá), chlazení (modrá) a dohřevu (červená), pro 25 m³/h (kruh) a 50 m³/h (trojúhelník) [87].

Ze zobrazení je patrné, že různé měřené zóny jsou různě citlivé na nastavení osobního větrání a změny průtoku (tedy vektorového pole proudění) a teploty. Obecně lze říci, že u vyšších hodnot proudění je dopad na tepelný komfort zásadnější, ale není tomu tak ve všech případech, zvláště u chlazení, kde teplota vzduchu má zásadní dopad na směry proudění, a tedy působení na jednotlivé zóny.

Lze specifikovat místa, která jsou výrazněji ovlivněna rychlostí proudění (například obličej) a místa, kde je výraznější rozdíl v nastavené teplotě (ruce). Například na obličeji měří manekýn pocit vyššího chladu v režimu ohřevu než v režimu chladu, protože v režimu ohřevu hlavní část proudu zasahuje oblast obličeje, zatímco v režimu chlazení se dostává podstatně níže, na úroveň hrudníku.

V módu chlazení je pak patrné negativní působení na ruce, a to specificky podle polohy vůči proudu vzduchu, kde levá ruka je zasažena podstatně více než pravá, což poukazuje i na fakt, že vliv na celkové působení personalizovaného větrání má jednoznačně i posazení uživatele vůči stolu. V tomto pohledu by bylo potřeba provést další měření ke zjištění celkového dopadu.

Zajímavou ukázkou je pak chlazení spodní části těla, kde má paradoxně větší ochlazující potenciál režim chlazení o nižším průtoku. Vysvětlením jsou nižší rychlosti u hrany stolu, které umožní chladnému vzduchu padnout pod desku stolu a více působit na spodní část těla.

Celkově je patrné, že změny pocitu chladu a tepla nejsou nikterak výrazné a pohybují se v rozmezí 0,5 indexového bodu pro celé tělo. Je to dáno převážně tím, že jednotka personalizovaného větrání si neklade za úkol zcela změnit vnitřní prostředí na daném místě, ale přizpůsobit ho osobním potřebám v dlouhodobém horizontu užívání. Zde by výrazné změny mohly mít spíše negativní zdravotní dopady, srovnatelné s působením klimatizace v osobních automobilech.

6.7.2 TECHNICKÁ SPECIFIKACE

Tabulka 11: Specifikace jednotlivých parametrů systému MKJ-1

Vzduchový výkon	max. 50 m ³ /h
Napájení	24 V
Režim chlazení	
Elektrický příkon (celkem)	max. 242 W
<i>Ventilátor</i>	<i>max. 12 W</i>
<i>Termoelektrické články</i>	<i>max. 230 W</i>
Tepelný výkon (celkem)	max. 242 W
<i>Do prostoru zdvojené podlahy</i>	<i>max. 342 W</i>
<i>Do upravovaného vzduchu</i>	<i>max. -100 W</i>
Režim vytápění	
Elektrický příkon (celkem)	max. 72 W
<i>Ventilátor</i>	<i>max. 12 W</i>
<i>Termoelektrické články</i>	<i>max. 60 W</i>
Tepelný výkon (celkem)	max. 72 W
<i>Do prostoru zdvojené podlahy</i>	<i>max. - 28 W</i>
<i>Do upravovaného vzduchu</i>	<i>max. 100 W</i>
Rozměry a umístění	
<i>Výška jednotky</i>	303 mm
<i>Šířka jednotky</i>	412 mm
<i>Hloubka jednotky</i>	100 mm
<i>Místo montáže</i>	Ve zdvojené podlaze
<i>Max. půdorysná vzdálenost jednotky od pracovního místa</i>	1,5 m
<i>Prostupy v podlaze</i>	2x Ø50
<i>Propojení s jednotkou</i>	Sonoflex 82

6.8 ZHODNOCENÍ JEDNOTKY

V rámci poslední fáze stage-gate metody bylo potřeba zhodnotit, jestli vývoj skutečně dospěl k řešení a jak následně ochránit získané duševní vlastnictví.

6.8.1 SPLNĚNÍ ZADÁNÍ

V rámci práce byl vytvořen funkční prototyp jednotky personalizovaného větrání, který řeší diskomfort zjištěný na daném pracovišti. Jednotka zvyšuje množství čerstvého vzduchu v dýchací zóně uživatelů, zvyšuje proudění vzduchu a dokáže doupravit tepelný komfort uživatelů, teplota i rychlost proudění je uživatelsky nastavitelná. Všechny jmenované výhody byly změřeny a prokázány v předchozích kapitolách. Jednotka tak prokazatelně zvyšuje kvalitu vnitřního prostředí.

Prototyp jednotky je implementovatelný do daného návrhu pracovního stolu dispečerů letového provozu a je sestrojitelný pomocí 3D tisku, případně vstřikovacím lisem a komerčně dostupnými prvky.

Zadání tedy bylo splněno.

6.8.2 ORIGINALITA ŘEŠENÍ

Originalita řešení spočívá v kombinaci jednotlivých známých principů (termoelektrické články, personalizované větrání, individuální řízení), ze kterých je vytvořen komplexní systém pro zvýšení kvality vnitřního prostředí na administrativním pracovišti. Upravený vzduch přiváděný do místnosti je na základě individuálního požadavku uživatele upravován teplotně pomocí termoelektrického článku a následně je distribuován v míře regulované samotným uživatelem do pracovní zóny, což podstatně zvyšuje vnímanou kvalitu vnitřního prostředí a umožňuje tak vyhovět preferencím jednotlivých uživatelů. Originalita spočívá především v autonomii jednotky, která je závislá pouze na přívodu elektrické energie a ohřev a ochlazování vzduchu je řešeno bez použití teplotnosných kapalin a kompresorového chlazení. Toto řešení přispívá ke snížení energetické náročnosti provozu klimatizace, zvýšení komfortu a bezpečnosti provozu v objektech, kde by únik teplotnosných kapalin z tradičních systémů vytápění a chlazení mohl způsobit škody na majetku a zařízení. Tím, že není použito chladiv, přispívá řešení výrazně k snížení produkce skleníkových plynů a GWP.

6.8.3 PRÁVNÍ OCHRANA

Ohledně jednotky MKJ-1 byla podána žádost o užitný vzor. Tato žádost byla v tuto chvíli dočasně pozastavena kvůli změnám v návrhu pracovního stolu pro letové dispečery, které se staly neslučitelné s instalací tohoto zařízení. K těmto změnám došlo až po ukončení projektu, proto je nebylo možné zahrnout do výsledné podoby jednotky.

7 VÝVOJ STOLNÍ JEDNOTKY PERSONALIZOVANÉHO VĚTRÁNÍ (MKJ-2)

Návrh na stolní jednotku MKJ-2 vznikl jako odpověď na kancelářské prostory s nevhodným vnitřním prostředím, které byly řešeny v rámci analýzy vnitřního prostředí v jiném projektu. Hlavní specifikací této jednotky je její nezávislost na distribuční síti čerstvého vzduchu, a tedy možnost její aplikace bez zásadního zásahu do stavby. Jednotka by měla zvyšovat kvalitu vnitřního prostředí pomocí zvýšení rychlosti proudění v osobní zóně a dohřevu či dochlazení cirkulujícího vzduchu.

7.1 ZADÁNÍ

Koncept mikro klimatizační jednotky MKJ-2, vyvíjené v rámci této práce, vychází z předpokladu, že většina stížností na kvalitu pracovního prostředí v prostorách s centrální vzduchotechnikou se týká teploty vzduchu a subjektivního vnímání rychlostí vzduchu proudícího kolem osoby. To, co vnímá jeden subjekt jako průvan, je pro druhého příjemným prouděním, ideální teplota pro daný stav je též jednotlivci vnímána různě. Individuální možnosti nastavit tyto konkrétní parametry na jednotlivých pracovních místech pak lze výrazně ovlivnit kvalitu vnitřního prostředí.

Zadání by se dalo shrnout do těchto hlavních bodů:

- **Aplikovatelnost v běžných kancelářských prostorách bez nutných zásahů do stávajícího konstrukčního či vzduchotechnického systému**
- **Napojení pouze na elektrickou energii.**
- **Možnost ovlivnit obraz proudění na pracovním místě**
- **Možnost individuálně upravit teplotu na pracovním místě**

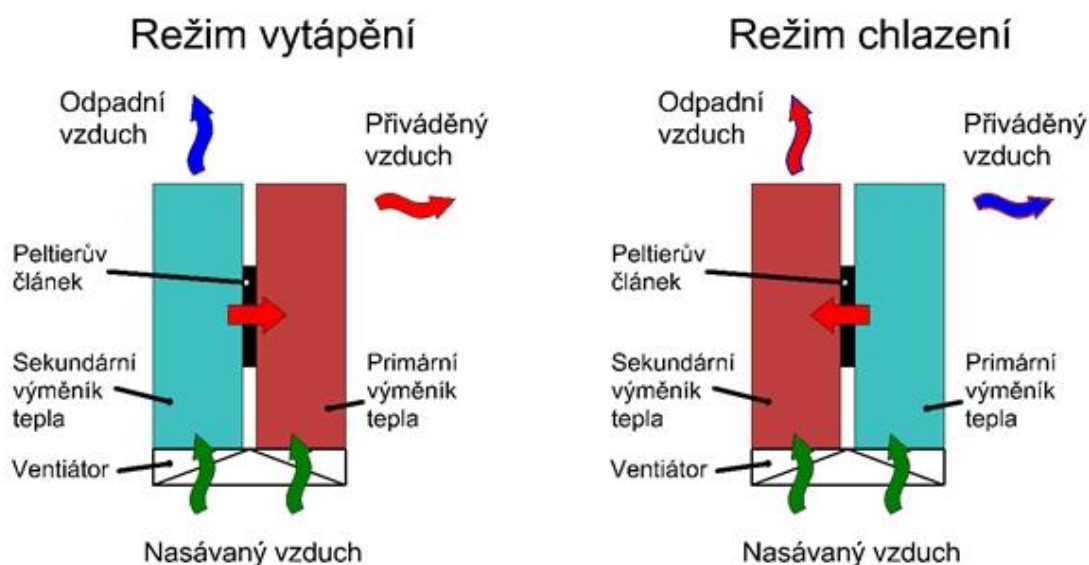
7.2 NÁVRH ŘEŠENÍ

7.2.1 KONCEPT

Účelem této jednotky je zajistit možnost částečné individuální úpravy teploty a proudění vzduchu v oblasti pracovní zóny té části těla pracovníka, která je nad rovinou pracovní desky stolu. Na základě předchozích experimentů byl zvolen požadavek na možnost úpravy teploty přiváděného vzduchu minimálně v rozmezí cca ± 4 K od teploty vzduchu v místnosti. Teplota vzduchu je upravována termoelektrickými články, rychlost a dosah proudu vzduchu regulovatelným ventilátorem a komplexním uspořádáním výustek zajišťujícím využití indukce pro tvorbu optimalizovaného obrazu proudění.

Jednotka je určena pro využití v běžném kancelářském provozu pro pracoviště s počítačem i bez. Přednostně by měla být umístěna na ploše pracovního stolu v dosahu pracovníka tak, aby minimálně zabírala pracovní prostor a výškově by neměla přesahovat hlavu sedícího člověka. Byla navržena s důrazem na stabilitu, estetickou neutralitu a snadnou přemístitelnost.

