



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VYUŽITÍ KNIHOVNY HAM-TOOLS PRO SIMULACI TEPELNÉHO CHOVÁNÍ RODINNÉHO DOMU

HAM-TOOLS LIBRARY USE FOR THE SIMULATION OF THE THERMAL PERFORMANCE
OF THE HOUSE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB ZÁBOJNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF ŠTĚTINA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Zábojník

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití knihovny HAM-Tools pro simulaci tepelného chování rodinného domu

v anglickém jazyce:

HAM-Tools library use for the simulation of the thermal performance of the house

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Upravte knihovnu HAM-Tools (International Building Physics Toolbox) pro MATLAB/Simulink, aby byla vhodná pro simulaci rodinných domů v České republice. Modifikovanou knihovnu využijte k modelování tepelného chování konkrétního rodinného domu včetně optimalizace vytápění. Porovnejte výsledky simulace s programem TRNSYS.

Cíle diplomové práce:

Cílem je získat přehled o modelování dynamických soustav v současných simulačních nástrojích. Do knihovny HAM integrovat atmosférické podmínky lokality Brno, stavební materiály používané v ČR a respektování platných norem v ČR. Provést simulaci typické novostavby rodinného domu v brněnské lokalitě a provést srovnání mezi knihovnou HAM a programem TRNSYS.

Seznam odborné literatury:

1. User's guide to The International Building Physics Toolbox
2. Mathworks (2001): Using Simulink: Simulink. Dynamic System Simulation for Matlab, Mathworks.
3. Jos van Schijndel Integrated, Modeling using MatLab, Simulink and COMSOL: with heat, air and moisture applications for building physics and systems, VDM 2011
4. Grepl Robert Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN 2011
5. Doňar Bohuslav, Zaplatílek Karel, MATLAB pro začátečníky, BEN 2003

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Knihovna HAM-Tools určená pro MATLAB/Simulink byla v rámci diplomové práce upravena pro použití při simulacích rodinných domů v České republice. Upravená knihovna je v práci spolu se svými prvky detailně popsána a také otestována při simulacích jednozónového a dvouzónového modelu obálky rodinného domu. Simulace modelů se stejnými parametry je provedena také v programu TRNSYS. Výsledky dosažené v obou simulačních nástrojích jsou mezi sebou porovnány. Na modelu jednozónové obálky vytvořeném pomocí knihovny HAM-Tools je dále provedena simulace jednozónové obálky při větrání, vytápění, chlazení a se zdroji vlhkosti. V práci je provedena také názorná ukázka praktického využití simulace, a sice ke zkoumání vlivu tloušťky izolace na tepelné chování budovy (resp. její tepelnou ztrátu) při reálných atmosférických podmínkách. Jsou zde mimo jiné uvedeny a srovnány dostupné zdroje meteorologických dat a byla vytvořena funkce pro jejich zpracování do souboru kompatibilního s knihovnou HAM-Tools. Byl také vytvořen soubor materiálových dat obsahující obvykle používané materiály stavebních konstrukcí v ČR a jejich parametry.

ABSTRACT

In terms of master's thesis HAM-Tools library designed for MATLAB/Simulink was modified for the use in simulations of houses in the Czech Republic. Modified library and its parts were described in detail and tested by the simulation of the one-zone and two-zones models of the house. The simulations of models with same parameters were also realized in program TRNSYS. The corresponding results achieved in mentioned simulation tools were compared to each other. The one-zone model created by using HAM-Tools library is tested by the simulation of ventilating, heating, cooling, and sources of moisture. A demonstration of the practical use of the simulation is carried out in the thesis, namely by examining the influence of the insulation thickness on the thermal performance of the house (resp. its heat loss) on real atmospheric conditions. Among others, available resources of meteorological data are mentioned and compared to each other. The function for processing of the meteorological data to a file compatible with the HAM-Tools library was created. It was also created a material data file containing commonly used materials of building structures in the Czech Republic and their parameters.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelné chování budov, simulace, knihovna HAM-Tools, MATLAB/Simulink, TRNSYS, meteorologická data, jednozónový model, dvouzónový model.

KEYWORDS

Thermal performance of buildings, simulation, HAM-Tools library, MATLAB/Simulink, TRNSYS, meteorological data, one-zone model, two-zone model.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÁBOJNÍK, J. *Využití knihovny HAM-Tools pro simulaci tepelného chování rodinného domu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 102 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Využití knihovny HAM-Tools pro simulaci tepelného chování rodinného domu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28. května 2015

.....

Bc. Jakub Zábojník

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především doc. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky poskytnuté při řešení problémů spojených s vypracováním diplomové práce a dále RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D. za poskytnutá data o průzračnosti oblohy. Poděkování patří také mé rodině a blízkým za podporu při tvorbě této práce i během celého vysokoškolského studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 ZÁKLADNÍ POJMY.....	13
1.1 SIMULACE TEPELNÉHO CHOVÁNÍ BUDOV	13
1.1.1 SIMULACE A MODELOVÁNÍ OBECNĚ	13
1.1.2 TEPELNÁ TECHNIKA, TEPELNÉ CHOVÁNÍ BUDOV	13
1.1.3 MOTIVACE SIMULACÍ TEPELNÉHO CHOVÁNÍ BUDOV	14
1.2 SIMULAČNÍ PROGRAMY	15
1.2.1 MATLAB, SIMULINK	15
1.2.2 TRNSYS	15
1.3 KNIHOVNA HAM-TOOLS	16
2 METEOROLOGICKÁ DATA	18
2.1 ÚVOD DO METEOROLOGIE A KLIMATOLOGIE NA ÚZEMÍ ČR	18
2.2 METEOROLOGICKÉ PRVKY	20
2.2.1 TEPLOTA VZDUCHU	20
2.2.2 VLHKOST VZDUCHU	21
2.2.3 INTENZITA SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ	21
2.2.4 RYCHLOST A SMĚR VĚTRU	22
2.2.5 PŘÍKLADY ROČNÍCH PRŮBĚHŮ ZÁKLADNÍCH METEOROLOGICKÝCH DAT	23
2.3 METEOROLOGICKÁ DATA V TEPELNÝCH SIMULACÍCH BUDOV	25
2.4 ZDROJE, FORMÁTY A DOSTUPNOST METEOROLOGICKÝCH DAT	25
2.4.1 STANICE TUBO	25
2.4.2 PROGRAM METEONORM	26
2.4.3 DATABÁZE A FORMÁTY METEOROLOGICKÝCH DAT	27
2.5 METEOROLOGICKÁ DATA V KNIHOVNĚ HAM-TOOLS	28
2.6 ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ DAT PRO VYUŽITÍ V KNIHOVNĚ HAM-TOOLS	29
2.7 FUNKCE PRO VYTVOŘENÍ SOUBORU WEATHERDATA.MAT	32
2.7.1 FUNKCE WEATHERF.M	32
2.7.2 FUNKCE DPTEMP.M	32
2.7.3 FUNKCE WEATHERRAD.M	34
2.7.4 NAHRAZENÍ HODNOTY NEZNÁMÉ VELIČINY KONSTANTOU	36
3 MATERIÁLOVÁ DATA	37
3.1 VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ	37
3.1.1 OBJEMOVÁ HMOTNOST	37
3.1.2 TEPELNÁ VODIVOST	37
3.1.3 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	37
3.2 MATERIÁLOVÁ DATA V KNIHOVNĚ HAM-TOOLS	38
4 BLOKY A FUNKCE KNIHOVNY HAM-TOOLS.....	41
4.1 PRINCIP PRÁCE S KNIHOVNOU HAM-TOOLS	41
4.2 VÝPOČETNÍ BLOKY SKUPINY CONSTRUCTIONS	42
4.2.1 BLOK EXTERNAL WALL, 2 MATERIALS (JZ)	42
4.2.2 BLOK INTERNAL WALL (JZ)	44
4.2.3 BLOK WINDOWS CTH (JZ)	46
4.3 VÝPOČETNÍ BLOKY SKUPINY ZONES	48

4.3.1	BLOK ROOM AIR CTH	48
4.4	VÝPOČETNÍ BLOKY SKUPINY SYSTEMS	51
4.4.1	BLOK NO VENTILATION	51
4.4.2	BLOK VENTILATION (EXTRACT/FORCED)	51
4.5	VÝPOČETNÍ BLOKY SKUPINY HELPERS	53
4.5.1	BLOK WEATHERDTADA DTU (JZ)	53
4.5.2	BLOK WEATHER ON SURFACE WITH WIND DTU+CTH (JZ)	54
4.5.3	BLOK EXTERNAL MATERIAL (JZ)	55
4.5.4	BLOK INTERNAL MATERIAL (JZ)	56
4.6	VÝPOČETNÍ BLOKY SKUPINY GAINS	58
4.6.1	BLOK NO GAINS	58
4.6.2	BLOK HAM GAINS (JZ)	58
4.7	OSTATNÍ BLOKY POUŽÍVANÉ V SIMULACÍCH	60
4.7.1	BLOKY ČASU SIMULACE	60
4.7.2	BLOKY PRO VYOBRAZENÍ PRŮBĚHU VELIČIN VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ	61
4.7.3	BLOK PRO ULOŽENÍ DAT DO SOUBORU	61
4.8	FUNKCE KNIHOVNY HAM-TOOLS	62
5	SIMULACE JEDNOZÓNOVÉ OBÁLKY	63
5.1	POJEM „OBÁLKA BUDOVY“	63
5.2	OBJEKT PRO SIMULACI JEDNOZÓNOVÉ OBÁLKY	63
5.3	SIMULAČNÍ MODEL JEDNOZÓNOVÉ OBÁLKY – HAM-TOOLS	67
5.4	SIMULAČNÍ MODEL JEDNOZÓNOVÉ OBÁLKY – TRNSYS	71
5.5	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE JEDNOZÓNOVÉ OBÁLKY	72
6	SIMULACE DVOUZÓNOVÉ OBÁLKY	75
6.1	OBJEKT PRO SIMULACI DVOUZÓNOVÉ OBÁLKY	75
6.2	SIMULAČNÍ MODEL DVOUZÓNOVÉ OBÁLKY – HAM-TOOLS	78
6.3	SIMULAČNÍ MODEL DVOUZÓNOVÉ OBÁLKY – TRNSYS	81
6.4	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE DVOUZÓNOVÉ OBÁLKY	82
7	VLIV TLOUŠŤKY IZOLACE NA ÚSPORY PŘI VYTÁPĚNÍ	87
7.1	OBJEKTY KE ZKOUMÁNÍ VLIVU TLOUŠŤKY NA ÚSPORY PŘI VYTÁPĚNÍ	87
7.2	SIMULAČNÍ MODEL KE ZKOUMÁNÍ VLIVU TLOUŠŤKY IZOLACE NA ÚSPORY PŘI VYTÁPĚNÍ	87
7.3	VÝSLEDKY SIMULACÍ KE ZKOUMÁNÍ VLIVU TLOUŠŤKY IZOLACE NA ÚSPORY PŘI VYTÁPĚNÍ	88
7.4	VLIV TLOUŠŤKY IZOLACE NA ÚSPORY PŘI VYTÁPĚNÍ SIMULACE V PROGRAMU TRNSYS	89
7.5	ZÁVĚR KE ZKOUMÁNÍ VLIVU TLOUŠŤKY IZOLACE NA ÚSPORY PŘI VYTÁPĚNÍ	89
8	SIMULACE VĚTRÁNÍ A ZDROJŮ TEPLA A VLHKOSTI	91
8.1	OBJEKT PRO SIMULACI VĚTRÁNÍ A ZDROJŮ TEPLA A VLHKOSTI	91
8.2	SIMULAČNÍ MODEL PRO SIMULACI VĚTRÁNÍ A ZDROJŮ TEPLA A VLHKOSTI	91
8.3	VÝSLEDKY SIMULACE VĚTRÁNÍ A ZDROJŮ TEPLA A VLHKOSTI	94
	ZÁVĚR.....	96
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	98
	SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	100
	SEZNAM PŘÍLOH	102

ÚVOD

Cílem diplomové práce je upravit knihovnu HAM-Tools pro MATLAB/Simulink, aby byla vhodná pro simulaci rodinných domů v České republice. Touto úpravou se rozumí zaintegrování atmosférických podmínek, parametrů stavebních materiálů používaných v ČR a respektování platných norem v ČR. Dalším z dílčích cílů práce je otestovat funkčnost upravené knihovny při simulaci tepelného chování konkrétního rodinného domu v brněnské lokalitě a srovnat výsledky této simulace s výsledky dosaženými při simulaci téhož rodinného domu v programu TRNSYS. Testování je prováděno na jednozónovém a dvouzónovém simulačním modelu uvedeného objektu. V rámci práce je provedena také ukázka praktického využití simulací pomocí knihovny HAM-Tools, a sice při zkoumání vlivu tloušťky izolace na úspory při vytápění.

Znalost tepelného chování budov lze využít ke snižování jejich energetické náročnosti. To je také jeden z hlavních důvodů proč se tepelným chováním budov zabývat. V dnešní době je, vyjma některých států, po celém světě kladen velký důraz na ochranu životního prostředí. Životní prostředí je narušováno škodlivinami, které v konečném důsledku mají vliv na lidské zdraví, na život organismů na Zemi, případně představují hrozbu do budoucna. Produkované množství škodlivin úzce souvisí s potřebou energie. Energie potřebná k provozu budov má ve vyspělých zemích přibližně třetinový podíl na celkové spotřebě energie, což je značná část energie a zároveň důvod, proč je vhodné se snižováním energetické náročnosti budov zabývat. Snižováním energetické náročnosti se samozřejmě dosáhne nižších provozních nákladů, tedy nákladů na vytápění a klimatizaci, které zajišťují požadovanou úroveň tepelné pohody. To má hlavní význam pro provozovatele budov, tedy pro jednotlivce, rodiny či organizace nebo firmy.

Jelikož je tepelné chování budov komplexní problematikou, je třeba k jeho popisu využívat progresivní metody a tou simulace bezpochyby je. Simulace tepelného chování budov je vhodná pro využití při návrhu stavební konstrukce z hlediska tepelného chování. Například při volbě orientace objektu vůči světovým stranám, návrhu rozměrů a materiálu částí stavební konstrukce, ale také při návrhu otopné a klimatizační soustavy, s nimiž souvisí výpočet tepelných ztrát a zisků apod. Simulaci tepelného chování budov lze využít také při návrhu moderních inteligentních budov a jejich sofistikovaných systémů. Velkou výhodou přístupu k řešení tepelného chování budov pomocí simulace je, že nám umožňuje zkoumat chování budov za reálných podmínek, a to ať průměrných podmínek, tak i konkrétních, během určitého časového úseku již naměřených podmínek. Další velkou výhodou je možnost jednoduchého zaintegrování spousty faktorů a parametrů, které tepelné chování budovy ovlivňují. Na základě simulací tepelného chování budov lze například spočítat očekávanou spotřebu tepla, tepelnou ztrátu a tepelné zisky budovy při konkrétních podmínkách či vhodně navrhnout obálku budovy tak, aby provozní náklady budovy byly co nejnižší.

