

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2019

**JAN
ŠAFRÁNEK**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

MODELOVANÍ SYSTÉMU TABS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šafránek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **437123**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelování systému TABS

Název diplomové práce anglicky:

Modelling of TABS System

Pokyny pro vypracování:

Sestavte matematický model sálavé otopné soustavy s akumulací hmotou TABS (Thermo Active Building System). Porovnejte různé přístupy v modelování systému a zvolte vhodnou variantu pro prediktivní regulaci. Modely porovnejte s výsledky experimentu na skutečném díle a ověřte jejich platnost.

Seznam doporučené literatury:

ZMRHAL, V. Sálavé chladičové systémy. Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2005.
ŠIROKÝ, J., OLDEWURTEL, F., CIGLER, J., PRÍVARA, S. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. Applied Energy. 88(2011), pp. 3079-3087.
LIM J., JO, J., H., KIM, Y., Y., YEO, M., S., KIM K., W., Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings. Building and Environment 41 (2006), pp. 60-73.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

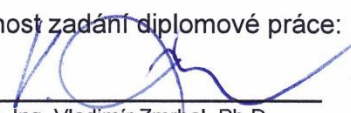
doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

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

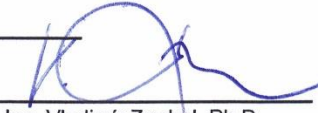
Datum zadání diplomové práce: **24.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.06.2019**

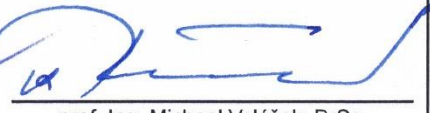
Platnost zadání diplomové práce:



doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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

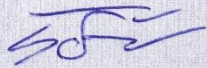


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2019
Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Diplomová práce se zabývá vývojem matematických modelů pro prediktivní regulaci vytápění s použitím systému aktivací betonového jádra (TABS). V rámci této práce bylo vytvořeno sedm matematických modelů popisujících fyzikální chování budovy. Pro ověření teoretických předpokladů modelů byl vytvořen experimentální objekt mini TABS, který sloužil pro testovací účely.

The diploma thesis deals with the development of mathematical model for predictive control of heating with the concrete core activation system (TABS). Seven mathematical models describing physical behaviour of a building have been developed within this thesis. The experimental mini TABS building was constructed for validation of theoretical assumptions.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Modelování systému TABS“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Zmrhala, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 1. 6. 2019

Jan Šafránek

OBSAH

1	CÍL PRÁCE.....	5
2	TEPELNÁ AKTIVACE BETONOVÉHO JÁDRA.....	6
2.1	Úvod a historie tepelné aktivace betonového jádra	6
2.2	Technická realizace.....	6
2.3	Výhody TABS systému	6
2.4	Typy aplikací TABS	8
2.4.1	Podlahové vytápění.....	8
2.4.2	Sálavé stropy.....	9
2.4.3	Desky s dutým jádrem	9
2.4.4	Betonové jádro.....	10
3	REGULACE.....	11
3.1	Prediktivní řízení.....	11
3.2	Matematický model.....	12
3.2.1	White box model.....	12
3.2.2	Grey box model	12
3.2.3	Black box model	12
3.3	Identifikace matematického modelu budovy	12
4	EXPERIMENTÁLNÍ OBJEKT MINI TABS	14
4.1	Stavba základní konstrukce na UCEEB.....	15
4.2	Přestavba objektu mini TABS.....	16
4.2.1	Zateplení objektu mini TABS.....	17
4.2.2	Stavba střechy a vnějšího opláštění objektu mini TABS.....	18
4.2.3	Otopná soustava.....	19
4.3	Rozvaděč.....	22
4.4	Technické specifikace mini TABS	23
5	TVORBA MATEMATICKÝCH MODELŮ	25
5.1	Modely objektu mini TABS.....	25
5.2	Popis modelu 1	27
5.3	Popis modelu 2.....	29
5.3.1	Soustava diferenciálních rovnic.....	30
5.4	Popis modelu 3.....	33
5.5	Popis modelu 4.....	33
5.6	Popis modelu 5.....	33
5.7	Popis modelu 6.....	34

5.7.1	Soustava diferenciálních rovnic.....	35
5.8	Popis modelu 7.....	37
5.9	Simulace matematických modelů	38
5.9.1	Ustálení na konstantní teplotě s nulovým vstupem do TABS	38
5.9.2	Ustálení s nulovým vstupem do TABS	40
5.10	Závěr	43
6	KALIBRACE MODELŮ	44
6.1	Kalibrace matematických modelů.....	45
6.1.1	Pasivní kalibrace modelů	45
6.1.2	Aktivní kalibrace modelů	46
6.2	Kalibrace upravených modelů zvýšením tepelné ztráty	48
6.2.1	Pasivní kalibrace modelů	48
6.2.2	Aktivní kalibrace modelů	49
6.3	Kalibrace upravených modelů zvýšením tepelné kapacity místnosti	52
6.4	Finální kalibrace všech modelů.....	55
6.4.1	Finální kalibrační verze Model 2	56
6.4.2	Finální kalibrační verze Model 3	57
6.4.3	Finální kalibrační verze Model 4	58
6.4.4	Finální kalibrační verze Model 5	59
6.4.5	Finální kalibrační verze Model 6	60
6.4.6	Finální kalibrační verze Model 7	62
7	ZÁVĚR.....	64
7.1	Shrnutí.....	66
8	LITERATURA.....	67
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
10	SEZNAM TABULEK	69

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Značka	Popis	Jednotka
$C_{interier}$	tepelná kapacita interiéru	[J/K]
C_{TABS}	tepelná kapacita stropu TABS	[J/K]
c_w	měrná tepelná kapacita vody	[J/(kg·K)]
C_w	tepelná kapacita vody	[J/K]
C_{Zone}	tepelná kapacita vzduchu v místnosti	[J/K]
d_{TABS}	tloušťka stropu TABS	[m]
$k_{interier_out}$	měrný tepelný výkon mezi interiérem a exteriérem	[W/K]
$k_{interier_zone}$	měrný tepelný výkon mezi interiérem a místností	[W/K]
k_{pipe_TABS}	měrný tepelný výkon mezi vodou a stropem TABS	[W/K]
k_{TABS_out}	měrný tepelný výkon mezi stropem TABS a exteriérem	[W/K]
$k_{TABS_Z_kon}$	měrný tepelný výkon konvekcí mezi stropem TABS a místností	[W/K]
$k_{TABS_Z_rad}$	měrný tepelný výkon radiací mezi stropem TABS a interiérem	[W/K]
k_{TABS_zona}	měrný tepelný výkon mezi stropem TABS a místností	[W/K]
k_{water}	měrný tepelný výkon mezi přívodní a vratnou vodou	[W/K]
k_{zona_out}	měrný tepelný výkon mezi místností a exteriérem	[W/K]
L_{pipe}	délka potrubí	[m]
\dot{m}_w	hmotnostní průtok vody	[kg/s]
Q_{occup}	vnitřní tepelné zisky	[W]
Q_{solar}	solární tepelné zisky	[W]
r_e	vnější poloměr potrubí	[m]
r_i	vnitřní poloměr potrubí	[m]
S_g	plocha podlahy	[m ²]
S_{TABS}	plocha stropu TABS	[m ²]
S_{TABS_ver}	vertikální plocha stropu TABS	[m ²]
S_{wall}	plocha stěn	[m ²]
S_{win}	plocha okna	[m ²]
T_{amb}	teplota venkovního vzduchu	[°C]
T_{MTR}	střední radiační teplota v místnosti	[°C]

T_{TABS}	střední teplota betonového stropu TABS	[°C]
T_{w1}	teplota přívodní vody	[°C]
T_{w2}	teplota vratné vody	[°C]
T_z	teplota vzduchu v místnosti	[°C]
U_g	součinitel prostupu tepla podlahy	[W/(m ² ·K)]
U_{TABS}	součinitel prostupu tepla betonového stropu TABS	[W/(m ² ·K)]
U_{wall}	součinitel prostupu tepla stěny	[W/(m ² ·K)]
U_{win}	součinitel prostupu tepla oknem	[W/(m ² ·K)]
α_i	součinitel přestupu tepla uvnitř potrubí	[W/(m ² ·K)]
α_{TABS}	součinitel přestupu tepla z TABS do místnosti	[W/(m ² ·K)]
λ_{TABS}	tepelná vodivost stropu TABS	[W/m·K]

1 CÍL PRÁCE

V dnešní době jsou kladeny nároky na snižování spotřeby energie na provoz budov z důvodu vyšších cen energií a ochrany životního prostředí. Velká část této energie se spotřebovává na vytápění a chlazení pro zajištění komfortních podmínek v prostorách budov. Prediktivní regulace vytápění budov s aktivací betonového jádra může, oproti konvenčnímu způsobu ekvitermní regulace, výrazně snížit provozní náklady na vytápění.

Cílem této práce je návrh matematických modelů pro prediktivní regulaci vytápění aktivního betonu. Bylo vytvořeno sedm matematických modelů popisujících fyzikální chování termodynamiky budovy. Předpokladem matematického modelování je vytvořit co nejjednodušší soustavu diferenciálních rovnic, které co nejpřesněji popisují fyzikální děje, které se v soustavě odehrávají.

V rámci diplomové práce byl vytvořen experimentální objekt mini TABS, který sloužil k ověření teoretických předpokladů modelů. Teoretické matematické modely byly porovnány s experimentálním objektem mini TABS. Na základě porovnání došlo k úpravě teoretických matematických modelů a vytvoření modelů vhodných pro prediktivní regulaci vytápění aktivního betonu. Jednotlivé úpravy modelů jsou podrobně rozebrány a odůvodněny z důvodu aplikace dané metodiky na reálný projekt prediktivní regulace vytápění aktivního betonu.

2 TEPELNÁ AKTIVACE BETONOVÉHO JÁDRA

2.1 Úvod a historie tepelné aktivace betonového jádra

Tepelná aktivace konstrukcí budovy je způsob vytápění, který se začal využívat ve 30. letech 20. století. Ve Spojených státech tento systém prosazoval architekt Frank Lloyd Wright, když při stavbě tzv. Usonian buildings vkládal do konstrukce podlahy kovové potrubí, jež sloužilo k sálavému vytápění objektu. V Evropě se mezitím začal rozšiřovat systém Crittall, který fungoval na stejném principu. Na našem území tento systém instalovala již před druhou světovou válkou firma Skokan, a ještě do dnešní doby lze nalézt budovy, kde je tento systém udržován a ke spokojenosti vlastníků i nájemníků provozován. [L1]

Po válce u nás postupně docházelo k nevhodnému nasazování tohoto způsobu vytápění i do budov s lehkým obvodovým pláštěm a velkými solárními zisky, kde tato kombinace byla odsouzena k neúspěchu. Až od 90. let se systém aktivace konstrukcí opět začal častěji využívat. [L1]

Tehdejší neúspěch tohoto způsobu vytápění a chlazení byl způsoben zejména nízkou tepelně izolační kvalitou obálky budovy, nedostatečným výkonem chlazení, nečistota se vyskytovala i nežádoucí kondenzace vlhkosti, docházelo k problémům s těsností svárů či korozi rozvodného potrubí nebo jejich porušením neodborným zásahem do konstrukce. [L1]

2.2 Technická realizace

Systém tepelné aktivace konstrukce (v angl. nazývaný TABS – thermally activated building systems nebo též CCA – concrete core activation, v němčině pak BKT – Betonkernaktivierung) je tedy systém pro vytápění a chlazení zabudovaný do podlah či stropů budov. Systém se skládá z potrubí různé konstrukce integrovaných v betonových vrstvách konstrukce stropu. Skrze potrubí potom proudí teplotně nosná látka (např. voda), které se stará o tepelnou výměnu mezi betonovou deskou (a následně vnitřním prostředím). [L1]

V současné době se namísto kovového potrubí využívají PEX hadice (ze zesíťovaného polyetylenu), takže odpadá problém s korozi a netěsností spojů. Koncept systému je nutné ale dobře navrhnout už ve fázi projektu a přizpůsobit tomu i samotnou budovu, další technologie a způsob provozování budovy. Absence komplexního návrhu nebo nedostatek zkušeností jsou častými faktory, které brání širšímu rozvoji TABS systému. TABS dnes nalézá uplatnění hlavně v kompaktních budovách s nízkými tepelnými ztrátami a malými tepelnými zisky. [L1]

2.3 Výhody TABS systému

Oproti konvenčním přístupům vytápění a chlazení lze u TABS, díky velké tepelné kapacitě betonové konstrukce a velké ploše, která je využita k přestupu tepla/chlady do jednotlivých místností, využít i nízkých teplot otopné vody, resp. vyšších teplot pro chlazení k zajištění

dostatečného tepelného komfortu. Pro případ vytápění lze použít nízkoteplotní zdroje s teplotou do 35 °C (například u tepelných čerpadel lze tuto výstupní teplotu získat s velmi příznivým topným faktorem COP), ale je možné uvažovat i o využití odpadního tepla nebo jiných zdrojů tepla. Naopak pro chlazení v našich podmínkách stačí teploty okolo 18 °C, což lze získat i pouhým pasivním protékáním chladicí vody horizontálním zemním výměníkem tepla nebo vrtem. [L1]

Aktivní využití rovněž vede k tomu, že lze posouvat (o několik hodin) dodávku tepla do betonové konstrukce. Toho se s úspěchem využívá zejména ke snížení odběrových špiček (např. v noci je primárně nízkoteplotní odběr TABS s vysokým COP, přes den odběr vzduchotechniky na vyšších teplotách s nižším COP), nebo k demand-response aplikacím (kdy je spotřeba řízena pomocí nějakého cenového signálu). Pokud se jedná o budovu, která má získat některou z forem energetické certifikace, lze za demand-response získat zajímavou bonifikaci. A je-li zdrojem TABS tepelné čerpadlo, je možné například také regulovat výkon podle aktuální ceny elektrické energie na trhu. [L1]

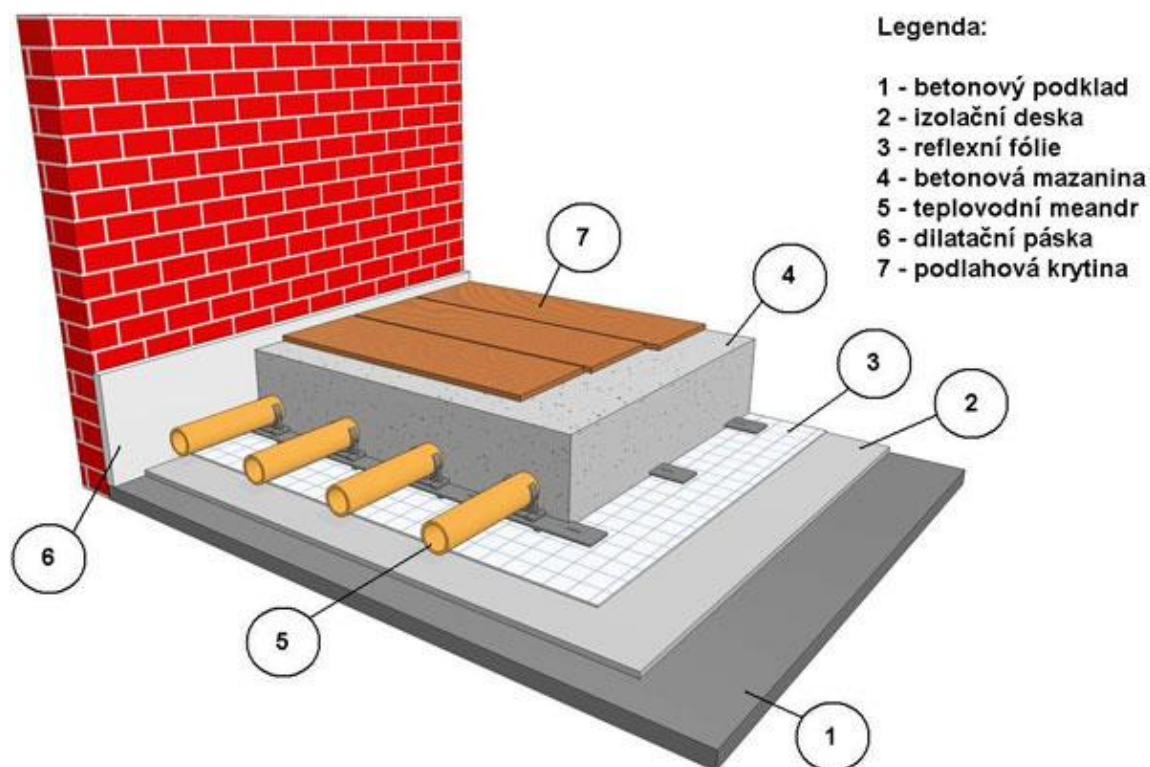
Z pohledu investičních nákladů je TABS zajímavý tím, že není třeba budovat podhledy, a tak lze do určité výšky budovy vměstnat více pater. TABS je navíc už sám o sobě koncovým prvkem, kterým je možné, jak vytápět, tak i chladit a nepotřebuje tak další přídatné prvky pro vytápění či chlazení. Jediným nutným doplňkem k TABS je systém nuceného větrání, zajišťující dostatečné množství čerstvého vzduchu, jeho úpravu na parametry, které v případě chlazení minimalizují riziko kondenzace vodní páry a starající se o odvod náhlých špiček vnitřních tepelných zisků. [L1]

2.4 Typy aplikací TABS

V oblasti TABS bylo provedeno mnoho výzkumů, ale názvosloví je stále velmi heterogenní. V závislosti na režimu provozu, poloze a pracovní tekutině existují různé typy TABS. Značení se ve světě může různými autory značně lišit. V následující kapitole budou představeny některé aplikace TABS. [L2]

2.4.1 Podlahové vytápění

Konstrukce podlahové otopné plochy vychází z termínu plovoucí podlaha. Značí to, že vlastní konstrukce otopné plochy není pevně spojena s nosnou částí podlahy, ale jakoby na ní plave tak, aby jí byly umožněny veškeré dilatační změny. [L3]



Obr. 2-1 Řez konstrukcí podlahové plochy – mokrá pokládka [L7]

SUCHÝ ZPŮSOB

Potrubí je uloženo do izolační vrstvy pod betonovou deskou. Od cementového potěru je potrubí odděleno speciální vrstvou, buď plastovou nebo kovovou fólií. Kovová lamela pod fólií zvyšuje pevnost podlahy a umožňuje rovnoměrný rozvod tepla. Podlaha vytvořená na suchý způsob, pracuje s vyššími teplotami otopné vody. Přírodní teplota vody se pohybuje v rozsahu 40 až 70 °C. Tento způsob se využívá tam, kde nám postačují nižší měrné tepelné výkony cca do 50 W/m² např. jako dodatková otopná plocha, či kde stačí pouze temperovat nebo se požaduje nízká konstrukční výška podlahy (rekonstrukce). [L3]

MOKRÝ ZPŮSOB

Otopné potrubí je zabetonován přímo do betonové vrstvy nad tepelně zvukovou izolaci. Předpokládaná teplota přírodní otopné vody je 35 až 55 °C a podlaha pracuje s měrným tepelným výkonem nad 50 W/m². [L3]

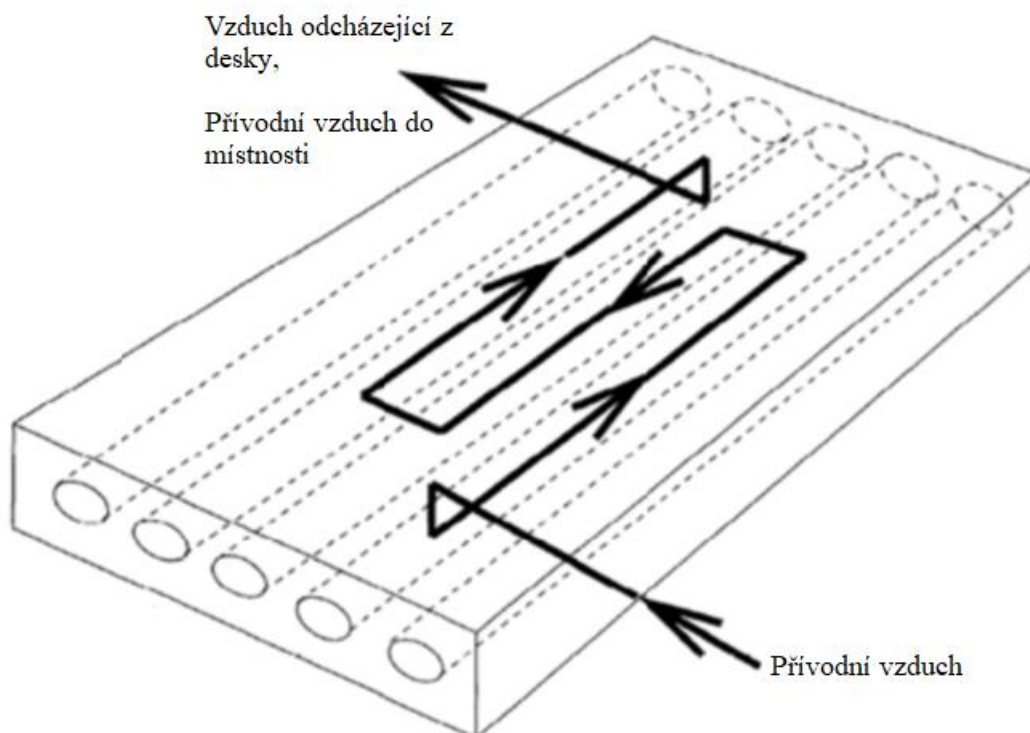
2.4.2 Sálavé stropy

Stropní vytápění s potrubím zalitým ve stropě se vyznačuje tím, že potrubí 3/8", 1/2" nebo 3/4" jsou přímo součástí stropní konstrukce (dnes se jednoznačně používá již jen plastů, tj. především PEXa - např. 17x2 mm). Mohou být uloženy přímo v betonu a pak plní i významnou roli vzhledem k nosnosti stropu jako armovací železo či jen v omítce stropu. [L3]

Při kladení potrubí přímo do betonu se jedná o starý způsob provedení (Crittall). V tomto případě musí být otopné potrubí kladeno současně s výstavbou stropu. Mezi bedněním a potrubím musí být před betonáží zajištěna distančními vzpěrami mezera cca 2 cm. Nároky kladené na preciznost provedení otopného hadu jsou velké, neboť při chybném vyrovnání a spádování dochází k neustálým provozním potížím s vypouštěním a odvzdušňováním. [L3]

