

TITULNÍ LIST

Druh závěrečné práce:

Bakalářská práce

Název závěrečné práce:

Dynamické vnitřní prostředí a jeho vliv na tepelný komfort osob

Autor závěrečné práce:

Michal Svoboda

Vedoucí závěrečné práce:

Ing. Vojtěch Zavřel, Ph.D.

Studijní program:

Strojní inženýrství

Číslo závěrečné práce:

7 – BSI - 2025

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Svoboda** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **518944**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Dynamické vnitřní prostředí a jeho vliv na tepelný komfort osob

Název bakalářské práce anglicky:

Dynamic Indoor Environment and Its Impact on Occupants' Thermal Comfort

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Zavřel, Ph.D. katedra softwarového inženýrství FIT

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

Datum zadání bakalářské práce: **25.03.2025**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.06.2025**

Vladimír Zmrhal
Digitálně podepsal(a)
Vladimír Zmrhal
Datum: 28.03.2025
17:37:49

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Jan Skočilas
Digitálně podepsal(a)
Jan Skočilas
Datum: 29.03.2025
16:29:16

podpis proděkana(ky) z pověření děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

01.04.2025

Datum převzetí zadání

Svoboda Michal

Podpis studenta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Svoboda** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **518944**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Dynamické vnitřní prostředí a jeho vliv na tepelný komfort osob

Název bakalářské práce anglicky:

Dynamic Indoor Environment and Its Impact on Occupants' Thermal Comfort

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je provést systematickou literární rešerši zaměřenou na posouzení vnitřního prostředí při dynamických změnách tepelně-vlhkostních podmínek v kontextu řízení spotřeby energie prostřednictvím chytrých sítí. Práce se zaměří na identifikaci typických dopadů na vnitřní prostředí, které mohou být vyvolány například reakcí na proměnlivé cenové signály, dostupnost obnovitelných zdrojů nebo dalšími strategiemi řízení v inteligentních budovách. Dále se bude věnovat analýze fyziologických reakcí člověka na náhlé změny mikroklimatu, i v rámci běžně akceptovaných komfortních rozmezí, a zhodnocení současných metod posuzování tepelné pohody (např. PMV a PPD dle ČSN EN ISO 7730), s důrazem na jejich omezení při aplikaci na nestacionární podmínky. Součástí práce bude také přehled současných přístupů k modelování interakce člověka s dynamicky se měnícím vnitřním prostředím, zpracovaný na úrovni literární rešerše.

Seznam doporučené literatury:

Mishra, A. K., M. G. L. C. Loomans, and J. L. M. Hensen. "Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions—An overview." *Building and Environment* 109 (2016): 82-100.

PROHLÁŠENÍ

Já, níže podepsaný

Příjmení, jméno studenta: Svoboda Michal
Osobní číslo: 518944
Název programu: Strojní inženýrství

prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem

Dynamické vnitřní prostředí a jeho vliv na tepelný komfort osob

vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu.

Prohlašuji, že jsem v průběhu příprav a psaní závěrečné práce použil nástroje umělé inteligence. Vygenerovaný obsah jsem ověřil. Stvrzuji, že jsem si vědom, že za obsah závěrečné práce plně zodpovídám.

V Praze dne 15.04.2025

Michal Svoboda

.....
podpis

SOUHRN

Bakalářská práce se zabývá vlivem flexibilního řízení HVAC systémů na tepelný komfort uživatelů budov v kontextu energetické flexibility a chytrých sítí. Na základě rešerše odborné literatury jsou popsány fyziologické, behaviorální a psychologické aspekty vnímání komfortu v dynamicky se měnícím vnitřním prostředí.

Jádrem práce je analýza hranic a podmínek zachování tepelného komfortu při dynamických změnách vnitřního prostředí, a to prostřednictvím syntézy poznatků z literatury i případových studií zaměřených na řízené zásahy do vnitřního prostředí budov za účelem omezení nebo přesunu spotřeby energie. Hodnoceny jsou jak fyziologické a percepční reakce uživatelů na tyto zásahy, tak metodické přístupy k měření komfortu.

Výsledky ukazují, že většina studií se komfortem zabývá pouze formálně a zaměřuje se na udržení teploty v úzkém pásmu bez ohledu na rychlost či směr změny. Dynamické aspekty komfortu, jako je aliezie, habituace nebo percepce rychlých změn, zůstávají opomíjeny. Reálná subjektivní zpětná vazba uživatelů byla zahrnuta pouze ve dvou studiích.

Práce poukazuje na metodické nedostatky současných strategií řízení HVAC a navrhuje využití poznatků z fyziologie člověka pro návrh flexibilních, a přitom komfortních strategií řízení vnitřního prostředí.

SUMMARY

This bachelor thesis examines the impact of flexible HVAC system control on the thermal comfort of building occupants in the context of energy flexibility and smart grids. Based on a review of the scientific literature, the thesis describes the physiological, behavioral, and psychological aspects of comfort perception in dynamically changing indoor environments.

The core of the work is an analysis of the boundaries and conditions for maintaining thermal comfort during dynamic changes in the indoor environment, achieved through a synthesis of findings from the literature and case studies focused on controlled interventions in building environments to reduce or shift energy consumption. Both the physiological and perceptual responses of users to these interventions, as well as the methodological approaches to comfort assessment, are evaluated.

The results show that most studies address comfort only formally, focusing on maintaining temperature within a narrow range regardless of the rate or direction of change.

Dynamic aspects of comfort such as alliesthesia, habituation, or the perception of rapid changes are often neglected. Genuine subjective feedback from users was included in only two studies.

The thesis highlights methodological shortcomings in current HVAC control strategies and proposes the use of knowledge from human physiology for the design of flexible, yet comfortable, approaches to indoor environment management.

KLÍČOVÁ SLOVA

- tepelný komfort
- dynamické vnitřní prostředí
- adaptace na změny teploty
- aliestezie
- overshoot
- habituace
- demand response
- flexibilní řízení HVAC
- model prediktivního řízení (MPC)
- řízení na základě setpointu
- předehřev / předchlazení
- nízkoenergetické budovy
- chytré sítě (smart grid)
- energetická flexibilita budov

KEYWORDS

- thermal comfort
- dynamic indoor environment
- temperature change adaptation
- alliesthesia
- overshoot
- habituation
- demand response
- flexible HVAC control
- model predictive control (MPC)
- setpoint-based control
- preheating / precooling
- low-energy buildings
- smart grid
- energy flexibility in buildings

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Souvislosti a motivace práce.....	9
1.2	Přístup k řešeršní práci.....	10
2	Stávající metody pro hodnocení tepelného komfortu.....	11
2.1	Precepční jevy lidského organismu na dynamicky se měnící vnitřní prostředí.....	12
2.1.1	Teplotní spády a drifty: vliv rychlosti změny teploty na komfort	12
2.1.2	Overshoot.....	14
2.1.3	Aliestezie.....	17
2.1.4	Habituace a fyziologická adaptace	19
2.1.5	Vliv aklimatizace a geografický původ.....	24
2.1.6	Vliv proudění vzduchu na tepelný komfort.....	26
2.1.7	Individuální a kontextové faktory ovlivňující tepelný komfort	30
2.2	Modely hodnocení tepelného komfortu.....	32
2.2.1	Fangerův model.....	32
2.2.2	Adaptivní modely	33
2.2.3	Omezení modelů v dynamických podmínkách	33
2.3	Syntéza: hranice a podmínky zachování komfortu.....	35
3	Analýza vlivu odezvy techniky prostředí na požadavky sítě: souhrn případových studií	36
3.1	Charakteristika analyzovaných studií.....	37
3.2	Syntéza poznatků.....	40
4	Diskuse.....	41
4.1	Zhodnocení výsledků případových studií	42
4.2	Reflexe komfortu a fyziologie v kontextu výsledků	44
4.3	Omezující faktory a přenositelnost výsledků.....	47
4.4	Doporučení pro praxi	48

5	Závěr.....	49
	Seznam použité literatury	51

1 Úvod

1.1 Souvislosti a motivace práce

Tepelný komfort osob je jedním z určujících parametrů kvality vnitřního prostředí budov a jeho zajištění je tradičně jedním z hlavních cílů návrhu i provozu systémů HVAC. Klasické přístupy k hodnocení komfortu, založené na modelech PMV/PPD a uvedené například v normách ČSN EN ISO 7730 či ASHRAE 55, vycházejí z předpokladu ustálených podmínek prostředí. Tento přístup se dlouhodobě osvědčil v kontextu mechanicky větraných a klimatizovaných budov, ale jen omezeně reflektuje reálnou proměnlivost vnitřního prostředí a individuální odezvu uživatelů [1].

Současně dochází k zásadní proměně širšího energetického kontextu. S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů energie v elektrické síti přibývá období s přebytkem nebo naopak nedostatkem energie, což vytváří potřebu odezvy na poptávku sítě na straně spotřebitelů. Budovy, a zejména jejich systémy technického zařízení, jsou v tomto ohledu považovány za jeden z klíčových nástrojů tzv. demand response, schopnosti přizpůsobit spotřebu aktuálním podmínkám v síti. V této souvislosti se do popředí dostávají strategie řízení, které umožňují krátkodobě měnit provozní podmínky (např. změna žádané/požadované teploty v systému HVAC) a to s ohledem na komfortní meze. [1], [2].

Úspěšné využití energetické flexibility však závisí nejen na algoritmu řízení, ale i na technologickém vybavení budovy. Například přítomnosti tepelných čerpadel, fotovoltaických panelů, akumulčních zásobníků nebo baterií. Právě kombinace těchto prvků společně s tepelnou setrvačností budov rozhoduje o tom, do jaké míry lze spotřebu energie posunout v čase. Zároveň růst podílu OZE, jako jsou solární nebo větrné elektrárny, zvyšuje četnost situací, kdy je žádoucí koordinovaně zvyšovat nebo omezovat odběr energie na úrovni jednotlivých objektů.

Tyto nové požadavky však přinášejí zásadní výzvu: do jaké míry lze akceptovat měnící se vnitřní prostředí a to i v rámci obecně akceptovaných komfortních mezí v rámci flexibilního řízení techniky prostředí? A jaké postupy anebo nástroje jsou pro hodnocení komfortu vhodné v podmínkách, kde je prostředí proměnlivé, například při kolísající teplotě nebo různých strategiích předběžného ohřevu či časového posunu odběru? Mnohé ze stávajících studií ukazují, že flexibilní řízení HVAC systémů je technicky proveditelné a přináší energetické úspory [3], [4], avšak samotný komfort je často hodnocen pouze nepřímo nebo zcela opomíjen, případně s předpokladem, že jsou dodrženy komfortní meze dle uvedených standardů. Zůstává tak nejasné, do jaké míry budou uživatelé dynamické změny vnitřního prostředí, zejména rychlosti změny operativní teploty, vnímat jako komfortní.

Hlavním záměrem této práce je proto prozkoumat, jak různé pokročilé strategie řízení HVAC systémů zohledňují individuální a dynamické aspekty komfortu a zda tyto přístupy využívají přirozenou schopnost uživatelů adaptace na měnící se podmínky. Práce kombinuje rešerši odborné literatury zaměřené na percepci komfortu v dynamickém vnitřním prostředí s přehledem případových studií, které dokumentují reálné přístupy k flexibilnímu řízení spotřeby. V těchto pracích se soustředíme, nakolik se komfortní kritéria v těchto studiích skutečně sledují a jakým způsobem jsou vyhodnocována. Dále jaké důsledky mohou mít

zvolené přístupy pro uživatelskou zkušenost i pro potenciál stabilizace elektrické sítě prostřednictvím chytrého řízení budov.

Práce propojuje poznatky z oblasti fyziologie, posuzování kvality vnitřního prostředí a technického zařízení budov. Zaměřuje se na faktory, které ovlivňují komfort v dynamickém prostředí, a na to, jakým způsobem může být komfort zohledněn při krátkodobých změnách provozních podmínek budov.

1.2 Přístup k rešeršní práci

Tato práce je koncipována jako kritická rešerše, s cílem propojit poznatky z oblasti vnímání tepelného komfortu v dynamickém prostředí se současnými přístupy k flexibilnímu řízení budov. Celý přístup je rozdělen do dvou hlavních částí, které na sebe volně navazují.

První část rešerše uvedena ve druhé kapitole je zaměřená na to, jak lidský organismus vnímá rychlé či pozvolné změny vnitřního prostředí, zejména teploty a proudění vzduchu. Rešerše zahrnuje fyziologické a behaviorální aspekty vnímání komfortu a zaměřuje se na jevy jako overshoot, alieście, habituace nebo vliv očekávání a kontroly. V této části se snažíme vymezit hranice a podmínky, za kterých lze považovat vnitřní prostředí za komfortní i při dynamických změnách, a formulovat předpoklady pro hodnocení komfortu v aplikovaných strategiích.

Druhá část rešerše uvedena ve třetí kapitole je analýza případových studií zaměřených na řízené zásahy do vnitřního prostředí budov pro dosažení vhodné odezvy na poptávku sítě. Tyto studie byly vybrány z odborných databází (např. ScienceDirect) s důrazem na publikace z posledních deseti let. Do výběru byly zařazeny pouze práce, které uvádějí alespoň základní informace o průběhu zásahu, změnách vnitřního prostředí a kontextu aplikace. Typická klíčová slova pro vyhledávání byla: demand response, tepelný komfort, flexibilní řízení HVAC, energetická flexibilita budov.

V této části vyhodnocujeme, do jaké míry jednotlivé strategie řízení HVAC systémů zohledňují tepelný komfort uživatelů, a zda pracují s poznatky o lidské adaptaci na proměnlivé prostředí. Dílčí hodnocení se zaměřuje například na typ použité technologie, způsob řízení, rozsah a charakter zásahu, způsob měření vnitřního prostředí a typ sledování komfortu (model, subjektivní hodnocení, expertní odhad). Pozornost je věnována i uživatelským aspektům – například zda měli uživatelé možnost ovlivnit podmínky, zda byli o zásahu informováni, a zda se objevily stížnosti či změny chování.

Hodnocení je vedeno podle strukturovaného rámce, který umožňuje porovnávat vybrané publikace z oblasti flexibilního řízení budov. Tento rámec není zaměřen na numerické porovnání výsledků, ale slouží k identifikaci klíčových faktorů, které vedly k úspěšné nebo problematické realizaci flexibilního řízení z pohledu zachování komfortu. Výsledná syntéza umožňuje formulovat závěry o možnostech i limitech současných přístupů a nabídnout doporučení pro jejich zlepšení případně možného zvýšení flexibilního potenciálu budov.

2 Stávající metody pro hodnocení tepelného komfortu

Tepelný komfort člověka představuje subjektivní stav spokojenosti s okolním prostředím, kdy člověk nepocítuje ani chlad, ani nadměrné teplo a vnímá tedy tepelné podmínky jako vyhovující. Zatímco tradiční modely komfortu předpokládají typicky ustálené podmínky, skutečné vnitřní klima se může dynamicky měnit – teplota kolísá a mění se rychlost proudění vzduchu, a to v závislosti na provozních podmínkách, řízení HVAC systémů či vnějších vlivech. Tato rešeršní část se proto zaměřuje především na to, jak lidský organismus vnímá a zpracovává dynamické změny teploty a proudění, které patří k hlavním faktorům ovlivňujícím tepelný komfort v krátkodobém horizontu.

V této práci je pojem „dynamické vnitřní prostředí“ používán výhradně pro situace, kdy dochází ke krátkodobým až střednědobým změnám základních parametrů vnitřního mikroklimatu, zejména teploty a rychlosti proudění vzduchu v horizontu minut až hodin. Jde tedy především o změny způsobené řízením případně výpadku HVAC systémů nebo jinými pokročilými provozními zásahy (např. v rámci odezvy na poptávku sítě), nikoli o dlouhodobé vícedenní či sezónní adaptace na klima. Dynamické vnitřní prostředí je v této rešerši zkoumáno z pohledu percepčních jevů jako například tzv. overshoot, aliestezie nebo habituace, které při těchto změnách vznikají, a jejich dopadu na subjektivní vnímání tepelného komfortu.

Lidský organismus zajišťuje stabilitu tělesné teploty prostřednictvím termoregulačních mechanismů, jejichž cílem je udržení homeostáze (rovnovážného vnitřního stavu organismu). Při náhlém poklesu teploty povrchu pokožky, či středu těla dochází ke vazokonstrikci (zúžení cév) a aktivaci termogeneze (produkce tepla v těle), zatímco při zvýšení teploty povrchu pokožky, či středu těla se spouští vazodilatace (rozšíření cév) a pocení. Tyto procesy však nejsou bezprostřední. Mezi změnou prostředí a reakcí těla existuje určitá latence, jejíž délka závisí na rychlosti, rozsahu změny i aktuálním stavu organismu. Důsledkem je, že i krátkodobé teplotní výkyvy, například náhlé ochlazení vzduchu nebo zvýšení proudění, mohou být subjektivně vnímány jako diskomfortní, přestože výsledné podmínky zůstávají v akceptovaném rozmezí komfortního pásma dle PMV/PPD modelu. [5], [6].

Ačkoliv vyhodnocení vnitřního prostředí běžně zahrnuje teplotní i vlhkostní parametry, vliv relativní vlhkosti vzduchu není v této rešerši analyzován samostatně. Práce se zaměřuje především na změny teploty a případně rychlosti proudění vzduchu, které jsou v rámci pokročilých řídicích strategií hlavními proměnnými. Většina experimentálních studií,

ze kterých práce vychází, udržuje vlhkost v kontrolovaném rozmezí (obvykle 40–60 % RH), aby minimalizovala její vliv na hodnocení komfortu. V krátkodobých přechodových jevech, které jsou předmětem této práce, je vlhkost takřka stabilní a její okamžitý dopad na tepelný komfort je oproti změně teploty či proudění vzduchu méně významný. Aktivní řízení vlhkosti není v běžných budovách standardem, což odpovídá i praxi popsané v odborné literatuře. Pokud byla vlhkost ve studovaných publikacích výslovně sledována, je její vliv v práci zohledněn [1], [7], [8].