Při výpočtech tepelných ztrát a tepelných zisků se doporučuje postupovat podle norem ČSN EN 12831 a ČSN 73 0548. Pokud bychom vzali v úvahu využití simulací tepelného chování budov k výpočtu tepelných ztrát či tepelných zisků a porovnali tuto metodu s přístupem využívajícím výpočet pomocí norem, zjistíme, že pomocí simulací dokážeme zohlednit více faktorů a parametrů než pomocí přístupu popsáno v normách a na rozdíl od přístupu dle norem dokonce i prozkoumat vliv reálných vnějších podmínek. Výpočty pomocí norem totiž uvažují extrémní podmínky, které nastanou pouze několik málo dní

či dokonce hodin v roce. Kolísání venkovních teplot vzduchu, možnosti akumulace tepla do vnějších i vnitřních konstrukcí stavby a další faktory zohledňují tyto výpočty jen zjednodušeně nebo vůbec. Otopné a klimatizační soustavy, jejichž návrh vychází právě ze znalosti tepelných ztrát a tepelných zisků, jsou po většinu svého provozního období předimenzované. Pokud by se nám podařilo akumulovat teplo do stavebních nebo jiných konstrukcí či tyto konstrukce vychladit tak, aby mohly být využívány právě při extrémních podmínkách, mohly by se navrhovat otopné a klimatizační soustavy oproti těm současným poddimenzované. Vlivem úspory materiálu by jejich pořizovací náklady byly nižší a jejich plného výkonu by se využívalo po podstatně delší dobu jejich provozu. A právě při realizování takových a podobných myšlenek jsou simulace tepelného chování budov velmi dobrým a silným pomocníkem.

1 ZÁKLADNÍ POJMY

První kapitola se zabývá popisem základních pojmů spojených s tématem diplomové práce. Poskytuje informace potřebné pro pochopení základní problematiky simulací tepelného chování budov, dále základní údaje o knihovně HAM-Tools a simulačních programech použitých v rámci diplomové práce.

1.1 Simulace tepelného chování budov

1.1.1 Simulace a modelování obecně

Simulace je výzkumná technika založená na náhradě zkoumaného dynamického systému, tj. originálu (např. reálného objektu nebo návrhu tohoto reálného objektu), jeho simulačním modelem. S tímto simulačním modelem pak experimentujeme za účelem získávání informací o původním zkoumaném dynamickém systému. Simulace se využívají v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti, jako jsou např. průmysl, energetika, armádní aplikace, ale také přírodní vědy, ekonomie atd.

Dynamický systém je takový systém, který se v každém okamžiku své existence nachází v jistém stavu. Simulace se jinými než dynamickými systémy nezabývá. Změny stavu reálných systémů jsou spojeny s výměnou energie, proto jsou spojitě, nemohou se měnit skokově. Dynamický systém může být modelován diferenciálními rovnicemi nebo rovnicemi diferencí, jejichž nezávislou proměnnou je čas.

Modelováním se pak rozumí samotná náhrada zkoumaného dynamického systému jeho simulačním modelem.

Dříve se simulační model realizoval na speciálních zařízeních, podle kterých pak dostávala simulace svůj přívlastek. Např. simulace elektromechanická, hydrodynamická, mechanická, odporová atd. V dnešní době je simulační model realizován na číslicovém počítači, odtud simulace číslicová. Pokud hovoříme o simulaci (bez dalšího přívlastku) ve smyslu výzkumné techniky, myslíme tím vždy simulaci číslicovou. Program řídící výpočet při simulaci se nazývá simulačním programem. [1], [2]

1.1.2 Tepelná technika, tepelné chování budov

Tepelná technika je spolu s akustikou, osvětlením a osluněním jednou ze základních disciplín stavební fyziky. Vzájemný komplex těchto disciplín ovlivňuje vnitřní pohodu prostředí při bydlení i v pracovním procesu a také energetickou náročnost objektu. [3]

Tepelně technické vlastnosti staveb mají zásadní vliv na tepelné ztráty a tedy i na spotřebu tepla. Obor, který se zabývá navrhováním obvodových a vnitřních konstrukcí pozemních staveb k zajištění tepelné pohody prostředí s ohledem na vnější klimatické podmínky i požadované vnitřní podmínky, se nazývá stavební tepelná technika. Se stavební tepelnou technikou pak úzce souvisejí obory vytápění a zdravotní technika. Ty se zabývají přívodem tepla, přívodem čistého a nezávadného vzduchu, odvodem škodlivin, ale i osvětlením, bezpečností práce apod. [4]

Tepelným chováním budov rozumíme chování veličin (jejich časově závislý průběh), které charakterizují tepelný stav budovy, tj. konstrukce budovy a vnitřního mikroklimatu. Mezi tyto veličiny se řadí např. teplota vnitřního a vnějšího povrchu stěn, teplota a vlhkost vnitřního vzduchu, ale také energetické veličiny v podobě tepelných ztrát, tepelných zisků atd. Chceme-li zkoumat chování těchto veličin, musíme znát spoustu parametrů, které je ovlivňují. Patří sem vlastnosti prvků stavební konstrukce (rozměry, orientace vůči světovým stranám, úhel sklonu vůči vodorovné rovině atd.) vč. tepelně technických a tepelně izolačních parametrů použitých materiálů (hustota, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti, emisivita atd.). Dále pak meteorologická data charakterizující vnější povětrnostní podmínky (teplota a relativní vlhkost vzduchu, intenzita slunečního záření, rychlost a směr větru atd.), požadavky na vnitřní mikroklima (teplota a relativní vlhkost vzduchu, teplota okolních ploch atd.), provoz uvnitř budovy (přítomnost a činnost osob, provoz strojů a zařízení atd.), parametry systémů HVAC (množství přiváděného vzduchu, tepelný výkon, účinnost atd.) a způsoby řízení a regulace těchto systémů.

1.1.3 Motivace simulací tepelného chování budov

Většinu času svého života tráví člověk ve vnitřních prostorách budov. Se zvyšující se životní úrovní rostou také nároky na kvalitu vnitřního prostředí. Ta je charakterizována celkovou pohodou prostředí, přičemž člověkem nejintenzivněji vnímaná je tepelná pohoda prostředí. Na zdraví člověka pak má významný vliv čistota vzduchu, která je spojená s pohodou toxickou, aerosolovou a mikrobiální. V posledních letech je kladen stále větší důraz na nízkou energetickou náročnost budov spojenou s ekonomičností provozu. Abychom splnili požadavky na kvalitu vnitřního prostředí a zajistili přitom co nejnižší energetickou náročnost budovy, je třeba vhodně navrhnout konstrukci budovy a zařízení pro vytápění, případně klimatizaci či větrání, a to s ohledem na vnější klimatické podmínky a provoz uvnitř budovy. Pro hledání stále nových a nových řešení v takové komplexní problematice je třeba využívat progresivních metod, mezi které simulace bez pochyby patří.

Z popisu uvedeného v podkapitole 1.1.2 můžeme vypozařovat, že tepelné chování budov závisí na velkém množství parametrů a veličin. Pokud bychom měli vzít v úvahu aspoň všechny uvedené parametry (reálně jich tepelné chování budov ovlivňuje mnohem více) a chtěli na jejich základě popsat tepelné chování nějaké konkrétní budovy, bez využití výpočetní techniky by to byl úkol velmi zdoluhavý, ne-li neřešitelný. S velkou výhodou se tedy klaníme k řešení tohoto typu úloh pomocí simulací v simulačních programech, přičemž je nezbytné, aby výpočtový čas simulace byl mnohonásobně kratší, než je délka simulovaného období.

Ilustrativním příkladem je využití simulací u nízkoenergetických a pasivní domů (příp. u nulových domů). Tyto typy domů mají velmi malou tepelnou ztrátu (běžný nízkoenergetický rodinný dům zhruba 3 kW při vnitřní teplotě 20 °C a venkovní teplotě -15 °C) a jsou velmi citlivé na tepelné zdroje z vnějšího i vnitřního prostředí. Takovým zdrojem může být sluneční záření, přítomnost osob, provoz elektronických zařízení, provoz kuchyně atd. V domě musí být instalována dostatečně pružná a regulovatelná zařízení pro dosažení tepelné pohody (otopná soustava, klimatizační soustava). Pomocí simulací tepelného chování lze například zkoumat význam jednotlivých zdrojů, stanovit

potřeby tepla pro různé podmínky a na základě výsledků simulací navrhnout vhodný systém pro vytápění a klimatizaci včetně jeho řízení a regulace.

1.2 Simulační programy

1.2.1 MATLAB, Simulink

Program MATLAB (z angl. *MATrix LABoratory*) byl představen v roce 1984 americkou společností The MathWorks, Inc. Jde o výpočetní program speciálně určený k provádění inženýrských a vědeckých výpočtů – numerické výpočty, vizualizace a programování. Původně tento software sloužil pouze pro maticové výpočty (odtud také jeho název), postupem času se ale vypracoval v pružný výpočetní systém, ve kterém lze vyřešit prakticky jakýkoliv technický problém. Výhoda MATLABu oproti tradičním programovacím jazykům, jako je např. C/C++ nebo Java, spočívá hlavně v jednoduchosti jeho používání, velkém množství zabudovaných funkcí a nástrojů, přehledné a dobře zpracované nápovědě a v neposlední řadě také v široké škále funkcí sdílených mezi uživateli MATLABu prostřednictvím internetu. Nevýhodou MATLABu je jeho vyšší pořizovací cena a nižší výpočetní rychlost. MATLAB lze využít v nejrůznějších oborech, např. při návrhu zařízení, zpracování signálu, obrazu a zvuku, zkoušení a měření, návrhu řízení, ale také ve výpočetní biologii a finanční analýze. [5], [6]

Simulink (z angl. *SIMulation and LINK*) je jednou z nejznámějších nadstaveb MATLABu. Pokud tedy chce uživatel pracovat v Simulinku, musí mít k dispozici i MATLAB. Simulink je grafické uživatelské rozhraní, které používá různé typy předprogramovaných prvků (tzv. bloků) k vytvoření simulace dynamického systému. Hlavní součástí Simulinku je grafický editor a knihovna výpočetních bloků a řešičů pro modelování a simulace dynamických systémů. Simulink umožňuje do svých modelů zakomponovat funkce vytvořené v MATLABu. Je také možné přenášet data mezi modelem Simulinku a pracovním prostředím MATLABu a to oběma směry. Modelování výpočetních systémů v Simulinku je velmi intuitivní. Avšak nutno podotknout, že k vytvoření správně pracujícího výpočetního modelu je třeba znát funkce jednotlivých výpočetních bloků. [7], [8]

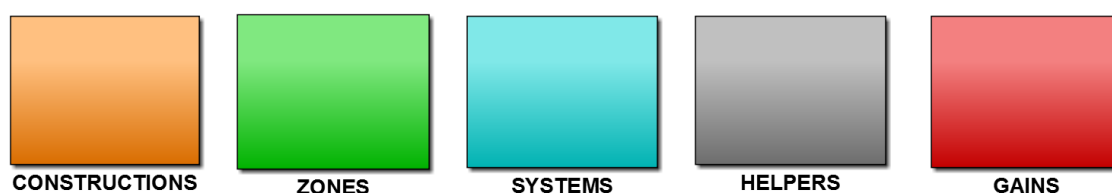
1.2.2 TRNSYS

TRNSYS (vyslovováno „transys“, z angl. *TRaNsient SYstems Simulation*) je, podobně jako Simulink, graficky založené prostředí používané pro simulace chování dynamických systémů, zejména vícezónových budov. Je využíván inženýry a výzkumnými pracovníky po celém světě k ověření nových energetických návrhů, myšlenek a konceptů. Obsahuje simulační nástroje pro řešení široké škály problémů spojených s budovami a jejich provozem, a to od jednoduchých domácích systémů pro ohřev teplé vody, přes systémy využívající obnovitelné zdroje energie (větrné, solární, fotovoltaické), až k návrhu a simulaci budov a jejich zařízení, včetně způsobů řízení. Hlavní výhoda TRNSYSu spočívá v tom, že umožňuje uživateli jednoduše přidat vlastní modelové komponenty použitím všech běžně známých programovacích jazyků (C, C++, PASCAL, FORTRAN atd.). Uživateli je rovněž dostupný zdrojový kód TRNSYSu, což zjednodušuje rozšiřování existujících modelů. Navíc lze TRNSYS jednoduše propojit se spoustou dalších aplikací (např. k preprocessingu a postprocessingu). Mezi tyto aplikace patří Excel, MATLAB, COMIS atd. [9], [10]

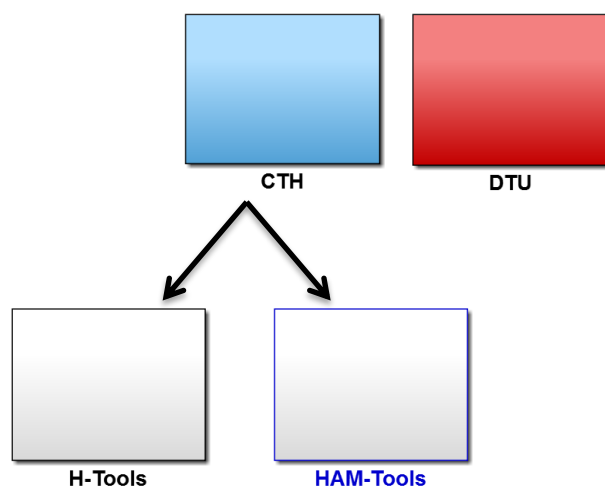
1.3 Knihovna HAM-Tools

Knihovna HAM-Tools je součástí mezinárodní knihovny stavební fyziky IBPT (z angl. *International Building Physics Toolbox*), která byla vytvořena výzkumnými týmy z univerzit Chalmers University of Technology a Technical University of Denmark. Včetně základních manuálů, popisu a příloh v podobě meteorologických dat, základní materiálové databáze, potřebných funkcí MATLABu a vzorových příkladů je celá knihovna IBPT volně dostupná na internetových stránkách www.ibpt.org. Jsou zde také ke stažení příklady uživatelských modelů. [11]