2.4.3 Desky s dutým jádrem

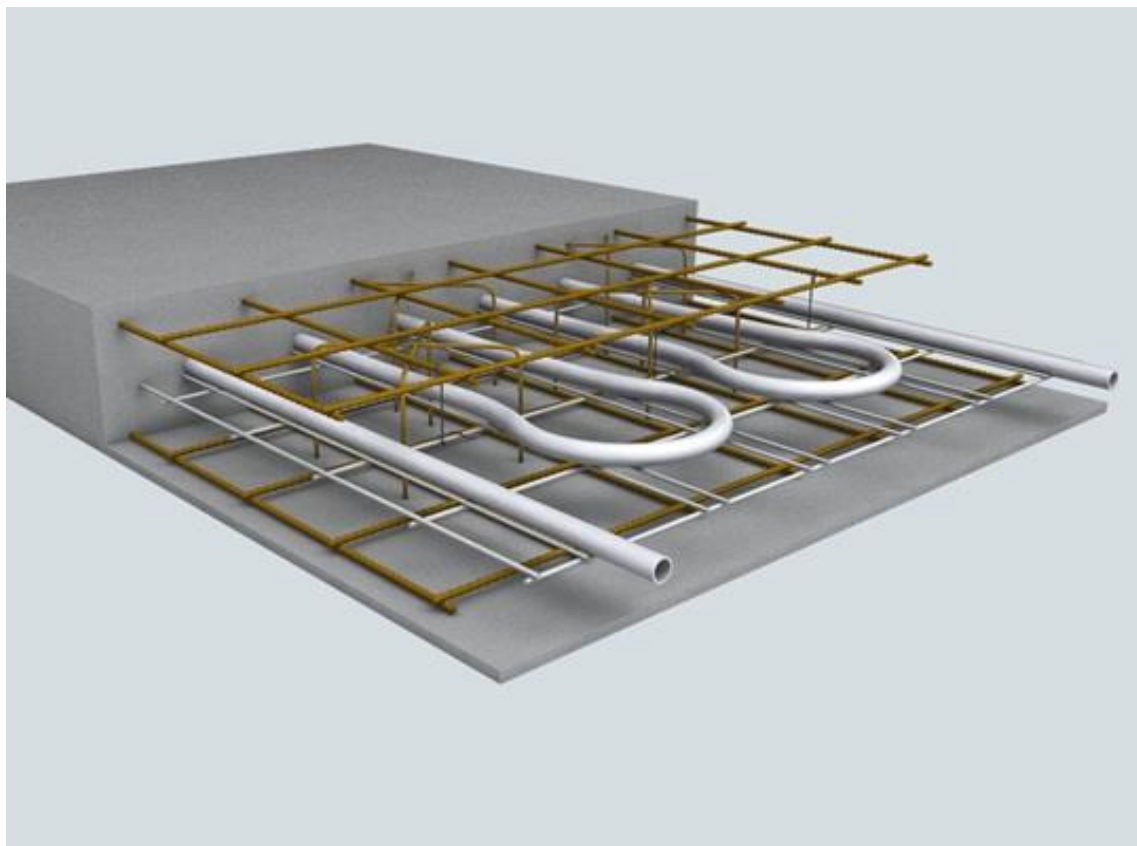
Jedná se o těžký typ konstrukce TABS. Používají se prázdná jádra prefabrikovaných betonových desek pro cirkulaci vzduchu. Desky s dutým jádrem se používají hlavně pro chlazení, noční větrání s venkovním vzduchem a pro free cooling. Cirkulaci vzduchu skrz jádra lze také využít pro větrání místností. [L2]



Obr. 2-2 Desky s dutým jádrem [L2]

2.4.4 Betonové jádro

Betonové jádro je TABS s vysokou hmotností. Potrubí je zapuštěno hluboko do betonové konstrukce. Betonové jádro může sloužit buď na ohřev nebo chlazení. Tepelný tok může směřovat na obě strany, nebo lze použít izolaci pro zajištění tepelného toku pouze jedním směrem.



Obr. 2-3 Betonové jádro [L8]

3 REGULACE

V dnešní době se používá několik typů řízení otopných soustav. Různé regulace mají různé nároky na instalaci, nastavení i provoz. Správná volba regulace závisí na konkrétním vytápěném objektu. Regulace otopné soustavy, i když tomu tak mnohdy nebývá, je nedílnou součástí jeho návrhu. Špatně navržená a vytvořená otopná soustava může být v některých případech jen velmi těžko regulovatelná. Zvolená strategie řízení určuje energetickou efektivitu celé otopné soustavy. Pro otopné soustavy s pomalou odezvou je vhodné prediktivní řízení. [L4]

3.1 Prediktivní řízení

Jádrum algoritmu prediktivního řízení je řešení optimalizační úlohy s daným kritériem optimality a modelem procesu. Kritéria optimality jsou volena podle konkrétní řešené úlohy. V průmyslu to typicky bývá požadavek na maximalizaci objemu výroby a zisku, minimalizaci vstupních nákladů, minimalizaci množství vedlejších produktů apod. V případě vytápění budovy je to dodržení požadovaných vnitřních teplot a minimalizace energie potřebné k vytápění. [L4]

Strategie prediktivního řízení nehledá pouze akční zásah pro následující periodu vzorkování jako u jiných metod, ale hledá se celá optimální posloupnost zásahů pro daný horizont predikce, a to na základě modelu procesu. Nalezená optimální posloupnost akčních zásahů by mohla být postupně použita v časovém intervalu daném horizontem predikce. Po zavedení všech vypočítaných akčních zásahů pro celý daný časový interval by se našla nová posloupnost. Takový přístup však není praktický. Představuje řízení v otevřené smyčce, kdy nemohou být brány v úvahu, a tedy ani eliminovány poruchové veličiny působící na systém v jednotlivých periodách vzorkování. Tento nedostatek je odstraněn zavedením zpětné vazby prostřednictvím klouzavého horizontu. Při použití klouzavého horizontu se z celé vypočítané optimální posloupnosti použije pouze první akční zásah a v následující periodě vzorkování se na základě nového měření vypočítá nová posloupnost. [L4]

Chování budovy je výrazně ovlivněno klimatickými podmínkami. Pro určení vývoje teploty uvnitř budovy je nutné uvažovat jakým klimatickým vlivům bude budova na horizontu predikce vystavena. Nejvíce ovlivňujícím faktorem je teplota venkovního vzduchu, mezi další patří například intenzita slunečního záření, případně rychlost větru. I když jsou předpovědi počasí pro veřejnost zcela běžná věc, získat přesné předpovědi počasí pro technické účely není jednoduché. Přesná předpověď počasí je jedním z nezbytných předpokladů pro správnou funkci prediktivního řízení. [L4]

Pro nastavení MPC regulátoru je třeba vždy nejdříve matematicky formulovat cíle řízení, tj. zvolit tzv. kritériální funkci, se kterou bude algoritmus MPC pracovat. Volba vhodné kritériální funkce ale není úplně triviální, navíc ne každá formulace kritériální funkce je vhodná pro použití v oblasti řízení budov [7]. Volba závisí nejen na tom, které parametry chceme řídit (například minimalizovat cenu vytápění, zachovat určité komfortní teploty atd.), ale je také třeba správně nastavit váhy u jednotlivých členů funkce (zastupujících výše zmíněné různé parametry řízení). [L1]

3.2 Matematický model

Matematické modelování je způsob reprezentování chování systému formou matematických rovnic. Model je navržen tak, aby co nejpřesněji popisoval chování daného systému. Porovnání výsledků se skutečnými daty získanými měřeními pak poskytuje komplexní představu o validaci modelu. Modelování a simulace nabízí možnost snížit pravděpodobnost selhání a optimalizovat výkon pro dynamické systémy. Tento proces šetří spoustu času, úsilí a peněz. [L5]

Tento přístup využívá maticovou formu k modelování dynamického systému, aby bylo možné specifikovat odezvy systémů s více vstupy a výstupy. Matematické modely takových systémů mají velký počet výstupů a stejně velký počet diferenciálních rovnic, které musí být vyřešeny, aby byly známy výstupy. Využití Laplaceovy transformace k řešení dané soustavy diferenciálních rovnic je snadnější než pomocí analytických metod. [L5]

Matematické modelování tepelných systémů je obvykle složité, protože pouze některé systémy mohou být reprezentovány jako lineární diferenciální rovnice. Většina tepelných systémů je reprezentována jako parciální diferenciální rovnice. Pokud se však předpokládá, že rozložení teploty je rovnoměrné, může být její dynamické chování modelováno lineárními obyčejnými diferenciálními rovnicemi. [L5]

3.2.1 White box model

Tento typ modelu je založen na dokonalém fyzikálním popisu dané budovy. Model se snaží co nejpřesněji popsat všechny fyzikální děje, které se v budově odehrávají. Pro tento typ modelu je potřeba znát podrobné geometrické a konstrukční specifikace budovy. Dále je nutno znát tepelné zisky jednotlivých částí budovy. Parametry modelu nejsou nijak upraveny na základě reálně měřených dat. [L6]

3.2.2 Grey box model

Model je založen na základním fyzikálním popisu dané budovy. Struktura modelu vychází z geometrické a konstrukční specifikace budovy. Ale parametry modelu jsou identifikovány z měření nebo ze simulací. [L6]

3.2.3 Black box model

Struktura modelu a parametry jsou statisticky identifikovány z reálného měření budovy nebo ze signálů generovaných simulací. Naopak není nijak využito konstrukčních a geometrických znalostí budovy. [L6]

3.3 Identifikace matematického modelu budovy

Klíčovou roli při generování předpovědi vývoje vnitřních teplot hraje matematický model, který popisuje chování dané budovy, resp. její části, která je pro účely předpovědi podstatná. Matematický model je možné získat pomocí modelování fyzikálních jevů nebo pomocí identifikace z měřených dat. [L4]

Metody matematického modelování vycházejí ze znalosti fyzikálních jevů, které se v budově odehrávají. Na jejich základě je pak konstruován jejich matematický model. Tento přístup ale vyžaduje pokročilé znalosti z oblasti termodynamiky budov a také podrobnější znalost stavebních detailů modelované budovy zohledňující i degradaci materiálu vlivem jeho stárnutí, což výrazně snižuje možnosti použití metod matematického modelování pro účely optimalizace systému řízení. [L4]

4 EXPERIMENTÁLNÍ OBJEKT MINI TABS

Pro reálný test prediktivní regulace TABS modelu bylo třeba vytvořit reálný experimentální model budovy. Zkonstruovaný objekt mini TABS zastupuje funkci reálné budovy.

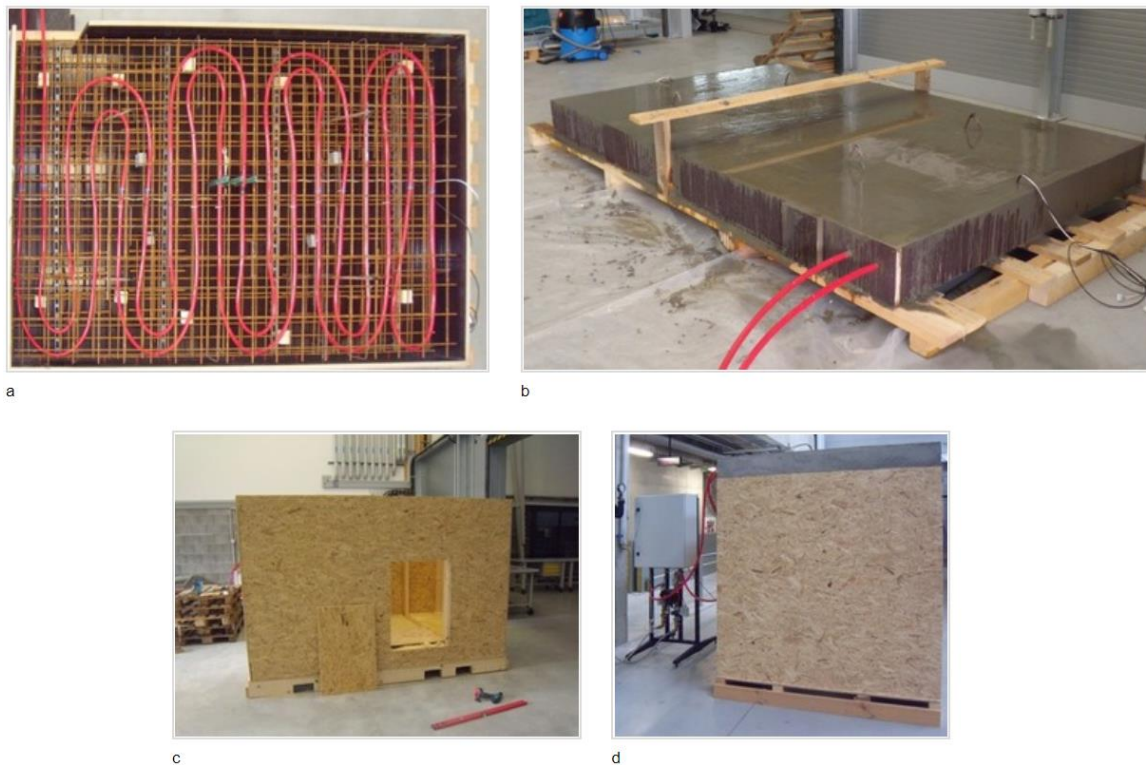
Jedná se o jedno-zónovou izolovanou budovu s měrnými tepelnými ztrátami blízcími se nízko energetické budově. Objekt mini TABS je osazen jedním oknem orientovaným na západ. Experimentální objekt mini TABS se nachází v lokalitě Praha Nové Butovice (souřadnice 50.0501947 N, 14.3555281 E). Rozměry objektu mini TABS, jsou uvedeny na Obr. 4-10, Obr. 4-11 a Obr. 4-12. Parametry jednotlivých konstrukcí jsou detailně uvedeny v kapitole 5.1.



Obr. 4-1 Objekt mini TABS

4.1 Stavba základní konstrukce na UCEEB

Základní konstrukce byla vytvořena Univerzitním centrem energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze. Konkrétně se jedná o nosnou dřevěnou konstrukci, na které se nachází betonový strop TABS. Potrubí (PEX) pro teplotonosnou látku je zabetonováno uprostřed stropu mezi ocelovou výztuž. Výška tohoto betonového TABS stropu je 18 cm.



Obr. 4-2 Realizace konstrukce objektu mini TABS [L1]

- a) detail rozložení potrubí v železné armatuře, která je následně zalita do betonu, vlevo nahoře přípojka pro vstupní a výstupní médium
- b) čerstvě vybetonovaný strop se vstupem a výstupem plastového potrubí
- c) příprava dřevěné kostry
- d) TABS strop usazený na dřevěnou kostru

4.2 Přestavba objektu mini TABS

Základní konstrukci objektu mini TABS bylo nutno přestavět na reálný model nízkoenergetické budovy.

Bylo potřeba experimentální objekt mini TABS osadit oknem a provést kompletní zateplení celého experimentálního objektu. Dále postavit střechu, která chrání budovu před nepřízní počasí a vytvořit otopnou soustavu, která se stará o vytápění budovy a následně TABS strop připojit k otopné soustavě.



Obr. 4-3 Základní konstrukce mini TABS

4.2.1 Zateplení objektu mini TABS

Obvodové stěny a střecha experimentálního objektu mini TABS byly pokryty fasádním polystyrenem Isover EPS 70 F tloušťky 120 mm. Polystyrén byl přilepen ke stěně montážním lepidlem PATTEX. Volba izolační vrstvy 120 mm neodpovídá standardům nízkoenergetických budov. Díky větší tepelné ztrátě měl mini TABS větší tepelnou dynamiku, a díky tomu rychleji reagoval na vstupní podmínky.

Západní stěna objektu mini TABS byla osazena oknem o rozměrech 600 x 900 mm. Okno tvořilo jediný vstupní otvor do objektu mini TABS.



Obr. 4-4 Zateplení vnější obálky objektu mini TABS

4.2.2 Stavba střechy a vnějšího opláštění objektu mini TABS

Střecha a vnější opláštění ochraňuje experimentální objekt mini TABS před vnějšími vlivy a nepřízní počasí. Střecha je tvořena dřevěnými OSB deskami. Ochranu střechy tvoří asphaltové šindelové pásy. Obvodové stěny jsou chráněny dřevěnou překližkou o tloušťce 9 mm.



Obr. 4-5 Stavba střechy a vnějšího opláštění

4.2.3 Otopná soustava

Pro regulaci vytápění objektu mini TABS bylo nutné vytvořit vhodnou otopnou soustavu. Bylo potřeba zajistit otopnou vodu a následnou distribuci do betonového stropu TABS. Řízení správné teploty bylo dosaženo směšovacím ventilem.

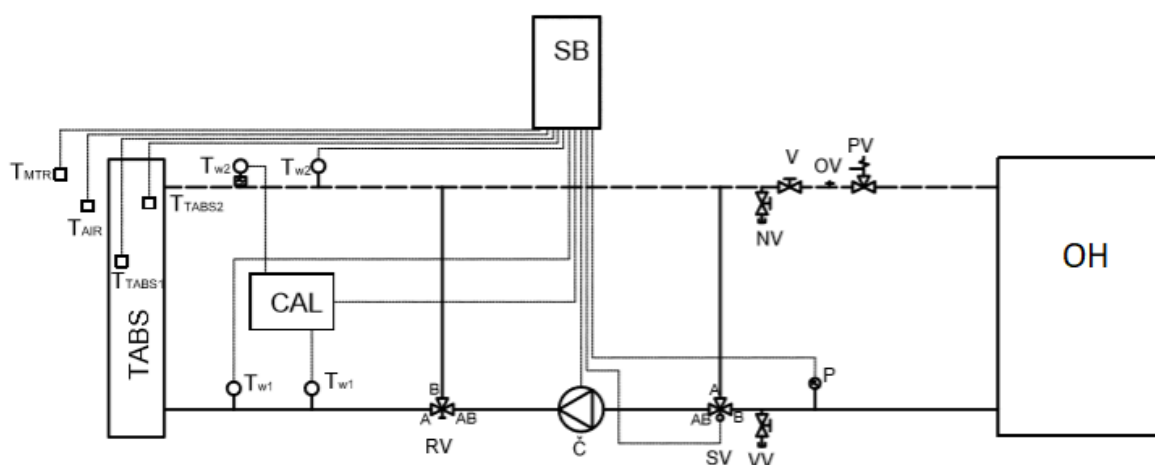


Obr. 4-6 Zapojení otopné soustavy

Otopná soustava se skládá s TABS konstrukce, která se stará o přenos tepla do objektu mini TABS. Přípravu otopné vody zajišťuje elektrický ohřívač DRAŽICE TO 5 IN. O distribuci teplonosné látky se stará oběhové čerpadlo KSB Calio S 25-40 180 mm. Otopná soustava byla osazena certifikovaným Kalorimetrem značky SHARKY, který měřil teplotu přívodní vody, teplotu vratné vody a zároveň průtok vody. Směšovací regulační ventil značky BELIMO reguloval přívod otopné vody. Směšovací ventil byl osazen elektrickým pohonem. Z důvodu příliš velkého průtoku vody musel být vytvořen zkrat v otopné soustavě rozdělovacím ventilem BOLA. Otopná soustava je izolována trubicemi TUBOLIT.



Obr. 4-7 Otopná soustava



Obr. 4-8 Schéma otopné soustavy

SB	Rozvaděč
CAL	Kalorimetr SHARKY
OH	Elektrický ohřivač vody DRAŽICE TO 5 IN
Č	Oběhové čerpadlo KSB Calio S 25-40 180
SV	Směšovací regulační ventil BELIMO
RV	Rozdělovací ventil BOLA
VV	Vypouštěcí ventil
NV	Napouštěcí ventil
V	Ventil
PV	Pojistný ventil 6 bar

OV	Odvzdušňovací ventil
T _{W1}	Senzor teploty přívodní vody
T _{W2}	Senzor teploty vratné vody
T _{TABS1}	Senzor teploty TABS 35 mm od povrchu
T _{TABS2}	Senzor teploty TABS 15 mm od povrchu
T _{AIR}	Senzor teploty vzduchu v mini TABS
T _{MRT}	Senzor střední radiační teploty v mini TABS

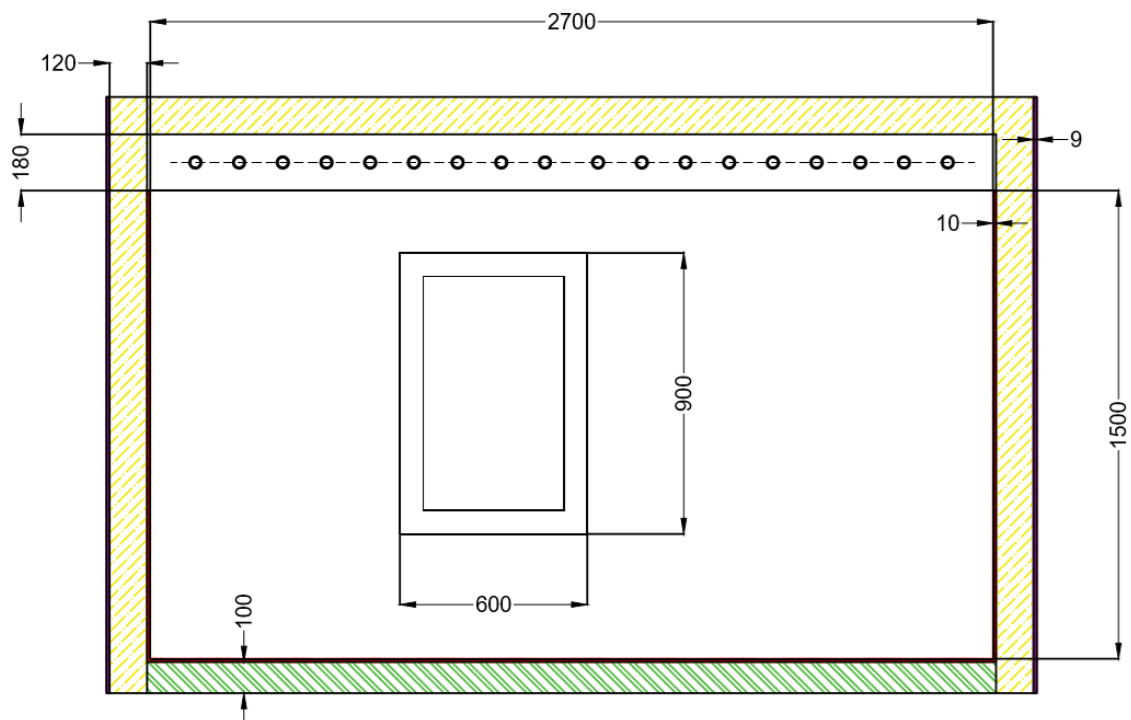
4.3 Rozvaděč

Do rozvaděče je přivedena elektrická energie, která je dále distribuována k jednotlivým komponentům. Dále jsou k němu připojeny všechny komponenty otopné soustavy a senzory. Otopná soustava je osazena kalorimetrem a dvěma záložními teplotními senzory umístěnými v jímkách. Objekt mini TABS je osazen dvěma teplotními senzory umístěnými přímo ve stropě TABS v hloubce 15 mm a 35 mm od povrchu. Uvnitř objektu mini TABS se nachází senzory na měření teploty vzduchu a střední radiační teploty.