2.1 Precepční jevy lidského organismu na dynamicky se měnící vnitřní prostředí

2.1.1 Teplotní spády a drifty: vliv rychlosti změny teploty na komfort

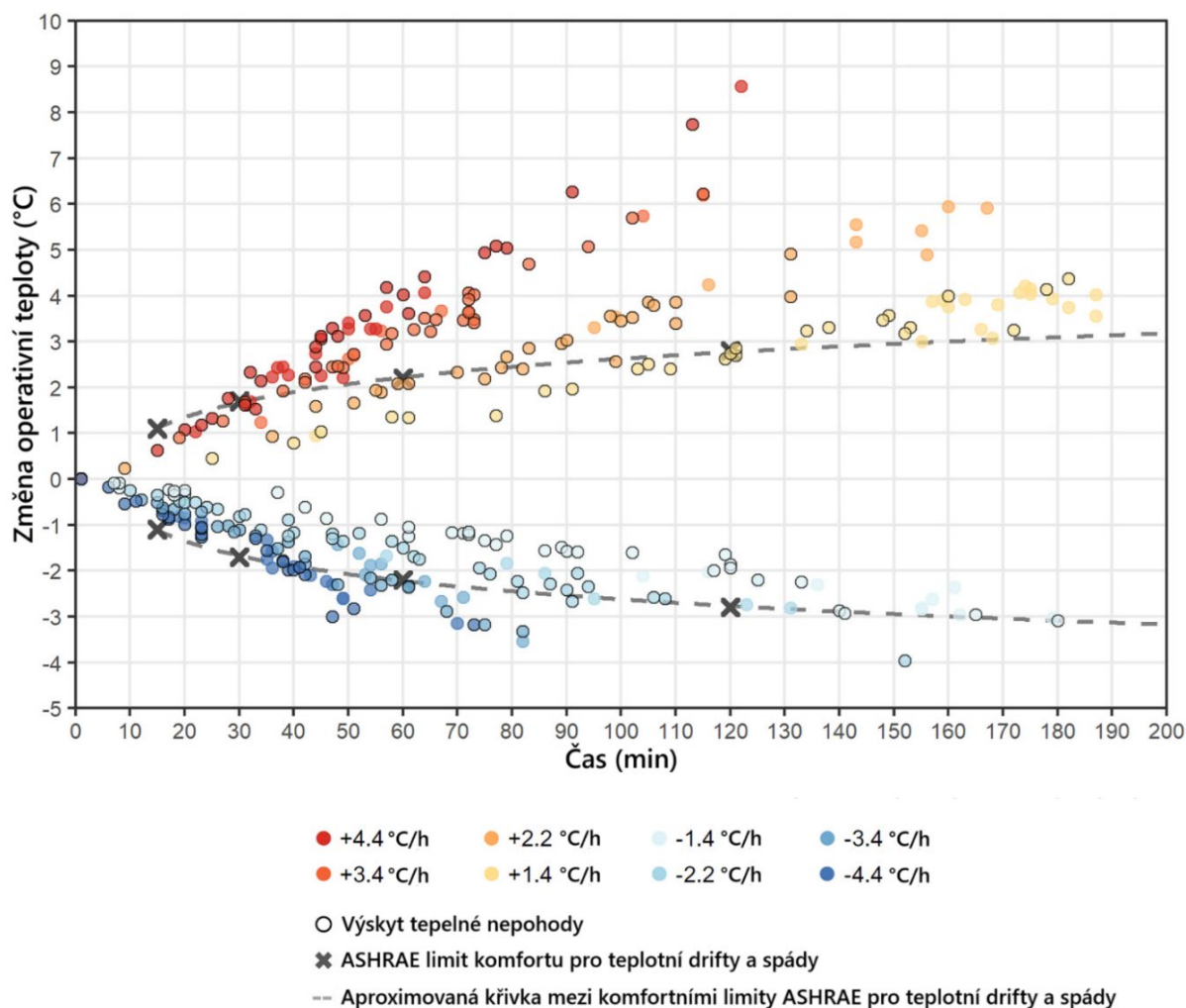
Vellei a kol. rozlišují mezi aktivními teplotními spády a pasivními drifty (řízenou monotónní, rovnoměrnou, necyklickou změnou operativní teploty nebo teplotním driftem, který není aktivně řízenou změnou). U velmi pomalých driftů do 0,5 °C/h nebyl pozorován významný rozdíl oproti ustáleným podmínkám. Naproti tomu při aktivně řízených teplotních spádech v rozsahu 1,5 až 2,5 °C/h se začala projevovat výrazná interindividuální variabilita. U některých účastníků se diskomfort objevil již při spádu kolem 1,5 °C/h, zatímco jiní tolerovali i hodnoty přesahující 2,5 °C/h bez subjektivní odezvy. Autoři tyto rozdíly částečně přisuzují fyziologickým faktorům, přičemž experimentálně doložili, že intenzita percepční reakce na změnu teploty byla nižší u osob s vyšším indexem tělesné hmotnosti (BMI – Body Mass Index) a současně vyšší u starších účastníků. Vyšší BMI tedy souvisel s tlumenou citlivostí, zatímco vyšší věk s vyšší reaktivitou na dynamiku prostředí. Autoři zároveň upozorňují, že jejich závěr o vlivu věku odporuje některým dřívějším studiím, podle nichž stárnutí obecně snižuje tepelnou citlivost. Tento rozpor přisuzují složení svého vzorku, který nezahrnoval osoby starší 65 let, a možnému vlivu hormonálních faktorů (např. menopauzy) [9].

Z dostupné literatury vyplývá, že mezi autory nepanuje shoda v tom, jak rychlá změna teploty je ještě vnímána jako komfortní. Studie [10] na základě dostupných dat doporučuje, aby v běžném provozu nebyl překročen teplotní spád $\pm 1,5$ °C/h, což zároveň koreluje s možným výskytem overshootu. Tato hodnota je považována za návrhové maximum, které by mělo zajistit, že většina uživatelů nebude vystavena diskomfortu.

Luo a kol. na základě experimentu v klimatické komoře zjistili, že při spádu ± 1 °C/h se subjektivní hodnocení komfortu prakticky nemění, zatímco při rychlosti 2,4 °C/h již dochází

ke zvýšení PMV mimo komfortní rozsah. Autoři proto označují $2,4\text{ °C/h}$ jako praktickou mez, nad kterou je výrazně zvýšené riziko vzniku diskomfortu [7].

Favero a kol. za počátek diskomfortu považovali moment, kdy účastník aktivně reagoval. Například změnou oblečení nebo přerušením expozice. Při teplotním spádu $2,2\text{ °C/h}$ (ohřívání) docházelo k těmto zásahům až relativně pozdě, zatímco při ochlazování o $1,4\text{ °C/h}$ reagovali účastníci výrazně dříve, a to ještě v rámci komfortního pásma predikovaného standardem ASHRAE 55. Tato asymetrie mezi směry změny bude blíže rozebrána v kapitole 2.3.2. Výsledky [11] naznačují, že norma ASHRAE 55 je z hlediska dynamiky změn příliš přísná při ohřívání a současně příliš mírná při ochlazení. Tento rozdíl je vizuálně ilustrován na Obrázku 2-8.



Obr. 2-8 Výskyt subjektivního diskomfortu při různých teplotních spádech a porovnání s limity modelu ASHRAE 55. Převzato z [11]

Zhao a kol. potvrzují, že i krokové změny teploty vzduchu v rozmezí 1–2 °C/h mohou výrazně snižovat vnímanou přijatelnost prostředí, přičemž subjektivní reakce na ochlazování bývá ostřejší než na ohřívání [12]. Studie [8] uvádí, že teplotní spády $\pm 1,5$ °C/h jsou obecně tolerovatelné, zejména pokud probíhají pozvolna, a přestože někdy jde o drift, reakce byly srovnatelné s řízenou změnou.

Na tyto laboratorní poznatky navazují i data z reálného provozu. Kang a kol. sledovali domácnosti zapojené do scénářů řízení poptávky. Při ochlazení o přibližně 1,5 °C/h docházelo k manuálním zásahům do nastavení termostatu již po 70 minutách, zatímco při ohřívání reagovali uživatelé až po zhruba 140 minutách. Frekvence zásahů byla navíc vyšší s větší variabilitou teploty vzduchu mezi dílčími prostory domácností [13].

Jebaei a kol. ve své simulační studii potvrdili, že při změně teploty vzduchu teplotní spády kolem ± 1 , °C /h mohou být dobře tolerovány, pokud jsou předvídatelné, pozvolné a v souladu s očekáváním uživatelů. Výsledky zároveň ukazují, že chování uživatelů (např. ochota upravit nastavení) závisí nejen na velikosti změny, ale i na tom, zda jde o změnu řízenou či nikoliv [4].

Rozdíly mezi jednotlivými výsledky lze do značné míry přičíst právě rozdílné metodice. Zatímco laboratorní studie umožňují přesnou kontrolu nad prostředím, často pracují s idealizovanými podmínkami, kde je omezena možnost zásahu ze strany účastníků. Naproti tomu experimenty v polo-realistickém nebo reálném prostředí (např. domácnosti) umožňují lépe zachytit behaviorální aspekty vnímání komfortu, jako je vliv očekávání, vnímání kontroly či okamžité reakce.

Z hlediska predikce komfortu přináší doplňující pohled studie [14], která navrhuje rozšíření prediktivních modelů o parametr rychlosti změny teploty. Tento přístup umožňuje lépe postihnout vznik přechodového diskomfortu v dynamických podmínkách a doplnit tak tradiční statické modely (např. PMV/PPD).

2.1.2 Overshoot

Dynamické změny vnitřního prostředí, zejména rychlé teplotní přechody, vyvolávají v lidském organismu specifické percepční jevy. Jedním z nejvýznamnějších je jev přechodného zesílení tepelného vjemu bezprostředně po změně teploty, který je označován jako thermal overshoot.

Overshoot vzniká v důsledku toho, že termoreceptory v kůži nereagují pouze na aktuální hodnotu teploty, ale také na rychlost její změny. Při rychlých změnách teploty organismus

nestačí okamžitě správně odhadnout nový stabilní stav a v důsledku toho vnímá nové podmínky intenzivněji, než by odpovídalo ustálenému fyziologickému nastavení [1], [9], [14].

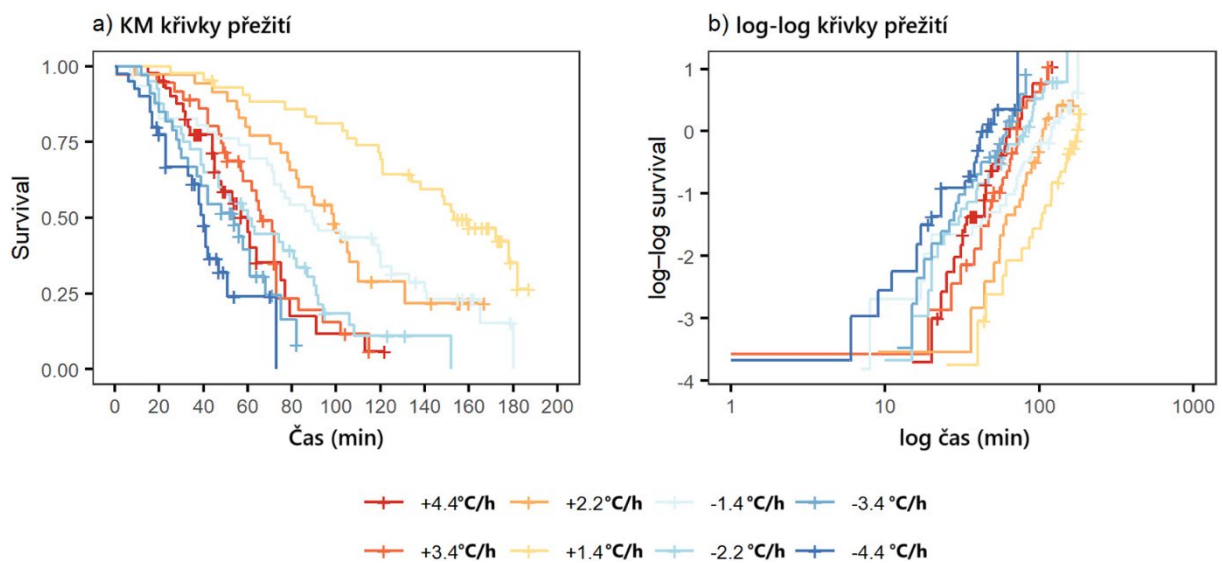
Tento přechodný jev znamená, že krátkodobě pociťujeme prostředí jako výrazně chladnější nebo teplejší, než jaké skutečně je, a to až do chvíle, kdy se organismus adaptuje na nové podmínky. Overshoot je proto klíčovým mechanismem vysvětlujícím, proč rychlé změny vnitřního klimatu mohou způsobit subjektivní diskomfort, a to i v případech, kdy by nová stabilní teplota ležela v rámci běžného komfortního rozmezí [1], [9].

Velikost a intenzita overshootu jsou úzce závislé na rychlosti změny teploty. Podle [9] se výrazný overshoot projevuje při teplotních změnách přesahujících rychlost 3 °C/h , zatímco při pomalejších změnách kolem $1,5\text{ °C/h}$ je nepohoda spojená s přechodovým jevem mírnější. Ve studii [11] pozorovali overshoot již při teplotních spádech $\pm 1,5\text{ °C/h}$, přičemž rychlejší změny vedly k větší intenzitě vjemu. Luo a kol. při velmi pomalých změnách (1 °C/h) zaznamenali pouze minimální odchylky v subjektivním vnímání [7]. Modely [14] naznačují, že při mírných změnách v rozmezí $1\text{--}2\text{ °C/h}$ dochází k adaptaci během přibližně 10 minut, což přispívá k rychlému ustálení vjemu a overshoot je tímto minimalizován. Fyziologickým základem overshootu je dynamická reakce periferních termoreceptorů v kůži na změnu teploty. Termoreceptory citlivé na chlad jsou četnější, uložené blíže k povrchu kůže (cca $0,15\text{--}0,17\text{ mm}$) a primárně detekují rychlost poklesu teploty. Oproti tomu termoreceptory citlivé na teplo jsou méně početné a uložené hlouběji (cca $0,3\text{--}0,6\text{ mm}$), přičemž reagují spíše na akumulaci tepla než na jeho rychlou změnu [1], [9], [14].

Ačkoli overshoot vzniká primárně v důsledku aktivace těchto periferních receptorů, významnou roli v celkovém vnímání teplotního stavu hrají také centrální termoreceptory umístěné ve vnitřních orgánech (např. játra, ledviny, žaludek) a v preoptické oblasti hypothalamu. Tyto receptory monitorují hlubokou tělesnou teplotu a podílejí se na homeostatické regulaci. Vzhledem k vyšší tepelné setrvačnosti uvnitř těla jsou méně ovlivněny rychlými změnami prostředí a přispívají spíše ke dlouhodobému vnímání prostředí než k okamžité sensorické odezvě spojené s overshoot efektem [11].

Důsledkem těchto anatomických a funkčních rozdílů je, že při náhlém ochlazení dochází k prudké aktivaci nervových drah a vzniká výraznější, rychlejší a subjektivně intenzivnější pocit nepohody spojené s „overshoot“ reakcí lidského organismu, zatímco při ohřívání je odpověď receptorů mírnější a pozvolnější. Výsledná percepční reakce je tedy asymetrická, přičemž subjektivní nepohodlí je při ochlazení obvykle intenzivnější [1], [9].

Tuto asymetrii dále podpořila studie [6], která popisuje, že dynamická odezva termoreceptorů citlivých na chlad je rychlejší a ostřejší než odezva termoreceptorů citlivých na teplo. Tento výsledek potvrzuje i experimentální studie [11], která využila Kaplan-Meierovu analýzu, statistickou metodu, která umožňuje sledovat, jak dlouho trvá, než u účastníků nastane určitá událost. V tomto případě znamená „survival“ na ose Y pravděpodobnost, že účastník v daném čase ještě zůstává v komfortu (nepocítil diskomfort). S přibývajícím časem survival/přežití klesá – to znamená, že postupně více účastníků začíná pociťovat diskomfort. Obrázek 2.1, část (a), ukazuje právě tento průběh Kaplan-Meierových křivek přežití v komfortu při různých rychlostech změny teploty. Část (b) zobrazuje log-log transformaci těchto křivek.



Obr. 2-1 KM křivky přežití (a) a log-log transformované křivky přežití (b) při různých rychlostech změny teploty. Převzato z [11]

V levé části (a) lze pozorovat, že při ochlazování (modré křivky) dochází k rychlejšímu nárůstu pravděpodobnosti diskomfortu ve srovnání s ohříváním (červené, oranžové a žluté křivky). Tento efekt je patrný napříč různými rychlostmi změny teploty, přičemž strmější teplotní spády vedou k rychlejšímu nástupu diskomfortu. Pravá část (b) znázorňuje log-log křivky přežití, které slouží k vizuálnímu posouzení, zda rychlost nástupu diskomfortu (tedy pravděpodobnost, že účastníci začnou vnímat diskomfort) zůstává v čase podobná mezi různými podmínkami. Pokud by tomu tak bylo, měly by křivky přibližně lineární a rovnoběžný tvar. Nelineární nebo se protínající křivky naznačují, že tempo vzniku diskomfortu se v čase mění a že směr změny (zahřívání vs. ochlazování) má odlišnou dynamiku [11].

Další faktory, jako individuální citlivost na změny teploty, jsou ovlivněny fyziologickými faktory, jak ukazuje [8], kde zjistili, že lidé vystavení dynamickým změnám teploty mají vyšší toleranci vůči přechodným změnám a mohou vnímat overshoot méně intenzivně.

2.1.3 Aliestezie

Tepelná aliestezie (thermal alliesthesia) je percepční jev, při němž stejný teplotní podnět může být subjektivně vnímán buď jako příjemný nebo nepříjemný v závislosti na vnitřním stavu organismu. Tento jev vysvětluje dynamickou vazbu mezi aktuálním fyziologickým stavem člověka a vnímáním změn teploty v prostředí. [1], [9].

Termín byl poprvé zaveden Cabanacem, který aliestezii definoval jako „*vlastnost daného stimulu vyvolávat potěšení nebo nelibost v závislosti na vnitřním stavu jedince*“. Podstatou tohoto jevu je snaha organismu minimalizovat tzv. thermoregulatory load-error – tedy rozdíl mezi aktuálním fyziologickým stavem a optimální (termoneutrální) podmínkou. Stimuly, které tento rozdíl zmenšují, jsou subjektivně vnímány jako příjemné (pozitivní aliestezie), zatímco podněty, které odchylku zvětšují, jsou vnímány jako nepříjemné (negativní aliestezie) [1].

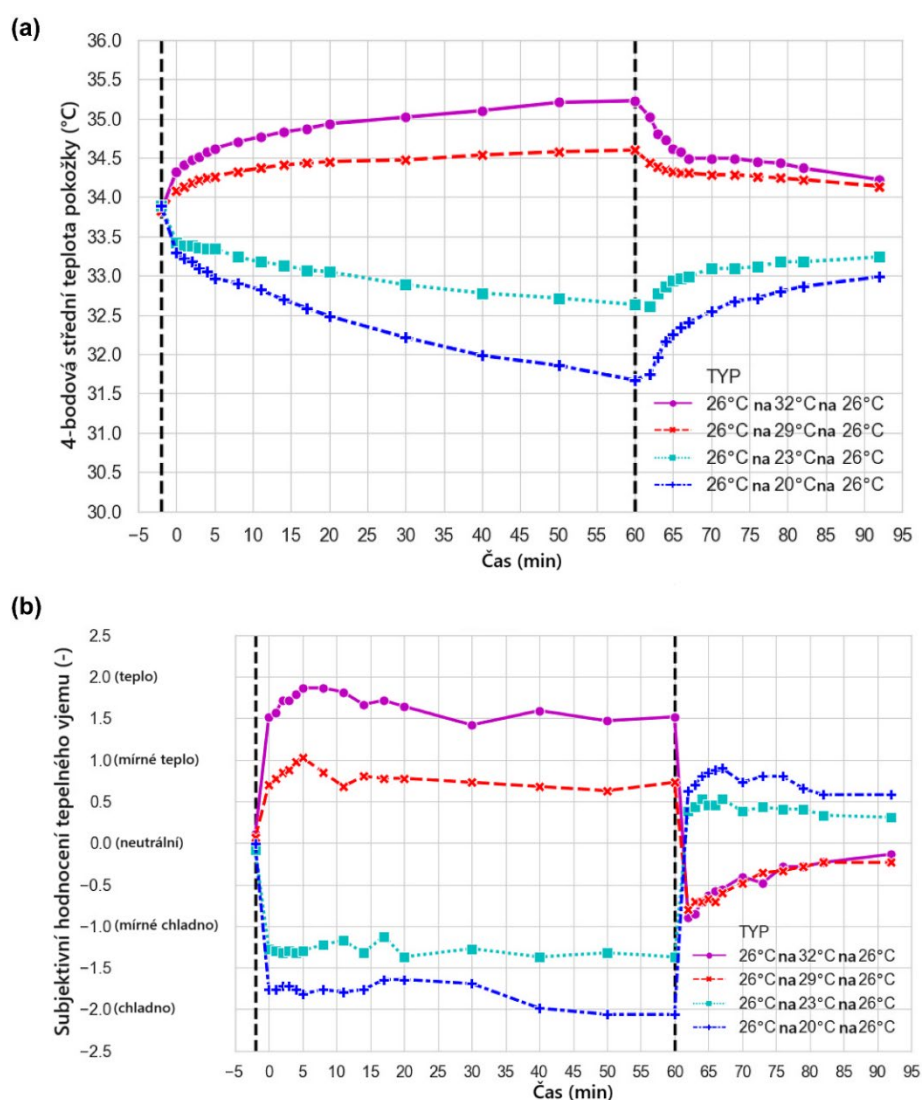
Dynamika tepelné aliestezie úzce souvisí se stavem tělesné teploty. Při hypertermii jsou ochlazující podněty vnímány jako výrazně příjemné, zatímco ohřívající stimuly působí nepříjemně. Naopak při hypotermii je situace opačná – ohřátí organismu je subjektivně pozitivní a ochlazení zvyšuje pocit diskomfortu. Typickým příkladem aliestezie je situace, kdy studený vánek působí jako příjemný stimul pro přehřátého člověka během horkého dne, zatímco pro podchlazeného jedince by stejný vánek představoval zhoršení pohodlí [1].