V knihovně IBPT jsou výpočetní bloky rozděleny do 5 hlavních skupin podle použití – viz obr. 1.1. Mezi hlavní skupiny patří skupina *CONSTRUCTIONS* a *ZONES*. Skupina *CONSTRUCTIONS* obsahuje bloky obálky budovy (zdi a okna) a skupina *ZONES* pak reprezentuje vzduch v prostoru uzavřeném obálkou budovy, tj. vzduch zkoumané zóny. Ve skupině *SYSTEMS* jsou obsaženy bloky zastupující použité HVAC systémy, ve skupině *HELPERS* pomocné bloky pro manipulaci s prvky budovy a meteorologickými daty a konečně ve skupině *GAINS* bloky představující použité vnitřní zdroje. Každá skupina je dále rozdělena na 2 části podle toho, kterým týmem byla vytvořena (CTH – Chalmers University of Technology, DTU – Technical University of Denmark), přičemž část označená CTH obsahuje knihovny H-Tools a HAM-Tools – viz obr. 1.2. [12]



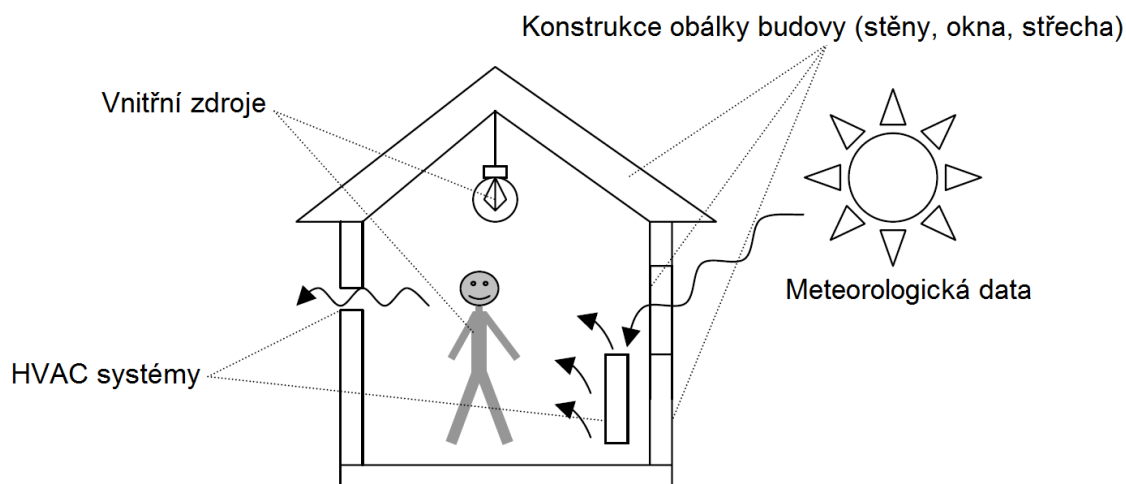
Obr. 1.1 – Základní rozdělení knihovny IBPT



Obr. 1.2 – Organizace hlavních skupin knihovny IBPT

Knihovna HAM-Tools (zkratka HAM z angl. *Heat, Air, Moisture*) je soubor výpočetních bloků vytvořených v programu MATLAB/Simulink a představuje speciální nástroj pro 1D simulaci procesů spojených především s přenosem tepla a vlhkosti stavební konstrukcí, s pronikáním vzduchu do vnitřního prostředí budovy stavební konstrukcí a prostřednictvím větrání, s produkcí tepla a vlhkosti z vnitřních zdrojů atd.

Tato knihovna je rozšířenou verzí knihovny H-Tools, která obsahuje pouze bloky pro výpočet přenosu tepla stavební konstrukcí. Základní myšlenka, o kterou se opírají simulace pomocí této knihovny, říká, že tepelný stav vnitřního prostředí (zkoumané zóny) je dán tepelnými ztrátami (resp. tepelnými zisky) obálky budovy, které závisí na vnějších meteorologických podmínkách, provozem HVAC systémů a vnitřními zdroji – znázornění na obr. 1.3. [12], [13]



Obr. 1.3 – Ilustrace základní myšlenky simulací s knihovnou HAM-Tools [12]

Modelování pomocí knihovny HAM-Tools má následující omezení:

- teplota v rozmezí mezi -30 °C a $+80\text{ °C}$
- efekty spojené s fázovou změnou voda–led jsou zanedbány
- nepočítá se s vlivem hystereze
- neuvažuje se vliv gravitace
- neuvažuje se vliv chemických reakcí
- prosakování mezi vrstvami materiálů
- zanedbávají se efekty stárnutí nebo změny geometrických rozměrů
- neuvažují se 2D a 3D efekty (tepelné mosty) [11]

2 METEOROLOGICKÁ DATA

První část kapitoly (podkapitoly 2.1–2.3) se zabývá úvodem do meteorologie a klimatologie, popisuje základní meteorologické pojmy a veličiny důležité z hlediska simulací tepelného chování budov. V druhé části kapitoly (podkapitoly 2.4–2.7) jsou popsány reálné zdroje meteorologických dat a jejich praktické využití v simulacích prostřednictvím knihovny HAM-Tools a programu TRNSYS. Zejména je pak tato část kapitoly zaměřena na převody meteorologických dat z reálných zdrojů do formátů kompatibilních s uvedenými simulačními nástroji.

2.1 Úvod do meteorologie a klimatologie na území ČR

Meteorologie je věda o zemské atmosféře, často označována jako fyzika atmosféry. Zabývá se složením a vlastnostmi atmosféry, zkoumá děje a jevy v ní probíhající, předpovídá a analyzuje počasí. Klimatologie je věda o utváření klimatu Země, vlivu geografických činitelů na jeho formování a působení klimatu na člověka a naopak. Rozlišujeme okamžitý (krátkodobý) stav ovzduší zvaný počasí a průměrný (dlouhodobý) stav ovzduší zvaný podnebí nebo také klima. [14]

Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) se sídlem v Praze a se svými pobočkami v Českých Budějovicích, Ústí nad Labem, Brně, Plzni, Hradci Králové a Ostravě, zajišťuje na území ČR hydrometeorologickou službu. Přednostně pro státní správu poskytuje ČHMÚ odborné služby ve třech hlavních oborech: meteorologie a klimatologie, hydrologie a jakost vody, ochrana čistoty ovzduší. V těchto oborech zřizuje a provozuje měřicí stanice, odborně zpracovává výsledky pozorování, měření a monitorování, vytváří a spravuje databáze a poskytuje předpovědi a výstrahy. Je institucí reprezentující ČR ve Světové meteorologické organizace WMO (angl. *World Meteorological Organization*). [14], [15]

K červnu 2011 spravoval ČHMÚ 802 meteorologických a klimatologických stanic, z toho 38 profesionálních meteorologických stanic, 179 dobrovolnických klimatologických stanic, 559 dobrovolnických srážkoměrných stanic a 26 totalizátorů poskytujících údaje o ročním srážkovém úhrnu v obtížně přístupných horských lokalitách. Vyjma srážkoměrných stanic je většina uvedených typů stanic automatizována. Stanice jsou řízeny a spravovány regionálními pobočkami ČHMÚ. Tyto pobočky rovněž vyřizují žádosti o data a služby ze stanic na území jejich působnosti. Většina informací a služeb včetně přístupu k meteorologickým datům je zpoplatněna. Na obr. 2.1 je znázorněna standardní automatická meteorologická stanice. Obr. 2.2 pak nabízí náhled do útrob tradiční meteorologické budky. K jejímu vybavení patří 2 staniční teploměry (suchý a mokrý), vlasový vlhkoměr, extrémní teploměry (minimální a maximální), termograf a hydrograf. Meteorologické přístroje jsou většinou umístěny na tzv. meteorologickém pozemku. [16], [17]



Obr. 2.1 – Standardní automatická meteorologická stanice [17]



Obr. 2.2 – Vybavení tradiční meteorologické budky [17]

2.2 Meteorologické prvky

Mezi měřené meteorologické prvky (veličiny) v profesionálních stanicích patří teplota, vlhkost a tlak vzduchu, směr a rychlost větru, úhrn srážek, výška sněhové pokrývky, doba slunečního svitu, přízemní minimální teplota a příkon fotonového dávkového ekvivalentu. Mezi pozorované prvky v tomto typu stanic se řadí vodorovná dohlednost, pokrytí oblohy oblačností, charakteristiky oblačnosti, stav a průběh počasí, nebezpečné a zvláštní atmosférické jevy a náhlé změny počasí. K nadstandardní činnosti patří měření výparu vody z vodní hladiny, měření teploty půdy, měření intenzity slunečního záření a měření čistoty ovzduší. [14]

Meteorologickými prvky je popsán stav ovzduší, který patří mezi hlavní činitele ovlivňující tepelné chování budov. Z tepelně technického hlediska a z hlediska tepelné pohody mají největší význam teplota a vlhkost vzduchu, intenzita slunečního záření, směr a rychlost proudění větru a příp. také tlak vzduchu. [3]

V následujících podkapitolách je uvedena stručná charakteristika těchto veličin, základní přístroje k jejich měření a dále je zde naznačeno, jakým způsobem tyto veličiny ovlivňují tepelné chování budov.

2.2.1 Teplota vzduchu

Teplota venkovního vzduchu významně ovlivňuje tepelnou ztrátu budov prostupem tepla a tepelnou ztrátu větráním, dále také topný faktor tepelných čerpadel, tepelnou ztrátu solárních kolektorů a další.

Teplota venkovního vzduchu se mění během dne i v průběhu roku. Děje se tak v důsledku proměnlivé intenzity osálení země sluncem. Průměrná teplota a amplituda kolísání závisí na hustotě oblačnosti. Čím větší je oblačnost, tím vyšší teplota v zimě a nižší teplota v létě. Oblačnost také zmenšuje amplitudy kolísání teplot. [4]

Měří se teplota suchého a mokrého teploměru, maximální, minimální a přízemní. Teplota vzduchu se měří ve výšce 2 m nad aktivním povrchem. Výjimkou je teplota přízemní měřená 5 cm nad povrchem. Používají se teploměry dilatační kapalinové, bimetalové, elektrické odporové a termoelektrické. Příkladem moderního odporového snímače teploty je snímač NS520-120 A od výrobce COMET SYSTEM – viz obr. 2.3. [17]



Obr. 2.3 – Odporový snímač teploty NS520-120 A, COMET SYSTEM [18]

2.2.2 Vlhkost vzduchu

Atmosférický vzduch je směsí suchého vzduchu a syté nebo přesycené vodní páry, případně vody ve formě kapiček nebo ledových krystalků. Vlhkost vzduchu je vlastnost vyjadřující množství vodní páry, příp. kapiček a ledových krystalků, v suchém vzduchu. Vlhkost lze vyjádřit několika veličinami:

- relativní vlhkost φ [–]
- měrná vlhkost x [kg/kg_{sv}]
- teplota rosného bodu t_r [°C]
- parciální tlak vodní páry p_p'' [Pa]
- teplota mokrého teploměru t_m [°C]

Vlhkost vzduchu nemá na tepelné chování budovy takový vliv jako jeho teplota. Nicméně vlhkost venkovního vzduchu, který je následně přiváděn do vnitřního prostředí, hraje zásadní roli při dimenzování výkonu zvlhčovacích a odvlhčovacích zařízení. Vlhkost vzduchu je důležitá zejména pro zdraví člověka. S vysokou vlhkostí souvisí tvorba plísní, s nízkou vlhkostí pak tvorba a rozklad prachu. [4]

Vlhkost vzduchu se měří vlasovými vlhkoměry, psychrometry (suchý a mokrý teploměr) nebo jinými vlhkoměry. Příkladem moderního snímače relativní vlhkosti vzduchu je snímač HG421.65 od výrobce COMET SYSTEM, viz obr. 2.4.



Obr. 2.4 – Snímač relativní vlhkosti HG421.65, COMET SYSTEM [18]

2.2.3 Intenzita slunečního záření

Intenzita slunečního záření je míra energetického účinku tohoto záření. Má zásadní vliv na tepelné zisky, resp. tepelnou zátěž, a činnost solárních systémů. Významné jsou zejména tepelné zisky okny, kdy se uplatňuje princip skleníkového jevu. Sluneční záření je zdrojem přirozeného osvětlení, proto má vliv také na světelnou pohodu. Rozlišujeme intenzitu přímého a intenzitu difúzního záření. Součtem těchto intenzit je intenzita globálního (celkového) záření. [4], [19]

K měření intenzity globálního záření se používají pyranometry, k měření intenzity přímého záření pyrliometry a k měření intenzity difúzního záření pyranometry se stínícím prvem, což je kruhová clona nebo stínítko na pohyblivém zařízení, které sleduje pohyb slunce po obloze. Měření intenzity slunečního záření se i přes vysoký význam provádí jen na omezeném počtu meteorologických stanic. Na obr. 2.5 je vlevo vyobrazen pyranometr SG002 od firmy Tlusták a vpravo pyrliometr MS-54 od firmy Eko Instruments. [20]



Obr. 2.5 – Pyranometr SG002 (vlevo) a pyrliometr MS-54 (vpravo) [20]

2.2.4 Rychlost a směr větru

Nerovnoměrností ohřevu zemského povrchu slunečním zářením je způsoben i nerovnoměrný ohřev přilehlých vrstev vzduchu. Důsledkem toho vznikají tlakové výše a níže. Vyrovnáváním tlakových rozdílů pak vzniká vítr, který vane ve směru od tlakových výší k tlakovým nížím. Rychlost a směr větru závisí na poloze, topografii, výšce nad zemí, mění se podle meteorologické situace. Na většině území ČR se průměrná rychlost větru pohybuje do $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vítr ovlivňuje zejména infiltraci venkovního vzduchu do budovy a tedy i krytí potřeb tepla na větrání a také přenos tepla konvekci z vnějšího povrchu budov. [3], [4]