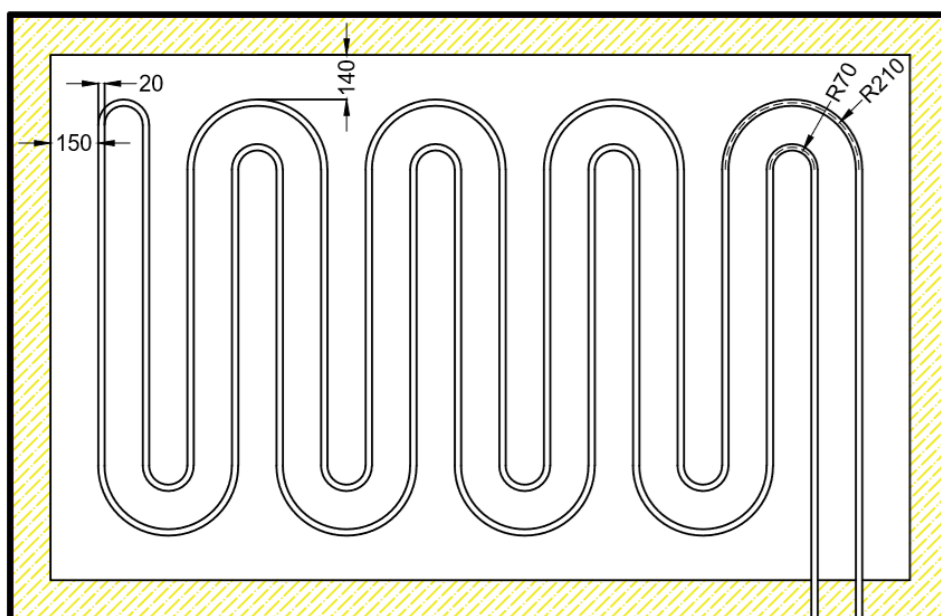


Obr. 4-9 Rozvaděč

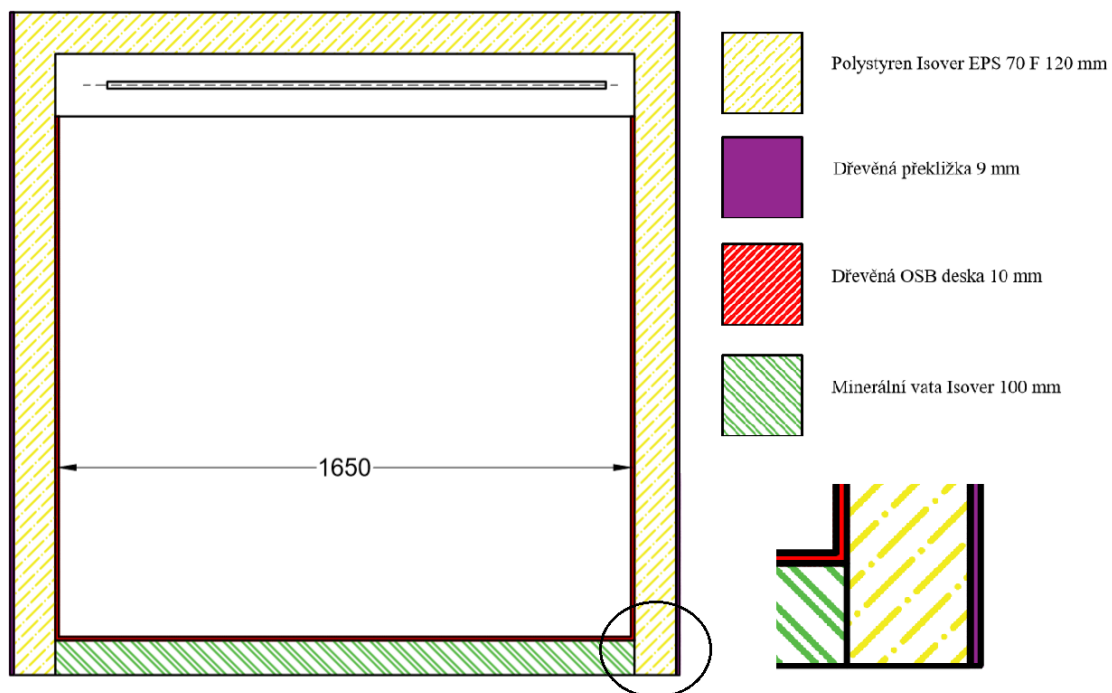
4.4 Technické specifikace mini TABS



Obr. 4-10 Řez podélný konstrukce objektu mini TABS



Obr. 4-11 Půdorys konstrukce objektu mini TABS



Obr. 4-12 Řez příčný konstrukce objektu mini TABS

5 TVORBA MATEMATICKÝCH MODELŮ

Cílem tvorby matematických modelů je vytvořit co nejjednodušší soustavu diferenciálních rovnic, které co nejpřesněji popisují fyzikální děje, které se v soustavě odehrávají. Jednoduchost matematických modelů má dva hlavní cíle. Za prvé je to výpočetní náročnost při řešení dané soustavy diferenciálních rovnic. Dalším důvodem jsou stavové veličiny, které není možné měřit. Neměřené stavové veličiny je třeba dopočítávat nebo odhadovat. V tomto kroku může vzniknout nepřesnost.

5.1 Modely objektu mini TABS

Pro experimentální účely bylo vytvořeno sedm matematických modelů fyzikálně popisujících objekt mini TABS. Modely se liší složitostí popisu daných fyzikálních jevů. Modely jsou obecně založeny na soustavě diferenciálních rovnic popisujících dynamické chování modelu. Jednotlivé rovnice popisují vývoj stavů v čase.

Hlavním vstupem, na který modely reagují je teplota přívodní vody. Na této veličině nejvíce závisí dynamika budovy. Další významný vstup je teplota venkovního vzduchu, která ovlivňuje tepelnou ztrátu objektu mini TABS. Poslední veličina, která ovlivňuje objekt mini TABS, jsou solární zisky. Tato veličina se na dynamickém chování mini TABS podílí druhotně z důvodu malého procentuálního zasklení objektu. Vnitřní zisky objektu mini TABS v podobě obsazenosti byly pro další experimenty nastaveny na hodnotu nula. Matematické modely jsou v budoucím výzkumu schopny s obsazeností počítat.

Solární zisky byly měřeny na budově nacházející se v blízké lokaci objektu mini TABS (1 km) a následně přepočteny na vertikální západní stranu podle ČSN 73 0548. Stínící součinitel byl zvolen 0,6 vzhledem k zastínění okolními budovami a přilehlými stromy.

Při výpočtech bylo nutno mnoho vstupních veličin zanedbat z důvodu komplikovaného měření veličin. Jedná se zejména o rychlost větru, který přímo ovlivňuje přestup tepla na vnější straně objektu mini TABS. Dále byly zanedbány solární zisky neprůsvitnými konstrukcemi.

Podrobný popis jednotlivých diferenciálních rovnic je uveden v kapitole 5.3.

Poznámka: Stav veličin vyjadřují aktuální hodnotu pozorované veličiny (př. teplota stropu TABS, teplota vratné vody, teplota v zóně)

Tab. 5-1 Přehled všech modelů

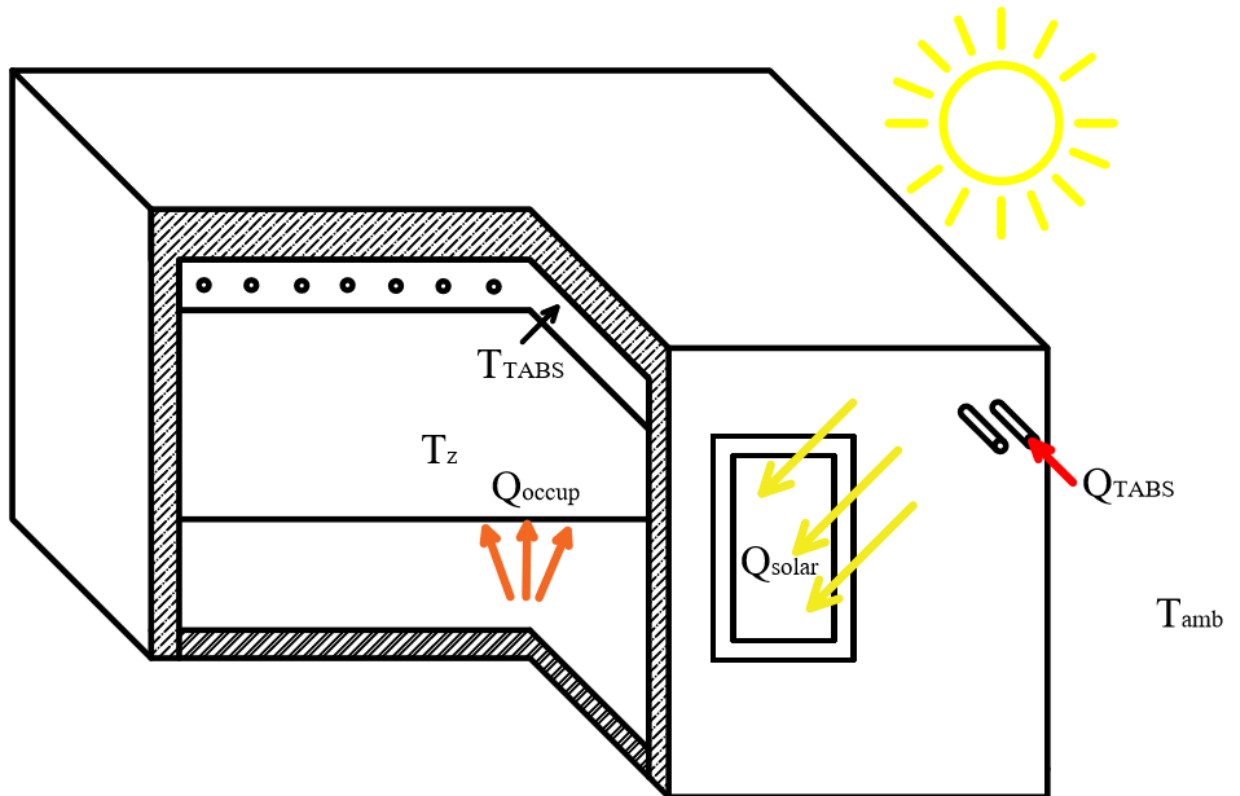
	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 1	Q_{TABS}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	T_{TABS}, T_z	2
Model 2	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{\text{w2}}, T_{\text{TABS}}, T_z$	3
Model 3	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{\text{w2}}, T_p, T_{\text{TABS}}, T_z$	4
Model 4	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{\text{w2}}, T_{\text{TABS1}}, T_{\text{TABS2}}, T_{\text{TABS3}}, T_z$	5
Model 5	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{\text{w2}}, T_{\text{TABS1}} - T_{\text{TABS9}}, T_z$	11
Model 6	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{\text{w2}}, T_{\text{TABS}}, T_z, T_{\text{MRT}}$	4
Model 7	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{\text{w2}}, T_{\text{TABS1}} - T_{\text{TABS3}}, T_z, T_{\text{MRT}}$	6

Tab. 5-2 Technické specifikace objektu mini TABS

Veličina	Hodnota	Jednotka
C_w	22979	J/K
C_{TABS}	1881300	J/K
C_{Zone}	8099	J/K
$C_{interier}$	1108700	J/K
\dot{m}_w	0,0144	kg/s
c_w	4180	J/(kg·K)
S_{TABS}	4,455	m ²
U_{TABS}	0,3143	W/(m ² ·K)
S_{TABS_ver}	1,566	m ²
α_{TABS}	10	W/(m ² ·K)
U_{wall}	0,290	W/(m ² ·K)
S_{wall}	13,95	m ²
U_g	0,349	W/(m ² ·K)
S_g	5,0374	m ²
U_{win}	1,6	W/(m ² ·K)
S_{win}	0,54	m ²
d_{TABS}	0,18	m
λ_{TABS}	1,4	W/(m·K)
L_{pipe}	27,5	m ²
r_i	0,01	m ²
r_e	0,008	m ²
α_i	500	W/(m ² ·K)

5.2 Popis modelu 1

Jedná se o fyzikálně nejjednodušší model. Model 1 je tvořen dvěma stavy, teplota v zóně a teplota stropu TABS. Řízený vstup je přímo tepelný výkon dodaný do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.



Obr. 5-1 Schéma model 1

Tab. 5-3 Přehled model 1

Řízené	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Q_{TABS}		$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	T_{TABS}, T_z	2

Matematický model je možné popsat pomocí soustavy diferenciálních rovnic:

$$C_{TABS} \cdot \frac{dT_{TABS}}{dt} = Q_{TABS} - k_{TABS_out} \cdot (T_{TABS} - T_{amb}) - k_{TABS_zona} \cdot (T_{TABS} - T_z) \quad (1)$$

$$C_{zone} \cdot \frac{dT_z}{dt} = k_{TABS_zona} \cdot (T_{TABS} - T_z) - k_{zona_out} \cdot (T_z - T_{amb}) + Q_{occup} + Q_{solar} \quad (2)$$

Kde je:

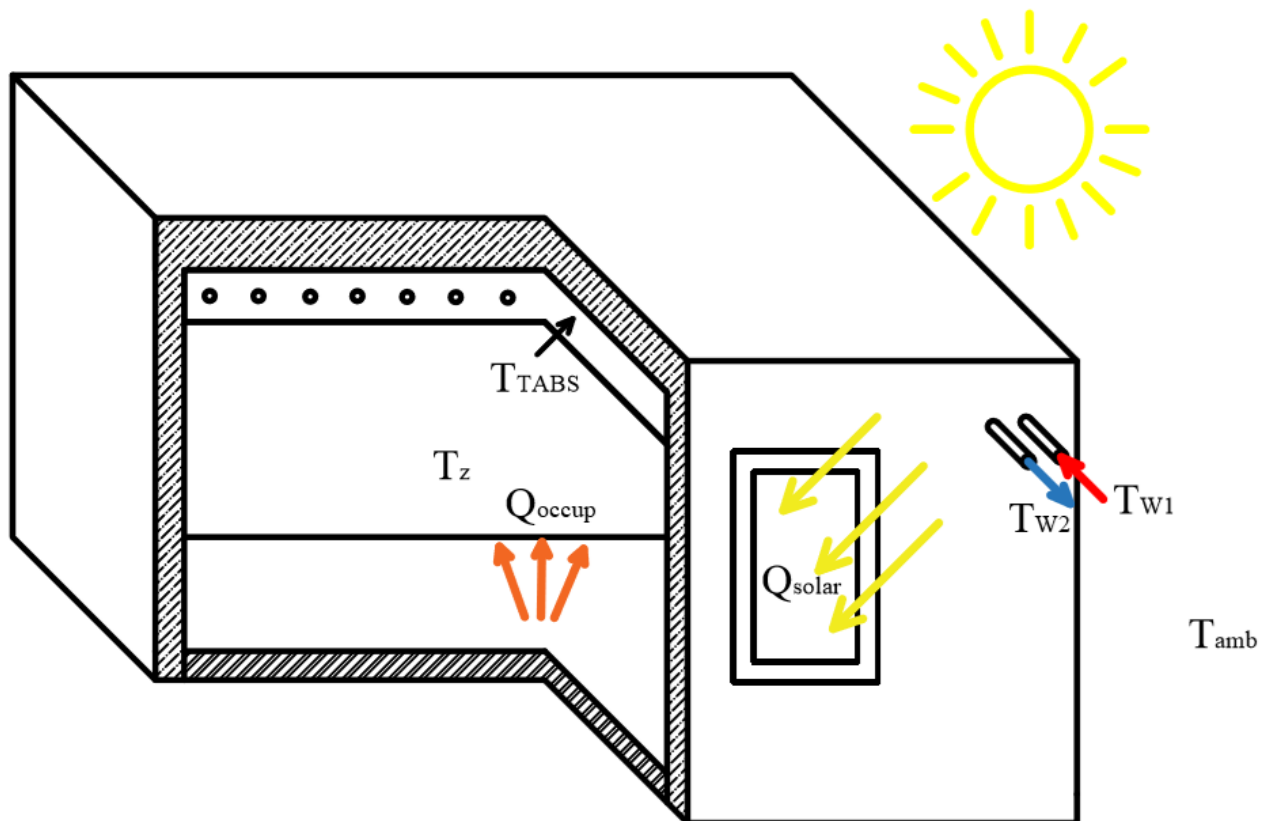
$$Q_{TABS} \quad \text{tepelný výkon TABS} \quad [\text{W}]$$

Soustavu rovnic je možné zapsat rovněž v maticovém tvaru, který je vhodný např. pro návrh regulace.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{TABS} \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(k_{TABS_out} + k_{TABS_zona})}{C_{TABS}} & \frac{k_{TABS_zona}}{C_{TABS}} \\ \frac{k_{TABS_zona}}{C_{zone}} & \frac{-(k_{TABS_zona} + k_{zona_out})}{C_{TABS}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{TABS} \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot Q_{TABS} + \begin{bmatrix} \frac{k_{TABS_out}}{C_{TABS}} & 0 & 0 \\ \frac{k_{zona_out}}{C_{zone}} & \frac{1}{C_{zone}} & \frac{1}{C_{zone}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{amb} \\ Q_{occup} \\ Q_{solar} \end{bmatrix} \quad (3)$$

5.3 Popis modelu 2

Model 2 je určitým kompromisem mezi fyzikální jednoduchostí a přesností. Model 2 je tvořen třemi stavy, teplota v zóně, teplota stropu TABS a teplota vratné vody. Řízený vstup je teplota přírodní vody do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.



Obr. 5-2 Schéma model 2

Tab. 5-4 Přehled model 2

Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
Řízené	Neřízené		
T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	T_{w2}, T_{TABS}, T_z	3

5.3.1 Soustava diferenciálních rovnic

$$C_w \cdot \frac{dT_{w2}}{dt} = k_{water} \cdot (T_{w1} - T_{w2}) - k_{pipe_TABS} \cdot (T_{w2} - T_{TABS}) \quad (4)$$

Rovnice popisuje změnu teploty vratné vody, která je ovlivněna teplotou vody na přívodu a přestupem tepla do TABS.

$$C_{TABS} \cdot \frac{dT_{TABS}}{dt} = k_{pipe_TABS} \cdot (T_{w2} - T_{TABS}) - k_{TABS_out} \cdot (T_{TABS} - T_{amb}) - k_{TABS_zona} \cdot (T_{TABS} - T_z) \quad (5)$$

Rovnice popisuje změnu teploty TABS, která je ovlivněna přestupem tepla ze vratné vody, přestupem tepla do venkovního prostředí a přestupem tepla do zóny.

$$C_{zone} \cdot \frac{dT_z}{dt} = k_{TABS_zona} \cdot (T_{TABS} - T_z) - k_{zona_out} \cdot (T_z - T_{amb}) + Q_{occup} + Q_{solar} \quad (6)$$

Rovnice popisuje změnu teploty v zóně, která je ovlivněna přestupem tepla z TABS, přestupem tepla do venkovního prostředí, vnitřní zisky vlivem obsazenosti a solárními zisky.

Kde je:

C_w	tepelná kapacita vody	[J/K]
C_{TABS}	tepelná kapacita stropu TABS	[J/K]
C_{Zone}	tepelná kapacita vzduchu v místnosti	[J/K]
T_{w2}	teplota vratné vody	[°C]
T_{w1}	teplota přívodní vody	[°C]
T_{TABS}	střední teplota betonového stropu TABS	[°C]
T_{amb}	teplota venkovního vzduchu	[°C]
T_z	teplota vzduchu v místnosti	[°C]
k_{water}	měrný tepelný výkon mezi přívodní a vratnou vodou	[W/K]
k_{pipe_TABS}	měrný tepelný výkon mezi vodou a stropem TABS	[W/K]
k_{TABS_out}	měrný tepelný výkon mezi stropem TABS a exteriérem	[W/K]
k_{TABS_zona}	měrný tepelný výkon mezi stropem TABS a místností	[W/K]
k_{zona_out}	měrný tepelný výkon mezi místností a exteriérem	[W/K]
Q_{occup}	vnitřní tepelné zisky	[W]
Q_{solar}	solární tepelné zisky	[W]

$$k_{water} = \dot{m}_w \cdot c_w \quad (7)$$

$$k_{pipe_TABS} = \frac{1}{\frac{R_{TABS}}{S_{TABS}} + \frac{1}{k_{pipe}}} \quad (8)$$

$$k_{TABS_out} = U_{TABS} \cdot S_{TABS} + U_{TABS} \cdot S_{TABS_ver} \quad (9)$$

$$k_{TABS_zona} = S_{TABS} \cdot \alpha_{TABS} \quad (10)$$

$$k_{zona_out} = U_{wall} \cdot S_{wall} + U_g \cdot S_g + U_{win} \cdot S_{win} \quad (11)$$

$$R_{TABS} = \frac{d_{TABS}}{\lambda_{TABS}} \quad (12)$$

$$k_{pipe} = \frac{L_{pipe}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{pipe}} \cdot \ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (13)$$

Kde je:

\dot{m}_w	hmotnostní průtok vody	[kg/s]
c_w	měrná tepelná kapacita vody	[J/(kg·K)]
S_{TABS}	plocha stropu TABS	[m ²]
U_{TABS}	součinitel prostupu tepla betonového stropu TABS	[W/(m ² ·K)]
S_{TABS_ver}	vertikální plocha stropu TABS	[m ²]
α_{TABS}	součinitel přestupu tepla z TABS do místnosti	[W/(m ² ·K)]
U_{wall}	součinitel prostupu tepla stěny	[W/(m ² ·K)]
S_{wall}	plocha stěn	[m ²]
U_g	součinitel prostupu tepla podlahy	[W/(m ² ·K)]
S_g	plocha podlahy	[m ²]
U_{win}	součinitel prostupu tepla oknem	[W/(m ² ·K)]
S_{win}	plocha okna	[m ²]
d_{TABS}	tloušťka stropu TABS	[m]

λ_{TABS}	tepelná vodivost stropu TABS	[W/m·K]
L_{pipe}	délka potrubí	[m]
r_i	vnitřní poloměr potrubí	[m]
r_e	vnější poloměr potrubí	[m]
α_i	součinitel přestupu tepla uvnitř potrubí	[W/(m ² ·K)]

Soustavu rovnic je možné zapsat rovněž v maticovém tvaru, který je vhodný např. pro návrh regulace.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{w2} \\ T_{TABS} \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(k_{water} + k_{pipe_{TABS}})}{C_w} & \frac{k_{pipe_{TABS}}}{C_w} & \frac{k_{pipe_{TABS}}}{C_w} \\ \frac{k_{pipe_{TABS}}}{C_{TABS}} & \frac{-(k_{pipe_{TABS}} + k_{TABS_{out}} + k_{TABS_{zona}})}{C_{TABS}} & \frac{k_{TABS_{zona}}}{C_{TABS}} \\ 0 & \frac{k_{TABS_{zona}}}{C_{zone}} & \frac{-(k_{TABS_{zona}} + k_{zona_{out}})}{C_{TABS}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{w2} \\ T_{TABS} \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{water} \\ C_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_{w1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{TABS_{out}}}{C_{TABS}} & 0 & 0 \\ \frac{k_{zona_{out}}}{C_{zone}} & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{amb} \\ Q_{occup} \\ Q_{solar} \end{bmatrix} \quad (14)$$

5.4 Popis modelu 3

Model 3 vychází z fyzikálního popisu 2. modelu. Model 3 je tvořen čtyřmi stavy, teplota v zóně, teplota stropu TABS, střední teplota stěny potrubí a teplota vratné vody. Řízený vstup je teplota přírodní vody do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.