Z fyziologického hlediska je aliestezie výsledkem integrace signálů z periferních kožních a centrálních termoreceptorů v hypothalamu. Hypothalamus vyhodnocuje aktuální termální stav těla a moduluje subjektivní vnímání teplotních podnětů v závislosti na tom, zda přispívají k návratu k rovnovážnému stavu [9].

Experimentální potvrzení významu dynamiky vnímání komfortu přinesla studie Favero a kol., která ukázala, že subjektivní tepelný komfort není funkcí pouze aktuální teploty prostředí, ale závisí také na předchozím tepelném stavu jedince [11].

Významným faktorem ovlivňujícím aliestezii se ukázala být rychlost změny teploty. Při mírné a pozvolné změny podporují pozitivní aliestezii, zatímco příliš prudké změny mohou vést k negativnímu vjemu [9].

Praktický důkaz existence tohoto fenoménu lze nalézt v měřeních tepelných reakcí subjektů na různé trajektorie změn teploty, viz Obrázek 2-2. Přestože tato měření nebyla primárně zaměřena na studování tepelné alieście, projevy tohoto jevu lze z výsledků pozorovat. Výsledky ukazují, že po přechodu na stabilní teplotu prostředí 26 °C byl subjektivní tepelný vjem výrazně ovlivněn předchozím fyziologickým stavem účastníků. Zejména střední teplota kůže lépe odrážela subjektivní vnímání komfortu než samotná teplota vzduchu [1]. V grafu (b) je patrné, že subjekty, které byly původně vystaveny teplotě 20 °C, vnímaly nové prostředí jako teplejší ve srovnání se subjekty, které byly před změnou vystaveny teplotě 23 °C, což je v souladu s poznatkami o tepelné alieście.



Obr. 2-2 Vývoj střední teploty kůže a tepelného vjemu při dynamické změně teploty vnitřního prostředí. Převzato z [1]

Významný posun v pochopení alieście přinesla nedávná studie [15], která jako první využila kombinaci subjektivních dotazníků a objektivního měření EEG (neinvasivní vyšetřovací

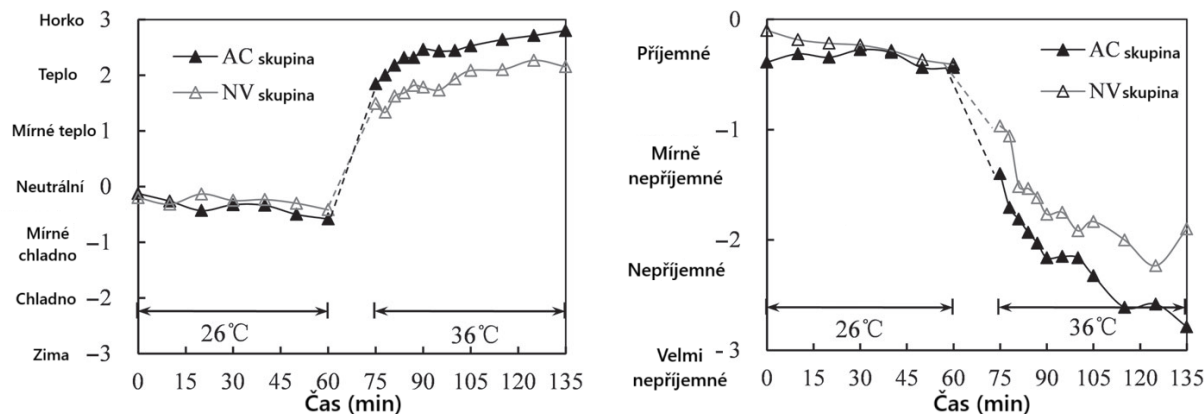
metoda, která umožňuje sledovat elektrickou aktivitu mozku pomocí elektrod připevněných na hlavu) k detailnímu sledování časového průběhu alieście při změně teploty prostředí. Výsledky ukazují, že efekt pozitivní alieście, tedy situace, kdy nová teplota napomáhá návratu k termoneutrálnímu stavu, je nejsilnější mezi 5. a 10. minutou po změně prostředí, kdy jej lze zachytit jak subjektivně, tak na úrovni mozkové aktivity. Po 10 minutách již efekt začíná slábnout a po 15 minutách mizí, což odpovídá plné adaptaci organismu. Všechny scénáře studie se týkaly pouze pozitivní alieście, tedy případů, kdy změna prostředí vedla ke komfortu. Tento výsledek představuje první přímý důkaz, že alieście není pouze subjektivní zkušeností, ale má i objektivní fyziologický základ měřitelný pomocí EEG.

2.1.4 Habituace a fyziologická adaptace

Habituace představuje proces, při němž se percepční odezva organismu na opakované dynamické změny teploty postupně snižuje. Tento jev má zásadní význam pro porozumění vnímání komfortu v prostředích, kde dochází k cyklickým nebo řízeným změnám teploty. Sensorická citlivost se v důsledku opakování stimulu tlumí, což zvyšuje toleranci k výkyvům prostředí a umožňuje subjektu lépe snášet změny, které by byly jinak vnímány jako nepříjemné [1], [8], [9].

Význam habituace se zvláště uplatňuje v prostředí budov s dynamicky řízeným klimatem. Umožňuje totiž využívat krátkodobé výkyvy teploty (například cyklické teplotní spády) bez toho, aby docházelo k významnému narušení subjektivního komfortu [9]. Místo snahy udržovat vnitřní prostředí v úzkém, energeticky náročném pásmu může být díky habituaci akceptovatelné i širší rozpětí teplot. Za předpokladu, že změny budou předvídatelné a organismus na ně bude mít čas reagovat [8], [11]. To otevírá cestu k efektivnímu řízení spotřeby energie například v rámci odezvy na poptávku, aniž by bylo nutné kompromitovat tepelnou pohodu [2], [9].

Tento efekt lze pozorovat například při sledování subjektivního vnímání tepelného prostředí po náhlé změně teploty. Ve studii [2] byly srovnávány dvě skupiny – osoby žijící dlouhodobě v přirozeně větraných budovách (NV) a osoby žijící v klimatizovaném prostředí (AC). Po přechodu z 26 °C na 36 °C hodnotila NV skupina vnímané teplo jako méně intenzivní než skupina AC, a to přesto, že byla vystavena stejným podmínkám (viz Obr. 2-3). To naznačuje vyšší úroveň adaptace díky častějšímu vystavení dynamického prostředí.



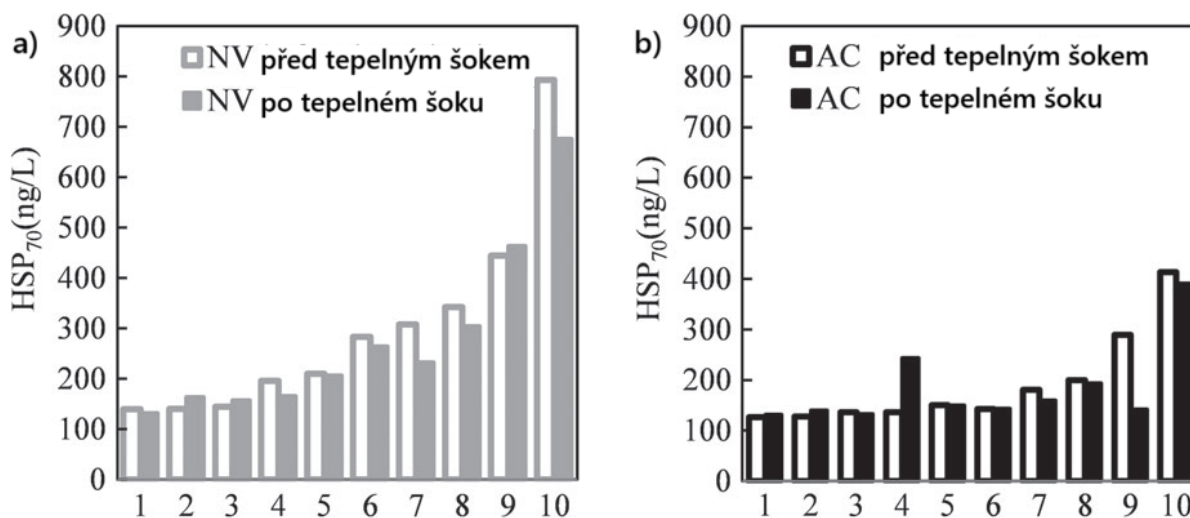
Obr. 2-3 Srovnání psychologických reakcí mezi skupinou s přirozeným větráním (NV) a skupinou s klimatizací (AC). Převzato z [2]

Kromě percepční habituace se uplatňuje i fyziologická adaptace, která probíhá na buněčné úrovni. Klíčovým ukazatelem této adaptace je zvýšená hladina heat-shock proteinu 70 (HSP₇₀), což je speciální ochranný protein, který hraje zásadní roli v ochraně buněk proti poškození způsobenému tepelným stresem. HSP₇₀ se váže na částečně denaturované proteiny, brání jejich agregaci, stabilizuje proteinové struktury a napomáhá při jejich opravě nebo degradaci. Tímto přispívá k udržování správné funkce buněk i v náročných podmínkách, například při vystavení teplotnímu stresu [16].

Kromě toho, že HSP₇₀ chrání buňky před poškozením, ovlivňuje také obranné reakce těla a pomáhá regulovat, kdy mají buňky přirozeně zaniknout. Zvýšená tvorba HSP₇₀ tedy není jen reakcí na teplotní stres, ale zároveň ukazuje, že organismus je lépe připraven zvládat a přizpůsobit se náročným podmínkám, například při výkyvech teploty [16].

V experimentu Zhu a kol. byla hladina HSP₇₀ měřena u dvou skupin: jedné žijící v přirozeně větraných budovách (NV) a druhé v prostředí s řízenou klimatizací (AC). Výsledky ukázaly, že NV skupina měla vyšší bazální i post-stresovou hladinu HSP₇₀ (viz Obr. 2-4), což svědčí o vyšší míře fyziologické adaptace na proměnlivé podmínky. To potvrzuje, že dlouhodobý pobyt v dynamickém prostředí nejen zvyšuje percepční toleranci, ale také posiluje ochranné buněčné mechanismy [2].

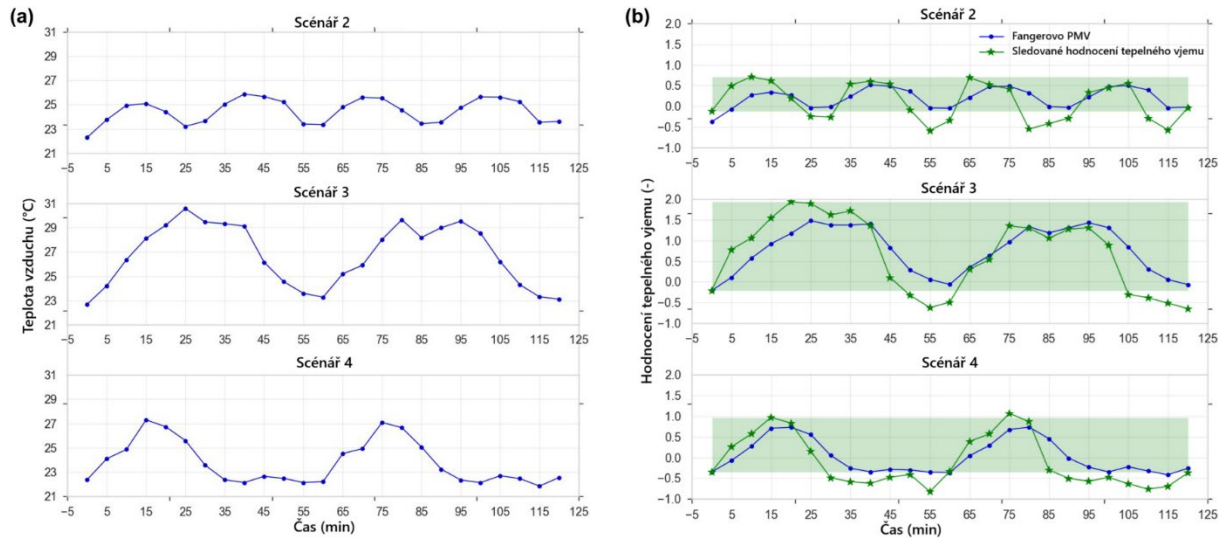
Z hlediska navrhování vnitřního prostředí budov lze tento poznatek využít pro podporu dynamického řízení vnitřního klimatu. Pokud je organismus pravidelně vystavován střídajícím se podmínkám, aktivují se jak behaviorální, tak fyziologické adaptační mechanismy, které ve svém důsledku umožňují udržet komfort i při širším rozpětí podmínek a zároveň snižují energetickou náročnost provozu.



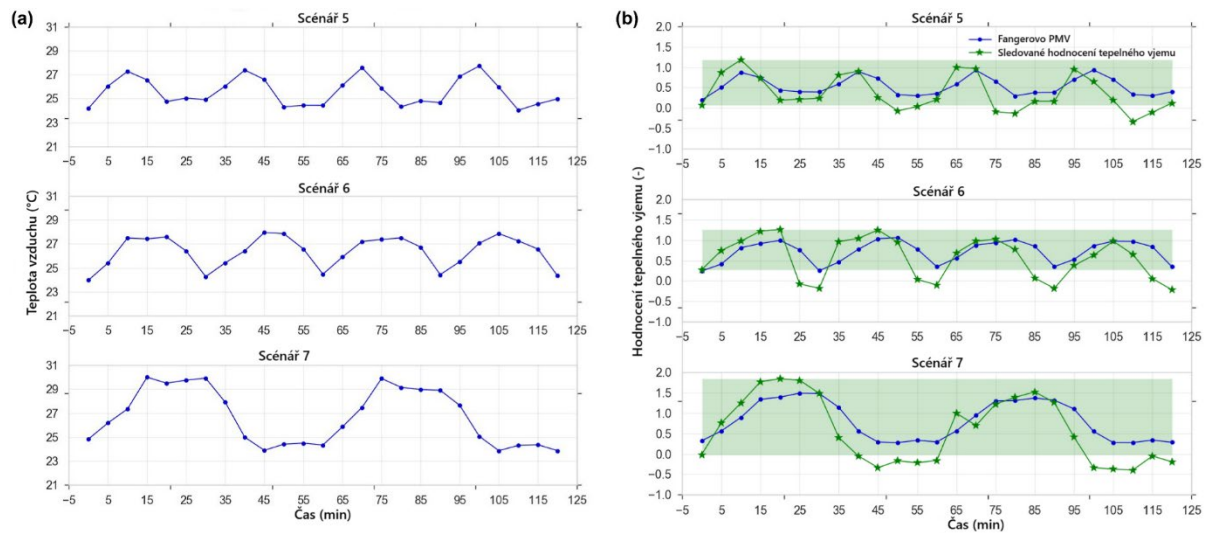
Obr. 2-4 Koncentrace proteinu HSP₇₀ před a po tepelném stresu. Na ose x jsou sériové označení subjektů ve studii. Převzato z [2]

Tato adaptace je výhodná i v kontextu řízení vnitřního klimatu budov. Lidé, kteří jsou zvyklí na dynamicky se měnící prostředí, si nejen subjektivně méně stěžují, ale jejich tělo má větší schopnost zvládat teplotní extrém. Díky tomu je možné provozovat prostředí s proměnlivým nastavením bez ztráty komfortu, což umožňuje větší flexibilitu při řízení spotřeby energie.

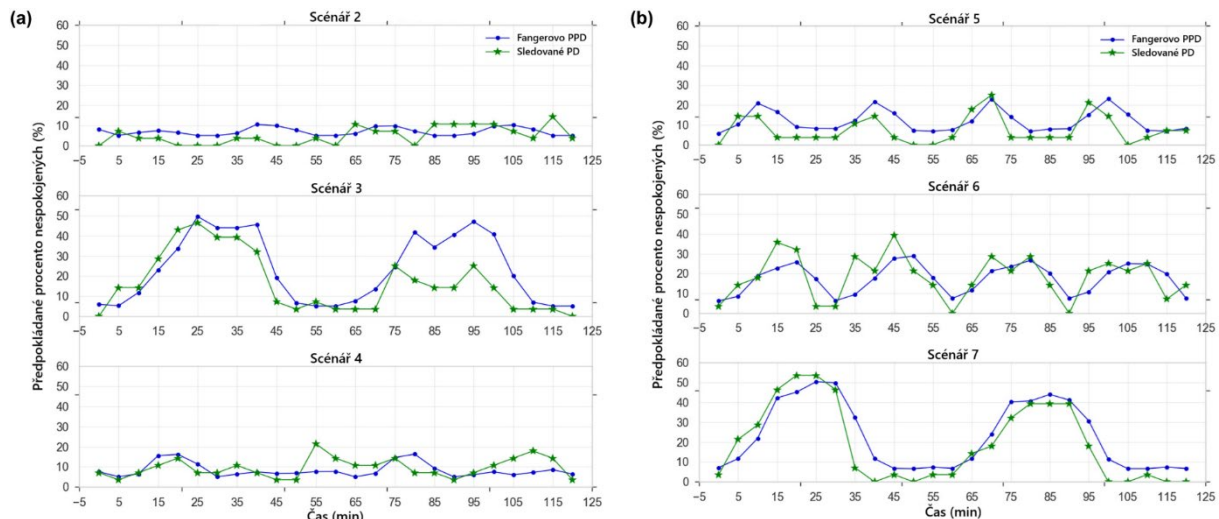
Vellei a kol. uvádějí výsledky experimentu, při kterém subjekty reagovaly na cyklické změny teploty. I přes pravidelné kolísání teploty o několik stupňů zůstával subjektivní tepelný vjem stabilnější a komfortní, než bylo očekávané (Mimo scénáře 3, 6 a 7, které vykazovaly velké teplotní spády anebo příliš vysokou teplotu ve špičce). To naznačuje, že lidé si na pravidelné změny teploty zvykají, jejich vnímání tepelného prostředí se postupně stabilizuje a PD (procentuální podíl nespokojených – percentage of dissatisfied) se postupně s opakujícími cykly snižuje [9].