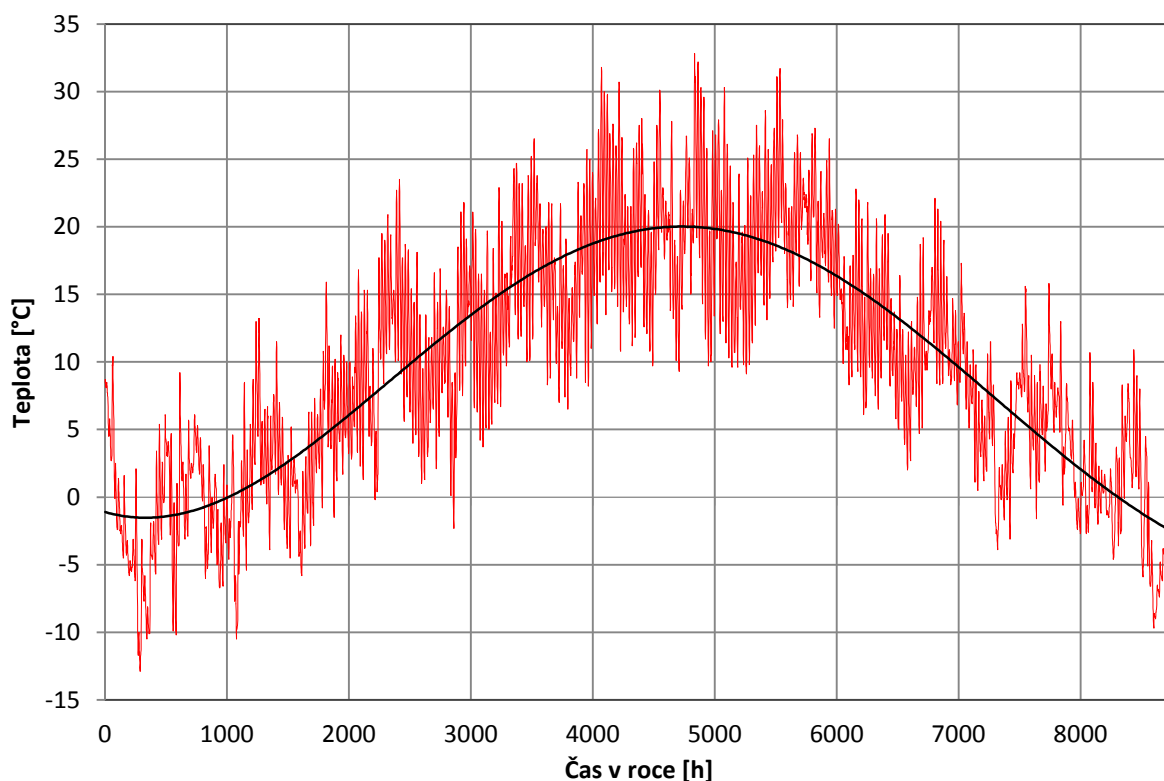
Rychlost větru se měří anemometry, např. miskovými nebo ultrazvukovými. Směr větru se určuje větrnými směrovkami umístěnými na stožáru a udává se ve stupních od 0° do 360° . Standardně se používá následující orientace větru: sever 0° (příp. 360°), východ 90° , jih 180° , západ 270° . Na obr. 2.6 je ultrazvukový anemometr Windsonic od výrobce GILL Instruments, který umožňuje měření rychlosti i směru větru. [14], [17]



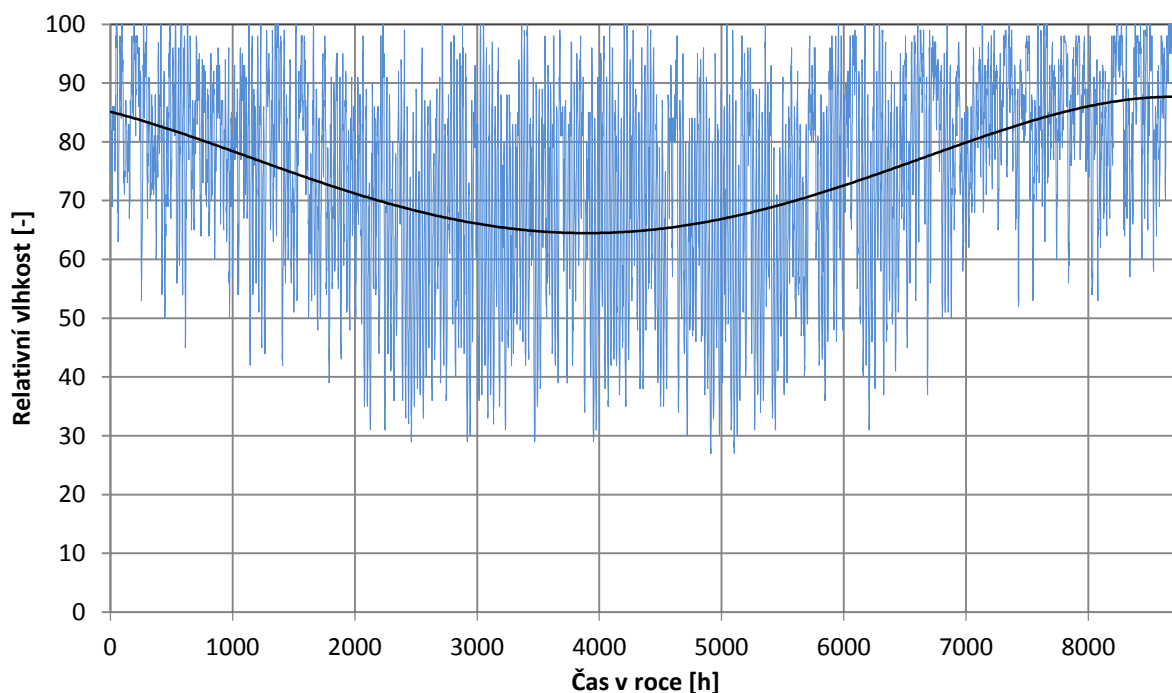
Obr. 2.6 – Ultrazvukový anemometr Windsonic, GILL Instruments [18]

2.2.5 Příklady ročních průběhů základních meteorologických dat

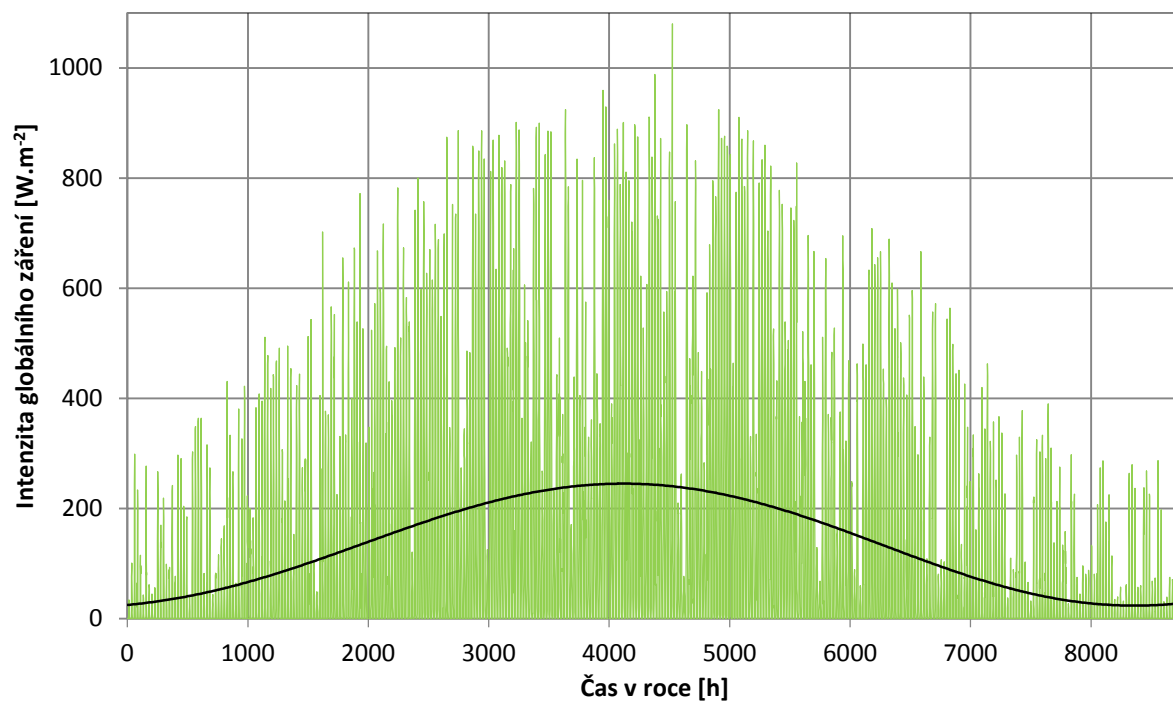
Na obrázcích 2.7–2.10 jsou graficky znázorněny průběhy hlavních meteorologických veličin. Jedná se o data získaná z programu Meteonorm, konkrétně z meteorologické stanice Kuchařovice nacházející se zhruba 50 km jihovýchodně od Brna. Pro lepší názornost jsou vybrané grafy meteorologických dat proloženy polynomickými spojnicemi trendu.



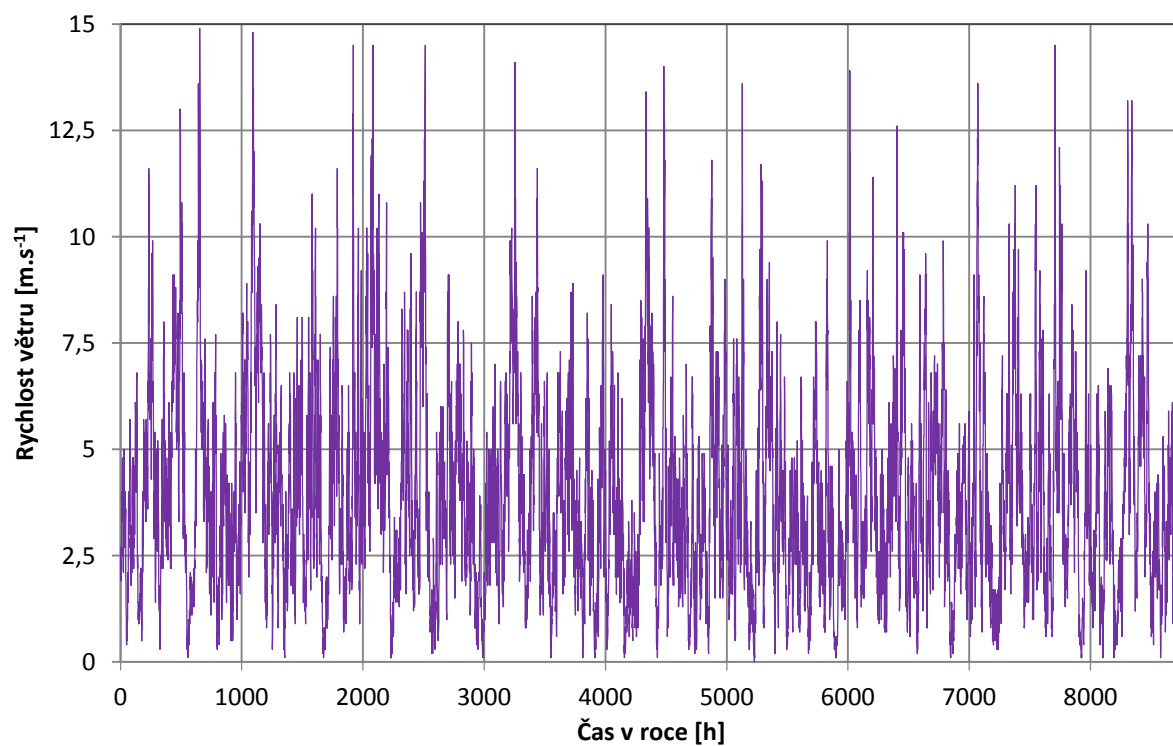
Obr. 2.7 – Roční průběh teploty venkovního vzduchu – stanice Kuchařovice



Obr. 2.8 – Roční průběh relativní vlhkosti – stanice Kuchařovice



Obr. 2.9 – Roční průběh intenzity globálního záření – stanice Kuchařovice



Obr. 2.10 – Roční průběh rychlosti větru – stanice Kuchařovice

2.3 Meteorologická data v tepelných simulacích budov

V tepelné technice budov se při návrhových výpočtech (např. při výpočtech tepelných ztrát dle ČSN EN 12831, tepelných zisků dle ČSN 73 0548 apod.) využívají extrémní hodnoty meteorologických veličin, které jsou stanoveny na základě dlouhodobých měření. Návrhový výpočet tedy provádíme pro jeden stav, příp. pro několik málo stavů, venkovního prostředí, který je dán normou nebo na základě dlouhodobých měření. Výsledkem návrhového výpočtu je pak hodnota hledané veličiny závislá na jednom konkrétním stavu venkovního prostředí.

Naproti tomu při simulacích jsou využívány hodnoty meteorologických veličin stanovené (měřením, výpočtem) pro určité časové období (obvykle rok, ale může být i kratší) v určitých časových intervalech (obvykle hodina). Tyto hodnoty lze získat buď jednorázově (tj. pro konkrétní hodinu v roce máme hodnotu veličiny získanou jedním měřením), nebo na základě dlouhodobých měření (tj. pro konkrétní hodinu v roce máme hodnotu veličiny získanou statistickým zpracováním několika hodnot z předchozích let). Ve většině případů se používají data z dlouhodobých měření, ale lze použít i data získaná jednorázově, např. s ohledem na měnící se charakter počasí posledních let či k simulaci chování objektu při konkrétních venkovních podmínkách.

Simulační výpočet se provádí postupně pro všechny stavy venkovního prostředí z uživatelem zvoleného časového úseku simulace. Tento časový úsek je podmnožinou výše zmíněného časového období, pro které máme k dispozici meteorologická data. Časový úsek je třeba zvolit vhodně tak, aby data v tomto časovém úseku co nejlépe reprezentovala podmínky, pro které chceme chování zkoumaného objektu simulovat. Například v případě simulace pro ověření správnosti návrhu tepelného zařízení je vhodné vybrat časový úsek s extrémními atmosférickými podmínkami (nejchladnější zimní dny, nejteplejší letní dny). K tomu lze podle uvážení a dostupnosti zvolit soubor meteorologických dat získaných jednorázově nebo i z dlouhodobých měření.

Výsledkem simulačního výpočtu je závislost sledované veličiny na čase a měnících se venkovních podmínkách, případně hodnota spotřeby energie apod.

2.4 Zdroje, formáty a dostupnost meteorologických dat

Vedle databází ČHMÚ zmíněných v podkapitole 2.1 existují i další zdroje meteorologických dat. Hlavním takovým zdrojem je v celosvětovém měřítku databáze programu Meteonorm. Dále jsou zde meteorologické stanice provozované různými organizacemi či jednotlivci. Mezi ně patří např. stanice TUBO, stanice na observatoři Masarykovy Univerzity na Kraví hoře a také různé amatérské či poloamatérské stanice.

2.4.1 Stanice TUBO

Provozovatelem stanice TUBO (z angl. *Technical University Brno*) je Ústav geodézie FAST VUT v Brně. Tato stanice je primárně provozována jako permanentní GPS stanice. Bod TUBO je zařazen do geodynamických sítí v ČR i Evropě. Vedle GPS dat však stanice poskytuje i pro nás potřebná meteorologická data.