Tab. 5-5 Přehled model 3

Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
Řízené	Neřízené		
T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_p, T_{TABS}, T_z$	4

5.5 Popis modelu 4

Model 4 vychází z fyzikálního popisu 2. modelu. TABS je rozdělen na 3 stejné díly. Model 4 je tvořen pěti stavy, teplota v zóně, tři teploty TABS a teplota vratné vody. Řízený vstup je teplota přírodní vody do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.

Tab. 5-6 Přehled model 4

Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
Řízené	Neřízené		
T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1}, T_{TABS2}, T_{TABS3}, T_z$	5

5.6 Popis modelu 5

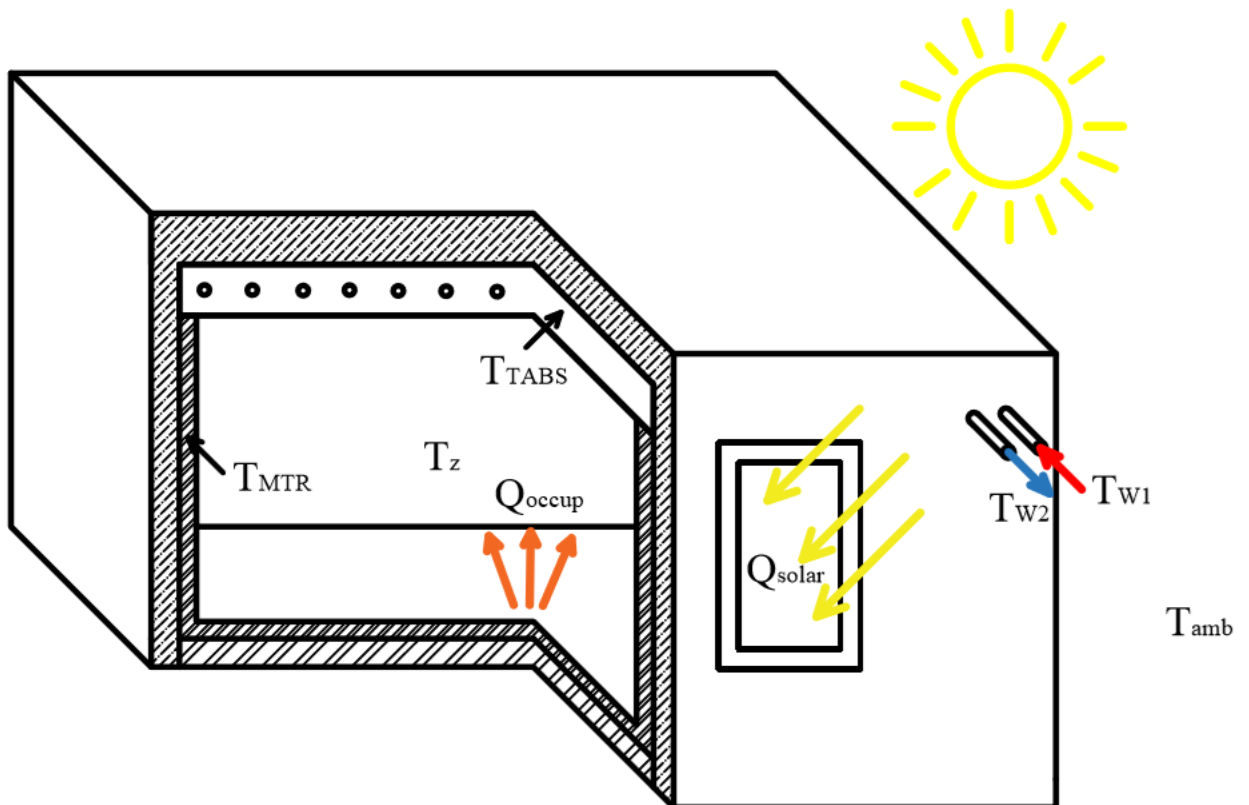
Model 5 vychází z fyzikálního popisu 2. modelu. TABS je rozdělen na 9 stejných dílů. Model 5 je tvořen 11 stavy, teplota v zóně, devět teplot TABS a teplota vratné vody. Řízený vstup je teplota přírodní vody do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.

Tab. 5-7 Přehled model 5

Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
Řízené	Neřízené		
T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS9}, T_z$	11

5.7 Popis modelu 6

Tento typ modelu se snaží nejpřesněji popsat fyzikální děje odehrávající se v mini TABS. Model 6 vychází z modelu 2, ale byl zde zaveden další stav, jedná se povrchovou teplotu v zóně. Model 6 je tvořen čtyřmi stavy, teplota v zóně, střední radiační teplota v zóně, teplota stropu TABS a teplota vratné vody. Řízený vstup je teplota přívodní vody do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.



Obr. 5-3 Schéma model 6

Tab. 5-8 Přehled model 6

Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
Řízené	Neřízené		
T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS}, T_z, T_{MTR}$	4

5.7.1 Soustava diferenciálních rovnic

$$C_w \cdot \frac{dT_{w2}}{dt} = k_{water} \cdot (T_{w1} - T_{w2}) - k_{pipe_TABS} \cdot (T_{w2} - T_{TABS}) \quad (15)$$

$$C_{TABS} \cdot \frac{dT_{TABS}}{dt} = k_{pipe_TABS} \cdot (T_{w2} - T_{TABS}) - k_{TABSout} \cdot (T_{TABS} - T_{amb}) - k_{TABS_Z_rad} \cdot (T_{TABS} - T_{MTR}) - k_{TABS_Z_konv} \cdot (T_{TABS} - T_z) \quad (16)$$

$$C_{interier} \cdot \frac{dT_{MTR}}{dt} = k_{TABS_Z_rad} \cdot (T_{TABS} - T_{MTR}) - k_{interierout} \cdot (T_{MTR} - T_{amb}) - k_{interier_zone} \cdot (T_{MTR} - T_z) \quad (17)$$

$$C_{zone} \cdot \frac{dT_z}{dt} = k_{TABS_Z_konv} \cdot (T_{TABS} - T_z) + k_{interier_zone} \cdot (T_{MTR} - T_z) + Q_{occup} + Q_{solar} \quad (18)$$

Kde je:

C_w	tepelná kapacita vody	[J/K]
C_{TABS}	tepelná kapacita stropu TABS	[J/K]
C_{Zone}	tepelná kapacita vzduchu v místnosti	[J/K]
$C_{interier}$	tepelná kapacita interiéru	[J/K]
T_{w2}	teplota vratné vody	[°C]
T_{w1}	teplota přívodní vody	[°C]
T_{TABS}	teplota stropu TABS	[°C]
T_{amb}	teplota venkovního vzduchu	[°C]
T_z	teplota vzduchu v místnosti	[°C]
T_{MTR}	střední radiační teplota v místnosti	[°C]
k_{water}	měrný tepelný výkon mezi přívodní a vratnou vodou	[W/K]
k_{pipe_TABS}	měrný tepelný výkon mezi vodou a stropem TABS	[W/K]
k_{TABS_out}	měrný tepelný výkon mezi stropem TABS a exteriérem	[W/K]
$k_{TABS_Z_rad}$	měrný tepelný výkon radiací mezi stropem TABS a interiérem	[W/K]
$k_{TABS_Z_kon}$	měrný tepelný výkon konvekcí mezi stropem TABS a místností	[W/K]
$k_{interier_out}$	měrný tepelný výkon mezi interiérem a exteriérem	[W/K]
$k_{interier_zone}$	měrný tepelný výkon mezi interiérem a místností	[W/K]

Q_{occup} vnitřní tepelné zisky [W]

Q_{solar} solární tepelné zisky [W]

Poznámka: Interiér je vnitřní vrstva stěn a podlahy o tloušťce 30 mm.

$$k_{TABS_Z_rad} = S_{TABS} \cdot \alpha_{rad} \quad (19)$$

$$k_{TABS_Z_konv} = S_{TABS} \cdot \alpha_{konv} \quad (20)$$

$$k_{interier_out} = U_{wall} \cdot S_{wall} + U_g \cdot S_g + U_{win} \cdot S_{win} \quad (21)$$

$$k_{interier_zone} = (S_{wall} + S_g) \cdot \alpha_{konv} \quad (22)$$

Kde je:

S_{TABS}	plocha stropu TABS	[m ²]
α_{rad}	součinitel přestupu tepla radiací z TABS do interiéru	[W/(m ² ·K)]
α_{konv}	součinitel přestupu tepla konvekci z TABS do místnosti	[W/(m ² ·K)]
U_{wall}	součinitel tepelné ztráty stěn	[W/(m ² ·K)]
S_{wall}	plocha stěn	[m ²]
U_g	součinitel tepelné ztráty podlahy	[W/(m ² ·K)]
S_g	plocha podlahy	[m ²]

5.8 Popis modelu 7

Jedná se kombinaci modelu 6 a modelu 4. Model 7 je tvořen šesti stavy, teplota v zóně, střední radiální teplota v zóně, tři teploty TABS a teplota vratné vody. Řízený vstup je teplota přívodní vody do stropu TABS. Neřízené vstupy jsou teplota venkovního vzduchu, solární zisky a vnitřní zisky.

Tab. 5-9 Přehled model 7

Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
Řízené	Neřízené		
T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS3}, T_z, T_{MRT}$	6

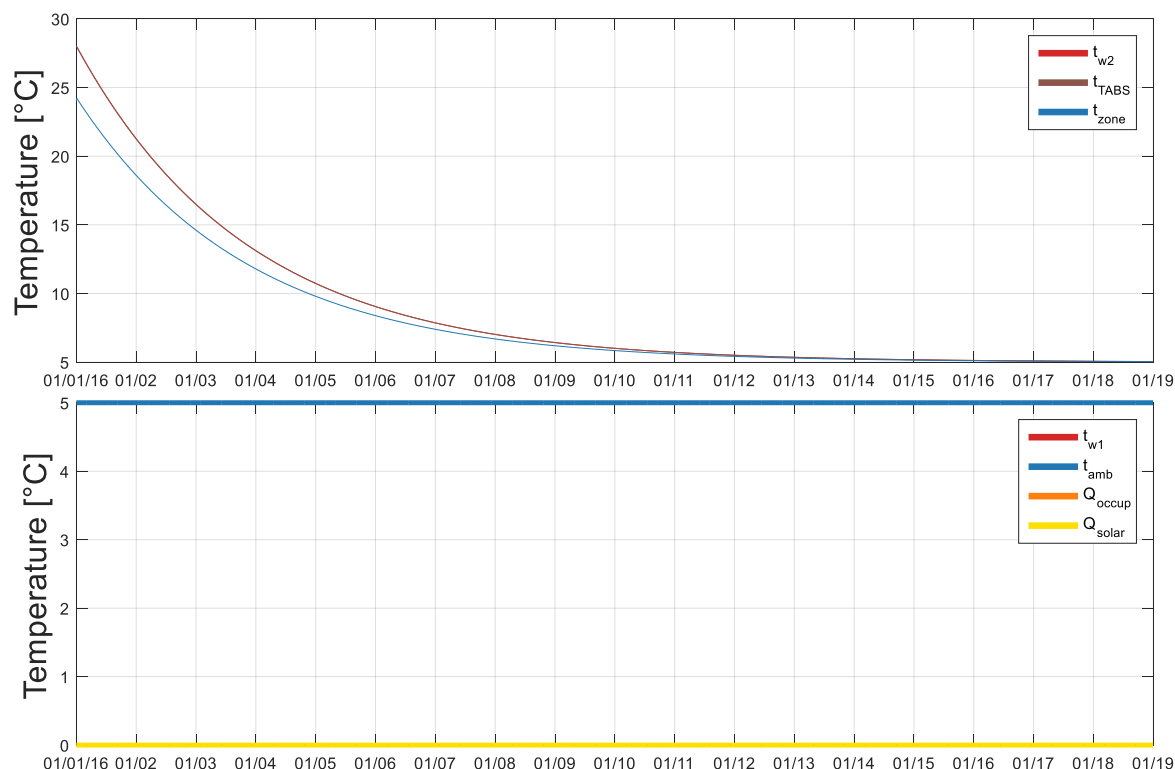
5.9 Simulace matematických modelů

Matematický model je třeba validovat. Simulací se testují základní fyzikální zákony. Pro simulace byla použita reálná klimatická data naměřená z roku 2016. Data byla stažena ze serveru PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM pro reálnou lokaci objektu mini TABS.

5.9.1 Ustálení na konstantní teplotě s nulovým vstupem do TABS

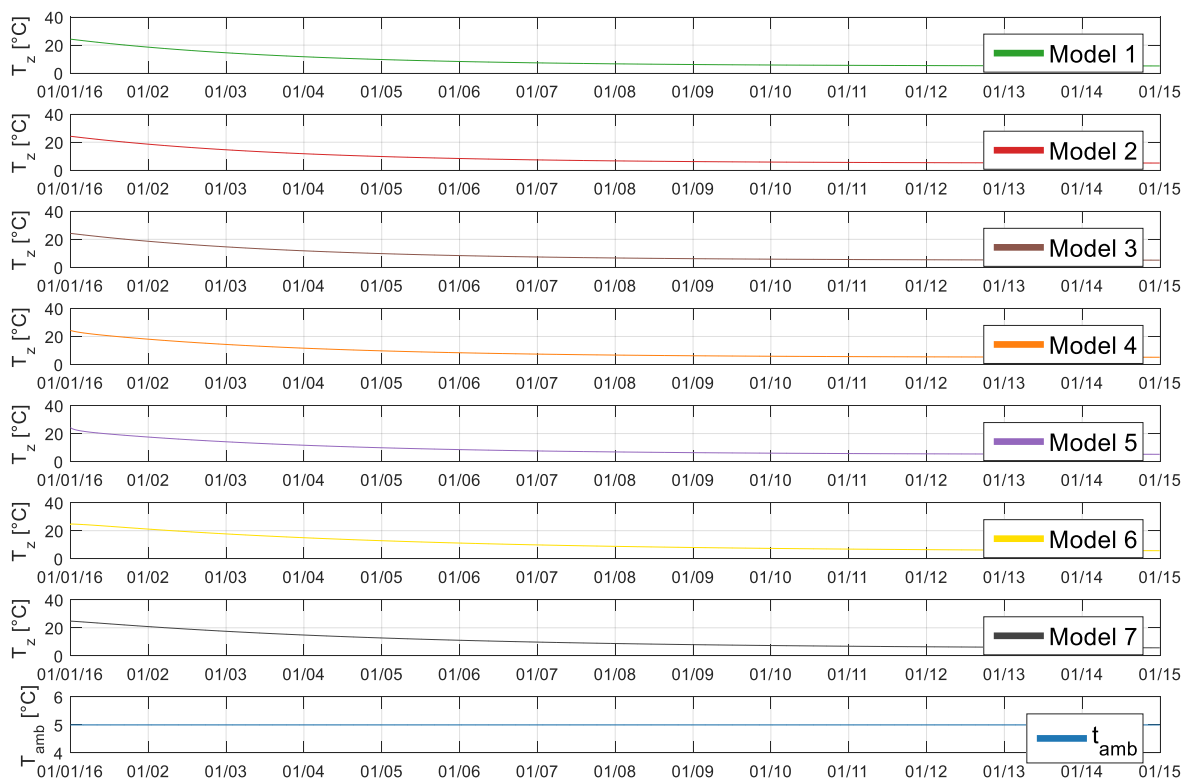
Jedná se o samovolné chladnutí bez dodané energie do TABS. Simulací se otestuje tepelná setrvačnost budovy, tj. jak rychle budova chladne při nulové dodávce tepla. Cílem simulace je ověřit přechodovou charakteristiku a ustálení stavových veličin na vstupních hodnotách.

Simulace probíhala po dobu 18 dní s krokem 5 minut, při nulovém výkonu dodaném do TABS a venkovní teplotě vzduchu 5 °C. Počáteční stavy modelu byly 28 °C teplota vratné vody a teplota stropu TABS a 24 °C teplota v zóně.



Obr. 5-4 Ustálení modelu 2 na konstantní teplotě s nulovým výkonem do TABS

Z grafu Obr. 5-6 je vidět, že teplota v zóně i teplota BKT klesá pozvolna a ustálí se na venkovní teplotě vzduchu 5 °C po cca 14 dnech.



Obr. 5-5 Ustálení všech modelů

Po 14 dnech simulace byla největší teplota v zóně v modelu 6 a 7. Je to způsobeno větší tepelnou kapacitou modelů v podobě tepelné kapacity interiéru.

Z grafu Obr. 5-5 je patrné, že chování při chladnutí u všech modelů je velmi podobné, z toho vyplývá jejich vzájemná fyzikální podobnost. Lze odhadovat podobnou tepelnou ztrátu všech modelů.

Tab. 5-10 Naměřené teploty v zóně

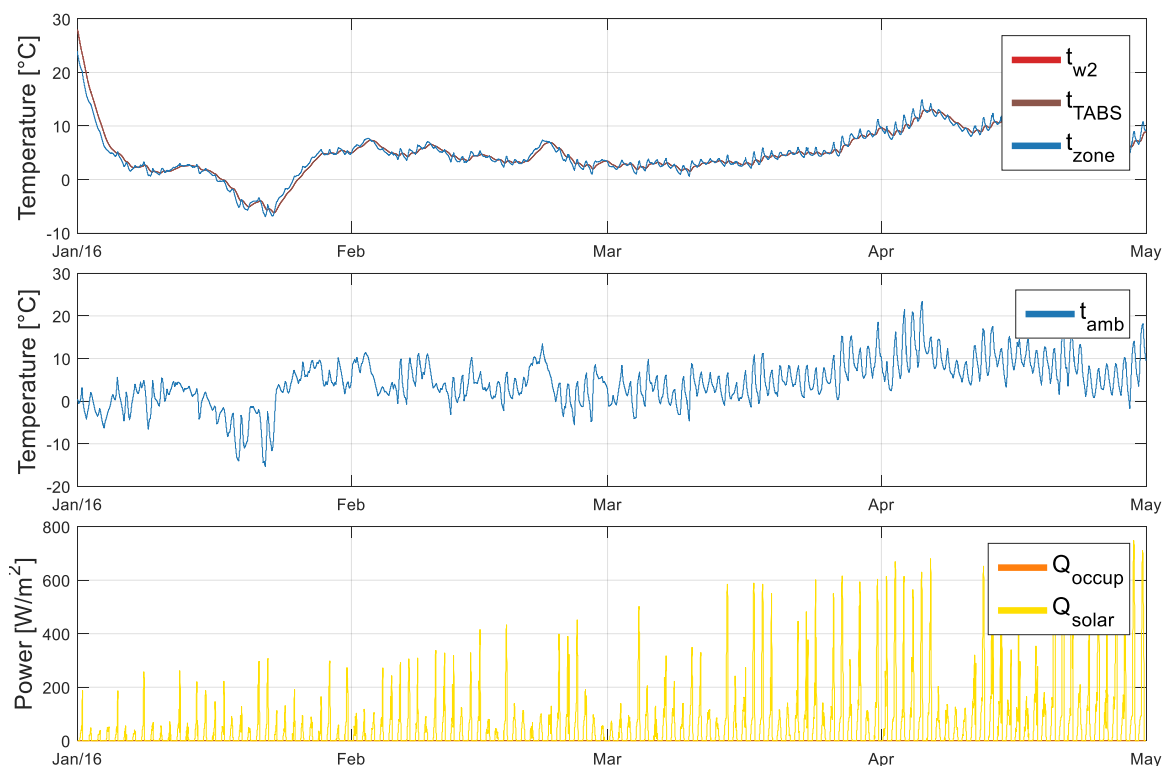
Model	1	2	3	4	5	6	7
T_z [°C]	15,14	15,15	15,15	15,16	15,21	15,70	15,70

5.9.2 Ustálení s nulovým vstupem do TABS

Simulace probíhala po dobu 4 měsíců od ledna do konce dubna s reálnými klimatickými podmínkami z roku 2016, při nulovém výkonu dodaném do stropu TABS.

Tento typ simulace lze považovat za pasivní, protože řízené vstupy byly na hodnotě nula a uvažovány byly pouze neřízené vstupy.

Počáteční stavy modelu byly 28 °C pro teplotu vratné vody a stropu TABS a 24 °C pro teplotu v zóně.