Obr. 2-5 Teplota vzduchu (vlevo) a hodnocení tepelného vjemu (vpravo) zaznamenaného během cyklických teplotních změn. Převzato z [1]



Obr. 2-6 Teplota vzduchu (vlevo) a hodnocení tepelného vjemu (vpravo) zaznamenaného během cyklických teplotních změn. Převzato z [1]



Obr. 2-7 Procento nespokojených osob zaznamenané během cyklických teplotních změn.

Převzato z [1]

Kromě samotného vjemu se mění také míra nespokojenosti. Modelovaná míra nespokojenosti (PPD), vypočtená na základě indexu PMV, vykazuje výraznější výkyvy než reálně zaznamenané subjektivní hodnocení (PD). Lidé totiž nejsou v dynamickém prostředí nespokojeni tak často, jak by predikoval Fangerův model. To naznačuje, že i krátkodobý „trénink“ v proměnlivých podmínkách vede ke snížení negativních hodnocení tepelné pohody (viz Obrázek 2-7).

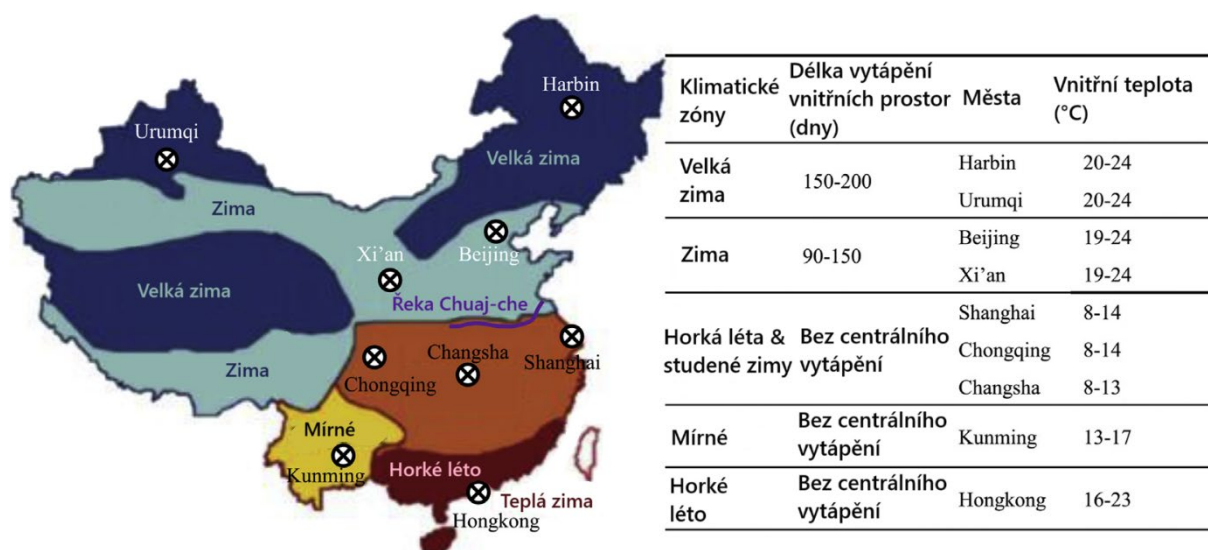
Důvodem rozdílu mezi modelovanou a skutečně zaznamenanou mírou nespokojenosti není pouze obecné podhodnocení PMV, ale také nesoulad mezi PMV a TSV (tepelným vjemem) po náhlých změnách teploty. Například po rychlém snížení teploty může být hodnota TSV subjektivně nižší oproti PMV, které zůstává v komfortním pásmu. Tento jev je způsoben overshootem, viz sekce 2.1.2, kdy percepce chladu krátkodobě překračuje hodnoty odpovídající fyzikálnímu stavu prostředí. Navzdory tomu však může být míra nespokojenosti (PD) reálně nízká, protože subjekt vnímá ochlazení jako příjemné – a to díky jevu aliestezie, viz sekce 2.1.3. Ta způsobuje, že i negativní vjem (např. nízké TSV) může být subjektivně přijatelný, pokud změna teploty snižuje vnitřní termoregulační zátěž. V důsledku toho je skutečně zaznamenaná PD nižší než modelované PPD, a to i v situacích, kdy se TSV více odchyluje od neutrální hodnoty než modelované PMV. Tento efekt se navíc postupně zmenšuje s opakováním změn. Jak ukazují grafy v Obrázcích 2-5 až 2-7, opakované cyklické změny teploty vedou ke snížení fluktuace subjektivního tepelného vjemu (TSV) i míry nespokojenosti (PD). Tento trend je přímým důsledkem habituace. Organismus si zvyká na kolísání prostředí a jednotlivé změny jsou pak subjektivně vnímány jako méně výrazné. Díky tomu dochází ke stabilizaci komfortu i v dynamickém vnitřním prostředí.

Z fyziologického hlediska se adaptace odehrává i na úrovni centrální nervové soustavy, zejména v hypothalamu, kde dochází ke zpracování signálů z periferních receptorů. Jak ukazuje [6], plasticita termoregulačních drah umožňuje adaptivní řízení tepelné rovnováhy organismu. Tato schopnost v kombinaci s habituací podmiňuje vyšší komfort i v méně stabilních prostředích. Na základě těchto poznatků je zřejmé, že dynamicky řízené vnitřní prostředí může být v mnoha ohledech výhodnější než tradiční stabilní přístup. Habituace a fyziologická adaptace umožňují vytvářet prostředí, které je flexibilní, úsporné a přitom komfortní, ať už se jedná o krátkodobé teplotní spády nebo dlouhodobě kolísavé podmínky.

2.1.5 Vliv aklimatizace a geografický původ

Vnímání tepelného komfortu je výsledkem nejen aktuálních fyzikálních parametrů prostředí, ale také dlouhodobého působení klimatických podmínek, kterému je člověk vystaven. Geografický původ a klimatická adaptace významně ovlivňují očekávání, toleranci a subjektivní reakci na změny vnitřního prostředí.

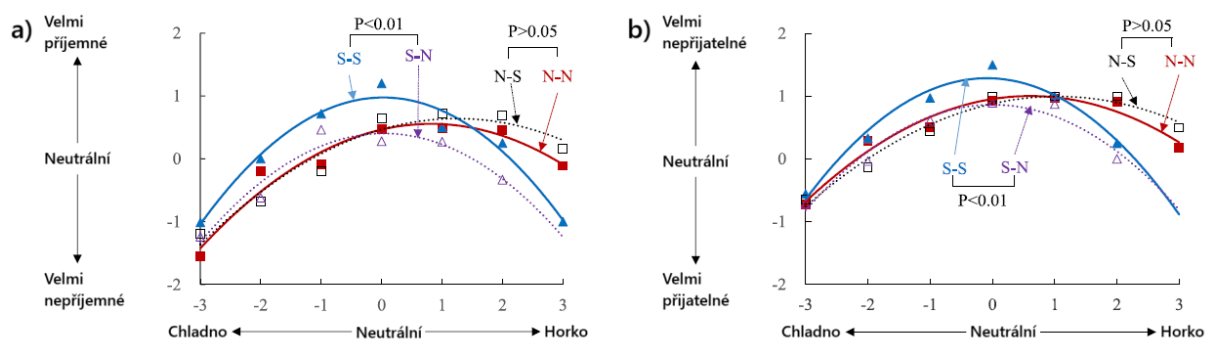
Luo a kol. podrobně analyzovali vliv dlouhodobého působení odlišných klimatických podmínek v rámci Číny. Zatímco v severních oblastech, kde je běžné centrální vytápění, dosahují vnitřní teploty v zimě přibližně 20 °C, jižní regiony bez centrálního vytápění vykazují v zimních měsících vnitřní teploty typicky v rozmezí 8–14 °C (viz Obr. 2-9). Tento zásadní rozdíl v prostředí vedl k odlišným očekáváním a subjektivnímu vnímání komfortu obyvatel těchto oblastí. Obyvatelé severní Číny vykazovali vyšší nároky na vnitřní teplotu a byli citlivější na poklesy teploty, zatímco obyvatelé jižní Číny tolerovali chladnější prostředí s menšími projevy diskomfortu [7].



Obr. 2-9 Rozdělení regionů v Číně podle systému vytápění. Převzato z [7]

Rozdíly byly kvantifikovány na základě rozsáhlého souboru dat čítajícího téměř 1000 účastníků. U osob narozených a žijících v severní Číně (NN) bylo 79 % hodnocení na „neutrální“ nebo „horkou“ stranu spektra, což ukazuje, že tyto osoby byly zvyklé na vyšší vnitřní teploty a při jejich poklesu rychleji pociťovaly chlad a diskomfort. U osob narozených na severu, ale žijících na jihu (NS), to bylo 89 %, a u osob narozených na jihu, ale žijících na severu (SN) dokonce 94 %, což naznačuje, že i po přesunu do odlišných podmínek zůstávaly jejich tepelné preference do značné míry ovlivněny původním klimatem. Naproti tomu u osob narozených a žijících v jižní Číně (SS) bylo 74 % hodnocení na „chladnou“ stranu spektra, což odráží jejich vyšší toleranci k chladnějším podmínkám. Přes tyto rozdíly byla míra subjektivního komfortu v rámci jednotlivých skupin podobná, přičemž pozitivní hodnocení komfortu se pohybovalo kolem 60 % a akceptace vnitřního klimatu dosahovala více než 80 %. Tento paradox ukazuje, že dlouhodobé vystavení specifickým podmínkám formuje vnímání komfortu i schopnost přizpůsobit se různým teplotním režimům [7].

Tím, že osoby z jižní Číny byly dlouhodobě vystaveny chladnějším podmínkám, vykazovaly celkově vyšší odolnost vůči nižším teplotám. Naopak osoby ze severu, zvyklé na komfortně vytápěné interiéry, byly citlivější na pokles teploty, což naznačuje, že dlouhodobá expozice příznivějším podmínkám může vést k nižší toleranci odchylek od optimálního prostředí [7].



Obr. 2-10 (a) Vztah mezi tepelným vjemem a vnímáním komfortu (b) Vztah mezi tepelným vjemem a akceptovatelností prostředí. Převzato z [7]

Z Obrázku 2-10 je patrné, že osoby narozené a žijící v severních oblastech (NN) mají vyšší nároky na vnitřní teplotu vzduchu, zatímco obyvatelé jižních oblastí (SS) projevují vyšší toleranci k chladnějším podmínkám. Migranti (SN, NS) se pohybují mezi těmito extrémy v závislosti na délce pobytu v novém prostředí, což podtrhuje význam klimatické historie na vnímání komfortu.

Podobnou roli klimatické adaptace potvrzují i výsledky [17]. Srovnávali vnímání letních teplot mezi obyvateli Melbourne a Hongkongu. Přestože venkovní podmínky byly shodné, obyvatelé

Hongkongu, dlouhodobě žijící v teplejším klimatu, vykazovali vyšší toleranci k vyšším teplotám a nižší citlivost na horko. Tento výsledek naznačuje, že dlouhodobé vystavení určitému klimatickému režimu formuje nejen fyziologické reakce, ale také subjektivní očekávání týkající se komfortu.

Na individuální odlišnosti související s geografickým původem upozorňuje i Favero a kol. [11]. Autoři zaznamenali případ účastníka pocházejícího ze Švédska, který během experimentu snášel nižší vnitřní teploty bez projevu diskomfortu výrazně lépe než ostatní účastníci. Ačkoliv se jednalo o jednotlivou pozorovanou situaci, podtrhuje význam dlouhodobé adaptace na chladné klima.

Vedle dlouhodobé aklimatizace existují i mechanismy krátkodobé adaptace, označované jako aklimace. Studie [18] ukazují, že již během několika dní pravidelné expozice vyšším teplotám dochází k posunu komfortních prahů a snížení subjektivního diskomfortu. Tento poznatek naznačuje, že vnímání komfortu lze v omezené míře modifikovat i v krátkodobém horizontu, byť s menším efektem než při dlouhodobé aklimatizaci.

Závěrem lze shrnout, že geografický původ, klimatická historie i aktuální míra aklimatizace zásadně ovlivňují očekávání i toleranci k teplotním změnám vnitřního prostředí. Tyto faktory vysvětlují, proč v praxi často nelze aplikovat jednotné komfortní limity pro všechny uživatele. Pro návrh flexibilních strategií řízení je proto nezbytné zohlednit různorodost preferencí i individuální adaptační potenciál, ať už jde o dlouhodobě získanou odolnost vůči nižším teplotám nebo schopnost krátkodobě posunout komfortní hranice pravidelnou expozicí. Tento poznatek potvrzuje, že flexibilní řízení vnitřního prostředí bude nejefektivnější tehdy, pokud bude reflektovat nejen fyzikální parametry, ale i klimatickou a kulturní historii uživatelů budov.

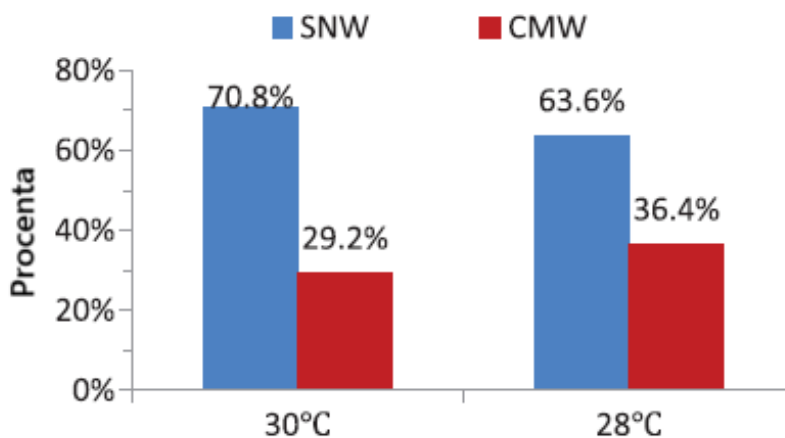
2.1.6 Vliv proudění vzduchu na tepelný komfort

Proudění vzduchu je jedním z klíčových faktorů ovlivňujícím vnímání tepelného komfortu v dynamickém vnitřním prostředí. Ochlazení prouděním probíhá dvěma hlavními mechanismy: zvýšeným konvekčním přenosem tepla mezi povrchem těla a okolním vzduchem a zvýšeným odpařováním vlhkosti z pokožky, které odvádí latentní teplo. Kombinace těchto procesů zesiluje subjektivní pocit ochlazení, zejména při vyšších teplotách a vyšší relativní vlhkosti [19].

Rychlost proudění vzduchu je jedním z hlavních parametrů ovlivňujících tepelný vjem. Zhang uvádí, že s rostoucí rychlostí proudění vzduchu dochází k posunu subjektivního tepelného vjemu směrem k pocitu většího chladu [14]. Zhu a kol. doporučují pro teplotu 30 °C

optimální průměrnou rychlost proudění kolem 0,3 m/s [2]. Luo a kol. konkrétně uvádějí, že při teplotě 28 °C je optimální rychlost proudění v rozmezí 0,4–0,6 m/s, přičemž při této rychlosti proudění přibližně 80 % účastníků vyjadřovalo spokojenost. Při teplotě 30 °C pak doporučují vyšší rychlost proudění, a to v rozmezí 0,7–0,9 m/s [3].

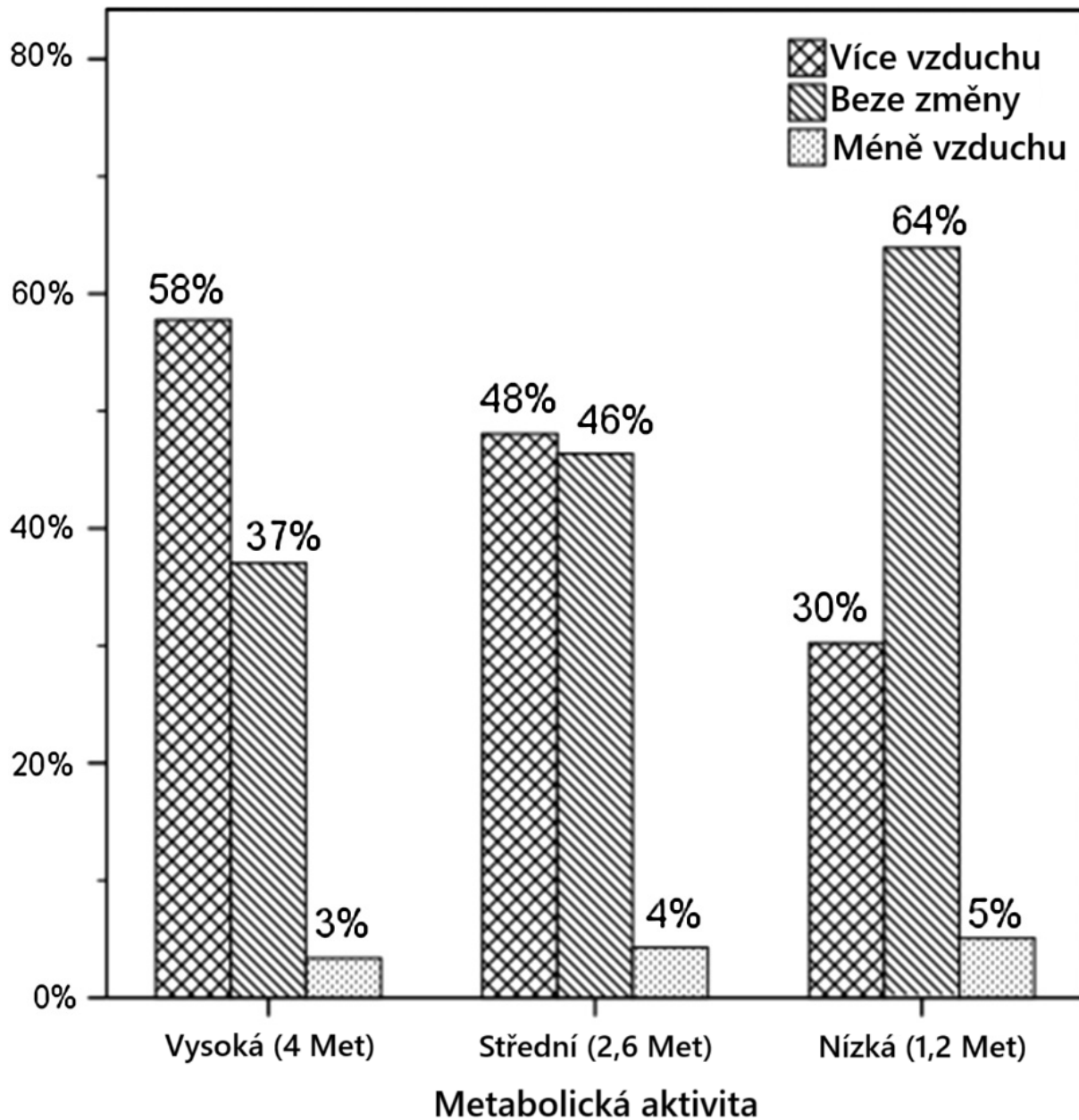
Vedle samotné rychlosti proudění je významný také jeho charakter, konkrétně způsob, jakým se v čase mění. Ve studii [2] zjistili, že proudění simulující přirozený vítr (simulated natural wind, SNW) je subjektivně vnímáno příznivěji než konstantní mechanické proudění (constant mechanical wind, CMW). Tento závěr potvrzuje také [3], která uvádí, že při teplotě 30 °C preferovalo SNW před CMW 70,8 % účastníků a při teplotě 28 °C to bylo 63,6 % účastníků viz Obrázek 2-11.