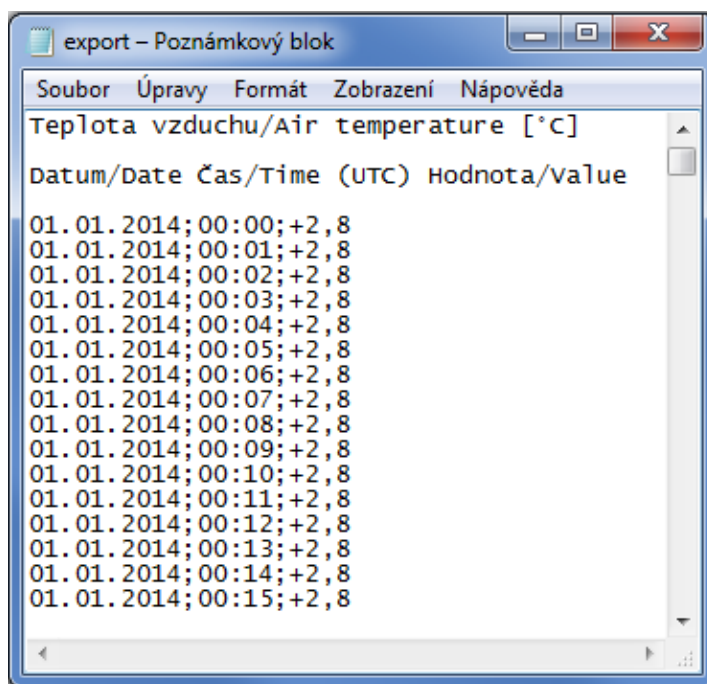
Meteorologický měřicí systém tvoří čidla teploty vzduchu, atmosférického tlaku, relativní vlhkosti, směru a rychlosti větru, intenzity slunečního záření a přístroj

pro komplexní měření srážek. Meteorologické prvky měřené v této stanici jsou zaznamenány v tab. 2.1. [18]

Tab. 2.1 – Meteorologické prvky měřené ve stanici TUBO

Číslo	Popis	Jednotka
1	Datum, čas	–
2	Teplota vzduchu	°C
3	Relativní vlhkost	%
4	Rychlost větru	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
5	Směr větru	°
6	Intenzita globálního záření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
7	Atmosférický tlak	hPa

Směr větru je orientován standardně (viz podkapitola 2.2.4). Meteorologická data z této stanice jsou volně dostupná na webových stránkách stanice [18]. Data z měření jednotlivých veličin zaznamenaná v minutových intervalech lze stáhnout ve formátu textového souboru, resp. jako CSV. Náhled takového souboru je k dispozici na obr. 2.11, kde je zobrazena část souboru s údaji o teplotě vzduchu, který byl exportován pro 1.1.2014 od 00:00 do 24:00.



Obr. 2.11 – Část souboru s údaji o teplotě vzduchu ze stanice TUBO

2.4.2 Program Meteonorm

Meteonorm je software poskytující přístup k meteorologickým datům v prakticky jakékoliv lokalitě na světě. Databáze tohoto programu je tvořena daty získávanými z více než 8300 meteorologických stanic a 5 geostacionárních družic s globálním pokrytím. K dispozici jsou data historická i aktuální, v měsíčních, hodinových nebo minutových intervalech, až ve 35 možných formátech výstupních souborů. Sledováno je přes 30 meteorologických veličin. V ČR Meteonorm využívá 32 stanic. [21], [22]

Licence programu Meteonorm patří mezi placené. Demoverze programu je sice volně dostupná, ale není určena k plnohodnotnému využití, neboť neumožňuje exportovat soubor s daty. Program je včetně demoverze ke stažení na oficiálních webových stránkách [21].

Jedním s nejrozšířenějších formátů souborů meteorologických dat, se kterým pracuje i Meteonorm, je formát TMY2. Tento formát je spolu s dalšími popsán v následující podkapitole.

2.4.3 Databáze a formáty meteorologických dat

Meteorologická data určená pro celoroční dynamické či statické modelování energetických, teplotních, vlhkostních a technických stavů budov lze zpracovat několika způsoby a lze tak vytvořit různé databáze tzv. referenčních klimatických roků. Referenční klimatický rok představuje typický charakter meteorologických poměrů v dané lokalitě. Mezi první klimatické databáze patřil tzv. testovací referenční rok TRY (angl. *Test Reference Year*), který obsahuje údaje o teplotě suchého a mokrého teploměru, teplotě rosného bodu vzduchu, směru a rychlosti větru, tlaku vzduchu, relativní vlhkosti a oblačnosti. Nedostatkem tohoto formátu byly chybějící údaje o sluneční radiaci, které pak bylo třeba odhadnout na základě údajů o oblačnosti. Vzhledem k potřebě upřesnit solární data byla vytvořena klimatická databáze zvaná typický meteorologický rok TMY (angl. *Typical Meteorological Year*) se všemi údaji jako TRY, ale navíc obsahovala data o měřené sluneční radiaci. Pro energetické výpočty se také používá databáze tzv. klimatický rok pro energetické výpočty WYEC (angl. *Weather Year for Energy Calculations*). Poslední verzí meteorologických databází je databáze ASHRAE. [3], [22]

Výše zmíněné databáze se mezi sebou liší použitými veličinami a v mnoha případech také jednotkami. Obsahují data získaná v různých časových intervalech, údaje od sebe mohou být odděleny různými oddělovači (mezera, tabulátor, čárka) atd. Z důvodu těchto odlišností lze chápat každý typ databáze také jako specifický formát meteorologických dat, tedy jako formát souboru, ve kterém jsou tato meteorologická data uložena.

Mezi nejčastěji používané formáty meteorologických dat patří formát TMY a jeho novější verze TMY2, příp. TMY3. TMY jsou datové soubory hodinových dat solárního záření a dalších meteorologických prvků stanovené pro období jednoho roku. Soubory těchto formátů jsou přednostně určeny k použití při simulaci systémů využívajících přeměny sluneční energie a simulaci systémů budov. Hodnoty meteorologických prvků v souboru TMY představují typické podmínky za časové období kolem 30 let. Protože hodnoty reprezentují právě typické podmínky (nepostihují extrémní výkyvy), nejsou meteorologická data tohoto formátu vhodná pro návrh systémů a jejich komponent přicházejících do styku s extrémními podmínkami vyskytujícími se v dané oblasti. [23]

Formáty TMY, TMY2 a TMY3 se liší v použitých veličinách a v jednotkách těchto veličin, případně v použitém oddělovači (mezera, tabulátor). Nelze je proto libovolně zaměňovat mezi sebou. [24]

V této práci předpokládáme, že všechna dostupná data lze získat ve formátu TMY2. Ten obsahuje časové údaje (měsíc, den, hodina), intenzitu slunečního záření vně atmosféry na vodorovnou plochu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], solární konstantu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], intenzitu

globálního záření na vodorovnou plochu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], intenzitu přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], intenzitu difúzního záření [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], údaje o osvětlení (globální, přímé, difúzní) [lx], údaje o pokrytí oblohy oblačností, teplotu vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], teplotu rosného bodu vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], relativní vlhkost [–], atmosférický tlak [hPa], směr větru [$^{\circ}$], rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], množství energie slunečního záření dopadající na 1 m^2 [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$] a další veličiny. Směr větru je ve formátu TMY2 orientován opět standardně (viz podkapitola 2.2.4). Všechny veličiny používané v TMY2 lze nalézt v tab. 2.3 v podkapitole 2.6. Přípona souboru ve formátu TMY2 je tm2. [23], [25]

2.5 Meteorologická data v knihovně HAM-Tools

Zdrojem meteorologických dat pro simulace v knihovně HAM-Tools je soubor MATLABu (*.mat), který obsahuje data stanovená v hodinových intervalech. Z tohoto souboru jsou během simulace automaticky čerpány všechny potřebné hodnoty. Aby se tak ale opravdu dělo, je třeba dodržet podmínky popsané v následujícím odstavci.

Soubor s meteorologickými daty musí být ve stejném adresáři jako soubor Simulinku se simulačním modelem, tj. soubor typu *.mld nebo *.slx. Název souboru s meteorologickými daty musí korespondovat s názvem použitým pro volání tohoto souboru v blocích simulačního modelu v Simulinku. Totéž platí pro název proměnné, která vznikne načtením souboru do pracovního prostředí MATLABu. Pro jednoduchost pracuje modifikovaná knihovna HAM-Tools se souborem meteorologických dat nazvaným *weatherdata.mat*, přičemž výše zmíněná proměnná nese název *weatherdata*. Doporučení je používat soubor s tímto názvem a názvem proměnné. Pokud se totiž uživatel rozhodne pro jiný název souboru či proměnné, je třeba tento název změnit i ve všech simulačních blocích v rámci prováděné simulace. Další podmínkou je dodržení struktury souboru meteorologických dat. Ta je popsána v tab. 2.2 a v následujících odstavcích.

Tab. 2.2 – Organizace veličin v souboru meteorologických dat [12]

Řádek	Popis	Jednotka
1	Čas	s
2	Teplota vzduchu	0,1 $^{\circ}\text{C}$
3	Teplota rosného bodu	0,1 $^{\circ}\text{C}$
4	Intenzita globálního záření na vodorovný povrch	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
5	Intenzita difúzního záření na vodorovný povrch	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
6	Intenzita přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
7	Intenzita dopadajícího dlouhovlnného záření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
8	Globální osvětlení	lx
9	Difúzní osvětlení	lx
10	Přímé osvětlení	lx
11	Směr větru	$^{\circ}$
12	Rychlost větru	0,1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Orientace směru větru v souboru *weatherdata.mat* a také orientace vůči světovým stranám používaná v knihovně HAM-Tools je následovná: směr sever 180° , východ -90° , jih 0° (příp. 360°) a západ 90° .

Soubor *weatherdata.mat* obsahuje vždy 12 řádků a 8760 sloupců. Řádky odpovídají výše uvedeným veličinám, sloupce pak času v roce, pro který byly hodnoty veličin stanoveny. V případě, že máme k dispozici data pouze pro omezený počet dní v roce, budou tato data v souboru umístěna do sloupců odpovídajících času v roce, pro který byla data stanovena. Pokud pak budeme v knihovně HAM-Tools provádět simulaci pro tento omezený počet dní, musíme v Simulinku nastavit čas simulace (pole *Start time*, *Stop time*) vhodně tak, aby byl podmnožinou časového intervalu, pro který máme meteorologická data.

Hodnoty teploty vzduchu, teploty rosného bodu a rychlosti větru jsou v souboru udávány 10× větší. Jedním z důvodů, proč jsou tyto hodnoty takto nastaveny, je jejich výhodnější měřítko při vykreslování těchto veličin v grafech použitých v simulaci.

2.6 Způsob zpracování dat pro využití v knihovně HAM-Tools

Z předchozích podkapitol je zřejmé, že pro simulace v knihovně HAM-Tools nelze použít soubory meteorologických dat v běžně dostupných formátech souborů. Data je nejprve třeba převést do souboru kompatibilního s programem MATLAB. Ve funkcích MATLABu naprogramovaných v rámci diplomové práce je pak tento kompatibilní soubor využit k vygenerování souboru *weatherdata.mat* (viz podkapitola 2.4), který je použitelný při simulacích v knihovně HAM-Tools. Tato podkapitola popisuje soubor meteorologických dat kompatibilní s programem MATLAB, podkapitola 2.7 pak zpracování dat ve funkcích a vygenerování souboru *weatherdata.mat*.

MATLAB dokáže pracovat se soubory několika komerčně dostupných programů. Při řešení našeho problému využijeme kompatibility MATLABu s tabulkovým editorem Excel. Ze souboru meteorologických dat získaného z měřicí stanice je třeba vytvořit soubor s názvem *weatherdata.xlsx* a se strukturou znázorněnou na obr. 2.12. Vygenerování korektní podoby souboru *weatherdata.mat* pomocí funkcí MATLABu je zaručeno pouze při dodržení níže popsanych pravidel.

Popis hlavičky (první 3 řádky) souboru *weatherdata.xlsx* lze libovolně měnit. Umístění veličin v daných sloupcích a jejich jednotky jsou však pevně dané a neměnné. Hodnoty ve žlutých sloupcích jsou povinné, v zelených sloupcích nepovinné. Všechny sloupce s hodnotami musí mít stejný počet řádků. Meteorologická data obsažená v tomto souboru by měla být zaznamenána v konstantních časových intervalech. Pokud tomu tak nebude, může se v některých případech stát, že funkce pro zpracování dat nevygeneruje soubor *weatherdata.mat*. Nejmenším časovým intervalem je 1 min, největším intervalem pak 1 h, rovněž lze použít časové intervaly 5, 10, 20 a 30 min. Ve sloupci hodina lze používat pouze hodnoty 0–23, nikoliv 1–24 jako se používá v některých souborech meteorologických dat.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	Rok	Měsíc	Den	Hodina	Minuta	Tepłota vzduchu	Relativní vlhkost	Intenzita globálního ozařování	Rychlost větru	Směr větru	Atmosférický tlak	Tepłota rovného bodu	Intenzita difúzního záření	Intenzita přímého záření	Globální osvětlení	Difúzní osvětlení	Přímé osvětlení	Intenzita dlouhovln ného záření
1	Y	M	D	H	MN	t_amb	RH	I_glob	w	d_w	p_b	t_r	I_diff	I_dir	E_glob	E_diff	E_dir	I_lw
2	rok	měsíc	den	hod	min	[°C]	[%]	[W/m2]	[m/s]	[°]	[hPa]	[°C]	[W/m2]	[W/m2]	[lx]	[lx]	[lx]	[W/m2]
3	2005	1	1	0	0	8,4	86	0	0	218	969	6,2	0	0	0	0	0	0
4	2005	1	1	1	0	8,7	82	0	0	207	969	5,9	0	0	0	0	0	0
5	2005	1	1	2	0	8,5	82	0	0	204	969	5,6	0	0	0	0	0	0
6	2005	1	1	3	0	8,4	82	0	0	220	969	5,5	0	0	0	0	0	0
7	2005	1	1	4	0	8,3	75	0	0	218	969	4,1	0	0	0	0	0	0
8	2005	1	1	5	0	8,2	76	0	0	207	969	4,3	0	0	0	0	0	0
9	2005	1	1	6	0	8,1	75	0	0	231	969	4	0	0	0	0	0	0
10	2005	1	1	7	0	8,1	74	0	0	192	969	3,7	0	0	0	0	0	0
11	2005	1	1	8	0	8,1	75	6	0,6	214	969	3,9	6	0	8	8	0	0
12	2005	1	1	9	0	8,2	75	17	1,7	253	969	4	17	0	21	21	0	0
13	2005	1	1	10	0	8,3	82	26	2,6	140	969	5,5	26	0	32	32	0	0
14	2005	1	1	11	0	8,4	69	32	3,2	226	969	3,2	32	0	39	39	0	0
15	2005	1	1	12	0	8,5	70	34	3,4	190	969	3,3	34	0	42	42	0	0
16	2005	1	1	13	0	8,5	69	27	2,7	148	969	3,1	27	0	34	34	0	0
17	2005	1	1	14	0	8,4	70	17	1,7	145	969	3,2	17	0	21	21	0	0
18	2005	1	1	15	0	8,3	82	6	0,6	221	969	5,5	6	0	7	7	0	0
19	2005	1	1	16	0	8,2	82	0	0	81	969	5,4	0	0	0	0	0	0
20	2005	1	1	16	0	8,2	82	0	0	81	969	5,4	0	0	0	0	0	0

Obr. 2.12 – Uspořádání dat v souboru *weatherdata.xlsx*

Jak bylo zmíněno v podkapitole 2.4.1, meteorologická data ze stanice TUBO jsou dostupná ve formátu textového souboru, resp. jako CSV. Tento typ souboru lze otevřít v programu Excel a zde pak získaná data zpracovat do požadované podoby. Při otevírání souboru je možno volit různé oddělovače (středník, dvojtečka, čárka), čímž lze dosáhnout požadovaného rozdělení hodnot do sloupců.