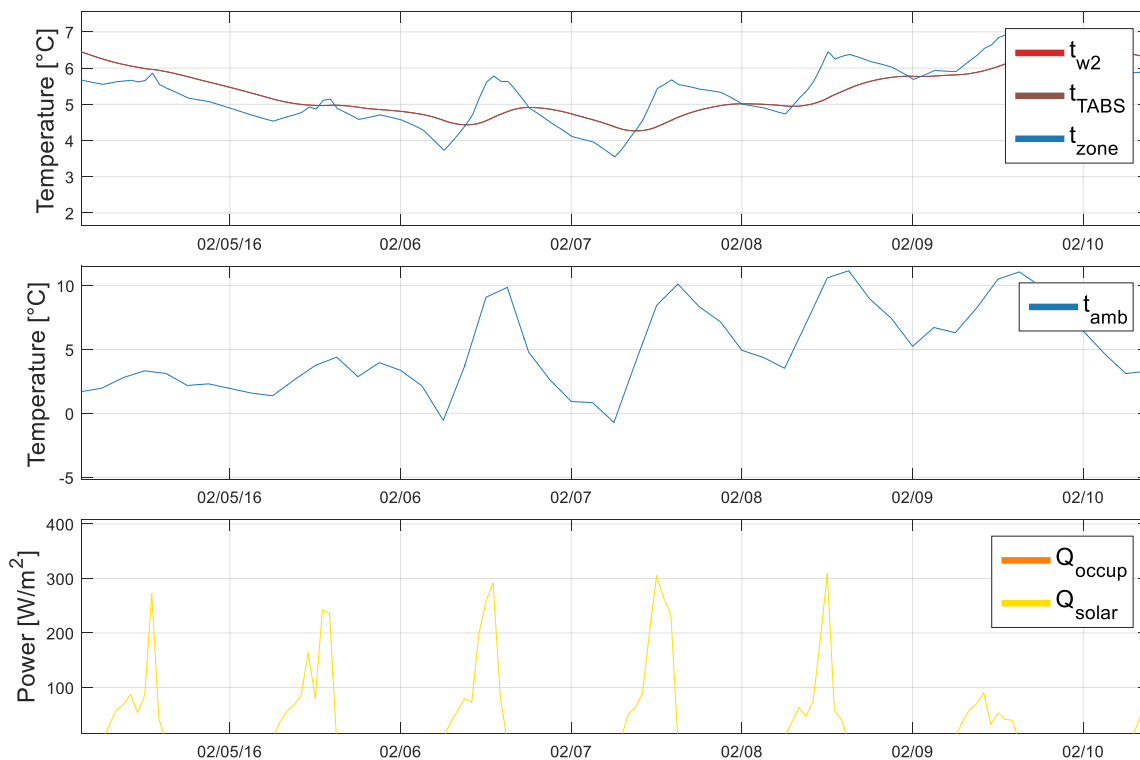


Obr. 5-6 Ustálení modelu 2 s nulovým výkonem do TABS

Ze simulace lze pozorovat reálné chování modelu z pohledu reakce na klimatické podmínky. Při poklesu venkovní teploty vzduchu lze vidět pozvolné snižování teploty v zóně a také obráceně.

V měsíci březnu je vidět reakce modelu na vyšší sluneční zisky, která se projevuje mírným nárůstem teploty v zóně.

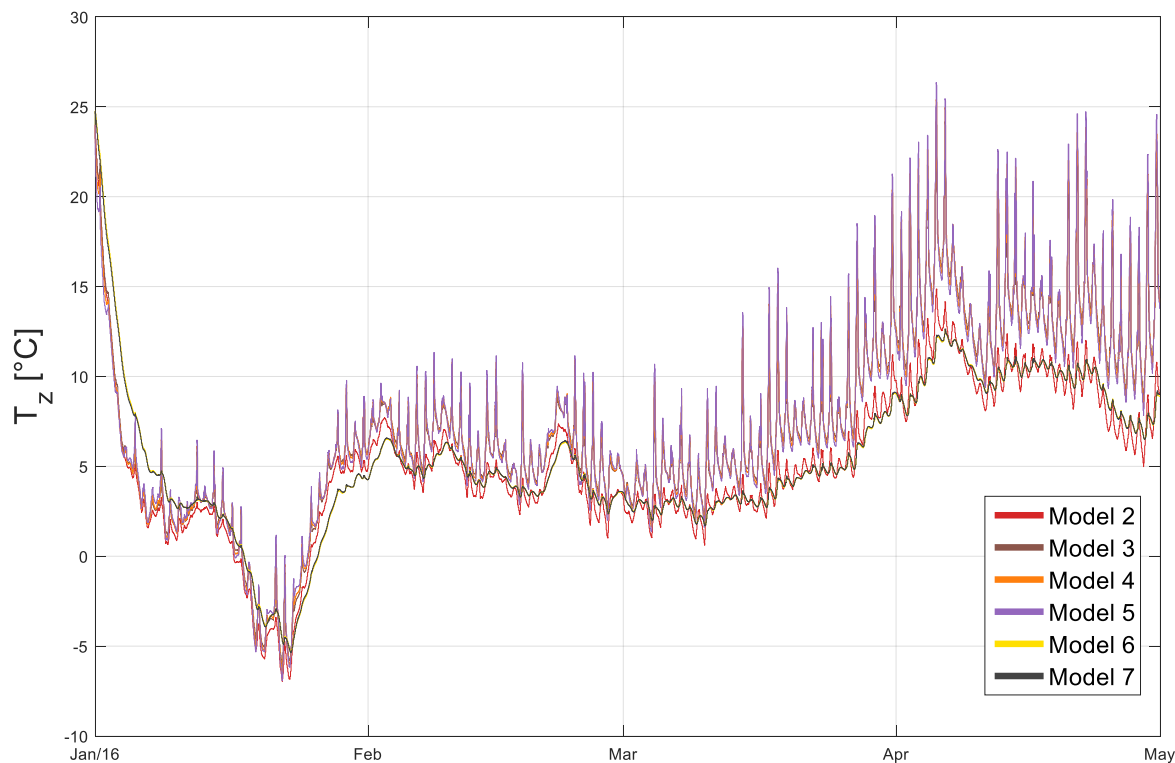
Na základě pasivní simulace nelze vyvozovat reálné chování celého modelu.



Obr. 5-7 Detail simulace ustálení modelu 2 s nulovým výkonem do TABS

Z grafu Obr. 5-7 lze pozorovat dynamické chování teploty v zóně a reakci teploty v zóně vlivem špičkových solárních zisků.

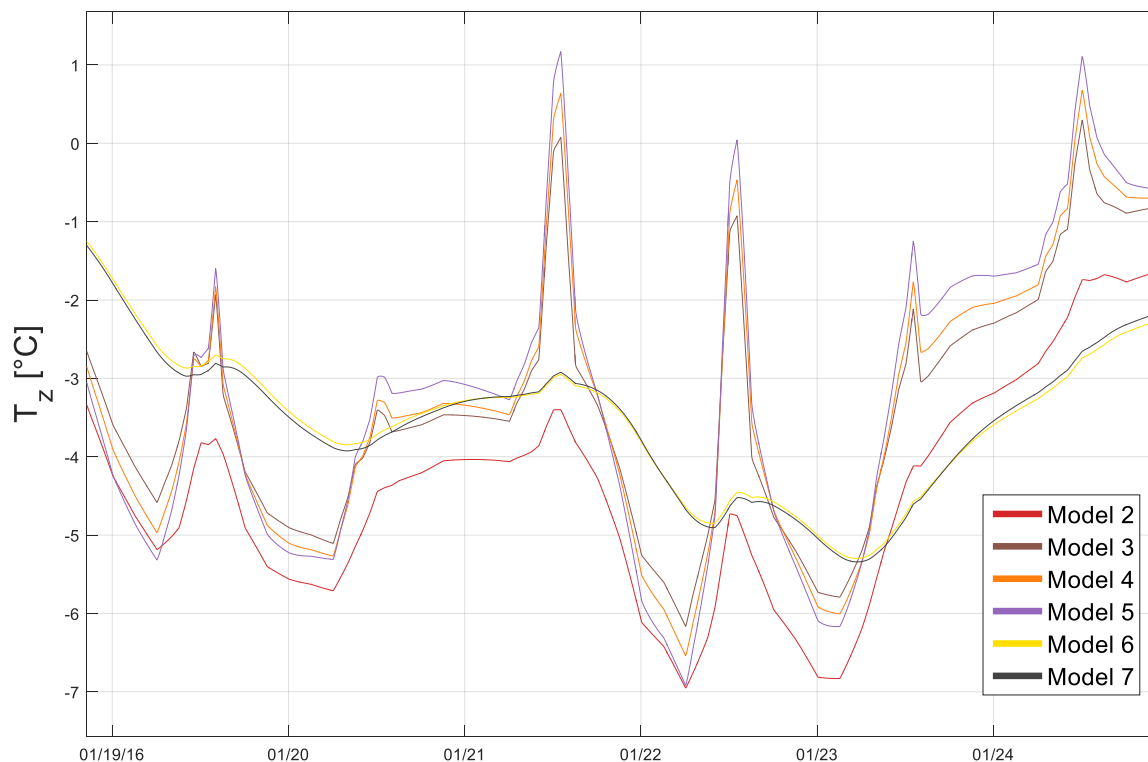
Z dalšího postupu byl vyřazen model 1 z důvodu jeho jednoduchosti, komplikovaného simulování a porovnávání s ostatními modely.



Obr. 5-8 Simulace všech modelů s nulovým výkonem do TABS

Ze simulace je patrné rozdílné chování modelů. Modely 2 až 5 mají rychlejší dynamiku v porovnání s modely 6 a 7 (žlutá a černá barva). Modely 2 až 5 mnohem více reagují na solární zisky, které se projevují špičkovým vychýlením teploty v zóně.

Chování modelů 6 a 7 se mnohem více přibližuje realitě vzhledem k malému zasklení objektu mini TABS.



Obr. 5-9 Detail simulace všech modelů s nulovým výkonem do TABS

Na grafu Obr. 5-9 je vidět pomalejší dynamika modelů 6 a 7 (žlutá a černá barva), ostatní modely mnohem rychleji reagují na solární zisky, které se projevují špičkovým vychýlením teploty v zóně.

5.10 Závěr

Simulací matematických modelů jsme dostali teoretický předpoklad o jejich reálném základu. Z prostých simulací matematických modelů nelze vyvozovat závěry o přesnosti daných modelů. Pro přesné vyhodnocení je potřeba simulaci modelů porovnat s naměřenými daty z reálného objektu mini TABS.

6 KALIBRACE MODELŮ

Cílem tvorby matematických modelů je vytvořit model, který bude odpovídat fyzikálně s reálnou budovou. V reálných případech je zapotřebí kalibrace white box modelu a následné vytvoření grey box modelu.

Pro posouzení kvality matematických modelů je třeba porovnat simulaci s naměřenými daty. Tímto porovnáním dostaneme přesný obraz o správnosti modelů.

Kalibrace spočívá v porovnání simulace modelu s reálnými naměřenými daty z experimentálního objektu mini TABS. Simulace modelu se provádí se stejnými vstupy, jaké byly reálně naměřeny na objektu mini TABS.

Pro kalibraci je vhodné pracovat s přechodovými stavy dané budovy.

PASIVNÍ KALIBRACE

Za prvé se jedná o pasivní přístup kalibrace, kdy sledujeme chladnutí budovy. Do objektu by ideálně nemělo být přiváděno žádné teplo. Během tohoto experimentu sledujeme tepelnou ztrátu objektu.

AKTIVNÍ KALIBRACE

Za druhé se jedná o aktivní přístup, kdy nás zajímá naopak zvyšování vnitřní teploty vzduchu. Zajímá nás odezva vnitřní teploty v zóně na dodané teplo.

V praxi je velmi komplikované se k takovým datům dostat, protože je tento experimentální provoz velmi nežádoucí z pohledu provozu budovy.

Tab. 6-1 Rekapitulace modelů

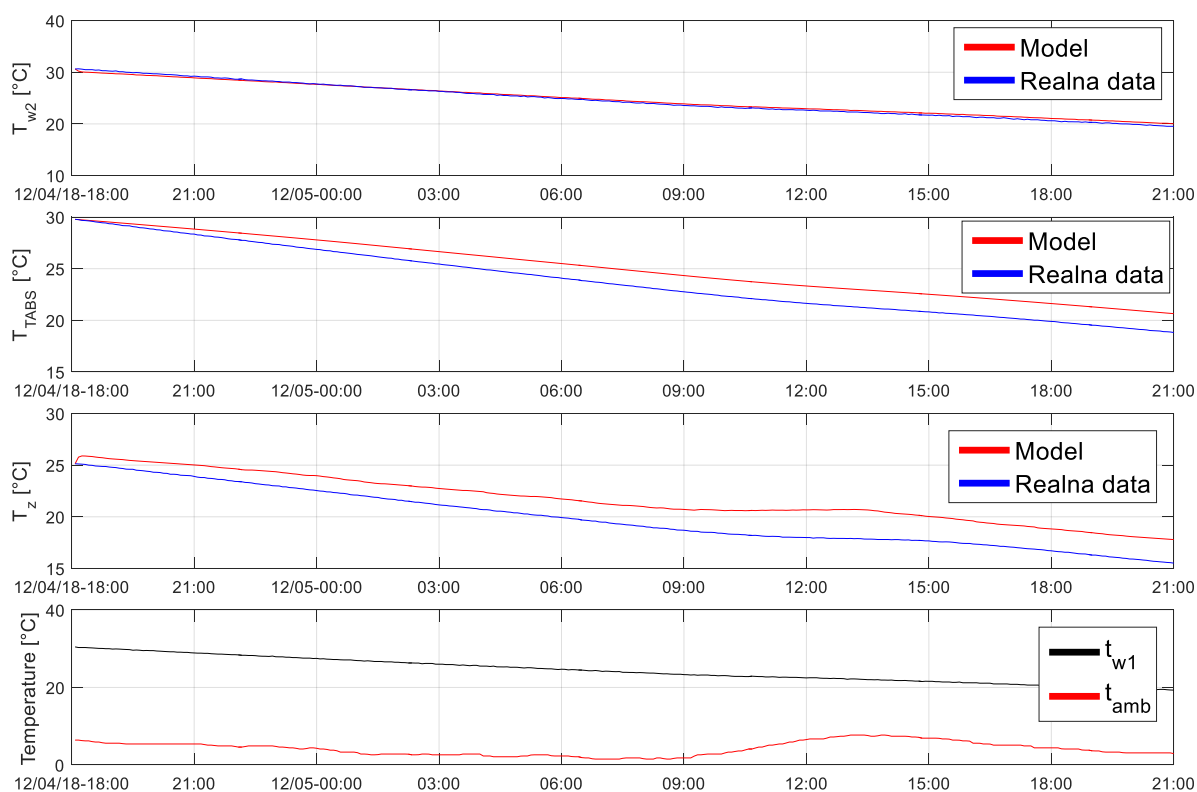
	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 2	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	T_{w2}, T_{TABS}, T_z	3
Model 3	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_p, T_{TABS}, T_z$	4
Model 4	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1}, T_{TABS2}, T_{TABS3}, T_z$	5
Model 5	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS9}, T_z$	11
Model 6	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS}, T_z, T_{MRT}$	4
Model 7	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS3}, T_z, T_{MRT}$	6

6.1 Kalibrace matematických modelů

Byla provedena kalibrace vytvořených matematických modelů s reálnými daty naměřenými na experimentálním objektu mini TABS. Cílem kalibrace bylo upravit původní matematické modely a vytvořit nové grey box modely, které budou vhodné pro prediktivní regulaci.

6.1.1 Pasivní kalibrace modelů

Během pasivní kalibrace matematických modelů pozorujeme chladnutí objektu mini TABS. Během tohoto experimentu sledujeme tepelnou ztrátu objektu.

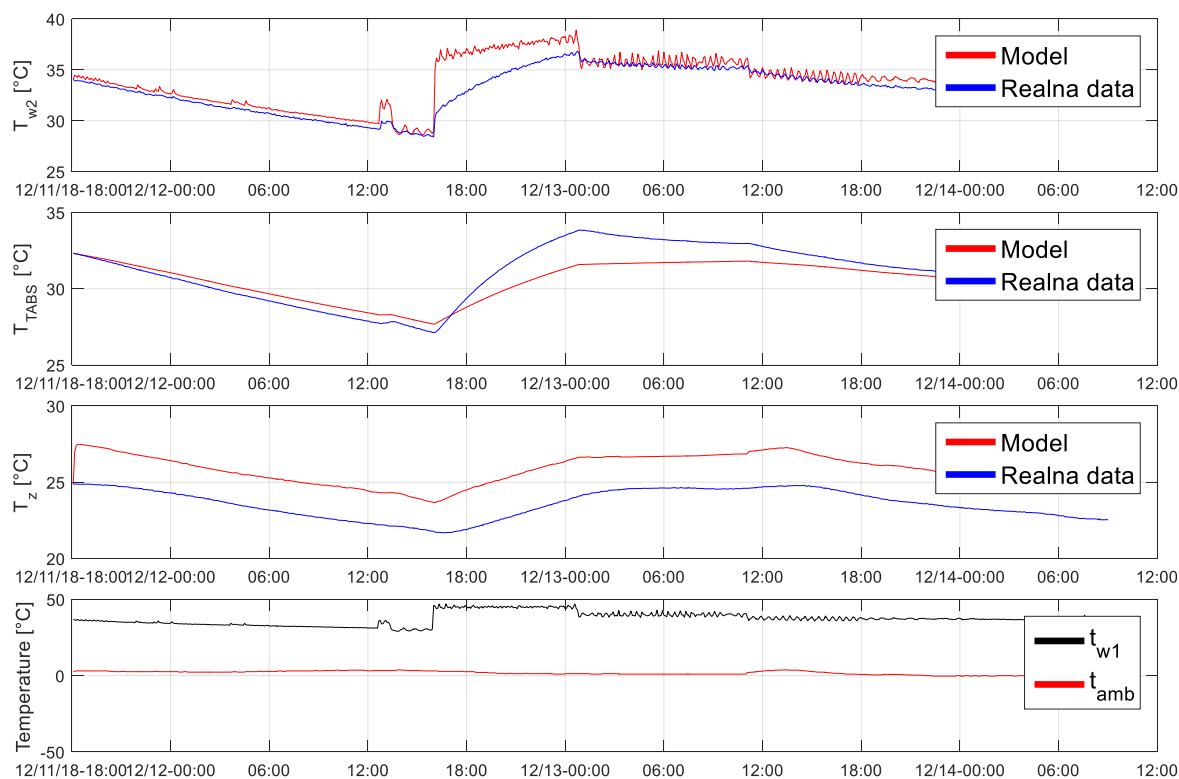


Obr. 6-1 Porovnání simulace modelu 2 s mini TABS v pasivním režimu chladnutí

Z Grafu Obr. 6-1 je patné, že model 2 chladne mnohem pomaleji než reálný mini TABS. To může být způsobeno špatným popisem tepelné ztráty matematického modelu.

6.1.2 Aktivní kalibrace modelů

Aktivní kalibrací sledujeme odezvu vnitřní teploty v zóně na zvýšenou dodávku tepla. Toho bylo docíleno zvýšením teploty přívodní vody.

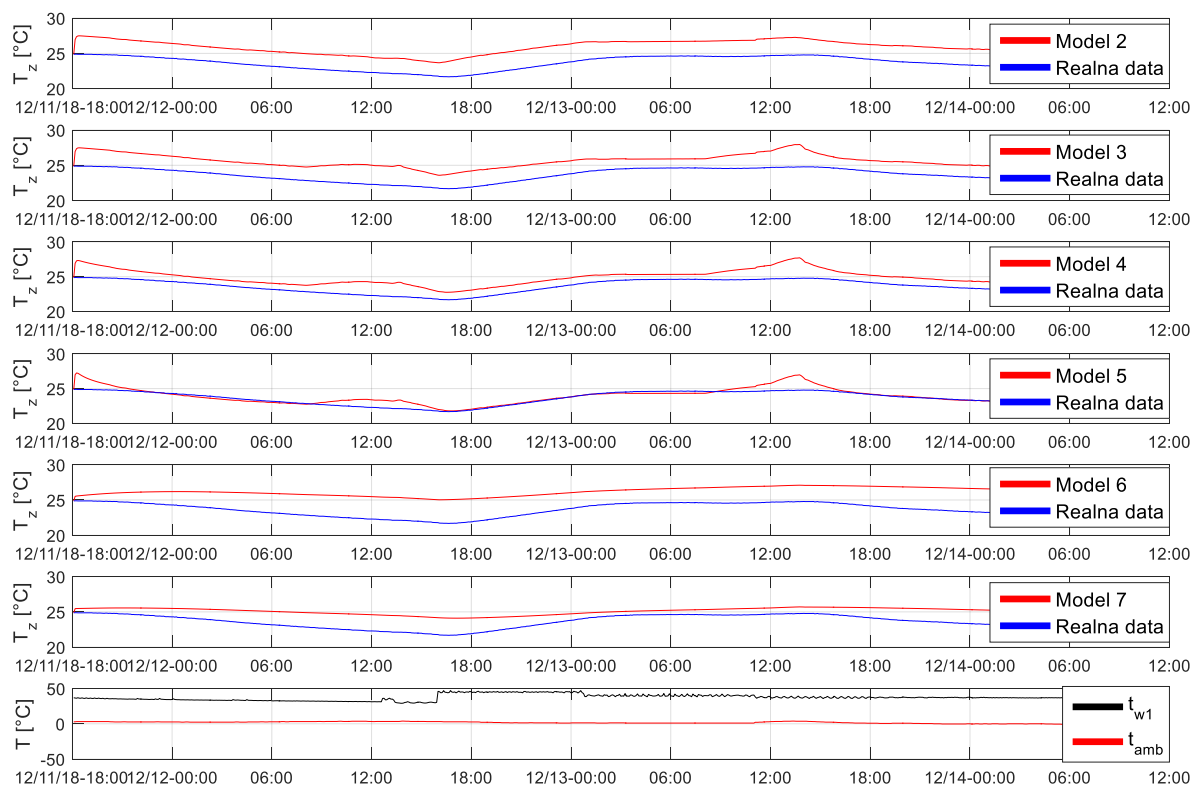


Obr. 6-2 Porovnání simulace modelu 2 s mini TABS v aktivním režimu

Z grafu Obr. 6-2 je opět patrné pomalejší chladnutí, to se projevuje větší teplotou v zóně u modelu (Model – červená barva) než u objektu mini TABS (Reálna data – modrá barva). Další věc, která z grafu vyplývá je podobnost modelu 2 a objektu mini TABS. Model 2 reaguje na vstupy podobnou odezvou stavů. To je vidět na průběhu teploty v zóně, která se chová stejně, ale s malým konstantním rozdílem.

Předběžný pohled nasvědčuje o možnosti model upravit, aby byl vhodný pro prediktivní regulaci, díky podobné reakci stavů modelu 2 na vstupy.

Pro přehlednou vizualizaci všech modelů byl vytvořen graf Obr. 6-3, na kterém je vidět porovnání všech modlů s experimentálním objektem mini TABS.



Obr. 6-3 Porovnání teploty v zóně simulace modelů s mini TABS v aktivním režimu

Z grafu Obr. 6-3 je patrné, že chování modelů 2 až 5 je velmi podobné. Můžeme vidět podobné špičkové vychýlení teploty v zóně, které je způsobeno reakcí na solární zisky. Modely 6 a 7 se na první pohled chovají nejbližše reálnému mini TABS.