Předpokládá se, že vzduch v místnosti splňuje požadavky na kvalitu vzduchu, a tudíž není požadavek, aby v jednotce byla kvalita vzduchu dále upravována z hlediska koncentrace CO_2 , prachu a dalších škodlivin.



Obr. 107: Princip funkce MKJ-2 (zdroj: autor).

Celkově se jednotka skládá z těla jednotky, termoelektrických článků s primárním a sekundárním výměníkem, centrálního ventilátoru, ovládání a regulace a napájení.

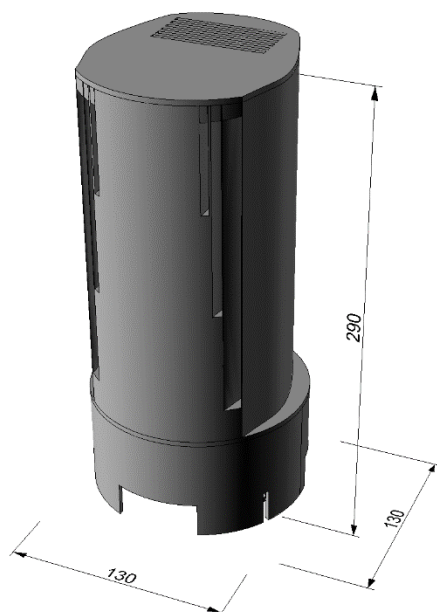
7.2.1.1 Tělo jednotky

je vyrobeno pomocí 3D tisku z černého polymeru ze čtyř dílů (Obr. 108), které po sestavení tvoří kompaktní jednotku (Obr. 109). Jednotka má vyústky ve tvaru třech štěrbin na každé straně, které zasahují od jedné třetiny do maximální délky. Vzduch je pak směřován mírně šikmo dolu, čímž splňuje požadavek na to, aby se vyhnul ve svém počátku zóně rukou, ale zároveň nesměřoval do vrchní části obličeje a zóny očí.

Velká výhoda tohoto uspořádání je také v tom, že různé tlakové ztráty jednotlivých částí zajišťují rovnoměrný a velmi stabilní proud při různých objemech vzduchu a vyšší rychlosti vzduchu ve štěrbině pak stabilitu i při neizotermním proudění.



Obr. 108: Díly těla MKJ-2 vyrobené 3D tiskem (Zdroj: autor)



Obr. 109: Sestavené tělo MKJ-2 (Zdroj: autor)

Výměníky tepla jsou hliníkové tažené žebrované profily o velikosti 150 x 69 x 36 mm, umístěné uvnitř těla jednotky ve vzduchových kanálech a mezi nimi je umístěn termoelektrický článek. Spojení a vzájemný přítlak zajišťují plastové šrouby, oddělení a izolace mezi kanály primárního a sekundárního vzduchu je zajištěna sendvičovou PU deskou o tloušťce 3 mm. Termoelektrický Peltierův článek je o velikosti 50 x 50 x 4 mm a maximálním výkonu 100 W a napájení 12 VDC.

Ve funkčním vzorku bylo použito radiálního ventilátoru o průměru 104 mm na max. napětí 12 VDC. Ventilátor je umístěn v základně jednotky a zajišťuje přívod vzduchu do obou kanálů – primárního i sekundárního vzduchu.

7.2.1.2 Ovládání a regulace

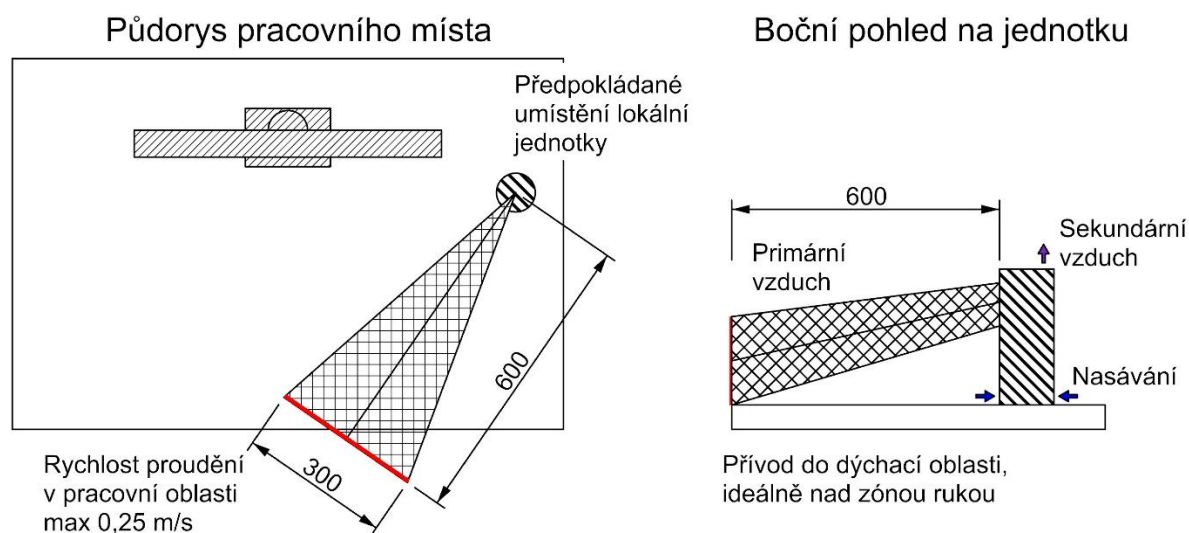
Ovládání a regulaci jednotky zajišťují dva step-down DC/DC napěťové regulátory, jeden pro ovládání výkonu termoelektrického Peltierova článku, jeden na ovládání otáček ventilátoru.

Napájení jednotky 12 VDC 10 A je ve funkčním vzorku zajištěno laboratorním zdrojem.

Všechny prvky jsou komerčně dostupné na trhu.

7.3 OPTIMALIZACE

Hlavním prvkem pro optimalizaci byla u jednotky MKJ-2 vyústka a výsledný obraz vzduchu. Na základě analýz a měření provedených při předchozím měření (jednotka MKJ-1) bylo specifikováno, že obraz proudění musí být co nejjednodušší při různých nastavených průtocích vzduchu a různých nastaveních teploty vzduchu. Hlavní koncept obrazu proudění lze vidět na Obr. 110.

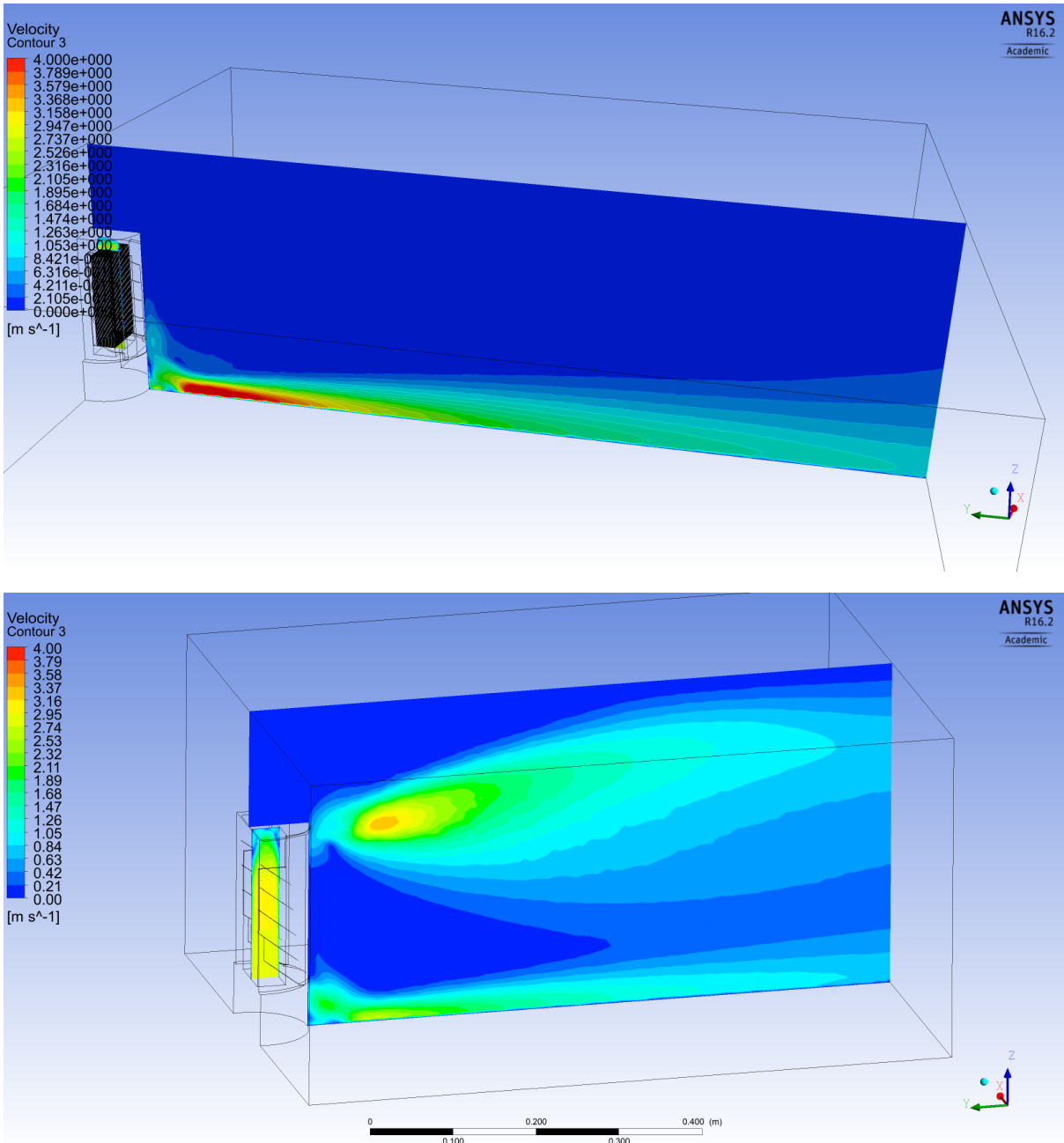


Obr. 110: Schéma proudění vzduchu, půdorysné uspořádání na pracovním místě a boční pohled (zdroj: autor).

7.3.1 VÝVOJOVÉ FÁZE VYÚSTKY

Na následujících obrázcích bude demonstrován postupný vývoj vyústky od nezdařených pokusů po finální fázi. Pro vývoj vyústek bylo využito 3D modelu a CFD simulace v programu Ansys Fluent. Autorem modelů je autor práce, autorem CFD simulací je Ing. Martin Kny, PhD.

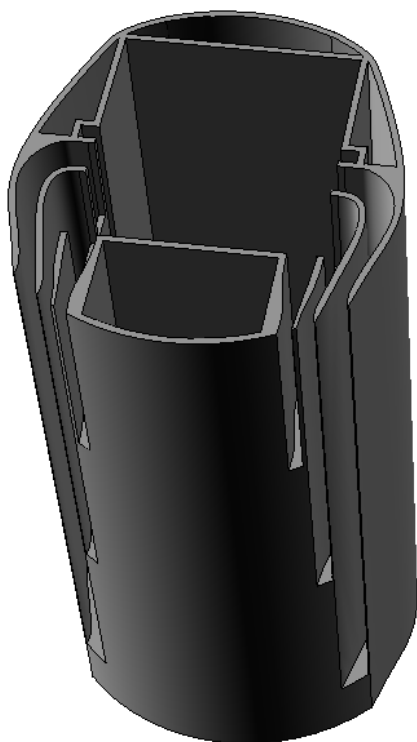
Autoři se potýkali zejména s tendencí proudu vzduchu směřovat příliš nízko či příliš vysoko nad deskou stolu, šíří a stabilitou proudu vzduchu.