V případě databází programu Meteororm či databází ČHMÚ bereme v úvahu, že lze meteorologická data z těchto zdrojů získat ve formátu TMY2. Na rozdíl od formátu textového souboru, program Excel se souborem TMY2 pracovat nedokáže. K otevření tohoto typu souboru je třeba využít převodník dostupný z [26], který je rovněž přílohou elektronické verze práce. Meteorologická data je opět třeba zpracovat do uvedené podoby souboru *weatherdata.xlsx*. Pevodník dat používá jiné označení veličin než program Meteororm. V tab. 2.3 je proto pro přehlednost uveden popis jednotlivých veličin a jejich označení používaná v Meteorormu a v převodníku.

Tab. 2.3 – Legenda veličin používaných v TMY2 [23], [25], [26]

Popis veličiny	Označení Meteororm	Označení převodník	Jednotka
Rok (nepoužívá se vždy)	y	Year	–
Měsíc	m	Month	–
Den	d	Day	–
Hodina	h	Hour	–
Intenzita záření vně atmosféry na vodorovnou plochu	G _{G_{ex}}	ETRH	W·m ⁻²
Solární konstanta	G ₀	ETRD	W·m ⁻²
Intenzita globálního záření na vodorovnou plochu	G _{G_h}	GLO	W·m ⁻²
Int. přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků	G _{B_n}	DIR	W·m ⁻²
Intenzita difúzního záření	G _{D_h}	DIF	W·m ⁻²
Globální osvětlení	LG	GloiLL	Lx
Přímé osvětlení	LB	DiriLL	Lx
Difúzní osvětlení	LD	DiFiLL	Lx
Zenitový jas	L _z	ZeniLL	Cd·m ⁻²
Pokrytí oblohy oblačností	N	TOT CC	1 – 8
Neprůsvitné pokrytí oblohy	N1	OPQ CC	–
Teplota vzduchu	Ta	Temp*10	0,1 °C
Teplota rosného bodu vzduchu	Td	DewPt*10	0,1 °C
Relativní vlhkost	RH	RH	%
Atmosférický tlak	p	mB	hPa
Směr větru	DD	Wdir	°
Rychlost větru	FF	WSPEED	0,1 m·s ⁻¹
Viditelnost	Vis	Vis	km
Výška stropu	Hc	Ceiling m	m
Aktuální počasí	Wc	PresentWX	–
Voda schopná srážení	w	H2O mm	g
Optická hloubka aerosolu	Aod	AOD*1000	–
Hloubka sněhu	Sn	Snow cm	cm
Dny od posledního sněžení	Ds	Days since	–

Pro převod souboru meteorologických dat ve formátu TMY2 do Excelu lze také využít simulační program TRNSYS, který dokáže číst většinu dostupných formátů meteorologických dat i vytvořit Excelovský soubor.

2.7 Funkce pro vytvoření souboru *weatherdata.mat*

K vytvoření souboru *weatherdata.mat* popsaného výše slouží funkce *weatherf.m* a případně její podfunkce *DPtemp.m* a *weatherrad.m*.

2.7.1 Funkce *weatherf.m*

Funkce *weatherf.m* pracuje tak, že nejprve načte soubor meteorologických dat *weatherdata.xlsx* umístěný ve stejné složce s touto funkcí a vytvořený dle popisu v podkapitole 2.6. Poté funkce zjistí, jaké meteorologické prvky soubor obsahuje, a vytvoří 2 proměnné – jednu s časovými hodnotami a druhou s hodnotami meteorologických veličin. Pokud jsou hodnoty v načteném souboru v menších než hodinových intervalech, stanoví funkce jejich průměrné hodnoty a vytvoří proměnné obsahující data v hodinových intervalech. Průměrnou hodnotu veličiny v danou hodinu stanovuje funkce vždy z hodnot 30 min před touto hodinou a 30 min po ní. V další fázi vytvoří funkce proměnnou *weatherdata* obsahující veličiny dle popisu v podkapitole 2.5. Pokud načtený soubor meteorologických dat *weatherdata.xlsx* neobsahuje některé z nepovinných veličin, využijí se k jejich stanovení funkce *DPtemp.m* či *weatherrad.m*, případně se hodnoty veličin nahradí určitou konstantou.

2.7.2 Funkce *DPtemp.m*

Funkce slouží k výpočtu teploty rosného bodu (angl. *dew point temperature*, odtud název funkce) z hodnot relativní vlhkosti, teploty vzduchu a atmosférického tlaku. Je volána funkcí *weatherf.m* v případě, že soubor meteorologických dat *weatherdata.xlsx* neobsahuje údaje o teplotě rosného bodu. Funkce *DPtemp.m* pracuje tak, že nejprve ze známé teploty vypočte tlak syté vodní páry a měrnou vlhkost vzduchu. Pro tuto vypočtenou měrnou vlhkost poté stanoví tlak syté vodní páry ve vzduchu právě nasyceném a z tohoto tlaku nakonec teplotu rosného bodu. Princip stanovení teploty rosného bodu v h-x diagramu je naznačen na obr. 2.13.

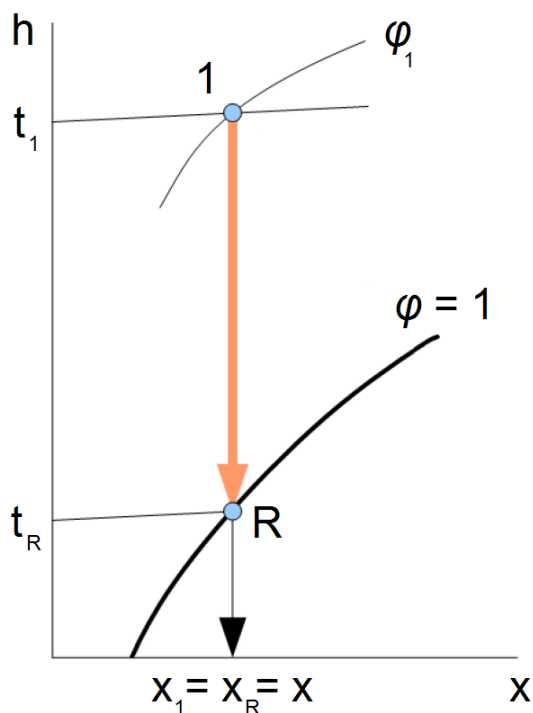
Výpočet tlaku syté vodní páry p_p'' při teplotě vzduchu t_1 v rozmezí od 0 do 80 °C provádíme ve funkci dle vztahu

$$p_p'' = e^{23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t_1}} \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

Pokud je teplota vzduchu t_1 záporná, pracuje funkce se vztahem

$$p_p'' = e^{28,926 - \frac{6148}{273,1 + t_1}} \quad [\text{Pa}] \quad (2.2)$$

Hodnoty teploty t_1 ve vztazích (2.1) a (2.2) je třeba zadávat ve [°C]. Vztah (2.2) je dle [4] platný pouze pro teploty od -20 °C do 0 °C. V našem případě uvažujeme, že teplota vzduchu v ČR klesá pod -20 °C jen zřídka, a proto použijeme tento vztah i pro teploty nižší než -20 °C.



Obr. 2.13 – Stanovení teploty rosného bodu v h-x diagramu

Hodnotu tlaku syté vodní páry p_p'' využijeme ve funkci při výpočtu měrné vlhkosti vzduchu x dle vztahu

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot p_p''}{p - \varphi_1 \cdot p_p''} \quad [\text{kg/kg}_{\text{sv}}] \quad (2.3)$$

kde φ_1 je relativní vlhkost vzduchu [–] a p atmosférický (celkový) tlak vzduchu [Pa].

Následně upravíme vztah (2.3) pro rosný bod ($\varphi = 1$) a vyjádříme z něj tlak syté vodní páry ve vzduchu nasyceném p_{pR}''

$$x = 0,622 \cdot \frac{1 \cdot p_{pR}''}{p - 1 \cdot p_{pR}''} \quad [\text{kg/kg}_{\text{sv}}] \quad (2.3a)$$

$$\Rightarrow p_{pR}'' = \frac{x \cdot p}{0,622 + x} \quad [\text{Pa}] \quad (2.4)$$

Pokud nyní ve vztahu (2.1) a (2.2) použijeme tlak syté vodní páry ve vzduchu nasyceném p_{pR}'' , lze místo teploty t_1 psát teplotu rosného bodu t_R a tu lze vyjádřit ve tvarech

$$t_R = \frac{235,6 \cdot \ln(p_{pR}'') - 1511,248}{23,58 - \ln(p_{pR}'')} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.5)$$

$$t_R = \frac{273,1 \cdot \ln(p_{pR}'') - 1751,691}{28,926 - \ln(p_{pR}'')} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.6)$$

kdy vztah (2.5) platí pro t_R od 0 do 80 °C a vztah (2.6) pro zápornou t_R (resp. pro t_R od –20 °C do 0 °C).

2.7.3 Funkce weatherrad.m

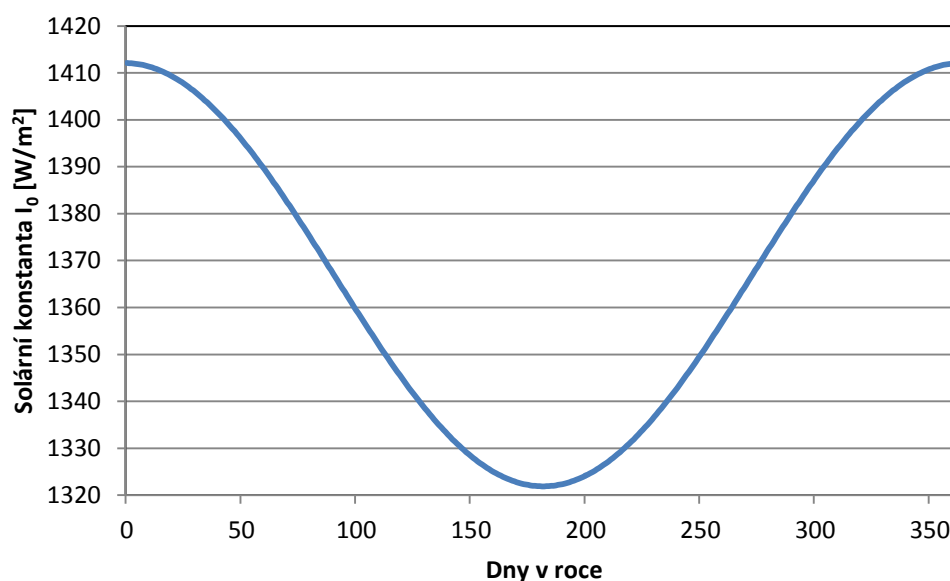
Tato funkce slouží k výpočtu intenzity difúzního záření a intenzity přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků. Výpočet těchto intenzit se ve funkci provede na základě znalosti intenzity globálního záření, teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu a polohy slunce na obloze v danou hodinu v roce. Funkce je volána funkcí *weatherf.m* v případě, že soubor *weatherdata.xlsx* neobsahuje hodnoty uvedených intenzit záření. Funkce nejprve stanoví výšku slunce nad obzorem a následně z této hodnoty a z hodnot vstupních veličin vypočte intenzitu difúzního záření a intenzitu přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků.

Pro výpočty intenzit slunečního záření je třeba znát intenzitu tohoto záření na hranici atmosféry Země, tzv. sluneční konstantu. Střední hodnota sluneční konstanty přijatá naposledy v roce 1981 Světovou meteorologickou organizací má hodnotu $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Ve výpočtech tepelných zisků dle normy ČSN 73 0548 se používá sluneční konstanta $1350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Hodnota sluneční konstanty je proměnná během roku, mění se zhruba o 3 % dle následujícího vztahu z [27]

$$I_0 = 1367 \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n_d}{365}\right) \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (2.7)$$

kde n_d je pořadí dne v roce [-].

Tato závislost je znázorněna na obr. 2.14. Funkce *weatherrad.m* pracuje právě s časově proměnnou hodnotou sluneční konstanty dle uvedeného vztahu (2.7).



Obr. 2.14 – Sluneční konstanta v průběhu roku

Výška slunce nad obzorem h je dána vztahem

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \varnothing + \cos \delta \cdot \cos \varnothing \cdot \cos \tau \quad (2.8)$$

kde δ je sluneční deklinace, $\varnothing$ je zeměpisná šířka a τ sluneční časový úhel v obloukových stupních.

Sluneční deklinace δ je zeměpisná šířka, kde se v daný den ve 12 hodin v poledne nachází slunce kolmo nad obzorem. Sluneční deklinaci lze stanovit různými způsoby, ve funkci *weatherrad.m* je využit vztah dle [27]

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n_d}{365}\right) \quad [^\circ] \quad (2.9)$$

Zeměpisná šířka $\varnothing$ se pro výpočet výšky slunce nad obzorem dle ČSN 73 0548 volí pro naše území 50° . Tato hodnota je použita i ve funkci *weatherrad.m*.

Sluneční časový úhel τ je úhel zdánlivého posunu Slunce (od východu na západ) vlivem rotace Země a stanoví se ze slunečního času ST dle vztahu

$$\tau = 15^\circ \cdot (ST - 12) \quad [^\circ] \quad (2.10)$$

Zde platí znaménková konvekce, před polednem je $\tau < 0$, po poledni je $\tau > 0$ [27]. Ve výpočtech dle ČSN 73 0548 pro naše území je sluneční čas nahrazen časem středoevropským. Toto nahrazení je rovněž provedeno i ve funkci *weatherrad.m*.