ZÁVĚR

Z kalibračních simulací je patrné, že žádný původní matematický model (white box model) není vhodný pro prediktivní regulaci. Simulace modelů se lišily od naměřených dat z experimentálního objektu mini TABS.

Všechny matematické modely bude třeba vhodně upravit a vytvořit nové modely (grey box modely).

6.2 Kalibrace upravených modelů zvýšením tepelné ztráty

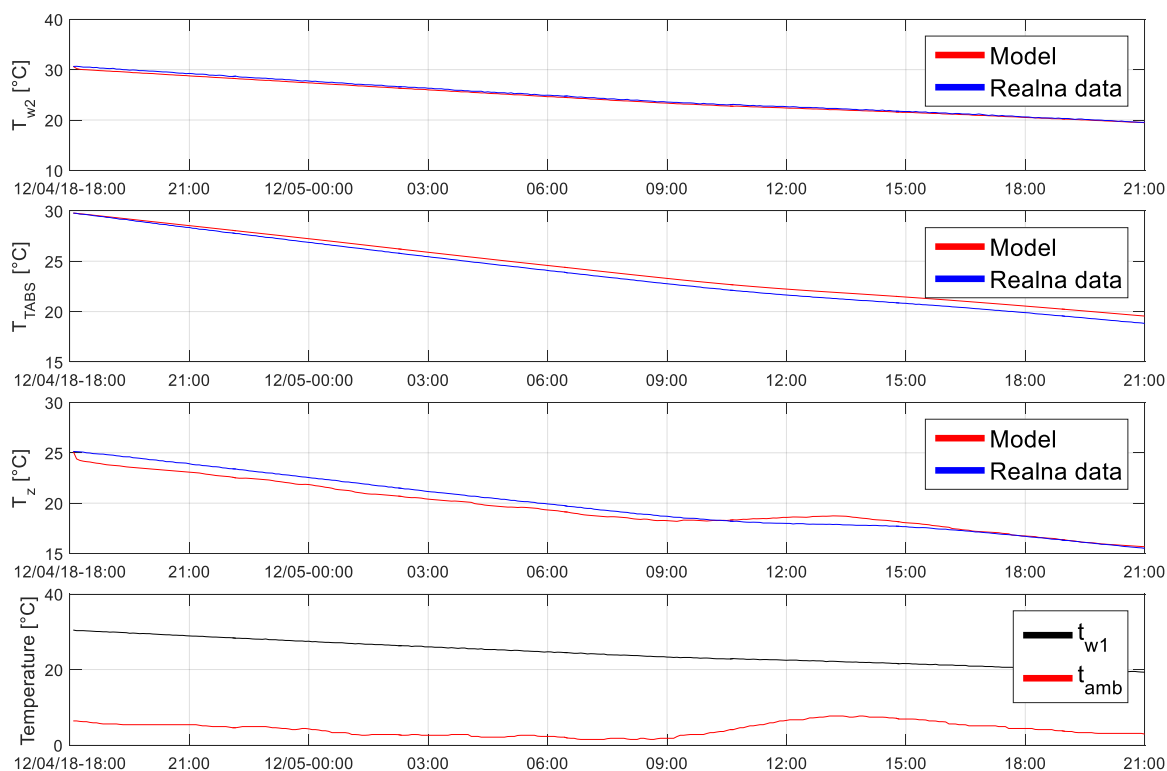
Z předchozího porovnání modelů s naměřenými daty s experimentálním objektem mini TABS bylo patrné, že modely mají menší tepelnou ztrátu než reálný mini TABS. Z tohoto důvodu byla zvětšena teplaná ztráta u všech modelů.

KOEFICIENT LTB

Tepelná ztráta byla zvýšena koeficientem LTB zohledňující vliv tepelných mostů. Hodnota koeficientu byla nastavena na $LTB = 1,8$. Součinitelem byla vynásobena celková tepelná ztráta mini TABS.

6.2.1 Pasivní kalibrace modelů

Byla provedena pasivní kalibrace modelu 2 se zvýšenou tepelnou ztrátou vlivem koeficientu LTB. Hodnota LTB koeficientu byla nastavena na 1,8.

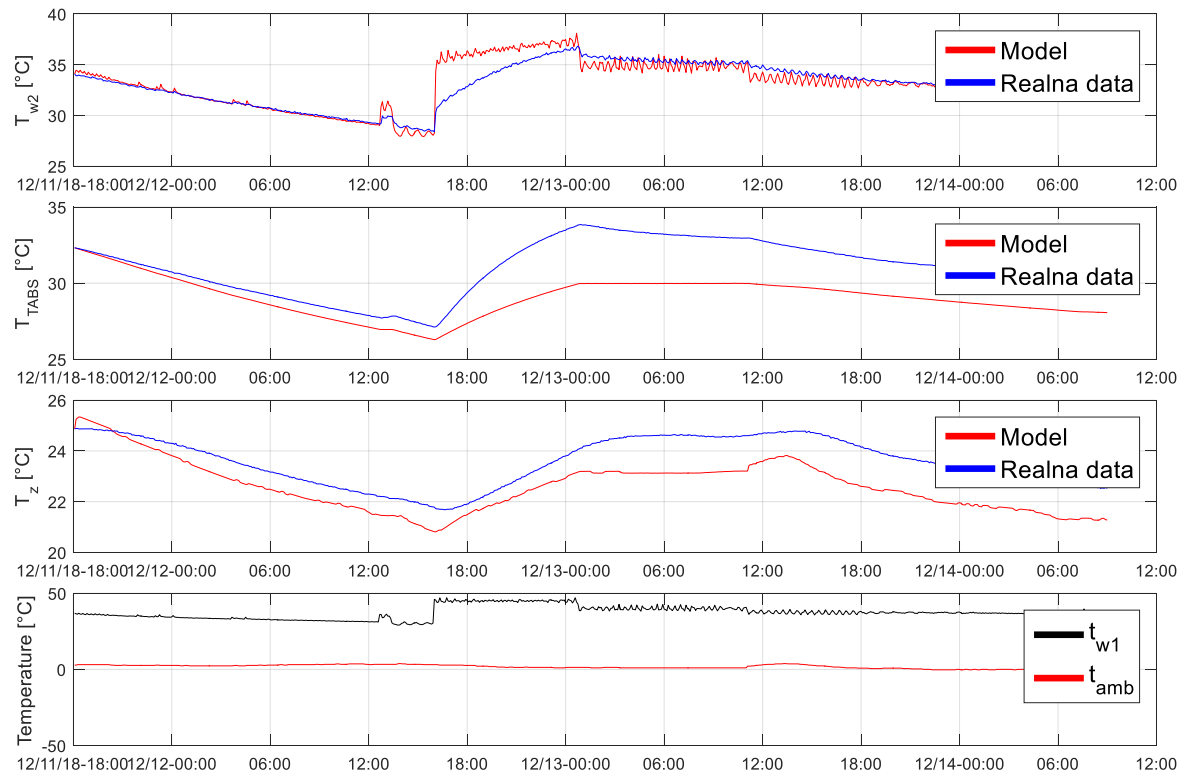


Obr. 6-4 Porovnání simulace modelu LTB 2 s mini TABS v pasivním režimu chlazení

Z grafu Obr. 6-4 je patrné, že model se chová z pohledu tepelných ztrát velmi podobně jako experimentální objekt mini TABS.

6.2.2 Aktivní kalibrace modelů

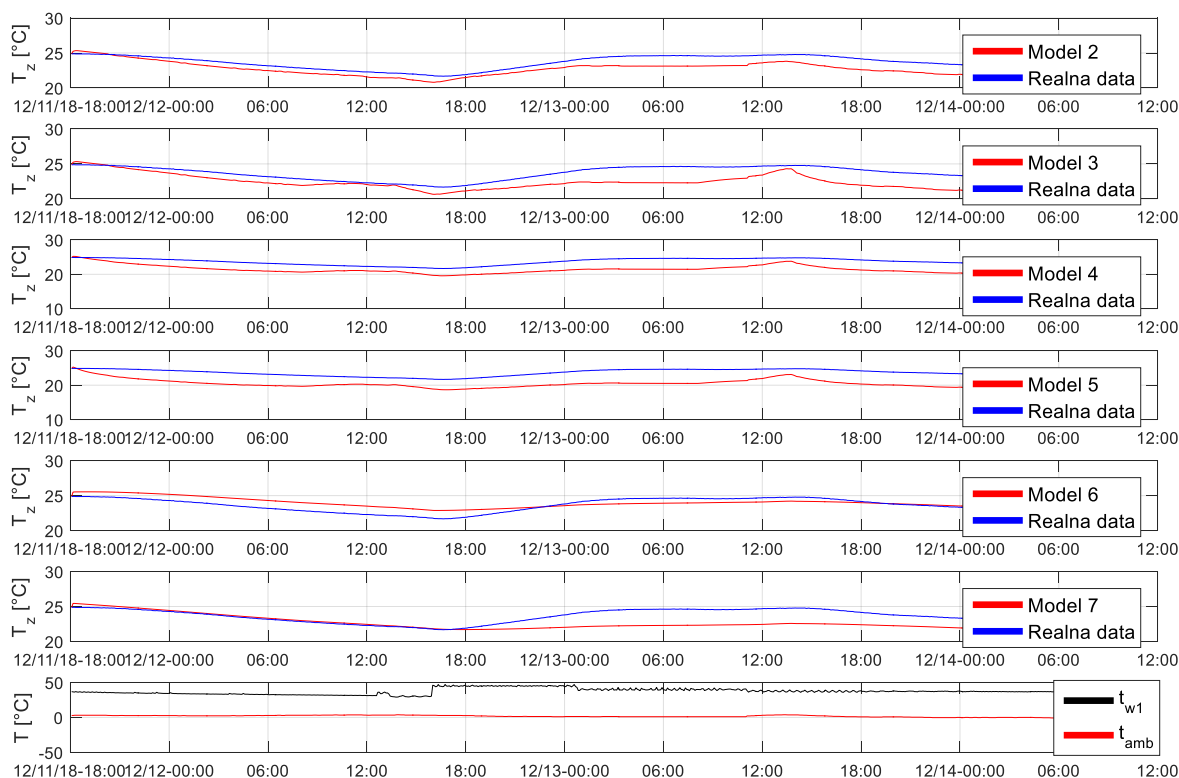
Byla provedena aktivní kalibrace modelu 2 se zvýšenou tepelnou ztrátou vlivem koeficientu LTB. Hodnota LTB koeficientu byla nastavena na 1,8.



Obr. 6-5 Porovnání simulace modelu LTB 2 s mini TABS v aktivním režimu

Z grafu Obr. 6-5 je patrné, že největší odchylka nastává v teplotě stropu TABS. Dochází k menšímu přenosu tepla z vody do betonu. To má následek i menší teplotu v zóně.

Pro přehlednou vizualizaci všech modelů byl vytvořen graf Obr. 6-6, na kterém je vidět porovnání všech modlů s experimentálním objektem mini TABS.

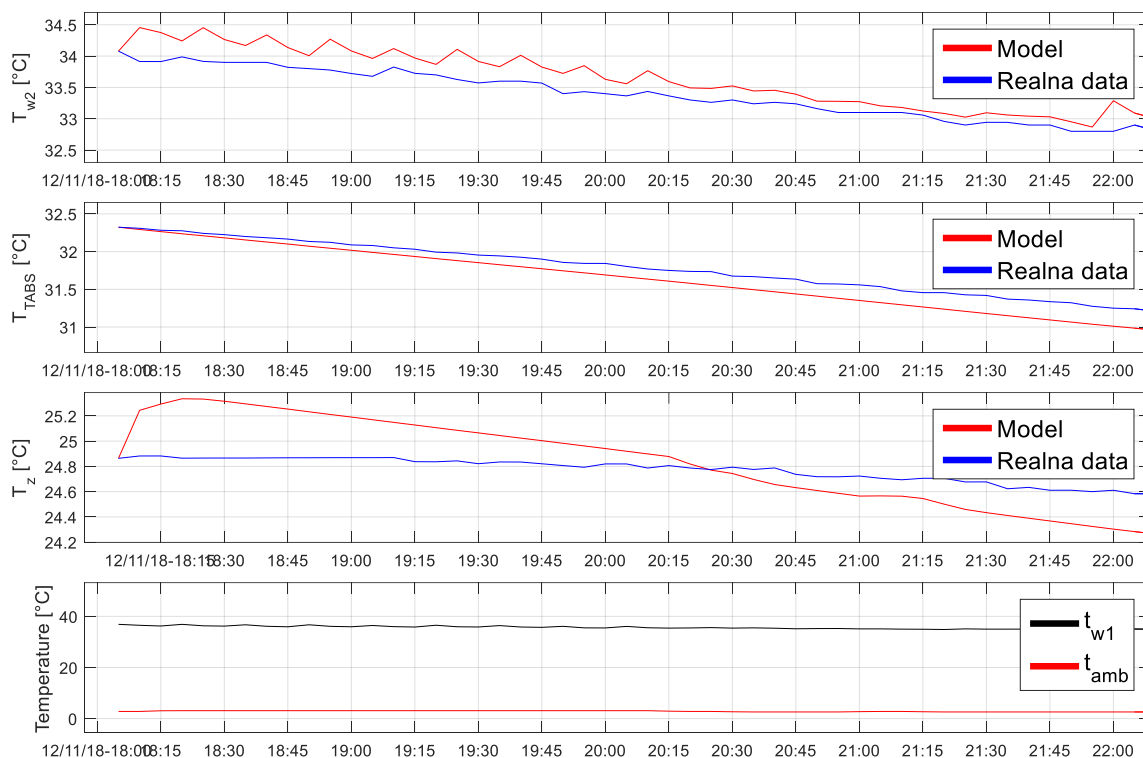


Obr. 6-6 Porovnání teploty v zóně simulace modelů LTB s mini TABS v aktivním režimu

Z kompletního porovnání všech modelů můžeme vidět na grafu Obr. 6-6 rozdělení modelů do dvou skupin model 2 až 5 a modely 6 a 7. Tyto dvě skupiny se liší ve fyzikálním popisu.

Z pozorování vyplývá, že největší potenciál má prozatím model 2. Je vidět největší podobnost modelu s experimentálním objektem mini TABS.

Jestliže se podíváme na začátek kalibrační simulace, uvidíme reakci modelu na počáteční podmínky. Počáteční podmínky jsou hodnoty stavů branné z experimentálního objektu mini TABS. Během prvních kroků simulace (délka kroku 5 min) je vidět odezva modelu na počáteční podmínky.



Obr. 6-7 Detail počátku porovnání modelu LTB 2 s mini TABS

Na grafu Obr. 5-7 je vidět další možný problém, jedná se o příliš rychlou reakci modelu na počáteční stavy. Během prvního kroku byl zaznamenán nárůst teploty o skoro 0,4 K. Tento rozdíl by byl velmi problematický při použití v prediktivní regulaci. Prediktivní regulace vytváří simulační horizont modelu v každém kroku znova. Z tohoto důvodu by byl výpočet prediktivní regulace v každém kroku nepřesný.

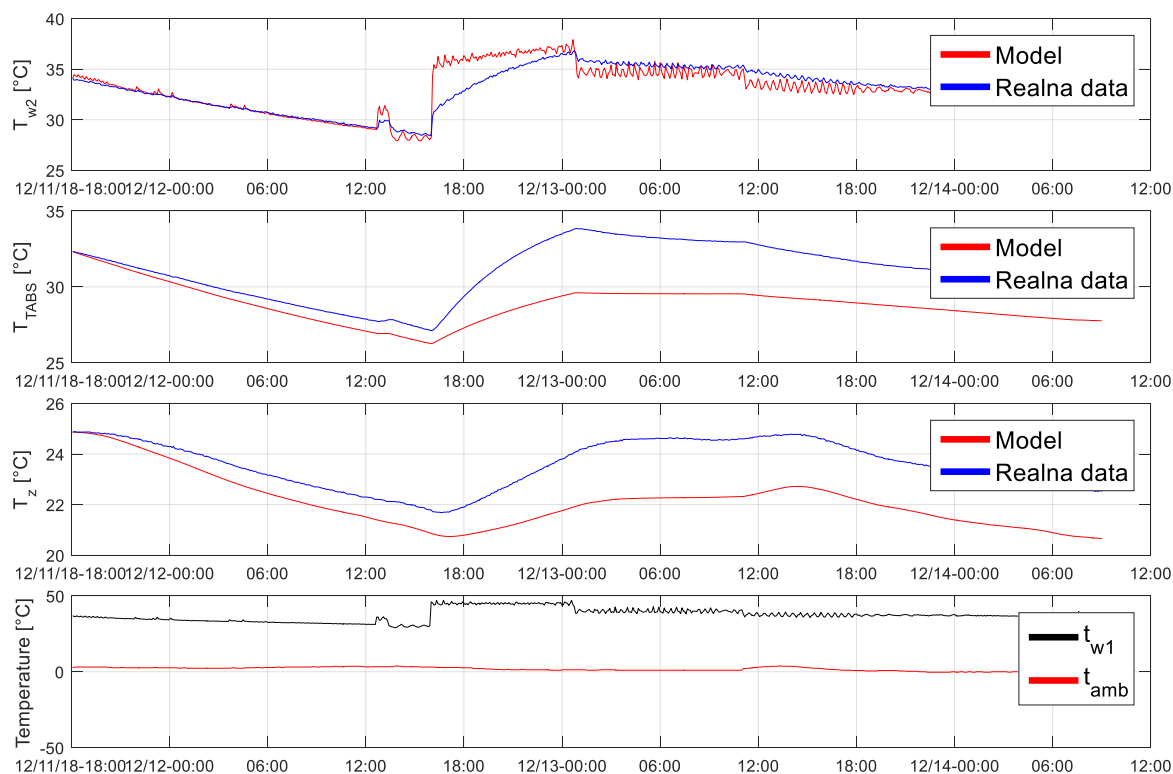
ZÁVĚR

Z grafu Obr. 5-7 je patrné, že bude potřeba komplexnější úprava modelů. Jednoduchý fyzikální popis budovy může vynechávat mnoho termodynamických dějů.

6.3 Kalibrace upravených modelů zvýšením tepelné kapacity místnosti

Matematické modely 1 až 5 mají fyzikální problém s nízkou tepelnou kapacitou místnosti, u vybraných modelů je uvažována tepelná kapacita místnosti pouze ve formě vzduchu obsaženém v místnosti a ta je příliš nízká. V experimentálním objektu mini TABS je energie akumulována do stěn a podlahy. Tento problém by mohl být vyřešen navýšením tepelné kapacity místnosti a zpomalit dynamiku modelu na počáteční stavy.

Byla provedena kalibrační simulace modelu 2 se zvýšenou tepelnou kapacitou místnosti (pouze kapacita vzduchu v místnosti). Tepelná kapacita místnosti byla zvýšena 50krát.

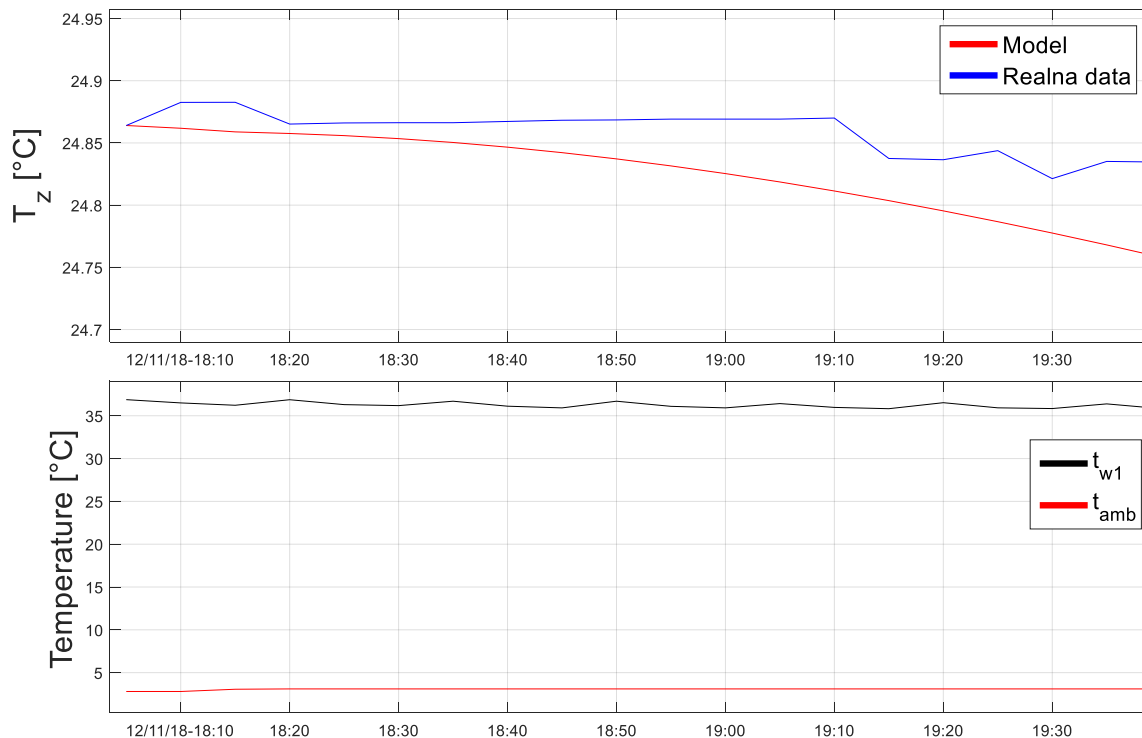


Obr. 6-8 Porovnání simulace modelu LTB+C 2 s mini TABS v aktivním režimu

Na grafu Obr. 6-8 můžeme vidět na začátku simulace podobnost s daty z experimentálního objektu mini TABS, v průběhu simulace se model 2 začne rozcházet vlivem nižší teploty v zóně (T_z). To je způsobeno větší tepelnou ztrátou, za kterou pravděpodobně může navýšení tepelné kapacity místnosti.

Jestliže se podíváme na začátek kalibrační simulace, uvidíme reakci modelu na počáteční podmínky. Během prvních kroků simulace (délka kroku 5 min) je vidět odezva modelu na počáteční podmínky.

Z grafu Obr. 6-9 je parné, že model 2 reaguje na počáteční podmínky podobně jako experimentální objekt TABS.