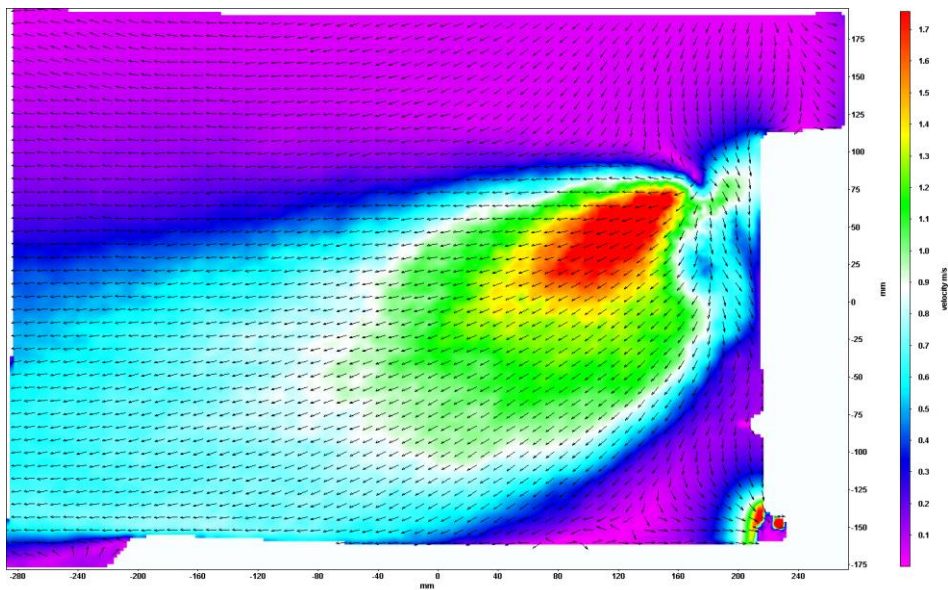
Obr. 111: CFD simulace dosud neoptimalizovaných polí proudění vzduchu. (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, CFD simulace jednotky).

7.3.2 VÝSLEDNÁ PODOBA VYÚSTKY

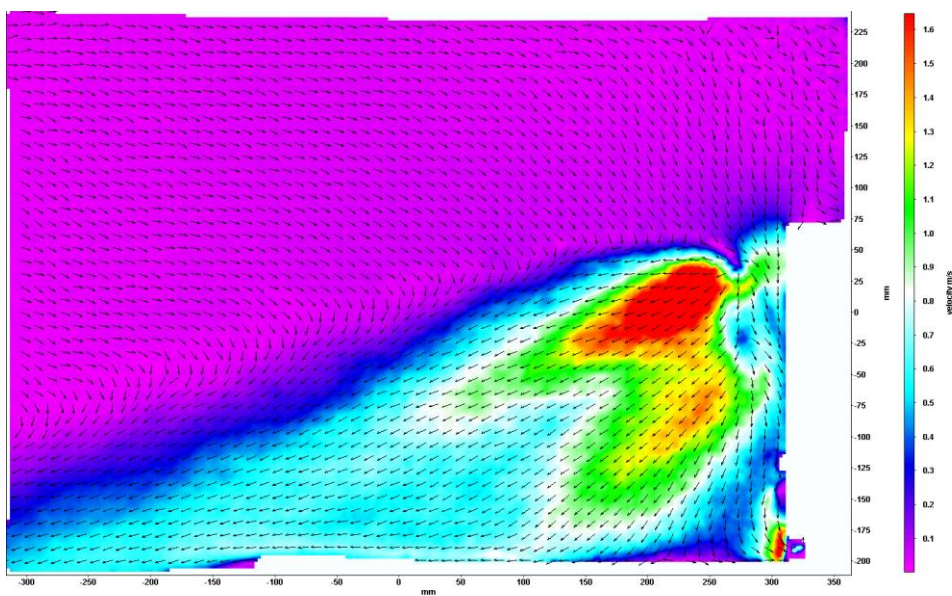
Výsledná podoba vyústky získala vysokou stabilitu při různých teplotách vzduchu i různých průtocích, a to primárně díky specificky uspořádaným šesti štěrbinám s rozdílnou tlakovou ztrátou, které se aktivují při různých průtocích. Stabilitě při rozdílných teplotách pomáhá vysoká ústňová rychlost i při malých průtocích. Pomocí indukce a mísení s okolním vzduchem je pak dosaženo toho, že na místě uživatele je adekvátní rychlost vzduchu (0,25 m/s při maximálním výkonu jednotky). Na Obr. 112 je finální podoba tvaru vyústky, která zajišťuje proudění vzduchu. Na Obr. 113 až Obr. 116 lze vidět obraz proudění při jednotlivých stavech změřený pomocí PIV anemometrie.



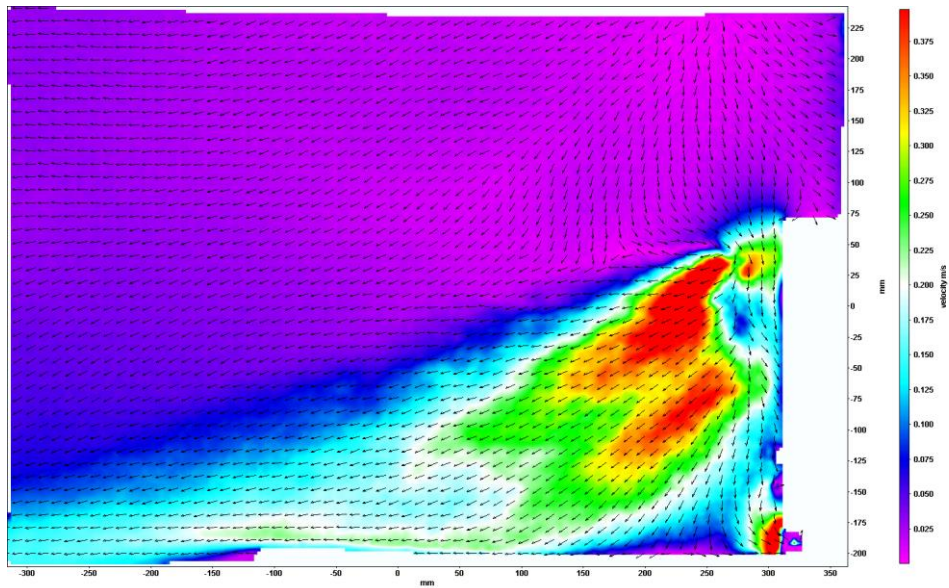
Obr. 112: Model finální podoby vyústek (Zdroj: autor).



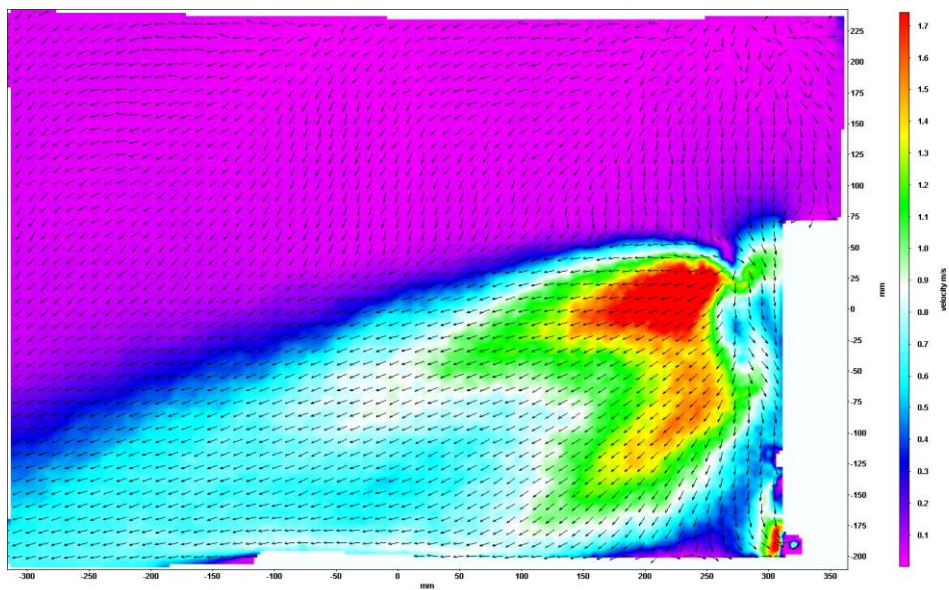
Obr. 113: Obráz proudění při režimu ohřevu +4 K oproti okolnímu vzduchu (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).



Obr. 114: Obráz proudění při režimu chlazení -4 K oproti okolnímu vzduchu (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).



Obr. 115: Obráz proudění při průtoku vzduchu 30 % (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).



Obr. 116: Obráz proudění při průtoku vzduchu 100 % (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).

7.4 MĚŘENÉ PARAMETRY JEDNOTKY

7.4.1 VÝKONOVÉ PARAMETRY

Výsledný funkční vzorek byl proměřen z hlediska výkonových parametrů v obou režimech – ohřev a chlazení. Výsledky pro různé nastavení výkonu (2–9 A) jsou uvedeny v tabulkách níže (Tabulka 12, Tabulka 13).

Tabulka 12: Výsledky měření funkčního vzorku v režimu chlazení

Chlazení								
proud (A)	2	3	4	5	6	7	8	9
teplota interiéru (°C)	21	21,1	21	21	21	21	21	21
výstup teplý (°C)	25	27,4	29,6	31,8	34,2	36,5	38,8	41,3
výstup studený (°C)	20,7	20,3	19,9	19,5	18,9	18,1	17,3	16,9
průtok celkový (m ³ /hod)	30			25				

Tabulka 13: Výsledky měření funkčního vzorku v režimu ohřevu

Vytápění					
proud (A)	4	5	6	7	8
teplota interiéru (°C)	22,8	22,9	22,8	22,7	22,8
výstup teplý (°C)	39,3	43,5	49	53,4	57,1
výstup studený (°C)	21,4	20,9	19,9	18,9	17,9
průtok celkový (m ³ /hod)	30			25	

7.4.2 VÝSLEDNÁ PODOBA JEDNOTKY

Na Obr. 117 je zobrazen finální sestavený stav funkční jednotky při testování. V popředí jsou patrné potenciometry pro ovládání step-down regulátorů ventilátoru a Peltiérova článku.



Obr. 117: Finální podoba funkčního vzorku (Zdroj: archiv autora).

7.5 ZHODNOCENÍ JEDNOTKY

Výsledná jednotka splňuje požadovaná kritéria. Pomocí jednotky je možné zvýšit kvalitu vnitřního prostředí pro jednotlivce v prostorách s centrální úpravou vzduchu. Jednotka je použitelná jak v novostavbách, tak ve stávajících provozech bez zásadních stavebních úprav, pořizovací náklady na jednotku jsou srovnatelné s lepšími stolními ventilátory. Pro ohřev i chlazení je využito bezchladvového systému Peltierových článků, které mají maximálně tichý provoz a dlouhou životnost. Jednotka umožňuje nastavit individuálně teplotu a množství přiváděného vzduchu, a to v rozmezí ± 4 K (při teplotě interiéru 21 °C a maximálním průtoku) a rychlostí v dýchací zóně od 0,1 do 0,3 m/s a zajistit tvorbu prostředí podle individuálních požadavků uživatele. Optimalizovaný obraz proudění s využitím indukce nezasahuje zónu očí a nezpůsobuje tak jejich vysychání a podráždění, negativně neovlivňuje ani zónu rukou při práci.