Obr. 2-11 Preference uživatelů mezi simulovaným přirozeným větrem a konstantním mechanickým větrem při teplotách 30 °C a 28 °C. Převzato z [3]

Simulované přirozené proudění napodobuje přirozené fluktuace rychlosti větru. Studie [2] uvádí, že lidské vnímání změn proudění je nejcitlivější v rozmezí frekvencí 0,1–1,0 Hz. Publikace [3], [20] ukazují, že v neutrálním vnitřním prostředí je nejefektivnější chladičí účinek dosahován při frekvencích v rozmezí 0,7–1,0 Hz.

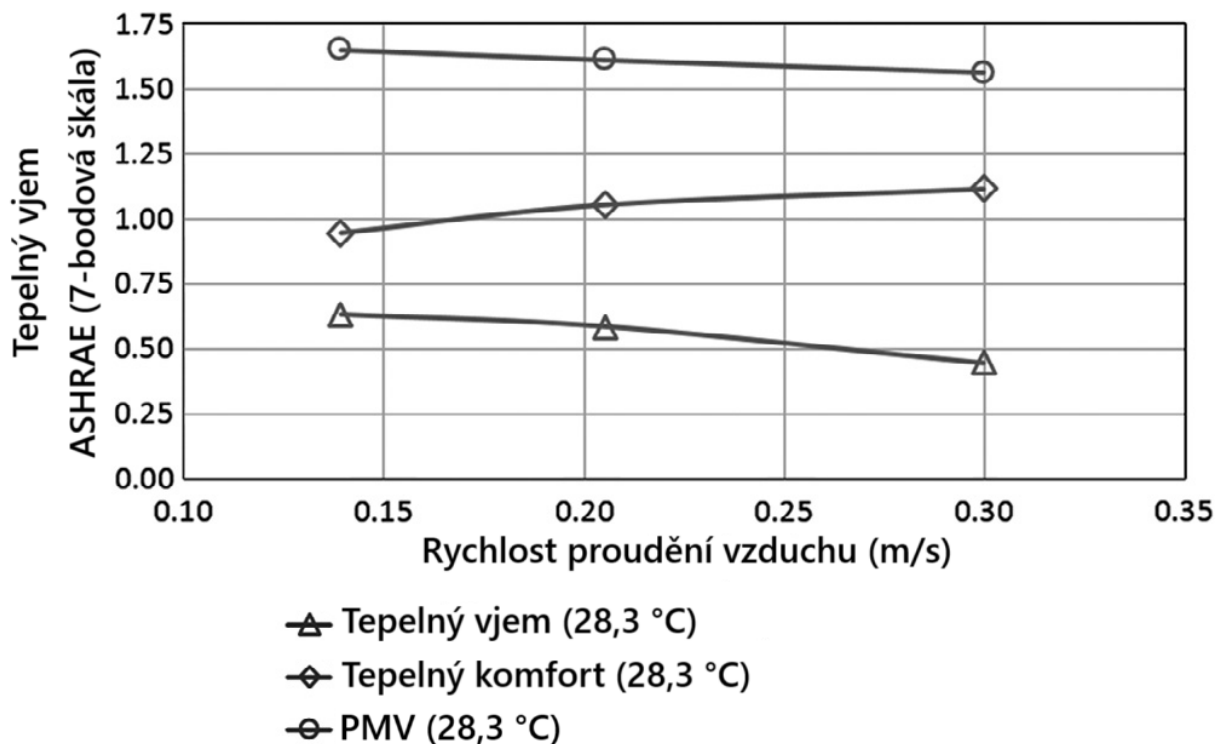
Preference proudění vzduchu závisí také na úrovni fyzické aktivity osob. Uğursal a kol. ukázali, že při vyšším metabolickém výkonu (4 MET) preferovalo vyšší rychlosti proudění výrazně více účastníků než při nízké fyzické aktivitě (1,2 MET) viz Obrázek 2-12 [3].



Obr. 2-12 Preference proudění vzduchu v závislosti na metabolickém výkonu.

Převzato z [19]

Uğursal a kol. zdůrazňují nejen význam rychlosti proudění, ale také lokalizace proudění vzduchu. Výsledky jejich studie ukázaly, že dynamické pulzní proudění (30 sekund zapnuto/vypnuto) poskytovalo větší subjektivní ochlazení a komfort, pokud bylo proudění směřováno současně na více částí těla (hlava, ruce a nohy) oproti pouhému směřování proudění pouze na hlavu [19]. Vliv rostoucí rychlosti proudění na subjektivní tepelnou senzaci, tepelný komfort a predikované PMV shrnuje Obrázek 2-13.



Obr. 2-13 Tepelný vjem a tepelný komfort v závislosti na rychlosti proudění vzduchu (28,3 °C; 45% relativní vlhkost; 0,5 Clo; 2,13 Met). Převzato z [19]

Studie [9], [12] upozorňují, že prudké změny v rychlosti proudění vzduchu mohou vyvolávat přechodné pocity diskomfortu. Naopak pozvolné a rytmické změny proudění, typické pro simulovaný přirozený vítr, jsou subjektivně vnímány výrazně pozitivněji. Zhao a kol. rovněž zdůrazňují obecnou vyšší efektivitu dynamického proudění vzduchu oproti proudění konstantnímu [12].

Důležitost dynamického proudění dokládají i výsledky studie [4], kde zjistili, že zavedení stropních ventilátorů a dynamického řízení proudění významně přispívá ke zvýšení tepelné tolerance osob. Kolísající proudění umožnilo zachovat vysokou úroveň subjektivního komfortu při zvýšených teplotách vzduchu (28–30 °C) a zároveň výrazně snížit spotřebu energie potřebné pro chlazení. Dynamické řízení proudění podle nich představuje efektivní strategii pro dosažení komfortního a energeticky úsporného vnitřního prostředí.

Výsledky studií jednoznačně potvrzují, že řízení proudění vzduchu je klíčovým nástrojem pro zajištění tepelného komfortu v dynamicky se měnícím prostředí. Optimální rychlost a charakter proudění dokážou významně zvýšit subjektivní snášenlivost vyšších vnitřních teplot a rozšířit komfortní pásmo při vhodném nastavení proudění. Nejpozitivněji je vnímáno dynamické pulsní či simulované přirozené proudění vzduchu, které zvyšuje účinnost ochlazování a je v praxi přijímáno lépe než proudění konstantní. Důležitým zjištěním je i vliv

lokalizace a rozsahu proudění na komfort a možnost významně snížit spotřebu energie potřebnou pro chlazení. Pro návrh flexibilních strategií řízení vnitřního prostředí to znamená, že správně navržené a dynamicky řízené proudění vzduchu umožňuje efektivně kompenzovat výkyvy teploty, snižovat riziko diskomfortu při krátkodobých spádech a zároveň optimalizovat energetickou náročnost provozu budov.

2.1.7 Individuální a kontextové faktory ovlivňující tepelný komfort

Vnímání dynamických změn vnitřního prostředí je výsledkem komplexní interakce mezi individuálními charakteristikami osob a podmínkami, v nichž se změny odehrávají. Mezi klíčové individuální faktory patří věk, pohlaví, tělesná konstituce, hormonální cyklus a subjektivní preference, zatímco kontextové faktory zahrnují fyzickou aktivitu, typ prostředí, historii expozice a vliv denní doby.

Věk ovlivňuje citlivost na změny teploty a proudění vzduchu. Starší osoby často vykazují sníženou termoregulační kapacitu a nižší senzitivitu na dynamické výkyvy prostředí, což může vést k menší subjektivní odezvě ve srovnání s mladšími jedinci [9]. Pohlaví rovněž hraje roli, přičemž Luo a kol. [3] zjistili, že ženy mohou být citlivější na změny proudění a teploty vzduchu a mohou vykazovat odlišné preference komfortu než muži. Tyto rozdíly mohou být částečně vysvětleny fyziologickými faktory, jako je odlišné tělesné složení a hormonální cyklus. Ve studii [21] uvádějí, že v luteální fázi menstruačního cyklu se tělesná teplota žen zvyšuje o přibližně 0,3–0,7 °C, což znamená změnu tepelné homeostáze žen v průběhu hormonálního cyklu. Tato proměnlivost může mít za následek různorodost teplotních preferencí.

Výsledky studie He a kol. [22] ukazují, že vyšší BMI je spojeno s vyšší mírou pocení a nižší povrchovou teplotou kůže při tepelném stresu, což naznačuje efektivnější ochlazování. Zároveň je však tato strategie doprovázena vyšším krevním tlakem a horším emocionálním stavem, což může zvyšovat subjektivní diskomfort. Naopak osoby s nižším BMI vykazují vyšší teplotu kůže a menší míru pocení, což může vést k rychlejšímu subjektivnímu přehřátí. Ani jedna z těchto skupin tedy nemá jednoznačnou výhodu v podmínkách dynamického vnitřního prostředí. Nejvyváženější termoregulační odezva je pravděpodobně dosažena u osob s normálním rozsahem BMI (18,5 – 24,9), které nevykazují extrémní míru pocení ani rychlé přehřívání a jejich vnímání tepelného komfortu je stabilnější a méně zatížené extrémními fyziologickými reakcemi. Odlišnosti v termoregulačních mechanismech tak mohou různě ovlivňovat vnímání tepelného komfortu napříč jednotlivými skupinami.

Významnou roli hrají rovněž subjektivní preference. Studie [2], [9] ukázali, že různé osoby mohou na stejné změny v prostředí reagovat velmi odlišně. Zatímco někteří jedinci vnímají fluktuace teploty a proudění vzduchu jako příjemné, jiní je hodnotí jako rušivé. Subjektivní variabilita vnímání dynamických změn potvrzuje, že univerzální návrh prostředí je problematický a že je nutné zohlednit individuální odlišnosti.

Vedle individuálních charakteristik významně působí také kontextové faktory. Fyzická aktivita ovlivňuje požadavky na vnitřní prostředí, kdy osoby vykonávající intenzivnější činnost preferují vyšší rychlosti proudění vzduchu pro účinnější ochlazení [3]. Typ prostředí je dalším významným aspektem. Ve studii [12] upozorňují, že v domácím prostředí jsou lidé tolerantnější k dynamickým změnám než v prostředí pracovním, kde bývá preferována vyšší stabilita podmínek.

Cirkadiální rytmus také přirozeně ovlivňuje vnímání tepelného komfortu v průběhu dne. Výsledky [11] ukazují, že v ranních hodinách jsou osoby citlivější na ochlazování a pociťují dříve diskomfort, zatímco odpoledne je zaznamenána vyšší tolerance k vyšším teplotám a větší akceptovatelnost dynamických změn prostředí. Tento jev souvisí s přirozeným denním cyklem tělesné teploty, která dosahuje vrcholu v pozdním odpoledni.

Schopnost adaptace na dynamicky se měnící vnitřní prostředí závisí nejen na individuálních vlastnostech osob, ale rovněž na kontextu, v němž změny probíhají. Významnou roli sehrává možnost uživatelské kontroly nad prostředím. Studie ukazují, že i minimální možnost zasáhnout do podmínek, například otevřením okna nebo regulací ventilátoru, může významně zvýšit akceptovatelnost jinak nepříznivých nebo proměnlivých podmínek [7], [8]. Pocit autonomie totiž modifikuje psychologické vnímání prostředí a snižuje míru nespokojenosti, i když objektivní fyzikální podmínky zůstávají stejné.

Dalším důležitým faktorem je očekávání. Lidé, kteří vědí, že podmínky se budou měnit (např. že dojde k přechodnému přehřátí či ochlazení), snáze akceptují i výraznější výkyvy. Tato schopnost je navíc ovlivněna předchozí expozicí. Například osoby pravidelně vystavené proměnlivému prostředí nebo žijící v sezónně extrémním klimatu vykazují vyšší míru tolerance k dynamickým změnám [17], [18]. Tento jev souvisí s procesem behaviorální adaptace a habituace, které snižují vnímaný stres z proměnlivého prostředí.

Možnost individuální kontroly nad vnitřním prostředím se ukazuje jako jeden z klíčových faktorů akceptace dynamických změn. Ve studii [13] zjistili, že možnost samovolné úpravy podmínek, například ovládním intenzity ventilátoru, významně zvyšuje subjektivní

spokojenost a snižuje míru nespokojenosti i při stejných fyzikálních parametrech prostředí. Tento poznatek podtrhuje důležitost psychologického aspektu vnímání kontroly.

Výsledky napříč literaturou ukazují, že vnímání dynamických změn vnitřního prostředí je ovlivněno širokým spektrem fyziologických, psychologických a situačních faktorů. Pro návrh komfortního dynamického prostředí je proto nezbytné zohlednit nejen fyzikální parametry změn, ale také individuální profil uživatelů, jejich aktuální aktivitu, historii expozice a denní dobu, v níž změny nastávají. Zcela zásadní je také, aby uživatelé byli o zásazích do prostředí informováni, mohli na ně v případě potřeby reagovat a akceptovali je. Pouze za těchto podmínek lze dosáhnout skutečného komfortu. Pokud uživatelé zásahy vnímají jako nechtěné nebo nemají možnost je ovlivnit, může být výsledkem subjektivní diskomfort bez ohledu na to, jak precizně jsou fyzikální parametry prostředí nastaveny. Proto by flexibilní strategie řízení měly vždy reflektovat nejen objektivní, ale i subjektivní stránku vnímání komfortu.

2.2 Modely hodnocení tepelného komfortu

2.2.1 Fangerův model

První ucelený model pro kvantitativní predikci tepelného komfortu navrhl dánský inženýr Povl Ole Fanger na počátku 70. let 20. století. Jeho přístup vychází z rovnováhy mezi produkcí metabolického tepla a jeho ztrátou do okolního prostředí a zahrnuje jak fyzikální parametry prostředí, tak charakteristiky osoby. Výsledkem je index PMV, který predikuje průměrné hodnocení tepelné pohody skupiny lidí na sedmibodové ASHRAE škále. Kromě PMV definoval Fanger i ukazatel PPD, který odhaduje procento nespokojených osob i při optimálních podmínkách [23]. Norma ČSN EN ISO 7730 přejímá tento přístup a stanovuje doporučené rozmezí PMV v interiérových prostorách mezi $-0,5$ a $+0,5$, přičemž akceptovatelná hodnota PPD by neměla překročit 10 %. Výpočet PMV zahrnuje šest hlavních parametrů: teplotu vzduchu, radiační teplotu, relativní vlhkost vzduchu, rychlost proudění vzduchu, tepelnou izolaci oděvu (clo) a metabolický výkon (met). Model poskytl důležitý základ pro hodnocení tepelných podmínek, avšak je primárně určen pro stacionární podmínky, tedy situace, kdy jsou všechny relevantní parametry (teplota vzduchu, vlhkost, rychlost proudění atd.) v prostoru i čase stabilní a nemění se v průběhu expozice. V takovém prostředí lze předpokládat, že tělo dosáhne tepelné rovnováhy a jeho reakce na prostředí je ustálená. V reálném provozu budov však může docházet k dynamickým změnám operativní teploty nebo dalších parametrů (např. v důsledku flexibilního řízení nebo proměnlivého počasí), kdy tato podmínka není splněna.

V takových případech může být výstup modelu PMV/PPD méně přesný, protože nereflektuje přechodové stavy a percepční jevy spojené se změnami prostředí. Toto je dále více rozebíráno v poslední sekci této podkapitoly.

2.2.2 Adaptivní modely

S rostoucím poznáním o lidské adaptaci na proměnlivé podmínky prostředí vznikl koncept adaptivního modelu tepelného komfortu. Tento model reflektuje skutečnost, že lidé v přirozeně větraných budovách, kde není mechanické chlazení, přizpůsobují své tepelné preference aktuálním venkovním podmínkám. Standard ASHRAE 55 proto umožňuje hodnotit komfort dvěma základními způsoby: pomocí tradičního PMV/PPD modelu (pro budovy s mechanickým řízením prostředí), nebo pomocí adaptivního modelu, který je určen výhradně pro přirozeně větrané budovy bez aktivního chlazení. Adaptivní model definuje akceptovatelné rozmezí operativní teploty jako funkci klouzavého průměru venkovních denních teplot za posledních 7 až 30 dní. Například pokud je klouzavý průměr venkovní teploty 25 °C, akceptovatelná operativní teplota vnitřního prostředí je v rozmezí přibližně 23 až 27 °C. Pásmo akceptovatelné teploty je v adaptivním modelu stanoveno na základě lineárního vztahu mezi venkovní teplotou a preferovanou vnitřní teplotou, přičemž se připouští širší rozmezí komfortních podmínek než v klasickém PMV/PPD modelu. Adaptivní model předpokládá, že lidé, kteří mají možnost ovlivnit své prostředí (například otevřením oken, použitím ventilátorů nebo změnou oděvu), snášejí širší spektrum teplotních podmínek bez významné ztráty komfortu. Podobnou volbu mezi oběma modely umožňuje také evropská norma EN 16798-1, která adaptivní přístup doporučuje právě pro budovy s přirozeným větráním. Tento přístup lépe vystihuje realitu dynamických vnitřních prostředí a umožňuje energeticky efektivnější návrh budov, které využívají přirozené větrání namísto mechanického chlazení.

2.2.3 Omezení modelů v dynamických podmínkách

Přestože PMV/PPD modely i adaptivní modely významně přispěly k pochopení tepelného komfortu, jejich aplikace v dynamicky se měnících podmínkách je omezená. PMV model vychází z předpokladu stacionárního prostředí a ustálených fyziologických stavů, což neodpovídá realitě při rychlých změnách teploty, proudění vzduchu či vlhkosti. Současné výzkumy [1], [9] ukazují, že dynamické změny prostředí jsou vnímány odlišně, než by predikoval PMV model, protože nezohledňuje fenomény jako aliestezii, habituaci či asymetrii vnímání chladu a tepla.

Norma ČSN EN ISO 7730 připouští použití PMV/PPD i při mírně neustálených podmínkách, například pokud rychlost změny teploty nepřekročí 2,0 °C /h, nebo pokud amplituda teplotních cyklů nepřesáhne 1 °C. V těchto případech norma stále doporučuje použít metody pro ustálené podmínky. Z podkapitoly 2.1 však víme, že toto není pravda a pro některé lidi může již změna 2,0 °C /h způsobit diskomfort. Ačkoliv tedy norma doporučuje použít metody pro ustálené podmínky, výsledky oproti subjektivnímu pocitu jedinců může být rozdílný, i když dle normy by se neměl komfort narušit, ve skutečnosti tak tomu být nemusí.

Adaptivní modely, například zakotvené ve standardu ASHRAE 55, přistupují k hodnocení komfortu flexibilněji tím, že zohledňují dlouhodobé venkovní teplotní trendy. Nicméně ani adaptivní modely primárně neřeší krátkodobé a rychlé fluktuace vnitřního klimatu. Standard ASHRAE 55 proto doplňuje své požadavky o limity maximálních změn operativní teploty v čase, aby bylo možné zachovat komfort i v dynamickém prostředí viz Tabulka 2-1.