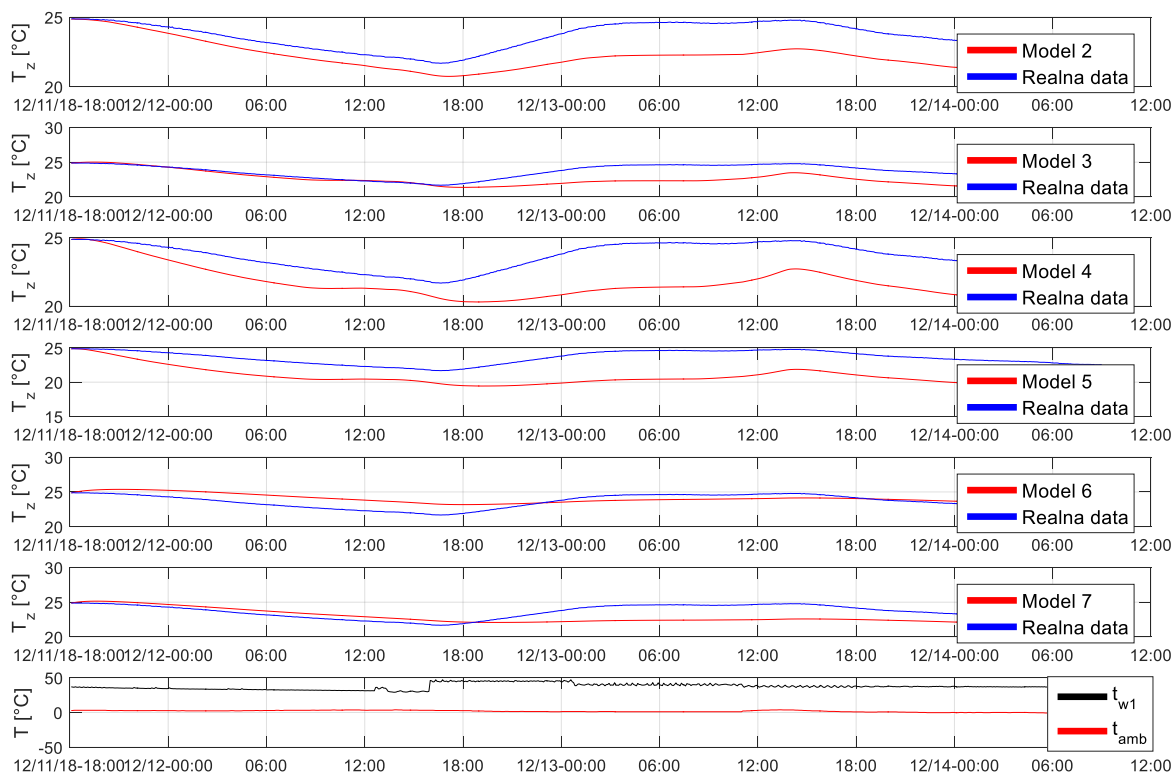


Obr. 6-9 Detail porovnání simulace modelu LTB+C 2 s mini TABS v aktivním režimu

Zvýšení tepelné kapacity místnosti vyřešilo problém s příliš rychlou reakcí modelu na počáteční stavy. Z grafu Obr. 6-9 je parné, že počáteční odezva modelu 2 je téměř totožná s reakcí experimentálního objektu mini TABS. Tento model by mohl být teoreticky použit pro MPC.

Z grafu Obr. 6-8 je vidět, že stále zůstává problém s pomalým přenosem energie z vody do betonu. Tento problém je vidět na vyšší teplotě vratné vody (T_{w2}) a na nižší teplotě stropu TABS (T_{TABS}).

Pro přehlednou vizualizaci všech modelů byl vytvořen graf Obr. 6-10, na kterém je vidět porovnání všech modlů s experimentálním objektem mini TABS.



Obr. 6-10 Porovnání teploty v zóně simulace modelů LTB+C s mini TABS v aktivním režimu

ZÁVĚR

Na grafu Obr. 6-10 zobrazeno porovnáním všech modelů, vidíme velké rozdíly při vyhodnocení výsledků. Stejně úpravy modelů nebudou mít pro všechny modely totožný dopad na kalibraci. Z tohoto důvodu je potřeba ke každému modelu přistupovat individuálně.

6.4 Finální kalibrace všech modelů

Cílem této práce bylo vytvořit matematický model experimentálního objektu mini TABS, který bude vhodný pro prediktivní regulaci vytápění stropu s aktivací betonového jádra.

Na základě různého fyzikálního základu a složitosti jednotlivých modelů, bylo ke všem modelům přistupováno individuálně a kalibrace byla prováděna zvlášť.

Na základě předchozích výsledku kalibrace jednotlivých matematických modelů byly zjištěny následující nedostatky původních matematických modelů. Všechny modely měly menší tepelnou ztrátu, příliš rychlou reakci na počáteční stavy a pomalý přenos energie z vody do betonu oproti experimentálnímu objektu mini TABS.

Na základě nespočetně porovnávacích kalibračních simulací a zkoušení různých parametrů modelů byly vytvořeny finální kalibrační verze matematických modelů.

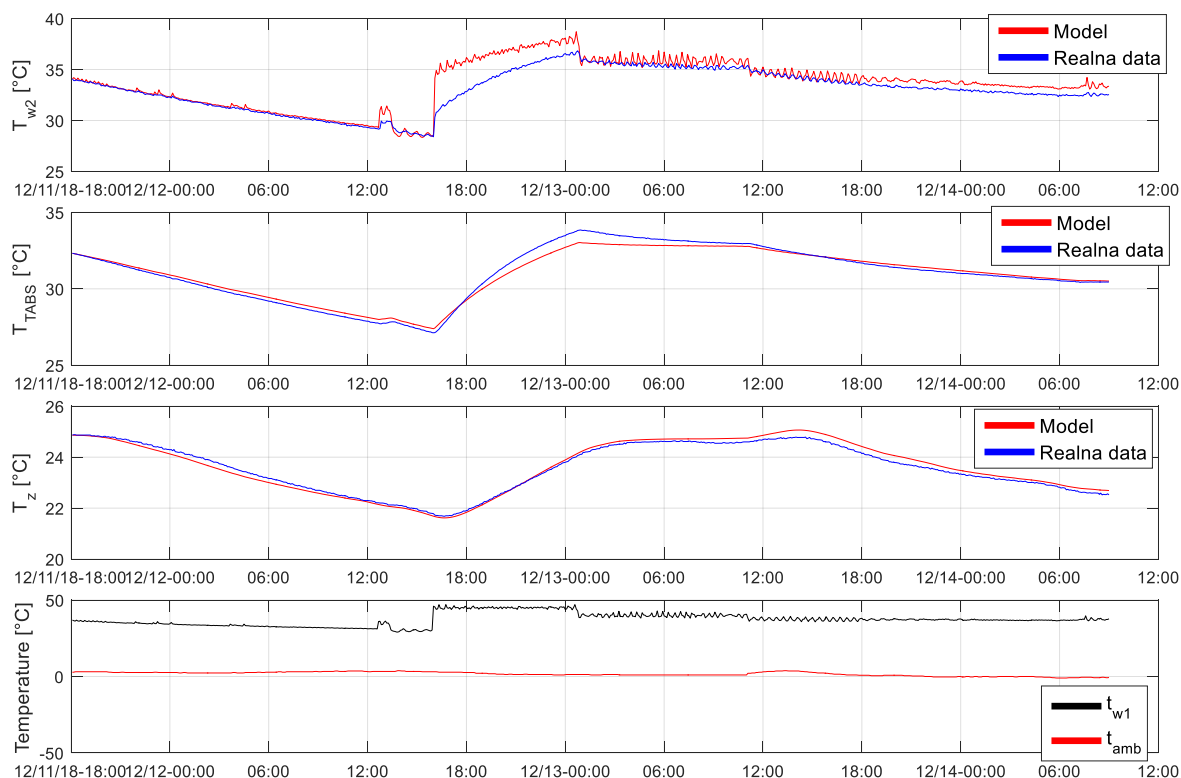
Tab. 6-2 Rekapitulace modelů

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 2	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	T_{w2}, T_{TABS}, T_z	3
Model 3	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_p, T_{TABS}, T_z$	4
Model 4	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1}, T_{TABS2}, T_{TABS3}, T_z$	5
Model 5	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS9}, T_z$	11
Model 6	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS}, T_z, T_{MRT}$	4
Model 7	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS3}, T_z, T_{MRT}$	6

6.4.1 Finální kalibrační verze Model 2

Na základě předchozích kalibračních simulací byl vytvořen grey box pro matematický model 2.

V modelu 2 byly upraveny následující parametry. Byla zvýšena tepelná ztráta koeficientem zohledňující vliv tepelných mostů na hodnotu $LTB = 2$. Následně byla 50krát zvýšena teplotní kapacita místnosti. Dále byl 40krát zvýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}). Jako poslední byla zvýšena měrná tepelná kapacita vody (c_w) 1,4krát.



Obr. 6-11 Finální kalibrace model 2

Finální verze modelu 2 je vhodná pro prediktivní regulaci experimentálního objektu mini TABS. Reakce vratné vody je trochu rychlejší než v objektu mini TABS, ale tato chyba nebude mít vliv na regulaci teploty v zóně.

Tab. 6-3 Model 2

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 2	T_{w1}	T_{amb} , Q_{solar} , Q_{occup}	T_{w2} , T_{TABS} , T_z	3

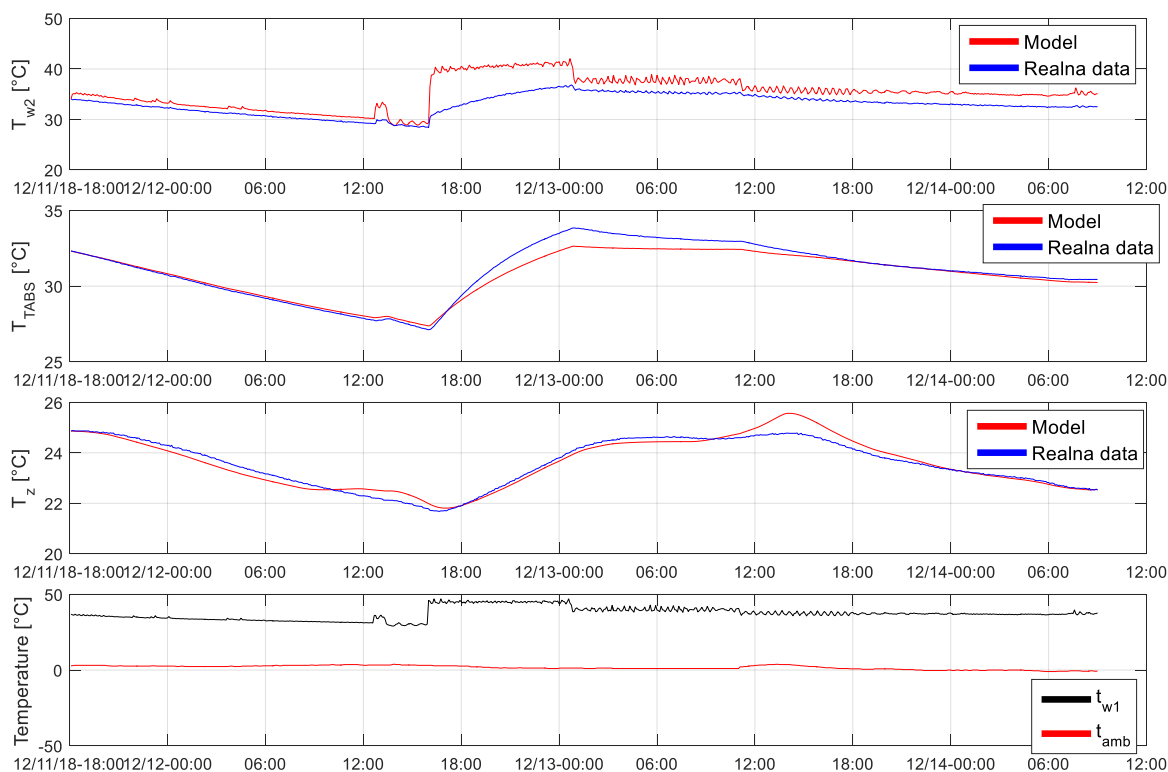
Tab. 6-4 Kalibrace modelu 2

Model 2	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	2	50krát	40krát	1,4krát

6.4.2 Finální kalibrační verze Model 3

Na základě předchozích kalibračních simulací byl vytvořen grey box pro matematický model 3.

V modelu 3 byly upraveny následující parametry. Byla zvýšena tepelná ztráta koeficientem zohledňující vliv tepelných mostů na hodnotu $LTB = 2$. Následně byla 50krát zvýšena teplaná kapacita místnosti. Dále byl 100krát zvýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}). Jako poslední byla zvýšena měrná tepelná kapacita vody (c_w) 2,5krát.



Obr. 6-12 Finální kalibrace model 3

Tento model by teoreticky mohl být použit pro prediktivní regulaci. Chování teploty vratné vody je výrazně rychlejší než v objektu mini TABS, to by mohlo mít vliv na výslednou teplotu v zóně. Chování teploty v zóně vykazuje lehké výkyvy, které mohou být způsobeny chybou modelu.

Tab. 6-5 Model 3

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 3	T_{w1}	T_{amb} , Q_{solar} , Q_{occup}	T_{w2} , T_p , T_{TABS} , T_z	4

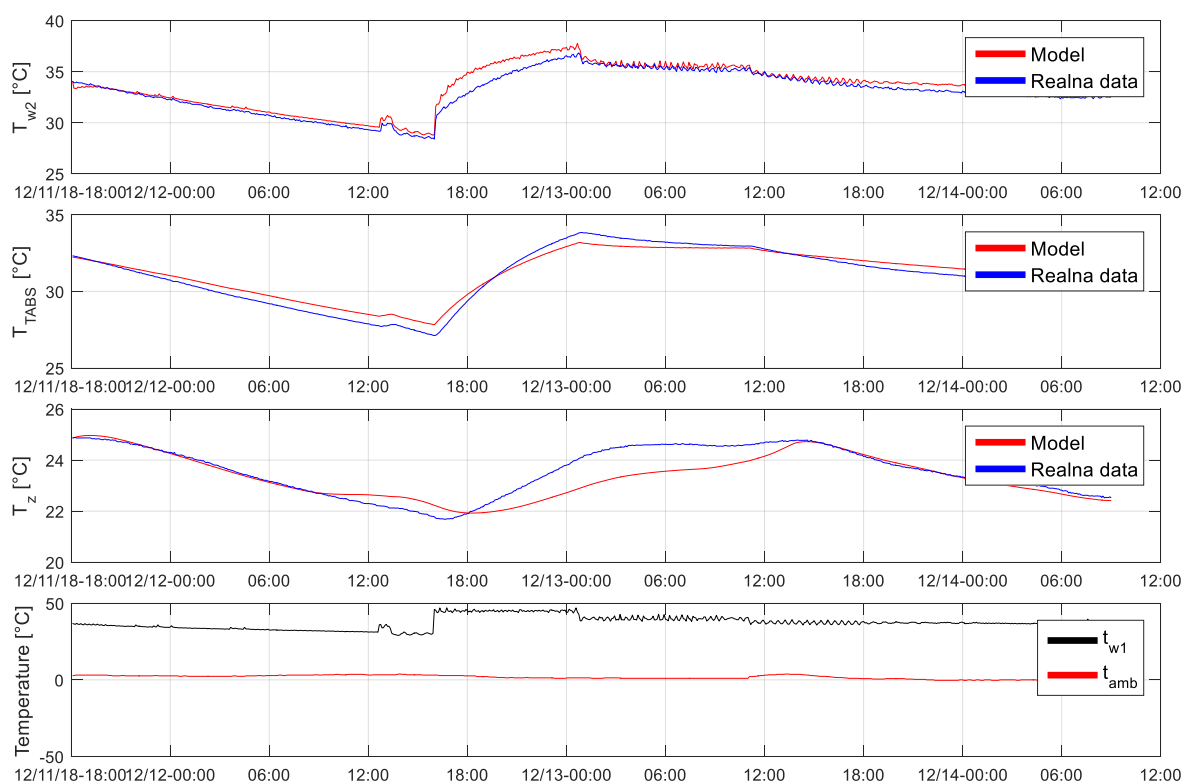
Tab. 6-6 Kalibrace modelu 3

Model 3	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	2	50krát	100krát	2,5krát

6.4.3 Finální kalibrační verze Model 4

Na základě předchozích kalibračních simulací byl vytvořen grey box pro matematický model 4.

V modelu 4 byly upraveny následující parametry. Byla zvýšena tepelná ztráta koeficientem zohledňující vliv tepelných mostů na hodnotu $LTB = 1,6$. Následně byla 80krát zvýšena teplaná kapacita místnosti. Dále byl 40krát zvýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}). Jako poslední byla zvýšena měrná tepelná kapacita vody (c_w) 1,1krát.



Obr. 6-13 Finální kalibrace model 4

Tento model by nemohl být použit pro prediktivní regulaci z důvodu nepřesného chování tepoty v zóně. Chyba může být způsobena komplikovaným přenosem tepla ve stropě TABS. Ostatní stavy se chovají přijatelně.

Tab. 6-7 Model 4

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 4	T_{w1}	T_{amb} , Q_{solar} , Q_{occup}	T_{w2} , T_{TABS1} , T_{TABS2} , T_{TABS3} , T_z	5

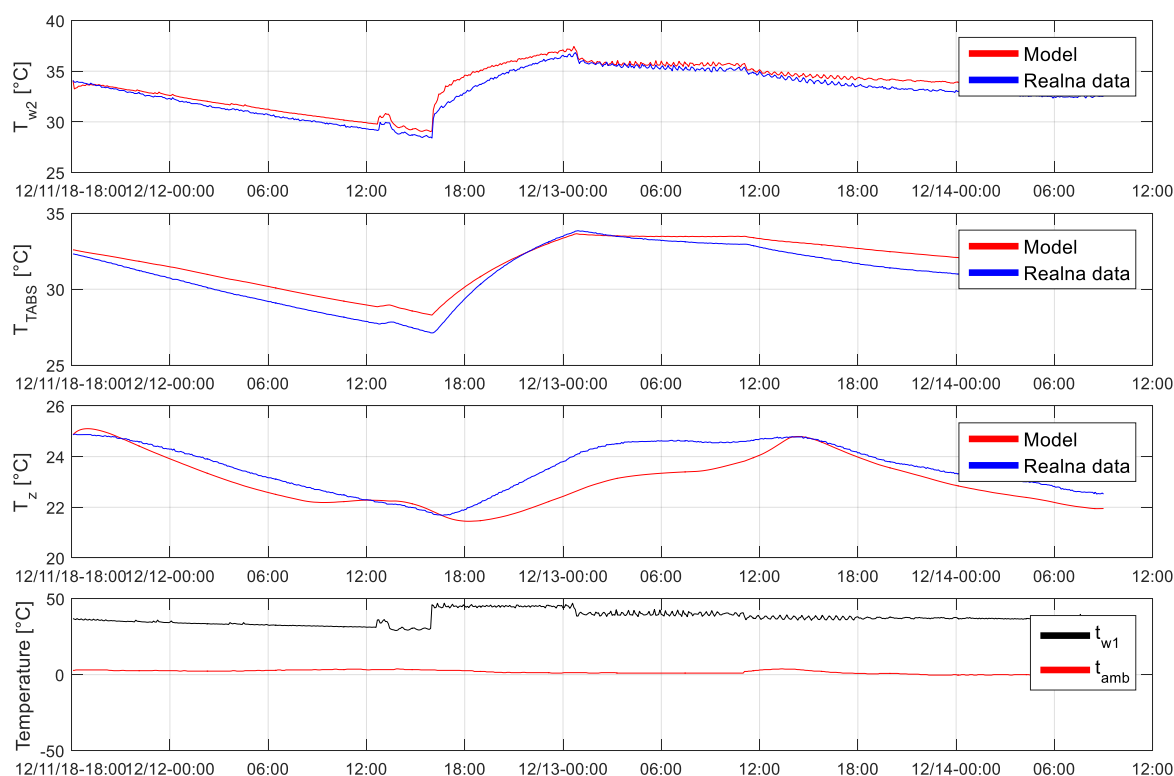
Tab. 6-8 Kalibrace modelu 4

Model 4	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	1,6	80krát	40krát	1,1krát

6.4.4 Finální kalibrační verze Model 5

Na základě předchozích kalibračních simulací byl vytvořen grey box pro matematický model 5.

V modelu 5 byly upraveny následující parametry. Byla zvýšena tepelná ztráta koeficientem zohledňující vliv tepelných mostů na hodnotu $LTB = 1,4$. Následně byla 50krát zvýšena teplotní kapacita místnosti. Dále byl 10krát zvýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}). Tepelná kapacita vody nebyla navýšena.



Obr. 6-14 Finální kalibrace model 5

Tento model se chová velmi podobně jako model 4, proto by nemohl být použit pro prediktivní regulaci z důvodu nepřesného chování teploty v zóně. Chyba může být způsobena komplikovaným přenosem tepla v TABS. Ostatní stavy se chovají přijatelně.

Tab. 6-9 Model 5

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 5	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS9}, T_z$	11

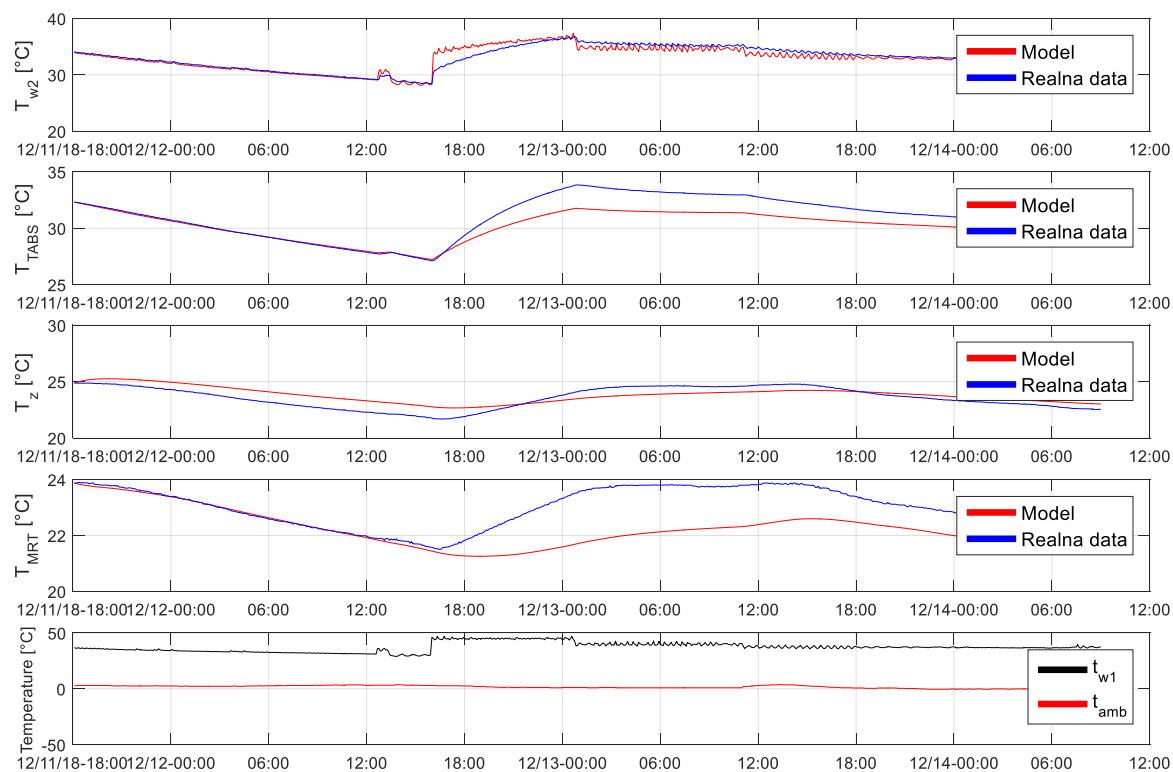
Tab. 6-10 Kalibrace modelu 5

Model 5	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	1,4	50krát	10krát	1krát

6.4.5 Finální kalibrační verze Model 6

Na základě předchozích kalibračních simulací byl vytvořen grey box pro matematický model 6.