V současnosti není běžně na trhu žádné zařízení, které by bylo navrženo pro lokální osobní úpravu teploty a proudění vzduchu na pracovišti.

Jednotka MKJ-2 byla zapsána jako funkční vzorek:

- Kabele, K.; Adamovský, D.; Mazanec, V.; Kny, M.; Mikeš, V.; Mareda, L.; Hrdlička, T., „Mikro klimatizační jednotka MKJ-2“, [Functional Sample] 2019

7.6 PRACOVNÍ TÝM

Na projektu pracoval tento tým lidí:

Prof. Ing. Karel Kabele, CSc. – Odborné vedení.

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D. – Vedoucí projektu za Univerzitní Centrum Energeticky Efektivních budov.

Ing. Martin Kny, Ph.D. – CFD simulace, měření.

Ing. Arch. Vojtěch Mazanec – Návrh konstrukce, výroba a měření prototypu.

8 NÁVAZNOST NA PROJEKTY

8.1 MKJ-1

Jednotka a jednotlivé části výzkumu byly přímo napojeny na tyto projekty:

- Smluvní výzkum: Návrh personálního větrání pracoviště řídicího letového provozu + funkční vzorek zařízení, Smlouva o dílo č. 224/2015/IS/186
- Grant studentské grantové soutěže ČVUT: SGS16/016/OHK1/1T/11
- Grant studentské grantové soutěže ČVUT: SGS17/015/OHK1/1T/11
- Grant studentské grantové soutěže ČVUT: SGS18/014/OHK1/1T/11

8.2 MKJ-2

- OP PIK: Vzduchotechnická jednotka s termoelektrickým chlazením a ohřevem CZ.01.1.02/0.0/0.0/17_107/0012468

9 NAVAZUJÍCÍ PROJEKTY A POKRAČOVÁNÍ VÝZKUMU

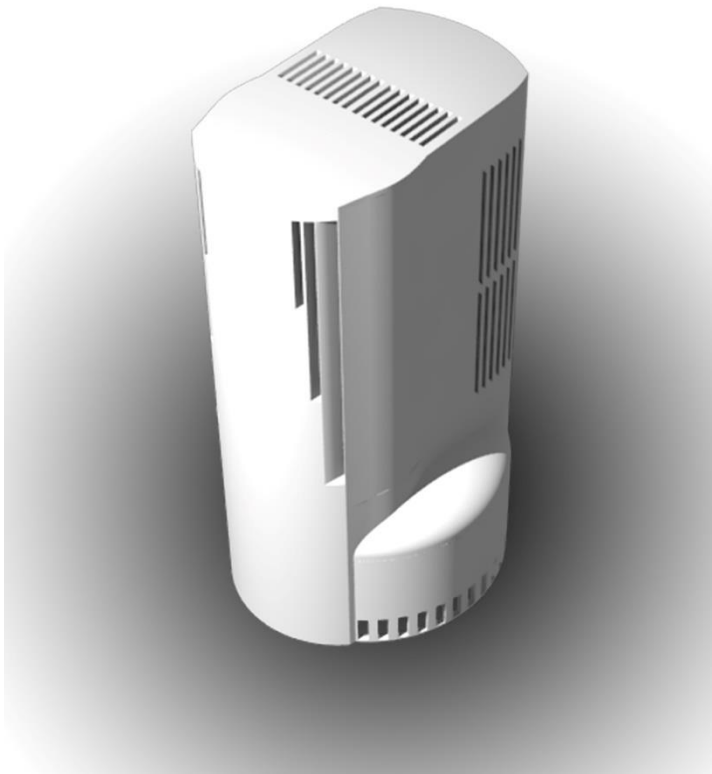
9.1 UNIVERZÁLNÍ JEDNOTKA PERSONALIZOVANÉHO VĚTRÁNÍ (MKJ-2.1)

Tato jednotka konstrukčně vychází z jednotky MKJ-2 zmíněné v kapitole 7 této práce. Hlavními rozdíly je univerzálnější použití a možnost provozovat jednotku jak v cirkulačním režimu, tak v režimu napojení na lokální přívod čerstvého vzduchu. Konkrétní modifikace oproti verzi MKJ-2 jsou tyto:

- **Oddělné komory primárního (přiváděného) a sekundárního (chladícího) vzduchu, sekundární vzduch má vlastní systém ventilátorů, který využívá nižších tlakových ztrát tohoto okruhu;**
- **možnost napojit primární vzduch na lokální přívod čerstvého vzduchu a tím výrazně zvýšit kvalitu vzduchu a vnitřního prostředí;**
- **Komplexnější sensorika, řízení jednotky na základě teplot, komunikace dálková komunikace jednotek s centrálním komunikačním jádrem v místnosti, pro detekci stavu vzduchu a úpravu přivádění vzduchu centrálním systémem (např. komunikace se smart boxy, regulace přívodního vzduchu podle lokální kvality vzduchu)**
- **Vysoká potenciální úspora na větrání, při napojení na čerstvý vzduch je možné přivádět výrazně nižší množství vzduchu do místnosti, regulace na základě obsazenosti prostoru i kvality vzduchu.**

Základní prototyp (zatím bez komplexní elektroniky) byl sestaven z grantu studentské grantové soutěže ČVUT číslo SGS19/004/OHK1/1T/11. Další vývoj prototypu se plánuje.

Výsledný model je vidět na Obr. 118.



Obr. 118: Model jednotky MKJ-2.1 (Zdroj: autor).

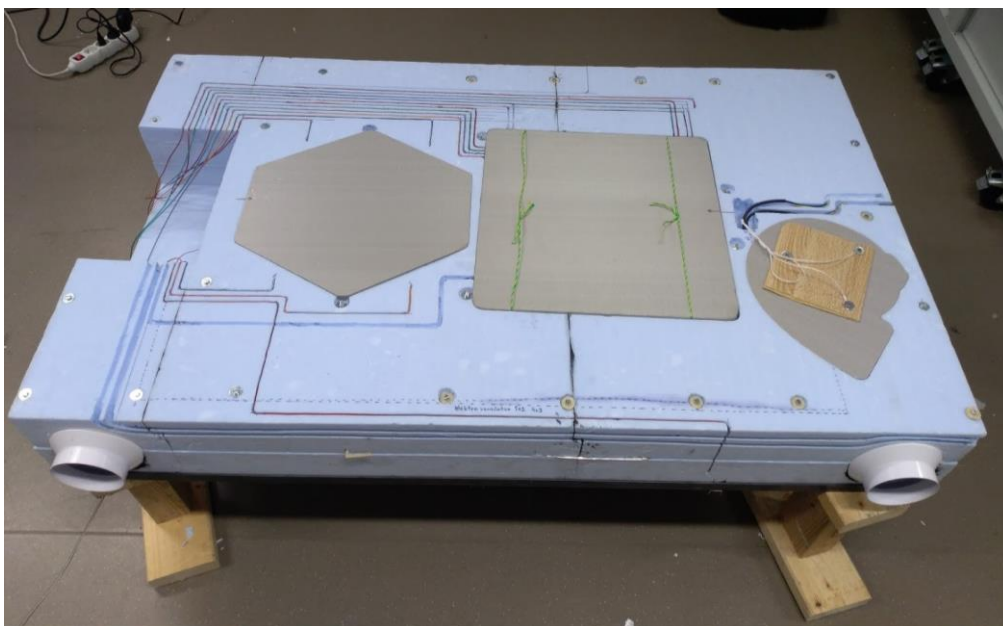
9.2 APLIKACE SYSTÉMU PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ PRO LOKÁLNÍ VĚTRACÍ JEDNOTKY

Na základě předchozích aplikací Peltierových článků byly vytvořeny projekty malých lokálních větracích jednotek s rekuperací vzduchu a termoelektrickým dohřevem. Tyto jednotky byly předpokládány pro podparapetní umístění namísto klasicích otopných těles, nebo jako bytové jednotky umístěné v podhledech sociálního zázemí, upravující vzduch samostatně pro bytovou jednotku.

Na základě tohoto výzkumu pak byla vytvořena série prototypů, několik užitečných vzorů a patentů, týkajících se aplikace Peltierových článků do větracích jednotek a jejich optimalizace. Vzhledem k ochraně duševního vlastnictví jsou níže zobrazeny jen některé vizualizace těchto jednotek.



Obr. 119: Koncept lokální podparapetní modulární větrací jednotky napojené k venkovnímu vzduchu přes fasádu. (Zdroj: autor).



Obr. 120: Prototyp lokální bytové jednotky pro aplikaci do pohledů. (Zdroj: archiv autora).

Související funkční vzorky:

- Adamovský, D.; Mazanec, V.; Kny, M.; Mlejnek, P.; Vodička, A.; Mikeš, V.; Mareda, L.; Linhart, J., „Bytová větrací jednotka s termoelektrickým chlazením a ohřevem“, [Functional Sample] 2020.

Související užité vzory:

- Včelák, J.; Mazanec, V.; Mlejnek, P.; Vodička, A.; Kny, M.; Adamovský, D., „Systém pro větrání objektu obsahující větrací jednotku s možností vytápění a chlazení se zvýšeným odvodem odpadního tepla“, Czech Republic. Utility Model CZ 32415. 2018-12-10.
- Včelák, J.; Mazanec, V.; Mlejnek, P.; Vodička, A.; Kny, M.; Adamovský, D., „Systém pro větrání objektu obsahující větrací jednotku s možností vytápění a chlazení se specifickým uspořádáním pasivního modulu“, Czech Republic. Utility Model CZ 32416. 2018-12-10.

Související patenty:

- Včelák, J.; Mazanec, V.; Mlejnek, P.; Vodička, A.; Kny, M.; Adamovský, D., „Systém pro větrání objektu obsahující alespoň jednu větrací jednotku s možností vytápění a chlazení se zvýšeným odvodem odpadního tepla“, Czech Republic. Patent CZ 308018. 2019-09-11.
- Včelák, J.; Mazanec, V.; Mlejnek, P.; Vodička, A.; Kny, M.; Adamovský, D., „Systém pro větrání objektu obsahující alespoň jednu větrací jednotku s možností vytápění a chlazení se specifickým uspořádáním pasivního modulu“, Czech Republic. Patent CZ 308043. 2019-10-02.

9.3 DYNAMICKÝ PROFIL PRO PERSONALIZOVANÉ VĚTRÁNÍ

Klasické personalizované větrání používá obvykle konstantní přívod vzduchu k uživateli. Dynamický profil větrání však často představuje způsob, jak využít vyšších rychlostí k překonání vzdáleností a například i konvekčních vrstev lidského těla, a tedy teoreticky možný výrazný pozitivní přínos pro efektivitu personalizovaného větrání. V nedávné době se tímto fenoménem začaly zabývat některá pracoviště a vyšlo na toto téma několik vědeckých článků (např. [88] [89]).

Dalším relativně novým tématem je dynamické vnitřní prostředí a jeho vliv na vnímanou kvalitu vnitřního prostředí a efektivitu práce ve srovnání s klasickým konstantním „ideálním“ prostředím, které je obvykle vytvářeno pomocí současných systémů (např. [90]).