Intenzitu difúzního záření lze stanovit z hodnot solární konstanty, intenzity globálního záření, výšky slunce nad obzorem, teploty a relativní vlhkosti vzduchu dle [9]. Nejprve je třeba stanovit poměr intenzity globálního záření ku solární konstantě

$$k_T = \frac{I_{glob}}{I_0} \quad [-] \quad (2.11)$$

Pro daný poměr k_T a stanovené omezení platí následující vztahy pro výpočet intenzity difúzního záření:

- pro $0 \leq k_T \leq 0,3$ s omezením $I_{diff}/I_{glob} \leq 1,0$:

$$I_{diff} = I_{glob}(1 - 0,232 \cdot k_T + 0,0239 \cdot \sin h - 0,000682 \cdot t_1 + 0,0195 \cdot \varphi_1) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.12)$$

- pro $0,3 < k_T \leq 0,78$ s omezením $0,1 \leq I_{diff}/I_{glob} \leq 0,97$:

$$I_{diff} = I_{glob}(1,329 - 1,716 \cdot k_T + 0,267 \cdot \sin h - 0,00357 \cdot t_1 + 0,106 \cdot \varphi_1) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.13)$$

- pro $0,78 < k_T$ s omezením $0,1 \leq I_{diff}/I_{glob}$:

$$I_{diff} = I_{glob}(0,426 \cdot k_T - 0,256 \cdot \sin h + 0,00349 \cdot t_1 + 0,0734 \cdot \varphi_1) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.14)$$

Ve vztazích (2.12) až (2.14) označuje t_1 teplotu vzduchu ve $^\circ\text{C}$ a φ_1 relativní vlhkost vzduchu $[-]$. Funkce pracuje tak, že nejprve podle hodnoty k_T vybere vhodný vztah pro výpočet I_{diff} a tu vypočítá. Pokud vypočtená hodnota I_{diff} nesplňuje podmínku omezení, je nahrazena nejbližší hodnotou, která podmínku omezení splňuje.

K určení hodnoty intenzity přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků využijeme vztahu mezi intenzitou globálního záření na vodorovnou plochu I_{glob} , intenzitou přímého záření na vodorovnou plochu $I_{dir,h}$ a intenzitou difúzního záření I_{diff} . Z intenzity přímého záření na vodorovnou plochu $I_{dir,h}$ pak vypočteme intenzitu

přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků I_{dir} pomocí výšky slunce nad obzorem dle vztahu (2.16) níže.

$$I_{glob} = I_{diff} + I_{dir,h} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (2.15)$$

$$\Rightarrow I_{dir,h} = I_{glob} - I_{diff}$$

$$I_{dir} = \frac{I_{dir,h}}{\sin h} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (2.16)$$

2.7.4 Nahrazení hodnoty neznámé veličiny konstantou

Pokud soubor *weatherdata.xlsx* neobsahuje hodnoty veličin osvětlení nebo intenzitu dlouhovlnného záření, nahrazuje funkce *weatherf.m* tyto neznámé veličiny vhodnou konstantou tak, aby nebyly ovlivněny (nebo byly ovlivněny jen minimálně) výsledky simulací s vygenerovaným souborem meteorologických dat.

V případě globálního, přímého a difúzního osvětlení použije funkce místo neznámých hodnot hodnoty 0 lx. To lze provést, neboť osvětlení nemá na tepelné chování budov prakticky žádný vliv.

Co se týče intenzity dlouhovlnného záření, je místo její neznámé hodnoty použita konstantní hodnota $270 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, která přibližně odpovídá průměrné hodnotě intenzity dlouhovlnného záření získané z meteorologických dat dostupných se soubory ke knihovně HAM-Tools a která je také předpokládanou hodnotou této intenzity. Intenzita dlouhovlnného záření není dostupná ze stanice TUBO ani ze souborů TMY2, proto bylo zvoleno právě toto řešení pomocí zvolené konstanty. Vytvořené funkce jsou však nastaveny tak, aby v případě dostupnosti hodnot intenzity tohoto typu záření dokázaly zpracovat i tato data a zbytečně neznehodnocovaly jejich vliv nahrazením uvedenou konstantou.

3 MATERIÁLOVÁ DATA

3.1 Vlastnosti stavebních materiálů

Použité materiály a jejich tepelně technické a izolační vlastnosti jsou jedním ze zásadních vstupních parametrů simulací tepelného chování budov. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří objemová hmotnost, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Dalšími jsou pak reflexivita, transmisivita a absorptivita (resp. emisivita) charakterizující chování materiálu vůči slunečnímu záření, pórovitost, objemová vlhkost, sorpční vlhkost, hydraulická vodivost a další.

3.1.1 Objemová hmotnost

Většina stavebních materiálů obsahuje póry obsahující vzduch či vlhkost. Objemová hmotnost je hmotnost objemové jednotky materiálu se všemi jeho dutinami a póry. Obvykle se rozlišuje objemová hmotnost suchého a vlhkého materiálu. Objemová hmotnost suchého materiálu ρ_d je dána vztahem (3.1) a objemová hmotnost vlhkého materiálu ρ_v pak vztahem (3.2).

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_p} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3.1)$$

$$\rho_v = \frac{m_v}{V_p} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3.2)$$

kde m_d je hmotnost suchého materiálu [kg],
 m_v hmotnost vlhkého materiálu [kg],
 V_p objem dané látky včetně pórů a mezer [m^3]. [3]

Od objemové hmotnosti se odlišuje hustota materiálu ρ . Ta je dána podílem hmotnosti a objemu daného množství látky, ovšem na rozdíl od objemové hmotnosti bez dutin a pórů.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3.3)$$

kde m je hmotnost sledované látky [kg],
 V objem dané látky bez pórů a mezer [m^3]. [3]

3.1.2 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je veličina vyjadřující schopnost materiálu přenášet teplo vedením a je dána součinitelem tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Součinitel tepelné vodivosti ovlivňuje objemová hmotnost, vlhkost, směr tepelného toku v anizotropních látkách, chemické složení a teplota. Ve stavební tepelné technice jde o nejvýznamnější vlastnost stavebních látek. [3]

3.1.3 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je teplo potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 K. Rozlišuje se měrná tepelná kapacita při stálém tlaku c_p a měrná tepelná kapacita při stálém objemu c_v . Vysokou měrnou tepelnou kapacitu má voda ($4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), měrná tepelná kapacita stavebních materiálů a izolačních materiálů se pohybuje

od 800 do $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Na tepelnou kapacitu u tepelně izolačních materiálů má významný vliv vlhkost vztažená k velikosti pórů. S větší pórovitostí materiálu je spojena větší schopnost absorbovat vodu a také větší měrná tepelná kapacita. [3], [4]

3.2 Materiálová data v knihovně HAM-Tools

Zdrojem materiálových dat pro simulace pomocí knihovny HAM-Tools je stejně jako v případě meteorologických dat MATLABovský soubor (*.mat), ze kterého jsou v průběhu simulace čerpány všechny potřebné údaje. Druh materiálu je třeba zvolit ještě před simulací, a to ve výpočetních blocích simulačního modelu.

Pro soubor materiálových dat platí stejná pravidla jako pro soubor meteorologických dat. Pro správnou funkci simulace musí být tento soubor umístěn ve stejném adresáři jako soubor Simulinku se simulačním modelem. Název tohoto souboru a název proměnné, která vznikne načtením souboru materiálových dat do pracovního prostředí MATLABu, musí korespondovat s názvy použitými v blocích simulačního modelu. Bloky modifikované knihovny jsou pro jednoduchost nastaveny pro práci se souborem materiálových dat nazvaným *materialdata.mat* a s proměnnou materiálových dat nazvanou *materialdata*. Proto je opět doporučením používat soubor a proměnnou s těmito názvy. Aby byla při simulaci načtena správná data, je nutné dodržet správnou organizaci veličin a jejich hodnot v souboru materiálových dat, která je popsána v následujících odstavcích.

Soubor materiálových dat byl vytvořen ve formě tzv. struktury (*structure*). Struktura je datový typ MATLABu, který obsahuje pojmenované položky (*fields*). Do položek struktury lze ukládat hodnoty libovolných formátů (číslo, text, funkce, matice/vektor, další pole). Částečný náhled souboru materiálových dat je na obr. 3.1.

1x15 struct with 22 fields

Fields	index	name	dry_density	lambda_dry	lambda_T	lambda_W	heat_capacity
1	1	'Cellulose'	65	0.0400	0	5.6000e-04	2000
2	2	'Spruce'	450	0.9000	0	9.0000e-04	2500
3	3	'WindowGlass'	2400	0.0330	0	0	800
4	4	'RockWool39'	30	0.0360	1.5000e-04	1.0000e-03	800
5	5	'Plaster'	790	0.2000	0	0.0045	870
6	6	'Concrete'	2400	1.5000	0	0.0150	800
7	7	'Leight weight concrete'	1250	0.4500	0	5.6000e-04	1050
8	8	'BrickBench5'	1600	0.6820	0	0	1000
9	9	'Newmtrl1'	1600	0.6820	0	0	1000
10	10	'Newmtrl2'	1600	0.6820	0	0	1000
11	11	'Newmtrl3'	1600	0.6820	0	0	1000
12	12	'POROTHERM'	825	0.1750	0	0	1000
13	13	'Polystyrene EPS'	15	0.0330	0	0	1270
14	14	'YTONG'	500	0.1370	0	0	1000
15	15	'Polystyrene XPS'	45	0.0360	0	0	2060

Obr. 3.1 – Náhled souboru materiálových dat

Každému řádku v souboru odpovídá jeden materiál a každému sloupci pak jeden parametr. V 15 řádcích souboru je uvedeno 12 druhů materiálů. Zbývající 3 řádky (řádky 9–11) jsou předpřipravené pro případné doplnění uživatelem definovaného materiálu. Soubor obsahuje celkem 22 sloupců, ve kterých jsou zapsány parametry

odpovídajících materiálů. Všechny tyto parametry jsou včetně popisu uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 – Organizace veličin v souboru materiálových dat [12]

Název sloupce	Popis parametru	Jednotka	Příklad
name	Název materiálu		'Concrete'
dry_density	Objemová hmotnost suchého materiálu	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2400
lambda_dry	Součinitel tepelné vodivosti suchého materiálu	$\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.5
lambda_T	Faktor závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$	0
lambda_W	Faktor závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové vlhkosti	$\text{W}\cdot\text{m}^2/(\text{kg}\cdot\text{K})$	0.015
heat_capacity	Měrná tepelná kapacita suchého materiálu	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	800
emissivity	Emisivita	–	0.8
transmittance	Propustnost (transmisivita)	–	0
absorptivity	Pohltivost (absorptivita)	–	0.8
porosity	Pórovitost	–	0.204
W_capillary	Kapilární objemová vlhkost	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	148.8
WAC	Vlhkostní absorpční koeficient	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$	0.018
sorption_RH	Hodnoty rel. vlhkosti pro sorpční izotermu	–	[0 0.2525 0.449 0.65 0.8 0.8985 0.9815]
sorption_W	Hodnoty objemové vlhkosti pro sorpční izotermu	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	[0 21.36 27.84 41.76 62.88 80.4 106.56]
delta_W	Hodnoty objemové vlhkosti pro propustnost vlhkosti	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	[0 115.2 204]
delta_p_W	Propustnost vlhkosti $f(W)$	$\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m})$	[1.0e-11 1.0e-11 1.0e-16]
hyd_cond_W	Hodnoty objemové vlhkosti pro hydraulickou vodivost	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	[96 148.8 204]
hyd_cond_K	Hydraulická vodivost	$\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m})$	[1.1e-14 6.25e-13 6.25e-13]
air_permeability	Propustnost vzduchu	m^2	0
slope_sorption_RH	Hodnoty rel. vlhkosti pro sklon sorpční izotermy	–	[]
slope_sorption_ksi	Sklon sorpční izotermy	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	[]

Jedním z cílů práce bylo zakomponovat do knihovny HAM-Tools materiály často používané v ČR. Původní soubor materiálových dat knihovny HAM-Tools některé z těchto materiálů obsahoval. Nový soubor materiálových dat proto vznikl doplněním původního souboru o další materiály používané v ČR. Nový soubor materiálových dat obsahuje parametry následujících materiálů, z nichž poslední 4 jsou nově zavedené:

- celulóza (angl. *cellulose*),
- jedle (angl. *spruce*),
- okenní sklo (angl. *window glass*),
- minerální vlna (angl. *rock wool*),
- sádra, příp. sádrokarton (angl. *plaster, plaster board*),

- beton (angl. *concrete*),
- lehký beton (angl. *lightweight concrete*),
- cihla, příp. cihlový překlad (angl. *brick, brick bench*),
- Porotherm,
- polystyren EPS,
- Ytong,
- polystyren XPS.

Při zavádění nových materiálů byl kladen důraz na základní parametry uvedené v kapitole 3.1 (objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita) a na parametry ovlivňující přenos tepla zářením (emisivita, transmisivita, absorptivita). Hodnoty těchto parametrů byly získány z materiálových listů výrobců těchto materiálů, případně ze zdroje [3]. Ostatním parametrům nebyla věnována zvláštní pozornost.

Soubor materiálových dat je při simulacích pomocí knihovny HAM-Tools mimo jiné využíván výpočetním blokem *Material data tables* ke stanovení součinitele tepelné vodivosti v závislosti na teplotě a objemové vlhkosti a také k určení měrné tepelné kapacity v závislosti na objemové vlhkosti, teplotě a dalších parametrech.

Výpočet součinitele tepelné vodivosti λ závislé na teplotě a vlhkosti provádí tento výpočetní blok dle vztahu (3.4):

$$\lambda = \lambda_{0,ref} + \lambda_T \cdot (t - t_{ref}) + \lambda_w \cdot (w - w_{ref}) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.4)$$

kde $\lambda_{0,ref}$ je součinitel tepelné vodivosti suchého materiálu při t_{ref} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 λ_T faktor závislosti λ na teplotě [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$],
 λ_w faktor závislosti λ na objemové vlhkosti [$\text{W} \cdot \text{m}^2 / (\text{kg} \cdot \text{K})$],
 t teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 t_{ref} referenční teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 w objemová vlhkost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 w_{ref} referenční objemová vlhkost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. [11]

Výpočet měrné tepelné kapacity c závislé na vlhkosti se pak v bloku *Material data tables* provádí dle vztahu (3.5):

$$c = c_d + \frac{1}{\rho_d} \cdot c_l \cdot w \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.5)$$

kde c_d je měrná tepelná kapacita suchého materiálu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 c_l měrná tepelná kapacita tekuté fáze [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. [11]

Více poznatků ke zpracování ostatních veličin ze souboru materiálových dat je uvedeno ve zdroji [11].