V modelu 6 byly upraveny následující parametry. Byla zvýšena tepelná ztráta koeficientem zohledňující vliv tepelných mostů na hodnotu $LTB = 2,2$. Následně byla 50krát zvýšena teplaná kapacita místnosti. Dále byl 10krát zvýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}). Jako poslední byla zvýšena měrná tepelná kapacita vody (c_w) 1,1krát.



Obr. 6-15 Finální kalibrace model 6

Tento model by nemohl být použit pro prediktivní regulaci z důvodu nepřesného chování téměř všech stavů. Model se chová přijatelně v režimu chlazení (první část grafu), ale při zvýšeném režimu vytápění se značně rozchází střední radiační teplota (T_{MRT}) a teplota v zóně (T_z).

Hlavní příčina chybného chování může být způsobena nepřesným měřením střední radiační teploty. Tato chyba je velmi zásadní ve finálním vyhodnocování, z tohoto důvodu nelze výsledek kalibrace modelu 6 brát příliš věrohodně.

Tab. 6-11 Model 6

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 6	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS}, T_z, T_{MRT}$	4

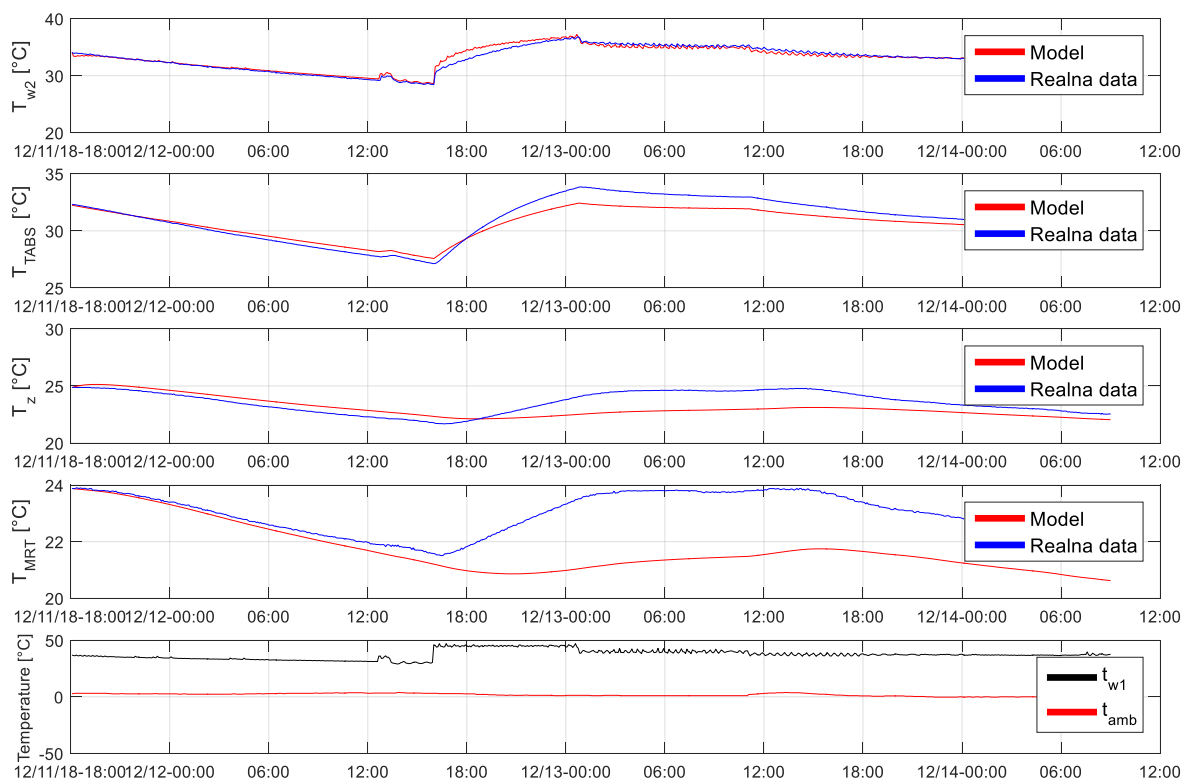
Tab. 6-12 Kalibrace modelu 6

Model 6	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	2,2	50krát	10krát	1,1krát

6.4.6 Finální kalibrační verze Model 7

Na základě předchozích kalibračních simulací byl vytvořen grey box pro matematický model 7.

V modelu 7 byly upraveny následující parametry. Byla zvýšena tepelná ztráta koeficientem zohledňující vliv tepelných mostů na hodnotu $LTB = 1,9$. Následně byla 50krát zvýšena teplotní kapacita místnosti. Dále byl 10krát zvýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}). Jako poslední byla zvýšena měrná tepelná kapacita vody (c_w) 1,1krát.



Obr. 6-16 Finální kalibrace model 7

Tento model se chová velmi podobně jako model 6, proto by nemohl být použit pro prediktivní regulaci z důvodu nepřesného chování téměř všech stavů. Model se chová přijatelně v režimu chladnutí (první část grafu), ale při zvýšeném režimu vytápění se značně rozchází střední radiační teplota a teplota v zóně.

Hlavní příčina chybného chování může být způsobena nepřesným měřením střední radiační teploty. Tato chyba je velmi zásadní ve finálním vyhodnocování, z tohoto důvodu nelze výsledek kalibrace modelu 7 brát příliš věrohodně.

Tab. 6-13 Model 7

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 7	T_{w1}	$T_{amb}, Q_{solar}, Q_{occup}$	$T_{w2}, T_{TABS1} - T_{TABS3}, T_z, T_{MRT}$	6

Tab. 6-14 Kalibrace modelu 7

Model 7	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	1,9	50krát	10krát	1,1krát

7 ZÁVĚR

V rámci této práce bylo navrženo sedm matematických modelů určených pro prediktivní regulaci vytápění aktivního betonu experimentálního objektu mini TABS. Původní matematické modely založené na fyzikálních předpokladech byly na základě kalibrace na reálných naměřených datech z objektu mini TABS upraveny z důvodu vhodného použití pro prediktivní regulaci.

Z celkových sedmi matematických modelů bylo dále vybráno šest z nich (Model 2 až 7), které byly dále upravovány na základě simulací.

Tab. 7-1 Přehled všech modelů

	Vstupy		Výstupy	Počet rovnic
	Řízené	Neřízené		
Model 1	Q_{TABS}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	T_{TABS}, T_z	2
Model 2	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{w2}, T_{\text{TABS}}, T_z$	3
Model 3	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{w2}, T_p, T_{\text{TABS}}, T_z$	4
Model 4	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{w2}, T_{\text{TABS1}}, T_{\text{TABS2}}, T_{\text{TABS3}}, T_z$	5
Model 5	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{w2}, T_{\text{TABS1}} - T_{\text{TABS9}}, T_z$	11
Model 6	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{w2}, T_{\text{TABS}}, T_z, T_{\text{MRT}}$	4
Model 7	T_{w1}	$T_{\text{amb}}, Q_{\text{solar}}, Q_{\text{occup}}$	$T_{w2}, T_{\text{TABS1}} - T_{\text{TABS3}}, T_z, T_{\text{MRT}}$	6

Výsledkem kalibrace bylo nalezení nedokonalostí a chybného popisu jednotlivých modelů pomocí diferenciálních rovnic.

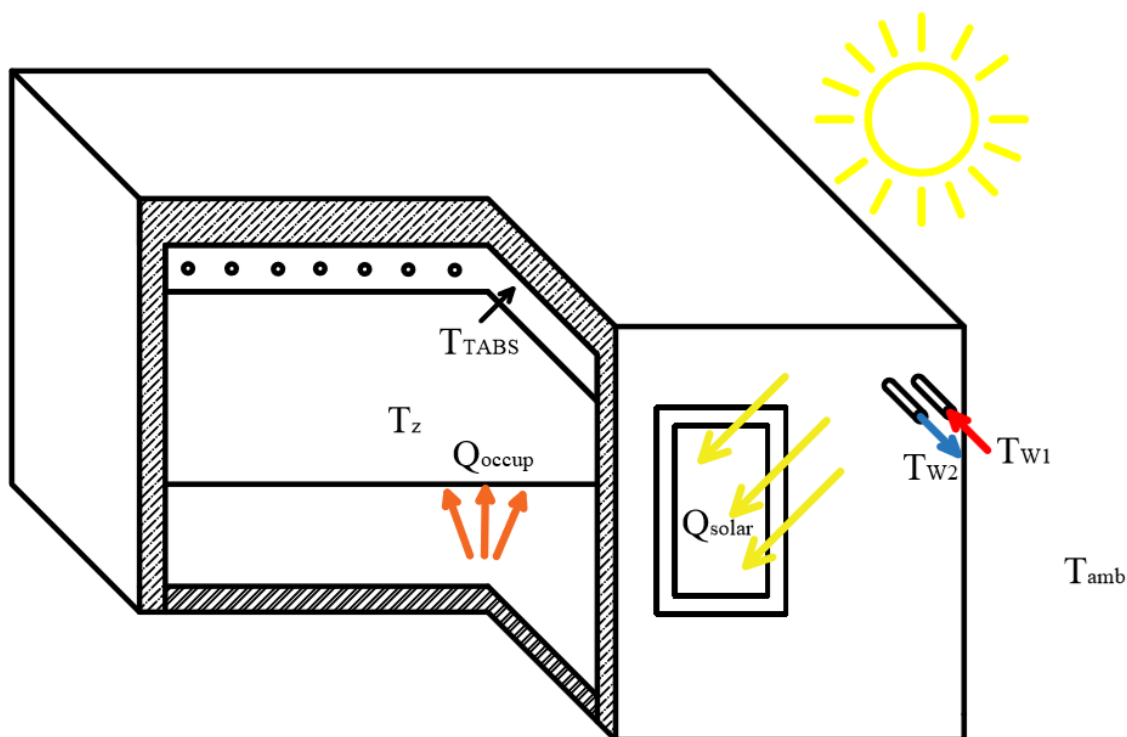
Na základě naměřených dat existuje teoreticky nekonečně možností, jak dané modely upravit. Cílem této práce není modely kalibrovat za pomoci komplikovaných matematických funkcí, ale jednotlivé úpravy jednoduchých modelů popsat za účelem aplikace na reálném objektu vytápěném aktivním betonem.

Všechny modely předpokládaly menší tepelnou ztrátu, to mohlo být způsobeno neodbornou instalací tepelné izolace a zanedbáním tepelných mostů objektu mini TABS. V modelech byla vynásobena celková tepelná ztráta objektu mini TABS součinitelem LTB.

Vlivem zjednodušení tepelné kapacity místnosti objektu mini TABS pouze na tepelnou kapacitu vzduchu obsaženou v místnosti a zanedbání tepelné kapacity podlahy a stěn bylo nutné mnohonásobně zvýšit tepelnou kapacitu místnosti (C_z).

Vzhledem k předchozím zásahům do fyzikální podstaty jednotlivých modelů musel být dále navýšen přestup tepla z vody do betonu (k_{water}) a měrná tepelná kapacita vody (c_w).

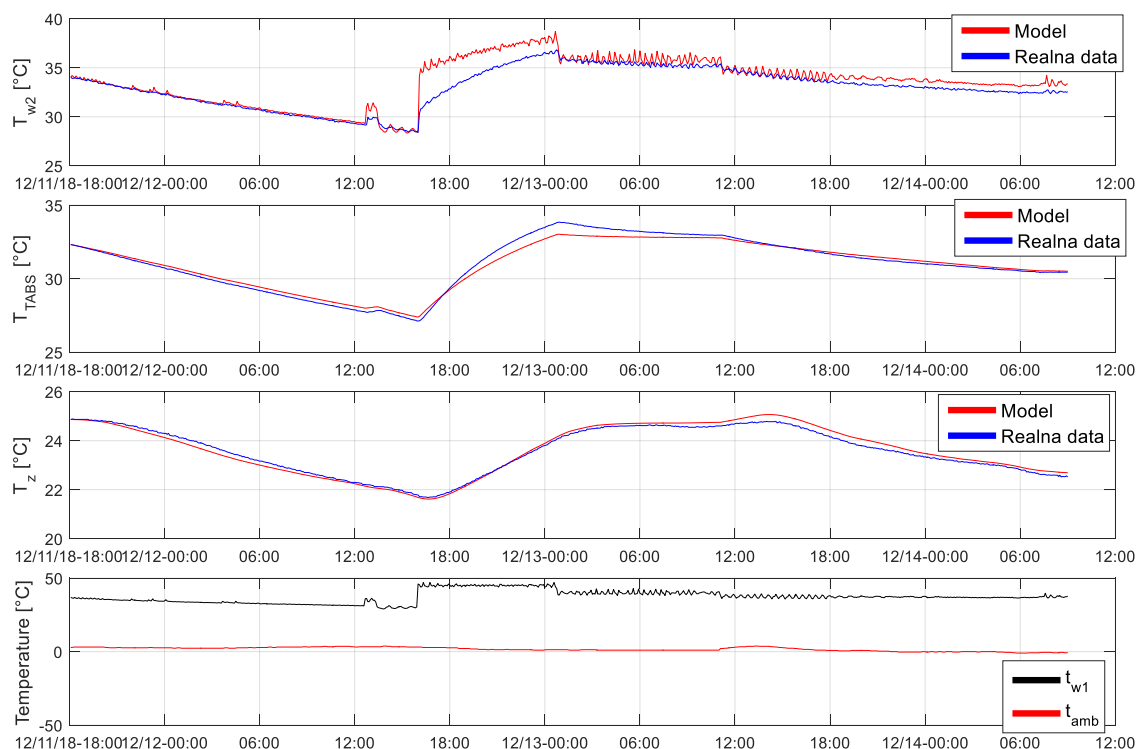
Nejlépe ze všech simulací, kde byly modely porovnávány s objektem mini TABS, vyšel model 2. Simulace byly prováděné s naměřenými vstupy (teplota přívodní vody, venkovní teplota vzduchu a solární zisky) a porovnávaly se se skutečnými stavy modelu (teplota v zóně, teplota stropu TABS a teplota vratné vody) z objektu mini TABS, viz graf na Obr. 7-2. Výsledné úpravy parametrů jsou uvedeny v Tab. 7-2.



Obr. 7-1 Schéma modelu 2

Tab. 7-2 Kalibrace modelu 2

Model 2	LTB	C_z	k_{water}	c_w
	2	50krát	40krát	1,4krát



Obr. 7-2 Simulace modelu 2

7.1 Shrnutí

Na základě poznatků získaných během tvorby práce je důležité zvolit vhodný postup tvorby matematických modelů budovy určené pro prediktivní regulaci vytápění aktivního betonu. V matematickém modelu je budova popsána soustavou diferenciálních rovnic, kde je fyzikálně popisován přestup tepla z vody v potrubí přímo do stropu TABS. Dále je popsán přestup tepla ze stropu TABS do místnosti, kde je uvažováno pouze s tepelnou kapacitou vzduchu místnosti. Tepelná ztráta budovy je v modelu vypočítaná na základě fyzikálních předpokladů.

Pro finální úpravu parametrů modelu lze aplikovat následující postup.

Je doporučeno zvýšit tepelnou ztrátu budovy 1,5krát, dále zvýšit tepelnou kapacitu vzduchu v místnosti 50krát, navýšit přestup tepla z vody do betonu 40krát a zvýšit měrnou tepelnou kapacitu vody 1,4krát.

Toto doporučení lze aplikovat pouze v případě, že není možno matematický model kalibrovat na základě naměřených dat.

8 LITERATURA

- [L1] KOHOUT, J., CIGLER, J., ŠIROKÝ, J., KOPECKÝ, P. *Systémy tepelné aktivace betonového jádra* [online]. TZB-info.cz. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/15628-systemy-tepelne-aktivace-betonoveho-jadra-a-jejich-vyuziti-pro-zvyseni-uzivatelskeho-komfortu-budov>
- [L2] ROMANÍ, J., GRACIA, A. *Simulation and control of Thermally Activated Building Systems* [online]. repositori.udl.cat. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/57860/024316.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [L3] Bašta, J.: *Velkoplošné sálavé vytápění*. Praha: GRADA, 2010. - 128 s. ISBN 978-80-247-3524-5.
- [L4] ŠIROKÝ, J., KUBEČEK, J. *Prediktivní řízení soustav vytápění budov* [online]. TZB-info.cz. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/7541-prediktivni-rizeni-soustav-vytapani-budov>
- [L5] MOHAMAD, M. *Modelování a ovládání vnitřních teplot* [online]. TZB-info.cz. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/17807-modelovani-a-ovladani-vnitřnich-teplot-aplikaci-matlab-simulink-pomoci-modelu-prostoru-a-prenosovych-funkci>
- [L6] CIGLER, J. *Model Predictive Control for Buildings*. Praha, 2013. Disertační práce. ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra Řídicí techniky.
- [L7] *Podlahové vytápění* [online]. EKOMPLEX. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <http://www.topeni-topenari.eu/topeni/systemy-vytapani/podlahove.php>
- [L8] *Thermally Active Building Systems* [online]. Uponor UK. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.uponor.co.uk/products/ceiling-heating-and-cooling/tabs>

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Řez konstrukcí podlahové plochy – mokrá pokládka [L7]	8
Obr. 2-2 Desky s dutým jádrem [L2].....	9
Obr. 2-3 Betonové jádro [L8]	10
Obr. 4-1 Objekt mini TABS	14
Obr. 4-2 Realizace konstrukce objektu mini TABS [L1]	15
Obr. 4-3 Základní konstrukce mini TABS	16
Obr. 4-4 Zateplení vnější obálky objektu mini TABS.....	17
Obr. 4-5 Stavba střechy a vnějšího opláštění.....	18
Obr. 4-6 Zapojení otopné soustavy.....	19
Obr. 4-7 Otopná soustava	20
Obr. 4-8 Schéma otopné soustavy	20
Obr. 4-9 Rozvaděč	22
Obr. 4-10 Řez podélný konstrukce objektu mini TABS.....	23
Obr. 4-11 Půdorys konstrukce objektu mini TABS.....	23
Obr. 4-12 Řez příčný konstrukce objektu mini TABS	24
Obr. 5-1 Schéma model 1	27
Obr. 5-2 Schéma model 2	29
Obr. 5-3 Schéma model 6	34
Obr. 5-4 Ustálení modelu 2 na konstantní teplotě s nulovým výkonem do TABS	38
Obr. 5-5 Ustálení všech modelů	39
Obr. 5-6 Ustálení modelu 2 s nulovým výkonem do TABS.....	40
Obr. 5-7 Detail simulace ustálení modelu 2 s nulovým výkonem do TABS	41
Obr. 5-8 Simulace všech modelů s nulovým výkonem do TABS.....	42
Obr. 5-9 Detail simulace všech modelů s nulovým výkonem do TABS.....	43
Obr. 6-1 Porovnání simulace modelu 2 s mini TABS v pasivním režimu chladnutí	45
Obr. 6-2 Porovnání simulace modelu 2 s mini TABS v aktivním režimu.....	46
Obr. 6-3 Porovnání teploty v zóně simulace modelů s mini TABS v aktivním režimu ...	47
Obr. 6-4 Porovnání simulace modelu LTB 2 s mini TABS v pasivním režimu chladnutí	48
Obr. 6-5 Porovnání simulace modelu LTB 2 s mini TABS v aktivním režimu	49
Obr. 6-6 Porovnání teploty v zóně simulace modelů LTB s mini TABS v aktivním režimu	50
Obr. 6-7 Detail počátku porovnání modelu LTB 2 s mini TABS	51
Obr. 6-8 Porovnání simulace modelu LTB+C 2 s mini TABS v aktivním režimu	52

Obr. 6-9 Detail porovnání simulace modelu LTB+C 2 s mini TABS v aktivním režimu	53
Obr. 6-10 Porovnání teploty v zóně simulace modelů LTB+C s mini TABS v aktivním režimu	54
Obr. 6-11 Finální kalibrace model 2	56
Obr. 6-12 Finální kalibrace model 3	57
Obr. 6-13 Finální kalibrace model 4	58
Obr. 6-14 Finální kalibrace model 5	59
Obr. 6-15 Finální kalibrace model 6	60
Obr. 6-16 Finální kalibrace model 7	62
Obr. 7-1 Schéma modelu 2	65
Obr. 7-2 Simulace modelu 2	66

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 Přehled všech modelů	25
Tab. 5-2 Technické specifikace objektu mini TABS.....	26
Tab. 5-3 Přehled model 1	27
Tab. 5-4 Přehled model 2	29
Tab. 5-5 Přehled model 3	33
Tab. 5-6 Přehled model 4	33
Tab. 5-7 Přehled model 5	33
Tab. 5-8 Přehled model 6	34
Tab. 5-9 Přehled model 7	37
Tab. 5-10 Naměřené teploty v zóně.....	39
Tab. 6-1 Rekapitulace modelů	44
Tab. 6-2 Rekapitulace modelů	55
Tab. 6-3 Model 2	56
Tab. 6-4 Kalibrace modelu 2	56
Tab. 6-5 Model 3	57
Tab. 6-6 Kalibrace modelu 3	57
Tab. 6-7 Model 4	58
Tab. 6-8 Kalibrace modelu 4	58
Tab. 6-9 Model 5	59
Tab. 6-10 Kalibrace modelu 5	59
Tab. 6-11 Model 6	61
Tab. 6-12 Kalibrace modelu 6	61

Tab. 6-13 Model 7	63
Tab. 6-14 Kalibrace modelu 7	63
Tab. 7-1 Přehled všech modelů	64
Tab. 7-2 Kalibrace modelu 2	65