Autor by chtěl dále pokračovat ve výzkumu v tématu možnosti aplikace personalizovaného větrání pro dynamické prostředí v kancelářských budovách.

10 ZÁVĚR

10.1 VÝSLEDKY DIZERTACE – VLASTNÍ PŘÍNOS DISERTANTA

Výsledkem dizertační práce je holistický náhled na systémy personalizovaného větrání. Autor se zabýval jak teoretickým rozbohem současně známých systémů, tak vývojem nových prototypů.

Během práce vznikl teoretický analytický nástroj pro posuzování jednotlivých systémů, který po další aktualizaci a upřesnění bude ideální pro projektanty, kteří se budou snažit personalizované větrání v praxi uplatňovat.

Hlavním výsledkem práce je pak funkční prototyp personalizovaného větrání, který byl komplexně optimalizován a byl změřen jeho jasný přínos na kvalitu vnitřního prostředí. Autor asistoval při analýze řešeného prostoru a následně při práci na prototypu použil prediktivní matematické modely CFD, 3D prototyping, PIV anemometrii a měření tepelného komfortu pomocí termálního manekýna.

Během studia se zúčastnil stáže na Dánské univerzitě DTU v Lyngby pod školitelským dohledem prof. Arsena Melikova, kterého lze považovat za jednoho z průkopníků oboru personalizovaného větrání a spoluautora velké části odborných článků.

10.2 PŘÍNOS PRO PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU

Personalizované větrání je rozvíjející se obor, který bohužel zatím neměl příliš prostoru při realizacích, a to převážně z důvodu chybějící podpory legislativy, nízkého povědomí o personalizovaném větrání, a hlavně chybějících funkčních systémů dostupných na trhu.

Autor během práce vytvořil prototypy dvou různých systémů personalizovaného větrání, které je možné aplikovat v praxi, vytvořil základ nástroje pro podporu projekce a snažil se zvýšit povědomí a potenciálních výhodách tohoto typu větrání. Dané téma prezentoval na českých i zahraničních konferencích a v odborných časopisech.

Autorova práce na aplikaci Peltierových článků do vzduchotechnických jednotek byla jedním z pilířů systému lokálního větrání s použitím termoelektrických článků. V daném projektu následně vznikly dva užité vzory a dva patenty.

10.2.1 ČLÁNKY AUTORA

Výsledky této práce byly publikovány na českých i mezinárodních konferencích a v časopisech:

- Mazanec, V.; Kabele, K., Analýza proudění vzduchu pomocí Particle Image Velocimetry, In: Sympozium Energeticky efektivní budovy 2015. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2015. pp. 185-189. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02615-0.
- Mazanec, V.; Kabele, K., The Personal Ventilation System with Air Temperature Customization Using a Peltier Effect, In: CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress: volume 5. Aalborg: Aalborg University, 2016. ISBN 87-91606-30-6.
- Mazanec, V.; Kabele, K., Simulace mikroklimatizační jednotky pro systém personalizovaného větrání, In: Simulace budov a techniky prostředí 2016 - sborník 9. konference IBPSA-CZ. Praha: IBPSA-CZ, 2016. pp. 99-104. ISBN 978-80-270-0772-1.
- Mazanec, V.; Kabele, K., Optimalizace prototypu mikroklimatizační jednotky pro systém osobního větrání CFD simulací, Vytápění, větrání, instalace. 2017, 26(4), 212-217. ISSN 1210-1389.
- Mazanec, V.; Kabele, K., Personalizované větrání pro pracoviště dispečera, In: 22. konference Klimatizace a větrání. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2017. p. 118-123. ISBN 978-80-02-02739-3.
- Mazanec, V.; Kny, M.; Kabele, K., The impact of the Human Body's Convective Boundary Layers on the Design of a Personalized Ventilation Diffuser, Vytápění, větrání, instalace. 2017, 26.(6), 355-359. ISSN 1210-1389.
- Mazanec, V.; Kabele, K., Personalised Ventilation with Air Temperature Customisation: Impact on the Design and Thermal Comfort of the User, Vytápění, větrání, instalace. 2018, 27(6), 362-365. ISSN 1210-1389.
- Kny, M.; Mazanec, V., Měření proudění vzduchu pomocí PIV ve vnitřním prostředí budov, In: Proceedings of 32nd Symposium on Anemometry. Praha: Institute of Hydrodynamics ASCR, 2018. p. 45-49. ISBN 978-80-87117-17-0.
- Mazanec, V.; Kabele, K., Effect of the Personalized Ventilation to a Human Thermal Comfort, In: Central Europe towards Sustainable Building (CESB19). Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science. vol. 290. ISSN 1755-1307.
- Mazanec, V.; Kabele, K., Design and assessment of personalized ventilation systems, In: Indoor Climate of Buildings 2019 Energy Management for Better Indoor Environment. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2019. p. 249-257. ISBN 978-80-89878-55-0.

10.3 SPLNĚNÍ CÍLŮ

Zpracování rešerše současného stavu poznání systémů personalizovaného větrání.

Během práce byl proveden podrobný průzkum odborné literatury o stavu poznání na polích týkajících se osobního větrání. Rešerše se týkala jednotlivých principů vstupujících do problematiky osobního větrání a oblastí, které osobní větrání přímo ovlivňuje. Jednalo se hlavně o kvalitu vnitřního prostředí (zde hlavně kvalita vzduchu a tepelný komfort), systémy větrání a legislativní požadavky, současné způsoby hodnocení systémů větrání, vnější vlivy na efektivitu větrání a mezní konvekční vrstvy lidského těla.

Byly prozkoumány současné i dříve publikované systémy osobního větrání a systémy současně i dřív dostupné na trhu. Tyto systémy pak byly kategorizovány podle účelu aplikace, pro následný rozbor jednotlivých prvků, které následně vstupují do holistické analýzy.

Holistická analýza systémů personalizovaného větrání a její aplikace na stávající i navrhované systémy.

Na základě podrobné rešerše vznikl základní software pro hodnocení a vzájemné porovnávání jednotlivých systémů personalizovaného větrání. Vzhledem k malému počtu současných realizací personalizovaného větrání nebylo možné vytvořit výpočetní jádro na základě naměřených dat, hodnotící software proto v tuto chvíli funguje na základě komplexní multikriteriální analýzy, která vychází z rešerše odborné literatury.

Hodnocení se skládá ze tří hlavních kategorií: kvality vnitřního prostředí, investičních nákladů a spotřeby energie. Tyto hlavní kategorie se pak dělí na podkategorie, které popisují jednotlivé podrobnější parametry základních kategorií a lze tak snadno podrobně posoudit dopad instalace personalizovaného větrání na daný objekt.

Software má sloužit principiálně k výběru a posouzení různých typů personalizovaného větrání podle jednotlivých základních komponent. Může být velmi dobrým nástrojem pro vývojáře těchto systémů, případně pro investory, kteří si budou chtít nechat vyrobit a instalovat systém personalizovaného větrání. V době, kdy na trhu bude více zařízení pak i k informovanému výběru vhodného zařízení. V rámci práce byl software využit k posouzení vyvíjených řešení.

Analýza kvality vnitřního prostředí a určení vhodné aplikace systému personalizovaného větrání

V rámci hlavního projektu této práce – řešení ATS sálu pro Řízení Letového Provozu v Jenči – byla vypracována podrobná analýza kvality vnitřního prostředí sálu a identifikovány klíčové problémy, na které bylo následně potřeba navrhnout vhodné řešení. Analýza se sestávala z fyzického měření na místě a dotazníkového průzkumu. Následně bylo využito holistické posouzení k rozpoznání vhodného řešení pro daný provoz.

Vzhledem k tomu, že hlavní problémy byly identifikovány v kategorii vnitřního prostředí, a to převážně v kvalitě vzduchu a tepelném komfortu, byl navržen systém se schopností čelit naráz těmto dvěma výzvám. Jedná se o systém personalizovaného větrání s individuální úpravou teploty přiváděného vzduchu založený na mikro klimatizační jednotce umístěné pod podlahou sálu s rozvodnou sítí a s distribučními prvky umístěnými v pracovním místě. Tento systém byl v následujících bodech dále rozvíjen a optimalizován.

Vývoj vhodného zařízení pro řešení zjištěných nedostatků kvality vnitřního prostředí

Pomocí stage-gate metody vývoje se během několika vývojových fází podařilo navrhnout a vytvořit prototyp zařízení vhodného pro zabudování do pracovního místa řídicího letového provozu: MKJ-1. Zařízení se skládá z mikro klimatizační jednotky, která je z akustických a tepelně technických důvodů umístěna ve zdvojené podlaze sálu a nasává čerstvý vzduch, který je do tohoto prostoru přiváděn, a dále z tepelně izolované distribuční sítě, která propojuje jednotku se vzduchotechnickými personalizovanými vyústkami, přivádějícími vzduch do dýchací zóny uživatele pracovního místa. Mikro klimatizační jednotka umožňuje personalizaci množství a teploty přiváděného vzduchu, a to v objemu 20-50 m³/h na jedno pracovní místo a rozdíl teplot ± 4 °C oproti centrálně přiváděnému vzduchu. Jednotka je regulována pomocí dvou potenciometrů zabudovaných do pracovního místa, z nichž jeden ovládá množství a druhý teplotu přiváděného vzduchu. Zařízení je napojeno na plánovaný rozvod stejnosměrného proudu 24 V a maximální příkon jedné jednotky je 200 W.

Na základě získaných znalostí poté byla postavena i podstatně univerzálnější mikro klimatizační jednotka MKJ-2, která je určena pro zvýšení kvality vnitřního prostředí v kancelářích bez nutnosti napojení na přívod čerstvého vzduchu.

Vyhodnocení dopadu zařízení na kvalitu vnitřního prostředí

Vyvíjené zařízení bylo během vývoje optimalizováno pomocí CFD simulací (matematická simulace proudění vzduchu a přenosu tepla) a pomocí 3D tisku byl postaven funkční prototyp, který byl následně podroben testům vlivu na efektivní proudění vzduchu a tepelný komfort, k čemuž byla využita PIV anemometrie a termální manekýn. Oba testy potvrdily faktickou funkčnost zařízení v očekávaných rovinách.

Lze tedy říct, že navržený prototyp zařízení odpovídá na problémy nalezené v analytické části práce. Pomocí pokročilé lokální distribuce a personalizace množství a teploty vzduchu příznivě ovlivňuje vnímané vnitřní prostředí a tepelnou pohodu uživatele.

Podání žádosti o ochranu duševního vlastnictví

Pro jednotku MKJ-1 byla podána žádost o užitný vzor. Tato žádost je v tuto chvíli pozastavena kvůli výrazným změnám v návrhu pracovního místa pro letové dispečery, které nastaly až po ukončení projektu a kvůli kterým nebylo možné daný prototyp jednotky do pracovního místa instalovat.

Jednotka MKJ-2 je v tuto chvíli zapsána jako funkční vzorek a ochrana duševního vlastnictví je v plánu po poslední fázi vývoje, kterým jednotka prochází.