Tab. 2-1 Limity pro teplotní driftы a teplotní spády podle ASHRAE 55-2017. Převzato z [11]

Čas (h)	Maximální dovolená změna operativní teploty (°C)
0,25	1,1
0,5	1,7
1	2,2
2	2,8
4	3,3

Tato doporučení ukazují, že v dynamických podmínkách je klíčovým faktorem nejen aktuální operativní teplota, ale i rychlost její změny. Přesto však i tyto limity nemusí plně postihnout všechny percepční jevy, které rychlé změny vnitřního klimatu vyvolávají, jak již bylo diskutováno v podkapitole 2.1, kde studie [11] poukázala na to, že tyto hodnoty pro teplotní spády jsou pro ochlazování příliš mírné a již spády s těmito rychlostmi mohou způsobovat diskomfort, kdežto naopak při zvýšení teplot jsou tyto hodnoty z ASHRAE55 zbytečně konzervativní. Vzhledem k těmto omezením je nutné doplňovat hodnocení komfortu v dynamických podmínkách experimentálním ověřováním subjektivních reakcí uživatelů.

2.3 Syntéza: hranice a podmínky zachování komfortu

Druhá kapitola shrnuje současné poznatky o vnímání tepelného komfortu v dynamicky se měnícím vnitřním prostředí budov. Z hlediska klasických kritérií je komfortní pásmo pro operativní teplotu v interiérech podle norem (ČSN EN ISO 7730, ASHRAE 55) nejčastěji definováno v rozmezí 20–26 °C, s přísnějšími limity v zimě (20–24 °C) a možností širšího pásma v létě či v adaptivním modelu až do cca 27–28 °C. Adaptivní modely navíc ukazují, že uživatelé přirozeně větraných budov jsou schopni bez ztráty komfortu tolerovat i širší rozmezí operativní teploty, pokud mají možnost ovlivnit prostředí (například otevřením okna nebo změnou oděvu).

Zásadním zjištěním však je, že vedle samotné hodnoty operativní teploty významně rozhoduje i rychlost její změny. Literatura uvádí, že při teplotních spádech do $\pm 1\text{--}1,5$ °C/h bývá komfort zpravidla zachován a minimalizuje riziko výskytu overshootu, zejména pokud jsou změny pozvolné a předvídatelné. Rychlejší změny, například kolem 2,4 °C/h, jsou vnímány jako horní mez, při které dochází k překročení komfortního rozmezí predikovaného indexem PMV a ke zvýšenému riziku diskomfortu. Tato hodnota je často považována za praktickou hranici, nad níž už je nutné uvažovat o negativním dopadu na pohodu uživatelů. Zároveň je zřejmé, že ochlazování je vnímáno jako méně komfortní než ohřívání – percepční jev overshoot se při stejném teplotním spádu projevují při ochlazování dříve a intenzivněji. Adaptivní modely i evropské normy přesto stále používají převážně stejné limity pro oba směry, což studie označují za možný zdroj nesouladu mezi modely a reálným vnímáním uživatelů. Jak již bylo zmíněno, dle ASHRAE 55, viz Tabulka 2-1, lze připustit změnu až 2,2 °C/h, avšak při ochlazení při tomto teplotním spádu pozorovala studie [11] výskyt značného diskomfortu. Oproti tomu při zvyšování teploty při stejném spádu lidé nehlásili tepelný diskomfort.

Dalšími klíčovými jevy jsou alieściezie a habituace – alieściezie znamená, že subjektivní hodnocení komfortu závisí na předchozím stavu organismu a směru změny; tentýž teplotní podnět je tak vnímán různě podle aktuální potřeby těla. Habituace a pravidelné vystavení proměnlivému prostředí navíc zvyšují toleranci k výkyvům a snižují percepční citlivost, což umožňuje komfortně snášet širší rozpětí teplotních podmínek v dynamickém prostředí. Výsledky studií také ukazují, že vnímání komfortu je silně ovlivněno individuálními rozdíly (věk, pohlaví, BMI, hormonální stav), úrovní fyzické aktivity, možností kontroly nad prostředím, geografickým původem a klimatickou adaptací.

Specifickou roli hraje proudění vzduchu, které při správném nastavení může významně rozšířit komfortní pásmo a kompenzovat dynamické výkyvy teploty.

3 Analýza vlivu odezvy techniky prostředí na požadavky sítě: souhrn případových studií

Tato kapitola se věnuje podrobnému rozboru případových studií, které dokumentují různé přístupy k řízení techniky prostředí s cílem ovlivnit spotřebu energie těchto zařazení. Zejména se budeme soustředit na kontext odezvy na poptávku sítě (tzv. demand response), integrace obnovitelných zdrojů anebo omezení zatížení během špičky. Hlavní důraz je kladen na to, jakým způsobem tyto strategie zohledňují tepelný komfort uživatelů a zda využívají poznatky o fyziologické adaptabilitě na proměnlivé prostředí.

Každá studie byla hodnocena podle předem definované sady kritérií, která umožňují sledovat několik klíčových aspektů: motivaci zásahu (např. cenový signál, přebytek OZE), typ a charakter zásahu (např. předchlazení, změna žádané teploty vzduchu, přímé vypnutí zařízení), typ technologie a způsob řízení (např. plánování, optimalizace), průběh a dynamiku změny (skoková, pozvolná, drift), měření prostředí (sledované veličiny, senzory, časové rozlišení), a případně míru validace v případě simulačních studií.

Speciální pozornost byla věnována způsobu hodnocení komfortu – tedy zda byl sledován pomocí výpočtových modelů (např. PMV, PPD), subjektivních nástrojů (např. TSV, dotazníky, zpětná vazba) nebo pouze expertním odhadem na základě průběhu parametrů prostředí. V případech, kdy komfort nebyl přímo měřen, byl odhadován nepřímo na základě rychlosti změny teploty, předchozí expozice nebo sledováním uživatelských zásahů do řízení techniky prostředí.

Zohledněna byla i uživatelská kritéria: informovanost osob o zásahu, možnost jejich aktivní reakce (např. ovlivnění podmínek volbou na termostatu, otevření oken apod.), nebo zmínky o stížnostech či změnách chování. Energetické hodnocení se pak zaměřilo na to, zda došlo ke skutečné úspoře nebo jen přeskupení spotřeby, jaký byl rozsah a načasování zásahu a zda byly případné energetické úspory vyváženy dopadem na komfort.

Snahou této části bylo identifikovat společné rysy a rozdíly mezi studii především z hlediska přístupu ke sledování tepelného komfortu a míry jeho zohlednění v rámci pokročilého řízení využívající energetickou flexibilitu systémů HVAC. Tyto aspekty bylo možné do určité míry porovnat. Naopak přímé srovnání „úspěšnosti“ jednotlivých strategií,

například z hlediska energetické účinnosti nebo dopadu na uživatelskou zkušenost, bylo vzhledem k velmi rozdílnému přístupu jednotlivých studií, použitým technologiím, typům budov, velikosti objektů a rozdílným klimatickým podmínkám a výstupním metrikám možné přímé srovnání provést pouze omezeně. Hodnocení se proto soustředí na kvalitativní analýzu přístupů, jejich kontextů a vlivu na komfort.

3.1 Charakteristika analyzovaných studií

Analyzovaný soubor případových studií představuje reprezentativní průřez současným výzkumem v oblasti pokročilého řízení energetických systémů budov v rámci odezvy na poptávku sítě a jeho vlivu na uživatelský komfort v různých provozních i klimatických podmínkách. Výběr zahrnuje jak reálně měřené projekty, tak detailní simulační studie, které svým charakterem umožňují detailně studovat různé optimalizační cíle řízení, jako jsou například minimalizace provozních nákladů, snižování emisí či zvyšování energetické soběstačnosti budov. V simulačních modelech lze totiž libovolně měnit vstupní podmínky i řídicí algoritmy a vyhodnocovat jejich dopady v široké škále scénářů, což by v reálném provozu bylo časově, technicky i ekonomicky velmi náročné nebo zcela neproveditelné. Díky této výhodě mohou simulační studie snáze implementovat více strategií řízení do provozu budovy současně – například lze v jednom experimentu optimalizovat náklady, emise, soběstačnost či různé scénáře chování uživatelů, aniž by bylo nutné skutečně zasahovat do fyzického prostředí budovy. Reálné měření v autentickém provozu bylo základem čtyř studií [24], [25], [26], [27], které se zaměřily na dopad flexibilního řízení v praxi, včetně narušení komfortu a možnosti sledování reakce uživatelů, které provedly studie [24], [25]. Zbývající studie [28], [29], [30], [31], [32], [33] pracovaly se simulacemi na validovaných modelech budov a technologií, což umožnilo analyzovat širší škálu scénářů, ovšem s omezením v možnosti predikovat reálnou uživatelskou odezvu.

Většina studií byla zaměřena na řízení vytápění pomocí tepelného čerpadla, v některých případech kombinovaného s akumulacím zásobníkem nebo fotovoltaikou, případně bateriovým úložištěm. Specifickým příkladem je studie [30], která ukázala, že výrazného zvýšení flexibilního potenciálů lze dosáhnout i chytrým řízením ohřevu teplé užitkové vody bez zásahu do obytných prostor, což představuje alternativu k přímému ovlivňování vnitřního klimatu. Právě rozmanitost předmětu řízení, od prostorového vytápění po ohřev vody či integraci FV výroby, dává vzorku studií komplexní charakter.

Rozdílná byla i motivace zásahů. Některé práce měly převážně výzkumný a demonstrační charakter (především již zmíněné studie, které prováděly reálné měření), jiné sledovaly ekonomické cíle, tedy minimalizaci provozních nákladů [28], [31], [32], [33], nebo environmentální benefity, typicky snížení emisí CO₂,ekv [28], [29], [31]. Významné místo má v několika studiích také snaha maximalizovat využití obnovitelných zdrojů energie v místě spotřeby, zejména [31].

V oblasti řízení byly použity jak jednoduché tarifní nebo heuristické algoritmy, tak pokročilé metody modelově prediktivního řízení (MPC), které dokáží plánovat zásahy na základě predikce budoucího vývoje cen, počasí nebo potřeby uživatele. Ekonomický model MPC (EMPC) byl využit pro minimalizaci nákladů, zatímco jiné varianty MPC se zaměřily na optimalizaci enviromentálních ukazatelů. Tyto prediktivní přístupy vykazovaly vysokou míru flexibility, avšak jejich úspěšnost závisela na kvalitě modelů a dostupnosti dat, což má za následek náročnější implementaci těchto prediktivních modelů. Naproti tomu jednodušší strategie byly robustnější a méně náchylné k chybám v predikcích.

Rozdíl se promítaly také do metod hodnocení komfortu. Jen studie [33] použila explicitně výpočet modelu PMV/PPD podle normy EN 15251. Ostatní studie pracují zejména s měřením vnitřní teploty, případně koncentrace CO₂ ve vnitřním prostředí, anebo subjektivní zpětnou vazbou obyvatel ([25], [34]). V mnoha případech byl komfort hodnocen na základě expertního posouzení průběhu vnitřních parametrů prostředí, zejména sledováním, zda vnitřní teplota zůstává v definovaném komfortním rozmezí a nedochází k jejímu překročení mimo stanovené limity.

Sledované budovy byly různorodé: od pasivních řadových domů a sociálních bytových jednotek [24], [34], přes běžné rodinné domy s různou mírou akumulace a izolace, až po experimentální dřevostavby [29] nebo nízkoenergetické byty ve Středomoří [33]. Zásadní rozdíly v konstrukci objektů, typu technologie i možnostech řízení významně ovlivnily výsledky jednotlivých strategií. Například budovy s vyšší tepelnou setrvačností umožnily delší časové posuny odběru bez narušení komfortu, zatímco objekty s nízkou akumulací byly citlivější na krátkodobé změny řízení.

Syntéza publikovaných výsledků ukazuje, že účinnost jednotlivých strategií je výrazně ovlivněna nejen volbou řídicího algoritmu, ale také konstrukčními vlastnostmi budovy, technologií systému a mírou zapojení uživatelů. Například v několika simulačních studiích dosáhly prediktivní strategie (MPC, EMPC) na základě simulací teoreticky vyšších hodnot

ukazatelů flexibility nebo i finančních úspor ve srovnání s jednoduššími heuristickými strategiemi, avšak tyto výsledky jsou závislé na konkrétním nastavení modelu a nejsou přímo přenositelné do reálného provozu. V reálně měřených studiích navíc sehrává významnou roli akceptace zásahů ze strany uživatelů a fyzikální limity daného objektu, což často omezuje potenciál dosažený v simulacích.

Tabulka 3-1 shrnuje klíčové charakteristiky, použité technologie a dosažené výsledky napříč analyzovaným vzorkem studií a slouží jako východisko pro další syntetickou komparaci.

Tab. 3-1 Přehled analyzovaných případových studií dle klíčových kritérií

Autoři	Technologie	Typ zásahu	Motivace zásahu	Hodnocení komfortu	Změna prostředí	Výsledky
Gupta, Morrey [24]	TČ (5-7 kW), FV, baterie (5 kWh, 3,6 kW)	Baterie pokryla spotřebu domácnosti místo odebrání ze sítě; spotřeba TČ posunuta mimo špičku	Výzkumná, ekonomická	Dotazníky pro uživatele, měření teploty	$\pm 0,5$ °C během 2h zásahu (max. ± 1 °C); do 2 h po zásahu max + 1,6 °C	Snížení odběru ve špičce o 1,3 kWh/domácnost (-67 %); při zvýšení odběru +5,8 kWh/domácnost (+600 %)
Gupta, Morrey [25]	TČ (3,5–5 kW), FV (1,3–3,0 kWp; u 16/17 domácností), baterie (5 kWh), některé domácnosti zásobník TUV	Zásahy se zvýšením a snížením odběru; snížení odběru ve večerních špičkách (17:00–19:00); zvýšení odběru v období přebytku (11:00–13:00)	Výzkumná; testování možností zvýšení flexibility	Objektivní měření teploty (± 2 °C limit), výstupní TUV; subjektivní rozhovory – většina bez stížností; žádné zásahy do override režimu	Pokles teploty max ± 1 °C (80 % případů $\pm 0,5$ °C), max. nárůst po zásahu 1,6 °C	Snížení odběru (17:00–19:00): -1,2 kWh/dům, export do sítě: +2,5 kWh/dům, zvýšení odběru (13:00–15:00): +2,3 kWh/dům; snížení spotřeby TČ + baterie: -3,7 až -4,2 kWh/dům, z toho TČ -0,34 kWh/dům
O'Connell a kol. [26]	TČ (VRF, 735 kW), ventilační jednotky, baterie (48 kWh), FV (50 kWp)	Dočasné omezení výkonu HVAC zařízení při DR událostech (13:30–15:30); bez úplného vypnutí	Výzkumná; stabilita odezvy, flexibilita	Nepřímé; měření vnitřní teploty a CO ₂ ; sledování uživatelských zásahů během DR	Průměrný nárůst teploty během 1h DR o 0,5–1,0 °C; všechny hodnoty pod setpointem 22 °C; výkyvy ve 2 z 35 místností	Výsledky Při 1h DR zásahu dosaženo snížení výkonu o 21 % z max. odběru budovy (140 kW); baterie -14 %, tepelné čerpadlo -4 %, ventilace -3 %; při 4h zásahu stabilní pokles o 12 %
Müller, Jansen [27]	TČ (výkon neuveden)	Vzdálené omezení provozu TČ (67 zásahů, ~300 domácností), délka 1–2 h	Výzkumná a demonstrační	Nepřímé; komfort posuzován podle průběhu spotřeby po zásahu; bez známek narušení, žádné stížnosti uživatelů	Teplota v interiéru nebyla měřena; možné dopady na komfort posouzeny podle následného dohřátí	Snížení odběru: -35 až -288 kW (29–90 %), včetně -159 kW u typického zásahu (141 domů); po zásahu nárůst až +128 kW
Hall, Geissler [28]	TČ (8,8 kW), FV (3 & 20 kWp), zásobník TUV (800 l)	Optimalizace časování ohřevu TUV dle SPOT/penalizačního signálu	Ekonomická, emisní, soběstačnost	Nepřímé (prostorová teplota vždy v komfortním pásmu), TUV nikdy pod 40 °C)	Prostorová teplota: změna $\pm 0,2$ °C během několika hodin	Roční úspora až 20 % (SPOT), s FV 3 kWp úspora až 35 %, s FV 20 kWp až 95%
Clauß a kol. [29]	TČ (5,1 kW), zásobník TUV (215 l) přímotopy	Změna teplotních setpointů (prostor/TUV), předzásobení teplem, řízení odběru TČ a přímotopů podle algoritmu	Ekonomická, emisní	Nepřímé (simulace); EN 15251, komfortní pásmo 20–24 °C)	Místnost: ± 1 –3 °C během 1–2 hod (typicky +1 °C/hod při předehřevu); TUV: +10 °C za 1–2 hod	Snížení špičky až o 30 %, úspora energie 7,7–11,3 % oproti referenci, zvýšení nákladů o 5–8 % (Norsko; malé cenové rozdíly)
Balint, Kazmi [30]	TČ, zásobník TUV (200 l)	Automatizovaný ohřev TUV v reakci na DR event	Výzkumná, flexibilita TUV	Nepřímé	TUV: +5 až +10 °C za 1–2 h při DR eventu	Flexibilita 0,6–1,5 kWh na zásah; průměrný výkon 1 kW; min. 2 zásahy/den
Vogler-Finck, kol. [31]	Elektrické přímotopy (účinnost = 1; 2,4–7,3 kW) podle izolace domu (1970/2010/2015)	Řízení teploty prostřednictvím optimalizace spotřeby v čase	Ekonomická, emisní	Nepřímé; čas mimo komfortní pásmo; chlad penalizován více než přehřátí	Většinu času 21–22,5 °C; pokles pod minimum <1 % času; změna ± 1 °C za 30–60 min	Noční úspora 7,7–11,3 % (MPC-EN); snížení CO ₂ o 5,6–11,3 % (MPC-CO ₂); spotovná cena 3–7,7 %
Finck a kol. [32]	TČ (max 20 kW), FV (2 kWp)	Dynamické řízení provozu TČ a teplotních setpointů v místnostech pomocí EMPC, optimalizace vytápění dle ceny a FV výroby	Ekonomická, soběstačnost	Nepřímé (dodržení limitů: 18 °C v noci, 20 °C ve dne, max. 22 °C)	Přechod setpointu až +2 °C za 1 hod, změna až 1,5 °C/10 min při zásahu	Náklady sníženy o 7 %, FF zvýšen z -0,89 na +0,42; vlastní spotřeba FV až 13 %; spotřeba tepla mírně vzrostla (+1,5 %)
Péan a kol. [33]	TČ, zásobník TUV (250 l), FV (1,4 kWp)	Dynamická modulace referenčních teplotních setpointů a ohřevu TUV podle cen elektřiny	Ekonomická	PMV/PPD (EN 15251); většinu dne v komfortních pásmech; krátkodobě PPD >10 % při přechodu režimu	předehřev na 22,5 °C, ochlazení na 20 °C za 3–4 hod; max. změna 1 °C za 30–60 min	Snížení ročních nákladů na elektřinu o 20 %, spotřeba na vytápění vyšší o 7 %, FV krytí ~50 %; odběr posunut mimo špičky

REÁLNĚ MĚŘENÍ

SIMULACE

3.2 Syntéza poznatků

Ačkoliv tabulka 3-1 slouží jako přehledné srovnání hlavních charakteristik jednotlivých studií, uvedené výsledky nejsou mezi sebou přímo porovnatelné. Jednotlivé práce se liší nejen typem použité metodiky (simulace vs. reálný provoz), ale také mírou kvantifikace výstupů a zvolenými metrikami. Některé studie uvádějí absolutní hodnoty (např. snížení spotřeby v kWh), naproti tomu studie [32] ukazuje relativní ukazatele (např. FF – flexibility factor, FCF – flexibility classification factor), případně kvalitativní hodnocení (např. posun spotřeby v čase). Z tohoto důvodu je tabulku vhodné chápat jako ilustrativní shrnutí přístupů k flexibilitě, nikoliv jako jednotné srovnání efektivity řízení. Podrobnější interpretace výsledků, včetně kontextu technologií, typů tarifů nebo rozsahu FV výroby, je dále uvedena v následující kapitole diskuze.