11 LITERATURA

- [1] A. K. Melikov, „Advanced air distribution,“ *ASHRAE Journal*, pp. 73-78, 11 2011.
- [2] L. Fang, D. P. Wyon, G. Clausen a O. Fanger, „Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance,“ *Indoor Air*, pp. 74-81, 2004.
- [3] J. E. Janssen, „The History of Ventilation and Temperature Control,“ *ASHRAE Journal*, sv. 41, č. 10, pp. 48-70, 1999.
- [4] A. K. Klauss, R. H. Tull, L. M. Roots a J. R. Pfafflin, „History of Changing Concepts of Ventilation Requirements,“ *ASHRAE Journal*, 12(6), 1970.
- [5] J. D. Spengler a Q. Chen, „Indoor Air Quality Factors in Designing a Healthy Building,“ *Annual Review of Energy and the Environment*, č. 25, pp. 567-600, 2000.
- [6] P. M. Bluysen, E. De Oliveira Fernandes, L. Groes, G. Clausen, P. O. Fanger, O. Valbjörn, C. A. Bernhard a C. A. Roulet, „European Indoor Air Quality Audit Project In 56 Office Buildings,“ *Indoor Air*, sv. 6, pp. 221-238, 1996.
- [7] M. J. Mendell, „Non-Specific Symptoms In Office Workers: A Review And Summary Of The Epidemiologic Literature,“ *Indoor Air*, sv. 3, pp. 227-236, 1993.
- [8] V. Mazanec a K. Kabele, „Personalizované větrání openspace kanceláří,“ v *15. Letní škola TZB, Český Šternberk*, 2017.
- [9] „SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2010/31/EU o energetické náročnosti budov a směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti,“ *Úřední věstník Evropské unie*, pp. 75-91, 19 6 2018.
- [10] J. Horváthová, *Vliv způsobu vytápění na kvalitu vnitřního prostředí*, Praha: Dizertační práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra technických zařízení budov, 2017.
- [11] A. K. Melikov a Godovic, „Personalised ventilation, State of Art and Performance in practise,“ v *KlimaForum*, Slovinsko, 2006.
- [12] Exhausto a.s., *Personalized ventilation - a healthy investment brochure*, Langeskov: Exhausto a.s..
- [13] C. E. Hyldgaard, „Humans as a source of pollution,“ v *Roomvent*, Cracow, 1994.

- [14] NV_3612007, *Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci.*
- [15] D. Licina, A. K. Melikov, J. Pantelic, C. Sekhar a K. W. Tham, „Human convection flow in spaces with and without ventilation: Personal exposure to floor released particles and cough released droplets,” 2015.
- [16] A. K. Melikov, M. A. Skwarczynski, J. Kaczmarczyk a J. Zabecky, „Use of personalized ventilation for improving health, comfort and performance at high room temperature and humidity,” *Indoor Air*, sv. 23, č. 3, pp. 250-263, 2013.
- [17] A. K. Melikov a R. Čermák, „Protection of occupants from exhaled infectious agents and floor material emissions in rooms with Personalised and underfloor ventilation,” *HVAC & R Research*, sv. 13, č. 1, 2007.
- [18] P. V. Nielsen, C. E. Hylgaard, A. K. Melikov, H. Andersen a M. Soennichsen, „Personal Exposure Between People in a Room Ventilated by Textile Terminals—with and without Personalized Ventilation”.
- [19] P. V. Nielsen, M. Polak, H. Jiang, Y. Li a H. Qian, „Protection Against Cross Infection in Hospital Beds with Integrated Personalized Ventilation”.
- [20] „Chair with Integrated Personalized Ventilation for Minimizing Cross Infection,” *Roomvent*, 2007.
- [21] M. P. Bivolarova, A. K. Melikov, C. Mizutani, K. Kajiwara a Z. D. Bolashikov, „Bed-integrated local exhaust ventilation system combined with local air cleaning for improved IAQ in hospital patient rooms”.
- [22] S. Schiavon, A. K. Melikov a S. C. Sekhar, „Energy analysis of the personalized ventilation system in hot and humid climates,” *Energy and Buildings*, sv. 42, č. 5, 2010.
- [23] Z. Mathauserová, „Požadavky na jednotlivé faktory vnitřního prostředí budov a jejich zajištění,” 2 2 2015. [Online]. Available: <https://stavba.tzb-info.cz/regenerace-domu/12280-pozadavky-na-jednotlive-factory-vnitriho-prostredi-budov-a-jejich-zajisteni>. [Přístup získán 31 7 2019].
- [24] K. Kabele, Z. Veverková a P. Dvořáková, „Vnitřní prostředí budov,” 26 6 2015. [Online]. Available: www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vetrani-a-klimatizace/vnitri-prostredi-budov. [Přístup získán 1 6 2019].
- [25] M. Frontczak, S. Schiavon, G. J. E. Arens a P. Wargocki, „Quantitative relationships between occupant satisfaction and aspects of indoor environmental quality and building design,” *Indoor Air*, 2011.

- [26] P. O. Fanger, Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering, Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [27] S. Altomonte, S. Schiavon, M. G. Kent a G. Brager, „Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings,” *Building Research & Information*, sv. 47, č. 3, pp. 255-274, 2019.
- [28] K. Kabele, Z. Veverková a P. Dvořáková, „Hodnocení vnitřního prostředí budov,” v *sborník konference Technická zařízení pro chytré, zdravé a úsporné budovy 2015*, 2015.
- [29] A. K. Melikov a J. Kaczmarczyk, „Air movement and perceived air quality,” *Building and Environment*, č. 47, pp. 400-409, 2012.
- [30] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: ASHRAE and the American National Standards Institute, 2013.
- [31] M. Jokl, Zdravé obytné a pracovní prostředí, Praha: Academia, 2002.
- [32] L. Fang, G. Clausen a P. O. Fanger, „Impact of temperature and humidity on perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposures,” *Indoor Air*, sv. 8, č. 4, pp. 276-284, 1998.
- [33] European Committee for Standardization, „EN 15251 Criteria for indoor environment including thermal, indoor air quality, light and noise,” Brussels, 2007.
- [34] W. F. Ganong, Přehled lékařské fyziologie, Praha: Galén, 2005.
- [35] L. Hes a P. Sluka, Úvod do komfortu textilií, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [36] M. Jokl, Teorie vnitřního prostředí budov, Praha: Ediční středisko ČVUT, 1986.
- [37] ČSN EN ISO 7933 - *Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného stresu pomocí výpočtu předvídané tepelné zátěže*, 2004.
- [38] ČSN EN ISO 11079 *Ergonomie tepelného prostředí - Stanovení a interpretace stresu z chladu pomocí potřebné izolace oděvu (IREQ) a místních účinků chladu*, 2008.
- [39] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition), ASHRAE, 2009.
- [40] A. Auliciems a S. V. Szokolay, Thermal comfort, Brisbane: PLEA in association with The University of Queensland, 2007.

- [41] ČSN EN ISO 7730 - *Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*, Český normalizační institut, 2006.
- [42] ČSN EN ISO 7243 *Ergonomie tepelného prostředí – Stanovení tepelné zátěže pracovníka podle ukazatele WBGT (teploty mokrého a kulového teploměru)*, 2018.
- [43] B. Yang, A. K. Melikov, A. Kabanshi, C. Zhang, F. S. Bauman, G. Cao, H. Awbi, H. Wigö, J. Niu, K. W. D. Cheong, K. W. Tham, M. Sandberg, P. V. Nielsen, R. Kosonen, R. Yao, S. Kato, S. C. Sekhar, S. Schiavon, T. Karimipannah, X. Li a Z. Lin, „A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions,” *Energy and Buildings*, sv. 202, 2019.
- [44] M. Sanberg, „What is ventilation efficiency?,” *Building and Environment*, sv. 16, pp. 123-135, 1981.
- [45] B. Zhao, X. Li, D. Li a J. Yang, „Revised Air-Exchange Efficiency Considering Occupant Distribution in Ventilated Rooms,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, sv. 53, pp. 759-763, 2003.
- [46] S. Kato a S. Murakami, „New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation,” *ASHRAE trans*, sv. 94, pp. 309-330, 1988.
- [47] S. Kato, H. Kobayashi a S. Murakami, „New Scale for Evaluating Ventilation Efficiency as Affected by Supply and Exhaust Openings based on Spatial Distribution of Contaminant,” v *12th International Symposium on Contamination Control Proceedings*, Yokohama, 1994.
- [48] A. Koestel a G. Tuve, „Performance and evaluation of room air distribution systems,” *ASHRAE Trans.*, sv. 61, pp. 533-550, 1955.
- [49] H. B. Awbi, „Ventilation of buildings,” v *Spon Press*, Londýn, 2003.
- [50] D. Šponiar a M. Barták, „Hodnocení tepelné pohody z výsledků CFD simulace a jejich aplikace v interiéru vozidla,” *Vytápění, větrání, instalace*, č. 3, pp. 151-154, 2007.
- [51] Z. Fang, H. Liu, B. Li, A. Baldwin, J. Wang a K. Xia, „Experimental investigation of personal air supply nozzle use in aircraft cabins,” *Applied Ergonomics*, sv. 47, pp. 193-202, 2015.
- [52] A. K. Melikov a V. Dzhartov, „Advanced air distribution for minimizing airborne crossinfection in aircraft cabins,” *HVAC&R Research*, sv. 19, č. 8, pp. 926-933, 2013.

- [53] B. Halvoňová a M. A. K. „Perfomance of ductless personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation: Workstations layout and Partitions," *HVACa&R Res.*, sv. 16, pp. 75-94, 2010.
- [54] J. Kaczmarczyk, Q. Zeng, A. K. Melikov a P. O. Fanger, „The effect of a personalized ventilation system on perceived air quality and SBS symptoms," v *Proc. of Indoor Air*, Monterey, California, 2002.
- [55] R. Čermák a A. K. Melikov, „Osobní větrání," *Vytápění, větrání, instalace*, č. 5, pp. 199-202, 2003.
- [56] A. K. Melikov, H. Grønbaek a J. B. Nielsen, „Personal Ventilation: from research to practical use," v *Proc. of Clima 2007*, Helsinki, 2007.
- [57] „Taskair," [Online]. Available: <https://uci.com.au/product/taskair/>. [Přístup získán 18 3 2018].
- [58] „The climate's right for Climadesk," *Facilities*, sv. 18, č. 3, 2000.
- [59] M. P. Bivolarova, L. Rezgals, A. K. Melikov a Z. D. Bolashikov, „Seat-integrated localized ventilation for exposure reduction to air pollutants in indoor environments".
- [60] A. K. Melikov, T. Ivanova a G. Stefanova, „Seat Headrest-Incorporated Personalized Ventilation: Thermal comfort and Inhaled Air Quality," *Building and Environment*, č. 47, pp. 100-107, 2012.
- [61] N. Gao, J. Niu a H. Zhang, „Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation," *HVAC&R Res.*, sv. 12, č. 3, 2006.
- [62] Y. Kogawa, N. Tatsuo a A. Onga, „Practical investigation of cool chair in warm offices," v *Proceedings of Clima 2007*, Helsinki, 2007.
- [63] Z. Zhai a I. D. Metzger, „Insights on critical parameters and conditions for personalized ventilation," *Sustainable Cities and Society*, sv. 48, 2019.
- [64] B. Yang a S. C. Sekhar, „Three-dimensional numerical simulation of a hybrid fresh air and recirculated air diffuser for decoupled ventilation strategy," *Building and Environment*, sv. 42, č. 5, pp. 1975-1982, 2007.
- [65] F. Bauman a E. Arens, „Task/Ambient Conditioning Systems: Engineering and Applications Guidelines," Berkeley: Center for Environmental Design Research, 1996.
- [66] R. Li, S. C. Sekhar a A. K. Melikov, „Thermal comfort and Indoor Air Quality in Rooms with Integrated Personalized Ventilation and Under-Floor Air Distribution System," 2011.

- [67] „Fotogalerie Kongresové centrum,“ [Online]. Available: <https://www.praguecc.cz/cz/fotogalerie>.
- [68] Z. D. Bolashikov, M. Barova a A. K. Melikov, „Wearable Personal Exhaust Ventilation, WPEV: Improved Indoor Air Quality and Reduced Exposure to Air Exhaled from a Sick Doctor,“ *Science and Technology for the Built Environment*, sv. 21, č. 8, p. 1117–1125, 2015.
- [69] Z. Bolashikov, A. K. Melikov a M. Spilak, „Experimental investigation on reduced exposure to pollutants indoors by applying wearable personalized ventilation,“ *HVAC&R Research*, sv. 19, č. 4, pp. 385-399, 2013.
- [70] D. Licina, A. K. Melikov, C. Sekhar a K. W. Tham, „Air temperature investigation in microenvironment around a human body,“ *Building and Environment*, pp. 39-47, 2015.
- [71] D. Licina, A. K. Melikov, C. Sekhar a K. W. Tham, „Human convective boundary layer and its interaction with roomventilation flow“. *Indoor Air 2014*.
- [72] V. Mazanec, M. Kny a K. Kabele, „The impact of the Human Body's Convective Boundary Layers on the Design of a Personalized Ventilation Diffuser,“ *Heating, Ventilation, Sanitary Installation*, č. 6, 12 2017.
- [73] A. K. Melikov, „Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction,“ *Building and Environment*, č. 91, pp. 70-77, 2015.
- [74] Z. Bolashikov, A. K. Melikov a M. Krenek, „Control of the Free Convective Flow around the Human Body for Enhanced Inhaled Air Quality: Application to a Seat-Incorporated Personalized Ventilation Unit,“ *HVAC&R Research*, sv. 16, č. 2, 2010.
- [75] V. Mazanec a K. Kabele, „Personalizované větrání pro pracoviště dispečera,“ v *Klimatizace a větrání*, Praha, 2017.
- [76] A. K. Melikov, R. Cermak a M. Majer, „Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices,“ *Energy and Buildings*, č. 34, p. 829–836, 2002.
- [77] W. Sun, K. W. Tham, W. Zhou a N. Gong, „Thermal performance of a personalized ventilation air terminal device attwo different turbulence intensities,“ *Building and Environment*, č. 42, p. 3974–3983, 2007.
- [78] M. Jahoda, „Počítačová dynamika tekutin (CFD),“ [Online]. Available: <http://uchi-old.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/CFD.uvod.pdf>. [Přístup získán 2017 9 12].
- [79] P. Vlček, „Modelování turbulentního proudění,“ [Online]. Available: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. [Přístup získán 5 10 2017].

- [80] R. G. Cooper, „Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products“.
- [81] C. Grönlund, D. R. Sjödin a J. Frishammar, „Open Innovation and the Stage-Gate Process: A REVISED MODEL FOR NEW PRODUCT DEVELOPMENT“.
- [82] K. Kabele a Z. Veverková, *Rekonfigurace ATS sálu - studie, závěrečná zpráva I. fáze*, Praha, 2016.
- [83] D. P. Wyon, „Individual microclimate control: Required range, probable benefits and current feasibility,“ v *Proc. of 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 1996.
- [84] V. Mazanec a K. Kabele, „The Personal Ventilation System with Air Temperature Customization Using a Peltier Effect,“ v *Clima 2016*, Aalborg, 2016.
- [85] V. Mazanec a K. Kabele, „Optimalizace prototypu mikroklimatizační jednotky pro systém personalizovaného větrání pomocí CFD simulace,“ *Vytápění, větrání, instalace*, č. 4, pp. 212-219, 2017.
- [86] COMSOL Guide, CFD Module User's Guide, 2004.
- [87] V. Mazanec a K. Kabele, „Effect of the Personalized Ventilation to a Human Thermal Comfort,“ v *Central Europe towards Sustainable Building (CESB19)*, Praha, 2019.
- [88] D. Al Assaad, K. Ghali, N. Ghaddar a C. Habchi, „Effectiveness of intermittent personalized ventilation in protecting occupant from indoor particles,“ *Building and Environment*, pp. 22-32, 15 1 2018.
- [89] D. Al Assaad, K. Ghali, N. Ghaddar a C. Habchi, „Mixing ventilation coupled with personalized sinusoidal ventilation: Optimal frequency and flow rate for acceptable air quality,“ *Energy and Buildings*, pp. 569-580, 1 11 2017.
- [90] Y. Zhang a R. Zhao, „Relationship between thermal sensation and comfort in non-uniform and dynamic environments,“ *Building and Environment*, sv. 44, č. 7, pp. 1386-1391, 7 2009.
- [91] P. Mustakallio, Z. D. Bolashikov, K. Kostov, A. K. Melikov a R. Kosonen, „Thermal environment in simulated offices with convective and radiant cooling systems under cooling (summer) mode of operation,“ *Building and Environment*, pp. 82-91, 2016.
- [92] V. Mazanec a K. Kabele, „Personalised Ventilation with Air Temperature Customisation: Impact on the Design and Thermal Comfort of the User,“ *Heating, Ventilation, Sanitation*, č. 6, pp. 362-365, 2018.

[93] *ČSN EN ISO 14505-2 Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty, 2007.*

Seznam obrázků

Obr. 1: Porovnání procenta nespokojených (PPD index) mezi běžně používaným směšovací vĕtráním a personalizovaným vĕtráním při různých teplotách interiéru. [12] [11] [8].....	7
Obr. 2: Graf znázorňující přenos životaschopných virů chřipky a spalniček mezi pracovními místy při použití různých systémů vĕtrání [8] [12] [17].	9
Obr. 3 Graf porovnání obsazenosti (0-100 % na svislé ose) dvou odlišných provozů během dne (0-24 h na vodorovné ose). V prvním případě je obsazenost vysoká a prostor pro úsporu energie není zásadní, v druhém případě je ale naopak možnost úspory výrazná, protože obsazenost se běžně pohybuje pod 50 %, což centrální systémy neumí zohlednit [22].....	10
Obr. 4: Vlivy na kvalitu vnitřního prostředí a jejich propojení s vnímanými smysly (Zdroj: Autor)	17
Obr. 5: Vlivy prostředí na objektivní a vnímanou kvalitu vzduchu (Zdroj: Autor)...	18
Obr. 6 Závislost entalpie na vnímané kvalitě vzduchu [2]	20
Obr. 7: Vztahy tepelné výměny lidského těla a okolního prostředí [10].....	21
Obr. 8: Faktory vstupující do vnímaného tepelného komfortu [10].....	22
Obr. 9: Graf závislosti PPD a PMV	26
Obr. 10: Osobní vĕtrání s lokálním odtahem v prostorách dopravních prostředků [1].....	31
Obr. 11: Jeden z prvních prototypů koncových prvků pro personalizované vĕtrání [55].....	33
Obr. 12: Personalizované vĕtrání společnosti Exhausto [12].....	33
Obr. 13: Čelní pohled na produkt společnosti Exhausto [56]	33
Obr. 14: Systém personalizovaného vĕtrání projektu TaskAir® [57]	34
Obr. 15: Schéma systému ClimaDesk [58]	35
Obr. 16 Personalizované vĕtrání v područce kancelářské židle [61].....	36
Obr. 17 Vĕtrání zabudované v kancelářské židli [62].....	36
Obr. 18: vĕtraná matrace pro odsávání škodlivin z osobní zóny [59].....	37
Obr. 19: Systém personalizovaných stropních vyústek v kombinaci se směšovací vĕtráním [64]	37
Obr. 20: Mechanické podlahové vyústky	38
Obr. 21: Pohled do hlavního sálu Kongresového centra na Vyšehradě [67]	39
Obr. 22: Personalizované vĕtrání nemocničních lůžek [1]	40
Obr. 23: Personální zařízení pro snížení rizika přenosu infekcí [1].....	40
Obr. 24: Vlivy působící na výslednou efektivitu personalizovaného vĕtrání [43] [55]. A – Dýchací zóna; B – Zóna očí (riziko vysychání očí při vyšších rychlostech); C – Zóna pracovního prostředí rukou (riziko tepelného diskomfortu při vyšších rychlostech, nebo nižších teplotách) (Zdroj: Autor). 41	41
Obr. 25: Rychlost proudění vzduchu v konvekčních vrstvách lidského těla sedící osoby ve dvou výškách (0,6 a 0,95 m) a dvou stavech (nahá a oblečená postava) podle A. Melikova [73].....	42
Obr. 26 Vlastní měření mezních vrstev [75]	43
Obr. 27 Narušení či otočení mezních vrstev pomocí sálavých panelů [73].....	44

Obr. 28 Fyzické přerušení mezních vrstev pomocí posuvné desky (uprostřed), nebo odsávání (vpravo) [73].....	45
Obr. 29: Pozice měřených koncových prvků. MP – pohyblivý panel nad monitorem; CMP – panel na monitoru počítače; PEM – vyústky po stranách monitoru; VDG – vertikální vyústka v oblasti břicha; HDG – horizontální vyústka v oblasti břicha.....	46
Obr. 30 Vliv pozice vyústek na efektivitu distribuce pro izotermní proudění (vlevo) a pro přiváděný vzduch chladnější o 6 °C (vpravo) [76]. Vertikální osa zobrazuje efektivitu větrání, zatímco horizontální průtok vzduchu vyústkou (5 l/s je ekvivalentní 18 m ³ /h). MP – pohyblivý panel nad monitorem; CMP – panel na monitoru počítače; PEM – vyústky po stranách monitoru; VDG – vertikální vyústka v oblasti břicha; HDG – horizontální vyústka v oblasti břicha.....	47
Obr. 31: Pokles ekvivalentní teploty lidského těla při použití různých typů vyústek ve svém optimálním průtoku [76]. MP – pohyblivý panel nad monitorem; CMP – panel na monitoru počítače; PEM – vyústky po stranách monitoru; VDG – vertikální vyústka v oblasti břicha; HDG – horizontální vyústka v oblasti břicha.....	47
Obr. 32: Schéma typického zapojení systému PIV. Kamera a laser jsou přesně synchronizovány pomocí ovladače časování a data jsou odečítána do počítače, kde je prováděna analýza vektorového pole. (Zdroj: autor).....	49
Obr. 33: Popis Navier-Stokesovy rovnice [78]	54
Obr. 34: Obvyklé fáze a brány Stage-gate metody [81]	58
Obr. 35: Vlivy na provozní náklady v holistické analýze, pozitivní vlivy jsou zobrazeny zelenou a negativní vlivy červenou barvou (zdroj: autor).....	62
Obr. 36: Vlivy na kvalitu vnitřního prostředí v holistické analýze (zdroj: autor).....	64
Obr. 37: Vlivy na investiční náklady v holistické analýze, pozitivní vlivy jsou zobrazeny zelenou a negativní vlivy červenou barvou. Méně zásadní dopady pak jsou zobrazeny přerušovaně (zdroj: autor).....	68
Obr. 38: Jednotlivé parametry specifikující systémy osobního větrání použité pro analýzu.....	71
Obr. 39: Celkový pohled na výpočetní tabulku.....	72
Obr. 40: Zobrazení výsledného porovnání tří odlišných systémů větrání	73
Obr. 41: Schéma systému 2; systém je podrobněji rozebírán v kapitole 6 (zdroj: autor).....	75
Obr. 42: 3D model MKJ-2; systém je podrobně rozebírán v kapitole 7 (zdroj: autor).....	76
Obr. 43: Numerické vyhodnocení systémů.....	77
Obr. 44: Grafické srovnání kategorií.....	78
Obr. 45: Grafické srovnání subkategorií	78
Obr. 46 Stage-gate metoda – konkrétní aplikace pro vývoj jednotky. Viz kapitolu 4.3.	80