Při porovnání všech analyzovaných případových studií lze identifikovat několik opakujících se vzorců. Strategie s pokročilým prediktivním řízením (např. EMPC, MPC) byly uplatněny zejména ve studiích [28], [29], [32], [33], přičemž ve studiích [28], [32] byly explicitně kvantifikovány vysoké hodnoty flexibility (FF až 0,8 u studie [28], výrazné zlepšení FF u studie [32]). Oproti tomu jednodušší, řízení na základě pravidel (např. PRBC ve studii [30]), či strategie založené pouze na tarifních signálech vykazovaly menší dynamiku řízení, což však může znamenat vyšší spolehlivost při praktickém nasazení díky nižším nárokům na implementaci komplexního řízení a přesnost predikcí.

Nejvyšších úspor nákladů bylo dosaženo ve studiích využívajících dynamické cenové signály ve spojení s větším FV systémem (především [32] a také reálně ověřené projekty [25], [26], kde byla optimalizace spotřeby úzce navázána na výrobu a akumulaci elektřiny z obnovitelných zdrojů). Studie [26], [27] zároveň ukazují, že i v reálných podmínkách lze při správném nastavení systémů docílit významného posunu odběru v čase, aniž by došlo k narušení komfortu uživatelů.

Komfort byl ve většině případů hodnocen nepřímo, nejčastěji na základě vývoje vnitřní teploty. Explicitní komfortní model PMV byl použit pouze ve studii [33], a to ve formě simulačního výpočtu. Subjektivní hodnocení uživatelů bylo provedeno pouze ve studiích [25], [34], jak bylo v přechodí kapitole již zmíněné, přičemž zejména v reálně měřených projektech byla zaznamenána vysoká akceptace zásahů, pokud nedocházelo k rychlým nebo výrazným změnám prostředí. Studie [27], která patří k největším demonstračním projektům (bylo sledováno přes 300 rezidenčních budov), prokázala možnost realizovat rozsáhlé agregované zásahy

(snížení odběru ve špičkách až o 90 % ve sledovaném okruhu sítě) bez výraznějšího dopadu na vnímaný komfort, zejména díky vhodně zvoleným parametrům řízení.

Výsledky některých studií vycházejí čistě ze simulací bez validace v reálném prostředí, zatímco jiné kombinují měření a uživatelskou zpětnou vazbu. I tato rozdílnost je zohledněna při hodnocení přenositelnosti výsledků. Celkově lze říci, že nejvyšší míra flexibility byla zaznamenána u systémů s prediktivním řízením a s vyšší úrovní akumulace, zatímco tarifní strategie byly provozně jednodušší, ale méně dynamické. Studie [25], [34] ukazují praktickou realizovatelnost těchto zásahů v běžných domácnostech a demonstrují, že klíčovým faktorem je nejen technologie, ale i uživatelská akceptace a možnost zásah kdykoliv přerušit bez výrazného diskomfortu. Z hlediska komfortu se ukazuje jako nejrobustnější kombinace nepřímého hodnocení s penalizací odchylek; v reálných měřeních byl komfort obyvatel zpravidla zachován, pokud byly změny prostředí pozvolné a omezené v čase.

Je však třeba zdůraznit, že jednotlivé studie pracovaly s velmi odlišnými typy budov a technických systémů. Liší se nejen konstrukčními vlastnostmi objektů, ale také použitými zdroji tepla a způsobem jejich řízení. Některé systémy využívaly přímotopné vytápění s jednoduchou regulací, jiná tepelná čerpadla s možností plynulé modulace výkonu, případně kombinace s fotovoltaikou a akumulačními zásobníky. Tyto rozdíly významně ovlivňují schopnost systému reagovat na řízení, jako například rychlost tepelné odezvy, potenciál akumulace nebo možnosti realizace předeřevu.

V praxi to znamená, že i dvě studie využívající shodnou strategii řízení mohou vykazovat rozdílné výsledky pouze na základě fyzikálních charakteristik budovy a technologií. Proto je třeba při interpretaci výsledků zohlednit nejen algoritmus řízení a jeho cíle, ale také kontext, ve kterém byl zásah realizován.

4 Diskuse

Analýza případových studií ukázala, že současné přístupy k flexibilnímu řízení spotřeby energie v budovách se výrazně liší jak z hlediska použitých technologií a typů řízení, tak v tom, jakým způsobem zohledňují komfort uživatelů. Zatímco některé strategie vykazují vysokou účinnost z hlediska ekonomických ukazatelů (například provozních nákladů) nebo parametrů souvisejících s flexibilitou vůči požadavkům elektrické sítě (např. omezení špičkového odběru, zajištění služeb výkonové rovnováhy apod.), otázka zachování tepelného komfortu v dynamickém prostředí zůstává často na okraji zájmu. Tato kapitola se proto zaměřuje

na kritické zhodnocení těchto aspektů ve světle poznatků shrnutých v kapitole 2, zejména s důrazem na fyziologické reakce člověka na nestacionární podmínky, metody hodnocení komfortu a přenositelnost výsledků do praxe.

4.1 Zhodnocení výsledků případových studií

Výsledky analyzovaných případových studií ukazují, že dosažená míra flexibility, úspor energie či nákladů a zachování komfortu závisí nejen na typu aplikovaného řízení, ale především na použité technologii, typu budovy a klimatických a provozních podmínkách, ve kterých systém funguje. Studie často prezentují výrazné rozdíly ve výsledcích, jejichž interpretace vyžaduje kontextuální pohled.

Studie [28] například deklaruje až 60 % snížení nákladů díky prediktivnímu řízení ve spojení s fotovoltaickým systémem o výkonu 20 kWp, konkrétně při optimalizaci podle spotových cen. V tomto případě se však nejedná o běžný rodinný dům, ale o tříbytový bytový dům s vytápěnou plochou 320 m², což vysoký instalovaný výkon FV systému částečně vysvětluje. Přesto i pro takový objekt jde o hodnotu spíše výjimečnou a samotní autoři označují tento scénář za modelový extrém, určený k ilustraci maximálního potenciálu flexibility při velké míře lokální výroby. Simulační model použitý ve studii byl sice validován podle reálných měření z obdobného objektu, avšak všechny prezentované výsledky strategií řízení a vyhodnocení úspor jsou již čistě simulační, bez ověření v reálném provozu. Studie zmiňuje, že produkce FV systému byla dostatečná i v zimních měsících, avšak konkrétní průběh počasí či sezónní proměnlivost výroby není detailně analyzována. Přestože hlavní pozornost je věnována kombinaci s FV, i bez využití obnovitelných zdrojů bylo ve studii dosaženo nezanedbatelného snížení nákladů. Například při řízení podle vysokého a nízkého tarifu (HT/LT) se stejným instalovaným FV systémem činila úspora přibližně 30 % oproti referenčnímu provozu, což ukazuje, že samotná volba strategie řízení (vhodně sladěná s tarifní strukturou) může mít významný dopad. Výsledky však byly získány čistě simulačně a pouze s omezeným zohledněním sezónních a meteorologických vlivů. Lze proto uzavřít, že prediktivní řízení může být velmi účinné, avšak míra dosaženého přínosu závisí nejen na algoritmu samotném, ale i na dostupnosti obnovitelných zdrojů, vhodně dimenzované akumulaci a kvalitě predikčních vstupů.

Výrazný kontrast poskytují experiment [25], [34], které testovaly řízení v reálném provozu napříč čtrnácti domácnostmi. Využit byl komerční automatizační systém bez predikce, založený na tarifním signálu a lokálním řízení technologií. Přesto se podařilo dosáhnout reálného vlivu

na zatížení nízkonapěťové sítě, aniž by byl narušen komfort. Ten byl ověřen jak subjektivními výpověďmi, tak stabilními teplotními průběhy. Tato studie ukazuje, že ani pokročilá predikce není nezbytnou podmínkou pro dosažení efektu: důležitější je kvalita realizace, správné nastavení a kontext systému. Studie [24] tak slouží jako důležitý důkaz praktické realizovatelnosti flexibilního řízení v reálném měřítku.

Studie [29] zase ukazuje, že typ technologie zásadně ovlivňuje účinnost řízení. Přímotopné systémy zde umožnily výrazné snížení odběru během špiček (až o 93 %), zatímco u modulačního tepelného čerpadla nebylo možné dosáhnout srovnatelného výsledku. Studie sice neuvádí konkrétní procento redukce pro tuto variantu, ale výslovně konstatuje, že flexibilní reakce byla výrazně omezena. Příčinou byla složitější vnitřní logika řízení zařízení, konkrétně minimální cykly, hystereze a prioritizace ohřevu teplé užitkové vody, které znemožňovaly rychlé změny výkonu systému. Tento případ dokládá, že účinnost řízení je vždy limitována fyzikálními vlastnostmi a interní regulací daného zařízení a že ani pokročilý algoritmus nemůže zrychlit odezvu zařízení, která je technicky omezená například minimální dobou chodu, hysterezí nebo setrvačností

Studie [31], [32] se zaměřují na řízení v prostředí s vysokým stupněm kontroly. Studie [31] pracuje s reálným měřením teploty a výkonu v testovací budově, a i při jednoduchém řízení dosahuje úspory provozních nákladů kolem 20 %, i když za cenu mírného navýšení spotřeby. Studie [32] je založena na simulaci, ale model byl kalibrován dle reálných dat z fyzické budovy. Zde došlo ke zlepšení ukazatele FF z $-0,89$ na $+0,42$ při použití EMPC oproti konvenční PI regulaci. Přínos těchto studií spočívá v důsledně kontrolované metodice – v případě [31] včetně měření dynamiky prostředí, v případě [32] alespoň v důkladné validaci modelu.

Důležité poznatky přinášejí také novější reálně měřené projekty [26], [27], které byly realizovány v běžných domácnostech s různou technologií (kombinace tepelných čerpadel, akumulace, FV výroby). Ve všech těchto případech se podařilo prokázat, že flexibilní řízení může být efektivně implementováno i mimo laboratorní podmínky. Pokud je správně nastaven algoritmus, respektovány limity komfortu a uživatelům je ponechána možnost zásah přerušit nebo ovlivnit. Výsledky ukazují, že i větší agregovaný zásah (například v rámci celé větve sítě) lze realizovat bez zásadního diskomfortu obyvatel, pokud jsou změny rozloženy v čase a komunikovány uživatelům transparentně.

Důležitým zjištěním z demonstračních projektů například Studie [27] je také to, že ačkoliv během zásahu může být dosaženo velmi výrazného snížení odběru (až o 29 až 90 %),

po ukončení zásahu často následuje opětovné zvýšení spotřeby – tzv. rebound efekt. Tento nárůst odběru po skončení flexibilního období může částečně kompenzovat dosažené úspory a je tedy důležité hodnotit nejen okamžitý účinek zásahu, ale i jeho celkový vliv na energetickou bilanci systému a dlouhodobý komfort uživatelů. Tato studie je v tomto ohledu výjimečná, protože rebound efekt kvantifikuje detailně jak v absolutních hodnotách, tak ve vztahu ke strategii řízení. V ostatních analyzovaných studiích je tento aspekt buď zcela opomenut, nebo zmiňován pouze okrajově, přičemž pozornost je zaměřena zejména na dosažené úspory během samotného zásahu. Tento poznatek podtrhuje význam pečlivého nastavování parametrů řízení i komunikace se samotnými uživateli, aby nedocházelo k nechtěným negativním dopadům po skončení flexibilních opatření.

Syntéza všech případů ukazuje, že účinnost strategie není dána pouze algoritmem, ale vždy kombinací několika faktorů: dostupnosti lokálních zdrojů, typu vytápění, možností regulace, metodiky návrhu i míry zapojení uživatele. Prediktivní řízení nabízí značný optimalizační potenciál, ale ten může být reálně naplněn pouze při splnění řady podmínek – které se v běžném provozu často nevyskytují současně. Naopak jednodušší strategie se mohou ukázat jako lépe použitelné v prostředí s vyšší mírou neurčitosti, kde není zaručená predikční přesnost nebo okamžitá odezva systému. Výsledky jednotlivých studií je proto nutné interpretovat vždy v rámci konkrétního technického a provozního kontextu.

4.2 Reflexe komfortu a fyziologie v kontextu výsledků

Přestože většina analyzovaných studií deklaruje, že jedním z cílů je zachování komfortu, samotný pojem komfortu bývá výrazně zjednodušen na pouhé udržení vnitřní teploty v předem stanoveném pásmu. Ve všech studiích s reálným měřením [25], [26], [27], [34] byl komfort sledován různými způsoby, ale pouze Studie [25], [34] použily skutečně subjektivní hodnocení pomocí dotazníků nebo telefonických rozhovorů s uživateli, kteří byli součástí experimentu. U Studie [26] bylo hodnocení komfortu provedeno nepřímou – měřením vnitřní teploty a také sledováním, zda uživatelé během DR událostí prováděli nějaké zásahy do systému (což by signalizovalo narušení komfortu). Studie [27] hodnotila komfort rovněž nepřímou, a to prostřednictvím sledování rebound efektu po zásahu; pokud byl rebound výrazný, bylo to interpretováno jako možné narušení komfortu, ale žádné přímé subjektivní dotazování uživatelů zde neproběhlo. Ačkoliv by bylo možné očekávat, že všechny studie s reálným měřením použijí pro komplexní posouzení i subjektivní hodnocení komfortu, v praxi se tak stalo pouze ve dvou z těchto čtyř případů – a navíc v obou případech šlo o studie stejné autorské

skupiny. To může naznačovat (byť na malém vzorku), že subjektivní hodnocení komfortu není při reálných experimentech běžnou praxí.

Ve všech ostatních studiích je komfort vyhodnocován výhradně na základě interních modelových předpokladů. Například pomocí penalizace za čas strávený mimo komfortní interval. Výjimkou je zde [33], kde byl použit výpočtový model PMV/PPD dle normy EN 15251; většinu dne byly simulované hodnoty v komfortních pásmech, avšak při přechodu režimu došlo krátkodobě k překročení PPD >10 %, což signalizuje možnost vzniku diskomfortu při některých změnách režimu. Studie [32] pak uvádí, že při zásahu docházelo k prudkému nárůstu teploty až o 1,5 °C během 10 minut, nebo přechodu žádané hodnoty až o +2 °C za hodinu, což je dynamika, která by teoreticky mohla způsobovat overshoot reakci lidského organismu a potenciální vyšší míru diskomfortu. Jak je podrobněji rozebráno v kapitole 2, literární prameny uvádějí jako praktickou horní hranici rychlosti změny teploty pro komfortní vnímání hodnotu přibližně 2,4 °C/h. Samotná postupná změna žádané hodnoty o 2 °C za hodinu by tedy nemusela být vnímána negativně. Naproti tomu rychlá změna o 1,5 °C během 10 minut významně překračuje hranici stanovenou ASHRAE55, která udává maximální změnu teploty během 15 minut 1,1 °C. Tato změna má tedy vysokou pravděpodobnost na způsobení overshootu reakce lidského organismu, která má za následek výrazný subjektivní pocit nepohody. Ani v těchto případech však nebyla reálně vyhodnocována subjektivní percepce uživatelů a efekt rychlých změn prostředí zůstává pouze v rovině modelového posouzení.

Ani studie [31], přestože využívala model reálné budovy, neřešila skutečné vnímání tepelného komfortu. Komfort byl opět definován úzkým teplotním pásmem a penalizací jeho překročení v simulaci, avšak bez reálné validace s uživateli. Teploty byly stabilizovány v extrémně úzkém rozsahu kolem 21–22,5 °C, což prakticky znemožnilo vyvolání jakýchkoli fyziologických či psychologických reakcí na dynamické změny. Tento způsob řízení vedl spíše k potvrzení známého faktu, že pokud se prostředí téměř nemění, lidé ho budou vnímat jako komfortní. Neumožnil však žádné závěry o tom, jak uživatelé reálně vnímají teplotní výkyvy nebo jak by reagovali na skutečně flexibilní řízení s větší amplitudou změn.

Studie [25], [34], jako jediné realizované v reálném provozu s komplexním subjektivním hodnocením, obsahovaly reálnou zpětnou vazbu od uživatelů. Zásahy snížení výkonu byly navrženy tak, aby minimalizovaly dopad na obyvatele a skutečně vedly k velmi malým změnám teploty (většinou do $\pm 0,5$ °C, nikdy nepřesáhly ± 1 °C během zásahu). Ani po zásahu nebyly změny dramatické. Maximální nárůst +1,6 °C byl důsledkem tepelné setrvačnosti.

Studie probíhaly v reálných podmínkách dobře izolovaných domácností, jejichž nízké tepelné ztráty přirozeně omezovaly rozsah výkyvů.

Je proto zřejmé, že ačkoliv uživatelé subjektivně nevnímali diskomfort, studie neposkytuje odpověď na to, zda by bylo možné zvýšit flexibilitu řízení prostřednictvím větších teplotních změn, protože ty jednoduše nenastaly. Právě zde by bylo možné využít poznatky z fyziologických výzkumů. Pokud by byly uplatněny strategie s větším rozsahem řízení, ale stále v mezích vnímaného komfortu, mohl by být potenciál flexibilního řízení výrazně rozšířen bez ztráty spokojenosti uživatelů.

Lze tedy shrnout, že žádná z analyzovaných studií reálně nezkoumala fyziologickou ani psychologickou adaptaci člověka na dynamicky proměnlivé vnitřní prostředí. Lidská percepce komfortu je přitom zásadně ovlivněna nejen aktuální hodnotou teploty, ale zejména dynamickými faktory – rychlostí změny, směrem změny, předchozí expozicí, vnímanou kontrolou nad prostředím a psychologickým kontextem. Právě tyto aspekty však zůstávají v dostupných studiích téměř zcela opomíjeny.

Z uvedeného vyplývá zaprvé, dostupné výsledky tak fakticky nelze použít pro posouzení skutečných limitů chytrého řízení cílící na zvýšení energetické flexibility. Strategie testované s minimálními výkyvy teplot neposkytují žádné informace o tom, zda lze dosáhnout výraznějších energetických případně finančních úspor nebo větší flexibility při zachování komfortu. Zadruhé, většina studií přistupuje ke komfortu velice konzervativně. Nastavují řízení tak, aby teplota zůstávala ve velmi úzkém rozsahu (např. $\pm 0,5$ °C), v přehnané obavě o zajištění stabilního vnitřního prostředí. Tento přístup však ignoruje skutečnost, že lidé jsou schopni se na změny prostředí adaptovat, ať už fyziologicky (např. habituací), nebo behaviorálně. Všechny analyzované studie pracovaly s tak úzkým rozsahem teplotních změn, že ani nemohlo dojít k žádné výraznější fyziologické nebo subjektivní reakci. V těchto podmínkách je téměř jisté, že komfort nebude narušen – což ale zároveň znamená, že byl také výrazně omezen potenciál flexibility v kontextu komfortních limitů. Dostupné výzkumy přitom ukazují (viz kapitola 2), že pokud se změna teploty odehrává dostatečně pomalu (například do 1,5 °C/h, chceme-li být konzervativní a neriskovat možnost výskytu overshootu), může být subjektivně vnímána jako komfortní, i když celková změna přesáhne 2 °C (2,4 °C/h je praktická horní mez, kterou by se nemělo překročit, pokud si chceme být jistí udržením komfortu, 2 °C/h by také mělo být v souladu s komfortem, avšak je zvýšená pravděpodobnost výskytu overshoot reakce). Pokud jsou strategie postaveny na předpokladu, že komfort je ohrožen při sebemenší odchylce, dochází k jejich zbytečnému omezování a tím i ke snížení dosažitelné flexibility systému.

Jinými slovy, pokud řízení pracuje s komfortem jako s křehkým parametrem bez reálného testování hranic, nikdy nemůže plně využít potenciál, který flexibilní řízení prostředí nabízí.

Navíc i v případech, kdy by počáteční výkyv teploty mírně překročil komfortní hranici, nemusí jít o dlouhodobý problém. Lidský organismus a percepční systém vykazují schopnost adaptace prostřednictvím habituace, tedy postupného snižování citlivosti na opakovaný podnět. Pokud by se větší výkyvy v prostředí opakovaly pravidelně a měly předvídatelný průběh, je vysoce pravděpodobné, že by je uživatelé začali vnímat jako přijatelné. Tento efekt však žádná z analyzovaných studií systematicky nezkoumala, a přesto bývá komfortní pásmo často nastavováno zbytečně přísně. Právě to je jeden z největších nevyužitých potenciálů při návrhu flexibilních strategií řízení vnitřního prostředí.

4.3 Omezující faktory a přenositelnost výsledků

Při hodnocení výsledků jednotlivých případových studií je třeba zohlednit, že jejich přenositelnost do jiného prostředí nebo jiného typu budovy je výrazně omezená. To souvisí nejen s rozdílnými cíli studií, ale především s odlišnou metodikou, technickým kontextem a charakterem použitého prostředí.

Prvním klíčovým omezením je rozdíl mezi simulacemi a reálným provozem. Šest z analyzovaných studií pracovalo výhradně se simulačním prostředím, přičemž pouze některé z nich byly validovány vůči reálným datům. Výsledky získané v simulaci sice umožňují detailní optimalizaci, avšak postrádají behaviorální odezvu uživatelů a často zjednodušují fyzikální modely (např. ignorují infiltraci, vnitřní zisky, mikroklima jednotlivých zón). Simulace navíc předpokládají dokonalé předpovědi vstupních veličin (počasí, ceny), což není v reálném provozu dosažitelné.

Druhým omezením je typ použité budovy a technologie. Většina studií pracuje s novostavbami nebo s budovami s velmi nízkou energetickou náročností (např. pasivní domy, EPC A). Výsledky dosažené v těchto budovách – například minimální pokles teploty po vypnutí systému vytápění ve studiích [25], [34] - nelze jen tak přenést na starší nebo méně akumulací objekty. Podobně nelze porovnávat výsledky dosažené s přímotopnými jednotkami, zařízeními s provozem typu on/off a modulačními tepelnými čerpadly – každá technologie má jiné časové konstanty, setrvačnost a možnosti řízení.

Třetím omezením je klimatický a tarifní kontext. Studie byly prováděny v různých geografických oblastech (Velká Británie, Norsko, Švýcarsko, Nizozemsko aj.),

každá s odlišnými klimatickými podmínkami a strukturou distribuční soustavy. Některé strategie byly přímo navrženy s ohledem na specifický tarifní systém (např. spotové ceny Nord Poolu), který nemusí být aplikovatelný v jiných regionech. Také reakce budovy na stejné řízení se může lišit v závislosti na venkovních podmínkách, například vlivem solárních zisků nebo délky otopného období.

Posledním významným faktorem je míra standardizace hodnocení výstupů. Zatímco některé studie používají kvantitativní ukazatele flexibility (např. FF, FCF), jiné nabízejí pouze velmi stručný informace jakožto výstup. Navíc i v rámci kvantitativních přístupů se jednotlivé práce zaměřují na odlišné aspekty. Některé měří úsporu nákladů, jiné snížení emisí nebo odezvu na špičkové zatížení. Tato metodická nejednotnost komplikuje nejen přímé porovnání, ale i syntézu závěrů napříč studiemi. Hodnocení komfortu je rovněž velmi nejednotné od subjektivních rozhovorů až po penalizační funkce v rámci optimalizace, což dále snižuje přenositelnost výsledků do praxe.

Z výše uvedených důvodů je proto třeba brát závěry jednotlivých studií jako kontextově podmíněné a specifické. Jejich přenositelnost do jiné budovy, jiného regionu nebo jiného provozního nastavení je omezená. Význam těchto studií nespočívá v absolutních hodnotách výsledků, ale v ilustraci možností a limitů jednotlivých přístupů, které mohou sloužit jako inspirace pro budoucí návrhy systémů v konkrétních podmínkách.

4.4 Doporučení pro praxi

Na základě výsledků případových studií a poznatků z rešerše lze formulovat několik doporučení pro návrh a provoz flexibilních systémů řízení vnitřního prostředí budov:

- **Šířeji definovat komfortní pásma:** Současné strategie často používají zbytečně úzké rozsahy teplot (např. $\pm 0,5$ °C), čímž se ochuzují o potenciální flexibilitu. Vzhledem k fyziologické adaptabilitě uživatelů lze uvažovat o větších, ale řízených výkyvech, zejména při pomalejších změnách. Vhodným rámcem může být norma ASHRAE 55, přičemž doporučujeme využít její maximální tolerované dynamiky, s výhradou asymetrie v hodnocení směru změny – jak ukazují fyziologické poznatky, lidé zpravidla snášejí mírné ohřívání lépe než náhlé ochlazení. Proto by při návrhu flexibilních strategií měla být věnována zvláštní pozornost právě rychlému poklesu teploty, který může být vnímán jako výrazně nepříjemnější.
- **Kombinovat jednoduché tarifní signály s akumulací a predikcí:** Studie ukazují, že i bez složitých algoritmů lze dosáhnout posunu spotřeby v čase. Při vhodném nastavení systémů a využití dostupných obnovitelných zdrojů (např. FV) může být zásah efektivní i bez zásahu do komfortu.

- **Zohlednit dynamiku a kontext prostředí:** Řízení by nemělo pracovat pouze s aktuální hodnotou teploty, ale i s rychlostí její změny, zónovými rozdíly nebo historií expozice. To umožní přesnější odhad komfortu a lepší optimalizaci zásahu.
- **Pracovat s uživatelem, ne proti němu:** Studie ukazují, že pokud má uživatel možnost zásah přepnout, nebo pokud je komfortní výkyv pozvolný a předvídatelný, nevzniká diskomfort. Flexibilita by proto měla být navrhována tak, aby byla akceptovatelná a vnímána jako přirozená součást provozu.
- **V reálných projektech důsledně hodnotit i subjektivní odezvu uživatelů:** Subjektivní vnímání komfortu je klíčové pro posouzení akceptace a úspěšnosti řízení v praxi. Doporučuji proto při experimentálním zavádění pokročilých řídicích strategií zahrnout dotazníky, rozhovory či jiné formy zpětné vazby přímo od uživatelů, nejen technická a modelová data.

Tato doporučení mohou sloužit jako vodítko pro budoucí návrhy řízení systémů HVAC, jejichž cílem je kombinovat energetickou flexibilitu se zachováním kvality vnitřního prostředí.

5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala možnostmi flexibilního řízení vnitřního prostředí budov s důrazem na zachování tepelného komfortu uživatelů. Zvláštní pozornost byla věnována tomu, jak mohou strategie řízení HVAC systémů reagovat na požadavky elektrické sítě, aniž by docházelo k narušení vnímání komfortu. Cílem práce bylo zhodnotit, jak různé technické a algoritmické přístupy pracují s pojmem komfortu, a do jaké míry využívají potenciál lidské adaptability v dynamicky se měnícím prostředí.

Druhá kapitola ukazuje, že tepelný komfort je dynamický a individuální jev, který je ovlivněn celou řadou faktorů. Mimo jiné rychlostí a směrem změny teploty, zónovým rozložením, předchozí expozicí, možnostmi kontroly nad prostředím, a také neurofyziologickými mechanismy, jako je overshoot, aliestezie nebo habituace. Zásadním zjištěním je, že komfort nelze definovat pouze na základě okamžité teploty, ale že závisí i na způsobu, jakým se prostředí mění. V tomto kontextu byly rovněž kriticky zhodnoceny limity běžně používaných modelů (např. PMV/PPD) a poukázáno na skutečnost, že rychlost teplotních spádů definovaných normou ASHRAE 55 je při zvyšování teploty přísnější, než odpovídá reálné percepční toleranci, zatímco při ochlazování umožňuje větší odchylky, které mohou být vnímány negativně.

Analýza deseti případových studií potvrdila, že většina z nich používá velmi konzervativní strategie řízení. Často s fixní žádanou teplotou a úzkým komfortním rozmezím bez zohlednění dynamických aspektů. Komfort bývá hodnocen převážně nepřímo,

prostřednictvím penalizačních funkcí nebo odhadovaných modelů. Ze čtyř studií s reálným měřením pouze dvě pracovaly s reálnými daty a zároveň se subjektivní zpětnou vazbou od uživatelů. Studie rovněž ukázaly, že efektivita řízení závisí nejen na typu algoritmu, ale také na vlastnostech budovy, dostupnosti obnovitelných zdrojů a míře akumulace.

Na výzkumnou otázku, zda je možné flexibilně řídit HVAC systémy bez narušení komfortu v dynamicky se měnícím prostředí, lze odpovědět pozitivně, ale pouze s důležitým omezením. Komfort sice nebyl v analyzovaných strategiích narušen, ale zároveň nebyl ani skutečně otestován v podmínkách s většími změnami. Většina strategií byla velice konzervativní v přehnané obavě o narušení kvality vnitřního prostředí a tím se připravila o možnost využít plný potenciál energetické flexibility v budově. Komfort byl chápán převážně staticky, bez hlubší reflexe percepční odezvy uživatelů. Přitom právě tato schopnost adaptace, potvrzená výzkumy uvedenými v druhé kapitole této práce, může být klíčem k návrhu systémů, které umožní větší výkyvy teploty bez ztráty vnímané pohody.

Práce tak přináší přehled a syntézu nejen technických přístupů, ale i fyziologických a částečně behaviorálních souvislostí komfortu v budovách. Hlavním přínosem je překlenutí mezi obory a propojení jak technických aspektů, tak lidského vnímání změn ve vnitřním prostředí. Tato práce poukazuje na to, že současné strategie odezvy na poptávku často nevyužívají plného potenciálu flexibility, které by jim poskytla realističtější a adaptivnější definice komfortu. Tato mezera je příležitostí jak pro výzkum, tak pro návrh nových typů řízení.

Omezením práce je její rešeršní charakter a závislost na externích případových studiích. Výsledky nebyly ověřeny vlastním měřením ani simulací a přenositelnost závěrů je podmíněna kontextem každé ze studií. Také subjektivní vnímání komfortu je individuální a může se lišit mezi populacemi, sezónami nebo kulturními kontexty, což ztěžuje generalizaci.

Další výzkum by se měl zaměřit na experimentální testování řízení s větší amplitudou změn teploty, včetně reálného měření komfortu a zapojení uživatelů do hodnocení. Zvláštní důraz by měl být kladen na rychlost změny, zónové rozdíly a adaptaci uživatelů v čase. Součástí výzkumu by mělo být také ověření různých forem interaktivní komunikace s uživateli například prostřednictvím notifikací, personalizovaných nastavení, zpětné vazby nebo možností ovlivnit řízení v reálném čase, což by mohlo významně přispět k vyššímu přijetí změn a celkové spokojenosti. Takový výzkum by mohl výrazně přispět k návrhu regulačních systémů, které by byly flexibilní vůči požadavkům elektrické sítě, aniž by kompromitovaly komfortní podmínky v budovách.

Seznam použité literatury

- [1] M. Vellei, R. de Dear, C. Inard, and O. Jay, “Dynamic thermal perception: A review and agenda for future experimental research,” *Build Environ*, vol. 205, p. 108269, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108269.
- [2] Y. Zhu, Q. Ouyang, B. Cao, X. Zhou, and J. Yu, “Dynamic thermal environment and thermal comfort,” *Indoor Air*, vol. 26, no. 1, pp. 125–137, Feb. 2016, doi: 10.1111/INA.12233.
- [3] M. Luo, J. Yu, Q. Ouyang, B. Cao, and Y. Zhu, “Application of dynamic airflows in buildings and its effects on perceived thermal comfort,” *Indoor and Built Environment*, vol. 27, no. 9, pp. 1162–1174, Nov. 2018, doi: 10.1177/1420326X17702520/ASSET/BC9B27EE-600C-4702-A23F-185A700FCEE3/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1420326X17702520-FIG14.JPG.
- [4] H. Al Jebaei and A. Aryal, “Dynamic Thermal Comfort-based Temperature Setpoint Controls,” vol. 11, pp. 619–625, May 2024, Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=simbuild2024_2203
- [5] T. H. BENZINGER, “Peripheral cold- and central warm-reception, main origins of human thermal discomfort,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 49, no. 6, pp. 832–839, 1963, doi: 10.1073/PNAS.49.6.832.
- [6] A. A. Romanovsky, “Thermoregulation: some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system,” *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, vol. 292, no. 1, Jan. 2007, doi: 10.1152/AJPREGU.00668.2006.
- [7] M. Luo *et al.*, “The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and impication,” *Build Environ*, vol. 95, pp. 322–329, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.07.015.

- [8] A. K. Mishra, M. G. L. C. Loomans, and J. L. M. Hensen, "Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions — An overview," *Build Environ*, vol. 109, pp. 82–100, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2016.09.016.
- [9] M. Vellei *et al.*, "Dynamic thermal perception under whole-body cyclical conditions: Thermal overshoot and thermal habituation," *Build Environ*, vol. 226, p. 109677, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109677.
- [10] J. L. M. Hensen, "Literature review on thermal comfort in transient conditions," *Build Environ*, vol. 25, no. 4, pp. 309–316, Jan. 1990, doi: 10.1016/0360-1323(90)90004-B.
- [11] M. Favero, I. Sartori, and S. Carlucci, "Human thermal comfort under dynamic conditions: An experimental study," *Build Environ*, vol. 204, p. 108144, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108144.
- [12] H. Zhao, W. Ji, S. Deng, Z. Wang, and S. Liu, "A review of dynamic thermal comfort influenced by environmental parameters and human factors," *Energy Build*, vol. 318, p. 114467, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2024.114467.
- [13] S. Kang *et al.*, "Toward A Dynamic Comfort Model for Human-Building Interaction in Grid-Interactive Efficient Buildings: Supported by Field Data," Mar. 2023, Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2303.07206v1>
- [14] H. Zhang, "Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments." Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/11m0n1wt>
- [15] A. Pourghorban, V. W. C. Chang, and J. Zhou, "Electroencephalograph (EEG) Insights into Short-Term Thermal Adaptation and Alliesthesia: From Rapid Change to Steady State," *Build Environ*, vol. 280, p. 113098, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2025.113098.
- [16] C. G. Evans, L. Chang, and J. E. Gestwicki, "Heat Shock Protein 70 (Hsp70) as an Emerging Drug Target," *J Med Chem*, vol. 53, no. 12, p. 4585, Jun. 2010, doi: 10.1021/JM100054F.
- [17] C. K. C. Lam and K. K. L. Lau, "Effect of long-term acclimatization on summer thermal comfort in outdoor spaces: a comparative study between Melbourne and Hong

- Kong,” *Int J Biometeorol*, vol. 62, no. 7, pp. 1311–1324, Jul. 2018, doi: 10.1007/S00484-018-1535-1/METRICS.
- [18] D. Chong, N. Zhu, W. Luo, and Z. Zhang, “Broadening human thermal comfort range based on short-term heat acclimation,” *Energy*, vol. 176, pp. 418–428, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.04.007.
- [19] A. Uğursal and C. H. Culp, “The effect of temperature, metabolic rate and dynamic localized airflow on thermal comfort,” *Appl Energy*, vol. 111, pp. 64–73, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.APENERGY.2013.04.014.
- [20] S. Cao, X. Li, B. Yang, and F. Li, “A review of research on dynamic thermal comfort,” *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 435–448, Jul. 2021, doi: 10.1177/01436244211003028/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_01436244211003028-FIG2.JPEG.
- [21] F. C. Baker, F. Sibozza, and A. Fuller, “Temperature regulation in women: Effects of the menstrual cycle,” *Temperature*, vol. 7, no. 3, pp. 226–262, Jul. 2020, doi: 10.1080/23328940.2020.1735927.
- [22] M. He *et al.*, “Does BMI affect thermal comfort in young people in warm indoor environments? Evidence from a climate chamber experiment in non-normal BMIs,” *Journal of Building Engineering*, vol. 106, p. 112618, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.112618.
- [23] “1 - FANGER - Thermal Comfort - 1972 | PDF” Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/446944727/1-FANGER-Thermal-comfort-1972>
- [24] R. Gupta and J. Morey, “Evaluation of residential demand response trials with smart heat pumps and batteries and their effect at the substation feeder,” *J Clean Prod*, vol. 403, p. 136760, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.136760.
- [25] R. Gupta and J. Morey, “Empirical evaluation of demand side response trials in UK dwellings with smart low carbon technologies,” *Renew Energy*, vol. 199, pp. 993–1004, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.09.008.

- [26] S. O’Connell, G. Reynders, and M. M. Keane, “Impact of source variability on flexibility for demand response,” *Energy*, vol. 237, p. 121612, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.121612.
- [27] F. L. Müller and B. Jansen, “Large-scale demonstration of precise demand response provided by residential heat pumps,” *Appl Energy*, vol. 239, pp. 836–845, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.01.202.
- [28] M. Hall and A. Geissler, “Comparison of Flexibility Factors and Introduction of A Flexibility Classification Using Advanced Heat Pump Control,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 8391*, vol. 14, no. 24, p. 8391, Dec. 2021, doi: 10.3390/EN14248391.
- [29] J. Clauß, S. Stinner, I. Sartori, and L. Georges, “Predictive rule-based control to activate the energy flexibility of Norwegian residential buildings: Case of an air-source heat pump and direct electric heating,” *Appl Energy*, vol. 237, pp. 500–518, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.12.074.
- [30] A. Balint and H. Kazmi, “Determinants of energy flexibility in residential hot water systems,” *Energy Build*, vol. 188–189, pp. 286–296, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.02.016.
- [31] P. J. C. Vogler-Finck, R. Wisniewski, and P. Popovski, “Reducing the carbon footprint of house heating through model predictive control – A simulation study in Danish conditions,” *Sustain Cities Soc*, vol. 42, pp. 558–573, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.SCS.2018.07.027.
- [32] C. Finck, R. Li, and W. Zeiler, “Economic model predictive control for demand flexibility of a residential building,” *Energy*, vol. 176, pp. 365–379, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.03.171.
- [33] T. Q. Péan, J. Ortiz, and J. Salom, “Impact of Demand-Side Management on Thermal Comfort and Energy Costs in a Residential nZEB,” *Buildings 2017, Vol. 7, Page 37*, vol. 7, no. 2, p. 37, May 2017, doi: 10.3390/BUILDINGS7020037.