Obr. 47: Řízení letového provozu: pohled do ATS sálu doplněný o snímky z termokamery, ukazující jednotlivé zdroje tepla. Na podlaze je vidět chladné vyústky distribuující čerstvý chladný vzduch [82].....	84
Obr. 48: Půdorys ATS sálu v současném rozložení pracovních míst [82].	85
Obr. 49: Půdorys a řez pracovním místem letového dispečera podle nového návrhu [82].	88
Obr. 50: Pohled na nový návrh pracovního místa letového dispečera doplněný o postranní technologické boxy [82].	88
Obr. 51: Půdorysné zobrazení měřených bodů [82].....	91
Obr. 52: Barevná škála používaná pro prostorové grafy [82].....	94
Obr. 53: Zobrazení spokojenosti s teplotou (horní řada, ve škále nespokojen-spokojen) a celkového tepelného pocitu (dolní řada, ve škále chlad-teplo) pro tři experimenty (A, B, D) [82].	94
Obr. 54: Spokojenost s teplotou (vlevo, škála nespokojený - spokojený) a celkový tepelný pocit (vpravo, škála chlad - teplo) [82].....	95
Obr. 55: Dílčí tepelné pocity (škála chlad-teplo) pro jednotlivé části těla. Horní řada zprava: hlava, ramena, záda; spodní řada zprava: hrudník, ruce, nohy [82].....	95
Obr. 56: Odpověď návrhu na zjištěné nedostatky	100
Obr. 57: Koncepční návrh zabudování vyústek a těla jednotky do pracoviště:...	101
Obr. 58: Princip fungování Peltierova článku za použití polovodičů P a N. (Zdroj: Autor)	104
Obr. 59: Obvyklá závislost výkonu článku při stejném příkonu (a tedy i účinnost) na rozdílu teplot na Peltierově článku. Zdroj: Technické listy použitých prvků.	104
Obr. 60: Koncepční schéma systému jednotky	106
Obr. 61: Působení na vnitřní prostředí v režimu chlazení. (Zdroj: Autor)	107
Obr. 62: Působení na vnitřní prostředí v režimu vytápění. (Zdroj: Autor).....	108
Obr. 63: Základní prototyp jednotky [84].....	109
Obr. 64: Rozložení měřených bodů [84]; (1) teplota primárního výměníku, (2) teplota sekundárního výměníku, (3) teplota nasávaného vzduchu, (4) teplota upraveného vzduchu.	110
Obr. 65: Graf měření náběhu a výkonu jednotky v režimu vytápění (zdroj: autor)	111
Obr. 66: Graf měření náběhu a výkonu jednotky v režimu chlazení (zdroj: autor)	112
Obr. 67: Typy výměníků použité v simulaci (Zdroj: autor).....	114
Obr. 68: Teplotní pole na výstupním průřezu (zdroj: autor).....	115
Obr. 69: Výsledky simulace ve 3D pohledu (odshora: V1, V2, V3) (zdroj: autor)..	115
Obr. 70: Výsledné funkční schéma systému personalizovaného větrání (zdroj: autor).....	117
Obr. 71: Označení řešené části.....	118
Obr. 72: Řezy těla jednotky ve čtyřech výškách (nahore) a model jednotky připravený pro 3D tisk (dole) (Zdroj: autor).....	119
Obr. 73: Jednotlivé díly jednotky před složením (zdroj: autor).....	120

Obr. 74: Původní (A) a zjednodušený (B) model, použitý pro výpočet [85].	121
Obr. 75: Síť použitá pro výpočet CFD [85].	122
Obr. 76: Měření prototypu pro kalibraci modelu [85].	122
Obr. 77: Výsledky kalibrace modelu, odchylka měření jednotlivých stavů [85].	124
Obr. 78: Vlevo: Výsledek výpočtu teploty pro kalibraci: Múd chlazení, běžná rychlost proudění v okolí. Vpravo: Výsledek výpočtu teploty pro kalibraci: Múd vytápění, běžná rychlost proudění v okolí. Škála označuje teploty ve °C v daném řezu [85].	124
Obr. 79: Vlevo: Výsledek výpočtu v situaci bez proudění vzduchu okolo vnějších výměníků a plném chladicím výkonu (70 W). Vpravo: Výsledek výpočtu bez nuceného proudění uvnitř jednotky a plném topném výkonu jednotky. Škála označuje teploty ve °C v daném řezu [85].	126
Obr. 80: Vlevo: Výsledek výpočtu při poruše vnějšího výměníku a plném chladicím výkonu (70 W). Škála označuje teploty ve °C v daném řezu. Vpravo: Výsledek při využití Peltierova článku o maximálním výkonu 100 W, linie vyznačují izotermy povrchových teplot výměníků s rizikem kondenzace tedy s teplotou výměníku mezi 8 a 10 °C. První stupnice označuje jednotlivé teploty izoterm ve °C, druhá stupnice pak teploty ve °C v daném řezu.	127
Obr. 81: rozložený model prototypu (sekundární výměníky neodpovídají finální zvolené variantě) (zdroj: autor).	131
Obr. 82: Prototyp po kompletaci (zdroj: autor).	132
Obr. 83: Označení řešené části	133
Obr. 84: Rozložení vyústek [82].	134
Obr. 85: Prostor pro zabudování vyústky ve středovém sloupku (půdorysný řez). A znázorněný návrh napojení vyústky. Výsledný model měl kvůli technologiím (za středovým krytem) delší krček mezi kruhovým napojením a vnitřní mřížkou (zdroj: autor).	134
Obr. 86: Napojení vyústky na rozvodnou síť bylo vytvořeno díly vytvořenými na 3D tiskárně. Model je pro názornější ukázkou rozložený (zdroj: autor).	135
Obr. 87: Testované varianty vyústek a jejich umístění v pracovišti [75].	136
Obr. 88: CFD simulace vyústek: kruhové trysky C3 (vlevo), obdélná vyústka s rovnoběžnými lamelami R1 (uprostřed), obdélná vertikální vyústka s rozbíhajícími se lamelami R5 (vpravo) [75].	136
Obr. 89: PIV anemometrie vyústky, rozložení proudu vzduchu ve vertikální rovině (vlevo) a horizontální rovině (vpravo) [72].	140
Obr. 90: PIV měření samostatných konvekčních vrstev okolo termálního manekýna [72].	141
Obr. 91: Zobrazení vzájemné pozice měřících a měřených prvků pro měření interakce vyústky a konvekčních vrstev lidského těla [72].	142
Obr. 92: Interakce mezi prouděním při průtoku vzduchu na vyústce 15 m ³ /h [72].	143
Obr. 93: Interakce mezi prouděním při průtoku vzduchu na vyústce 25 m ³ /h [72].	143

Obr. 94: Interakce mezi prouděním při průtoku vzduchu na vyústce 30 m ³ /s [72].	144
Obr. 95: Schéma měření proudění z obou vyústek [87].	145
Obr. 96: Obraz proudění z obou vyústek v izotermním režimu pro 25 a 50 m ³ /h [87].....	146
Obr. 97: Obraz proudění z obou vyústek v režimu ohřevu vzduchu pro 25 a 50 m ³ /h [87].	147
Obr. 98: Obraz proudění z obou vyústek v režimu chlazení pro 25 a 50 m ³ /h [87].	147
Obr. 99: Označení řešené části.....	149
Obr. 100: Rozložení teplotních senzorů (zdroj: autor).	150
Obr. 101: Měření tepelných ztrát v potrubí v režimu vytápění (zdroj: autor).	150
Obr. 102: Měření tepelných ztrát v potrubí v režimu chlazení (zdroj: autor).	151
Obr. 103: Kompletně smontovaný systém MKJ-1 (mezi jednotkou a odbočkou je vložený měřící kus) (zdroj: autor).....	152
Obr. 104: Popis finální verze těla jednotky (zdroj: autor).....	153
Obr. 105: Umístění vyústek a směrování proudu vzduchu (zdroj: autor).	154
Obr. 106: Dopad na tepelný komfort v jednotlivých měřených zónách při izotermním proudění (bílá), chlazení (modrá) a dohřevu (červená), pro 25 m ³ /h (kruh) a 50 m ³ /h (trojúhelník) [87].....	155
Obr. 107: Princip funkce MKJ-2 (zdroj: autor).....	162
Obr. 108: Díly těla MKJ-2 vyrobené 3D tiskem (Zdroj: autor)	163
Obr. 109: Sestavené tělo MKJ-2 (Zdroj: autor)	164
Obr. 110: Schéma proudění vzduchu, půdorysné uspořádání na pracovním místě a boční pohled (zdroj: autor).	165
Obr. 111: CFD simulace dosud neoptimalizovaných polí proudění vzduchu. (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, CFD simulace jednotky).....	166
Obr. 112: Model finální podoby vyústek (Zdroj: autor).....	167
Obr. 113: Obraz proudění při režimu ohřevu +4 K oproti okolnímu vzduchu (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).	168
Obr. 114: Obraz proudění při režimu chlazení -4 K oproti okolnímu vzduchu (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).	168
Obr. 115: Obraz proudění při průtoku vzduchu 30 % (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).....	169
Obr. 116: Obraz proudění při průtoku vzduchu 100 % (Zdroj: Ing. Martin Kny, PhD, PIV měření jednotky).....	169
Obr. 117: Finální podoba funkčního vzorku (Zdroj: archiv autora).	171
Obr. 118: Model jednotky MKJ-2.1 (Zdroj: autor).....	176
Obr. 119: Koncept lokální podparapetní modulární větrací jednotky napojené k venkovnímu vzduchu přes fasádu. (Zdroj: autor).	177
Obr. 120: Prototyp lokální bytové jednotky pro aplikaci do podhledů. (Zdroj: archiv autora).....	178

Seznam tabulek

Tabulka 1: Změna paradigmatu ve filosofii větrání budov od roku 1800 [5]	3
Tabulka 2: Předpisy stanovující limity pro jednotlivé faktory vnitřního prostředí [23].....	16
Tabulka 3: Limitní hodinové koncentrace chemických ukazatelů a prachu [23]....	19
Tabulka 4: Rozmezí veličin pro aplikaci PMV indexu [41]	25
Tabulka 5: Popis indexů SVE 1-6.....	28
Tabulka 6: Popis jednotlivých experimentů.....	90
Tabulka 7: Měřené veličiny v daných bodech [82].	91
Tabulka 8: Použité přístroje	92
Tabulka 9: Požadované parametry vstupního a výstupního vzduchu	105
Tabulka 10: Útlum zvuku rozvodného systému. Zdroj: výrobce	149
Tabulka 11: Specifikace jednotlivých parametrů systému MKJ-1	157
Tabulka 12: Výsledky měření funkčního vzorku v režimu chlazení.....	170
Tabulka 13: Výsledky měření funkčního vzorku v režimu ohřevu.....	170