4 BLOKY A FUNKCE KNIHOVNY HAM-TOOLS

V úvodu kapitoly je souhrnně popsán princip práce s knihovnou HAM-Tools. Další část popisuje vybrané výpočetní bloky knihovny HAM-Tools, resp. knihovny H-Tools, použité v simulacích, kterými se zabývají kapitoly 5–8. Informace o ostatních blocích knihovny, případně další informace o uvedených blocích, jsou k dispozici ve zdrojích [11], [28] a [29]. Bloky modifikované v rámci diplomové práce jsou pro rozlišení od původních bloků označeny iniciály „(JZ)“. Vedle bloků jsou zde popsány také funkce knihovny HAM-Tools potřebné pro simulaci.

4.1 Princip práce s knihovnou HAM-Tools

Pokud chceme v knihovně HAM-Tools simulovat nějaký objekt, musíme nejprve v grafickém prostředí programu Simulink vytvořit jeho simulační model. Simulační model se skládá z výpočetních bloků, které lze pomocí myši přetáhnout ze souboru knihovny do grafického prostředí programu Simulink. Výpočetní bloky je pak třeba nastavit a spojit vhodně tak, aby simulační model správně fungoval a co nejvíce odpovídal reálnému simulovanému objektu. Simulační model je třeba uložit do souboru s příponou *.mld nebo *.slx.

Nastavením bloků je myšleno nastavení jejich vstupních parametrů (např. materiálu, velikosti, orientace a sklonu stěn, počátečních podmínek simulace). Pokud výpočetní blok umožňuje nastavit nějaké vstupní parametry, pak se po dvojitém kliknutí na tento blok zobrazí dialogové okno, ve kterém lze vstupní parametry zadat. Zadávaný parametr může být číslo, vektor, textový řetězec, případně lze vybrat parametr z roletového menu nebo zadat pomocí proměnné, jejíž hodnota je definovaná v nadřazeném bloku. Parametry vybraných bloků použitých v rámci práce jsou popsány v následujících podkapitolách.

Spojování bloků je při tvorbě simulačního modelu velmi intuitivní. Provádí se u bloků, které mají na svém obvodu vstupní nebo výstupní šipky opatřené popiskem, a to kliknutím levým tlačítkem myši na výstupní šipku a přetažením na vstupní šipku se stejným popiskem nebo naopak (přetažením ze vstupní šipky na výstupní). Názorný příklad hotového simulačního modelu je k vidění na obr. 5.6 v kapitole 5.

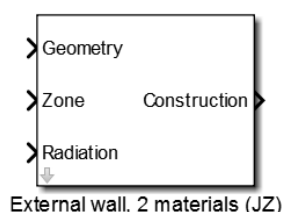
Kliknutím na průhlednou šipku v levém dolním rohu bloku lze nahlédnout na model výpočetního bloku, kde se nachází výpočetní podbloky, výjimečně pak další zadávané parametry. Součástí modifikace bloků knihovny v rámci této práce bylo přemístění často zadávaných parametrů do hlavních nadřazených bloků. Tato úprava byla provedena za účelem zvýšení uživatelského komfortu. Kliknutím na blok a stiskem klávesové zkratky Ctrl+M se otevře dialogové okno, kde lze například nastavit zadávání vstupních parametrů bloku nebo zadat příkazy ke zpracování vstupních parametrů atd.

Po vytvoření simulačního modelu a před spuštěním samotné simulace je třeba umístit soubor simulačního modelu, funkce knihovny HAM-Tools (*weatherconv.m*, *sun.m*, *irradh.m*, *irrad.m*) a soubory meteorologických a materiálových dat (*weatherdata.mat* a *materialdata.mat*) do společné složky. Před spuštěním simulace je také třeba nastavit v řešiči (tlačítko *Model configuration parameters*, záložka *Solver*) začátek simulace (pole *Start time*) a konec simulace (pole *Stop time*), případně velikost kroku a další parametry simulace.

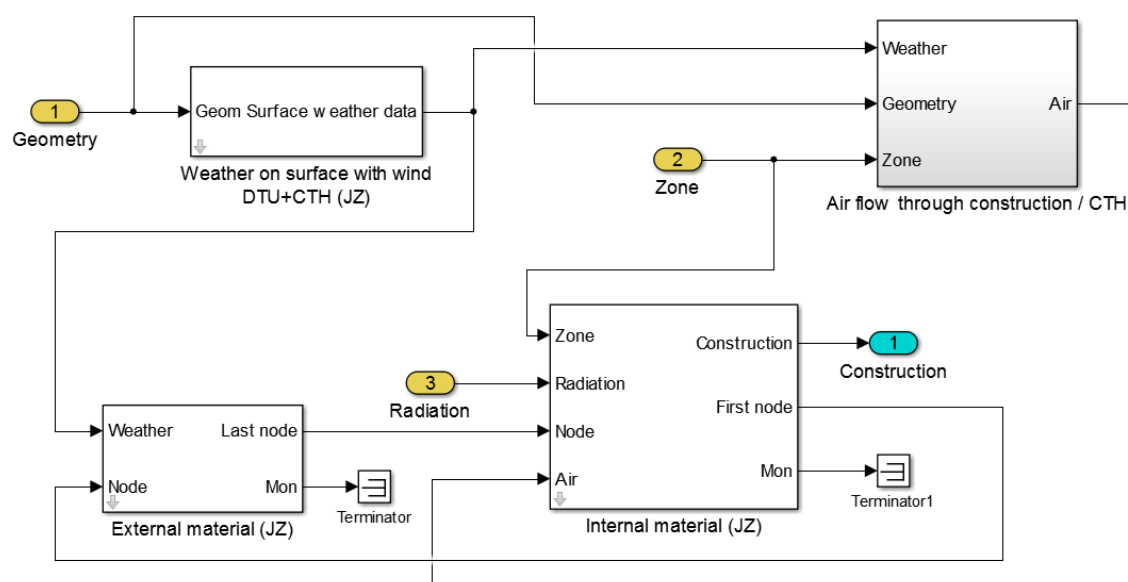
4.2 Výpočetní bloky skupiny CONSTRUCTIONS

4.2.1 Blok External wall, 2 materials (JZ)

Tento blok slouží k modelování vnějších konstrukcí budovy, tedy stěn, podlahy a střechy. Vstupními prvky bloku jsou matice *Geometry*, *Zone*, *Radiation*, výstupním prvkem je matice *Construction* – viz obr. 4.1. Na obr. 4.2 je k dispozici model bloku. Jeho podbloky patří do skupiny *HELPERS*. Bloky *Terminator* slouží k předejití chybové hlášky u nepotřebných výstupů. V bloku *External wall, 2 materials (JZ)* je lze v případě potřeby nahradit bloky *Scope*, kterými se pak zobrazí průběh výstupních veličin bloků *External material (JZ)* a *Internal material (JZ)*.



Obr. 4.1 – Blok *External wall, 2 materials (JZ)*



Obr. 4.2 – Model bloku *External wall, 2 materials (JZ)*

Okno pro nastavení vstupních parametrů bloku *External wall, 2 materials (JZ)* je znázorněno na obr. 4.3. Pro správnou funkci simulačního modelu je třeba, aby každý prvek konstrukce budovy (stěna, okno, střecha) měl vlastní číslo povrchu (pole *Surface number*). Toto číslo udává pořadí prvků ve vektorech povrchů, orientací a sklonů, které jsou zadávány jako vstupní parametry bloku *Room air CTH* – viz podkapitola 4.3.1. Dalšími vstupními parametry jsou součinitele přestupu tepla pro vnější a vnitřní povrch [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] (pole *Convective heat transfer coefficient for outdoor/indoor surface*), součinitele přestupu vlhkosti (páry) pro vnější a vnitřní povrch [$\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Pa})$] (pole *Convective vapor transfer coefficient for outdoor/indoor surface*), počáteční teplota [$^{\circ}\text{C}$] (pole *Start temperature*) a relativní vlhkost [–] (pole *Start relative humidity*).

Function Block Parameters: External wall, 2 materials (JZ) (1), 160...

Outer wall /HAM model (mask)

Parameters

Surface number
1

Convective heat transfer coefficient for outdoor surface [W/m²K]
25

Convective heat transfer coefficient for indoor surface [W/m²K]
8

Convective vapor transfer coefficient for outdoor surface [kg/sm²Pa]
0

Convective vapor transfer coefficient for indoor surface [kg/sm²Pa]
0

Start temperature [°C]
20

Start relative humidity [-]
0.5

Air flow active? (1 for yes, 0 for no)
0

Amplifier
1

Shading (0-1)
0

Weather data filename (e.g. 'weatherdata.mat')
'weatherdata.mat'

Material data filename (e.g. 'materialdata.mat')
'materialdata.mat'

External material
Polystyrene EPS

External material thickness [m]
0.1

Internal material
POROTHERM

Internal material thickness [m]
0.3

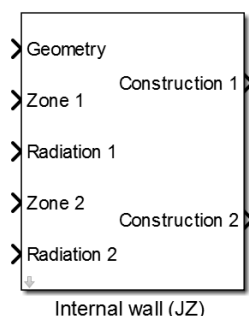
OK Cancel Help Apply

Obr. 4.3 – Vstupní parametry bloku *External wall, 2 materials (JZ)*

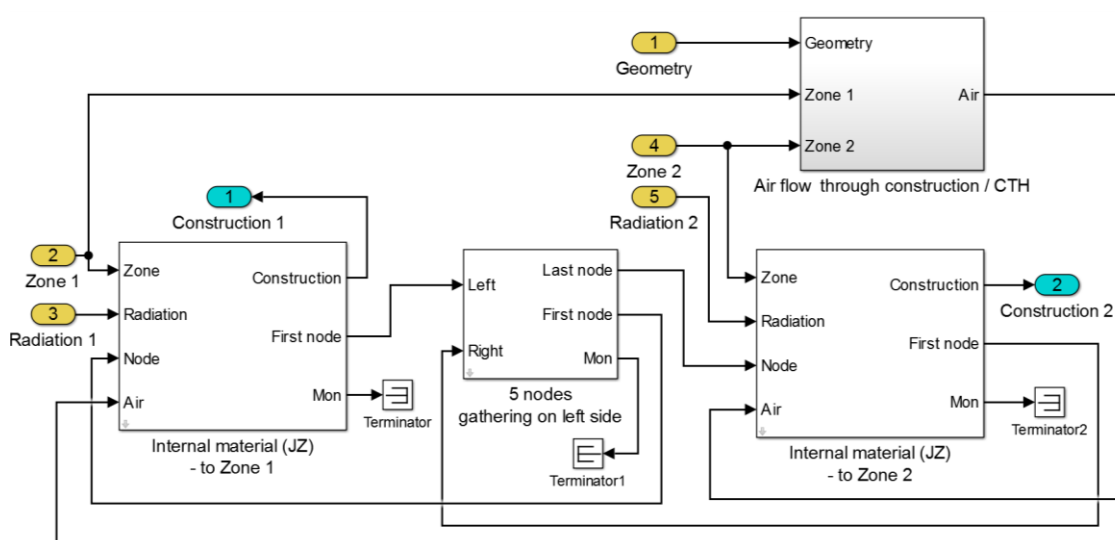
V dalších oknech se zadává požadavek na zapnutí či vypnutí výpočtu prostupu (prodyšnosti) vzduchu (pole *Air flow active? 1 for yes, 0 for no*), časový zesilovač (pole *Amplifier*) – hodnota 1 odpovídá časovému měřítku v sekundách, míra stínění (pole *Shading 0–1*) – pro případ, že je povrch stíněn např. okolními budovami. Dalším parametrem jsou názvy souborů meteorologických a materiálových dat zadávané ve formě textových řetězců (pole *Weatherdata filename* a *Material data filename*). Z roletového menu se pak volí druh vnějšího a vnitřního materiálu (pole *External material* a *Internal material*), číselně se zadá jeho tloušťka [m] (pole *External material thickness* a *Internal material thickness*). Běžně jsou stěny složeny ze dvou významných materiálů. Proto je tento blok nastaven primárně pro volbu dvou materiálů. Pokud by chtěl uživatel zadat další materiál, musí buď použít jiný blok, nebo zadat další materiál v podbloku *External material (JZ)*, případně *Internal material (JZ)*.

4.2.2 Blok Internal wall (JZ)

Blok *Internal wall (JZ)* se používá k modelování vnitřních konstrukcí, které se nacházejí mezi dvěma zkoumanými zónami. Mezi tyto konstrukce patří např. stěny, podlahy a stropy. V práci je tento blok použit při modelování podlahy ve dvouzónovém modelu. Vstupní prvky bloku tvoří matice *Geometry*, *Zone 1*, *Radiation 1*, *Zone 2* a *Radiation 2*. Výstupními prvky jsou matice *Construction 1* a *Construction 2*. Model bloku je znázorněn na obr. 4.5. Tento model je tvořen, stejně jako předchozí blok, podbloky skupiny *HELPERS*. Bloky *Terminator* mohou být rovněž nahrazeny bloky *Scope*, kterými se zobrazí průběh výstupních veličin odpovídajících bloků.



Obr. 4.4 – Blok *Internal wall (JZ)*



Obr. 4.5 – Model bloku *Internal wall (JZ)*

Function Block Parameters:

Outer wall /HAM model (mask)

Parameters

Surface number

8

Convective heat transfer coefficient for outdoor surface [W/m²K]

8

Convective heat transfer coefficient for indoor surface [W/m²K]

8

Convective vapor transfer coefficient for outdoor surface [kg/sm²Pa]

0

Convective vapor transfer coefficient for indoor surface [kg/sm²Pa]

0

Start temperature [°C]

20

Start relative humidity [-]

0.5

Air flow active? (1 for yes, 0 for no)

1

Amplifier

1

Material data filename (e.g. 'materialdata.mat')

'materialdata.mat'

External material (=material to zone 2)

Concrete

External material thickness [m]

0.075

Central material (=between external and internal material)

RockWool39

Central material thickness [m]

0.1

Internal material (=material to zone 1)

Concrete

Internal material thickness [m]

0.075

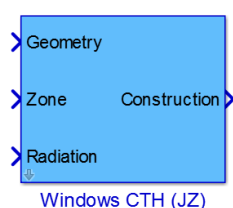
OK Cancel Help Apply

Obr. 4.6 – Parametry bloku *Internal wall (JZ)*

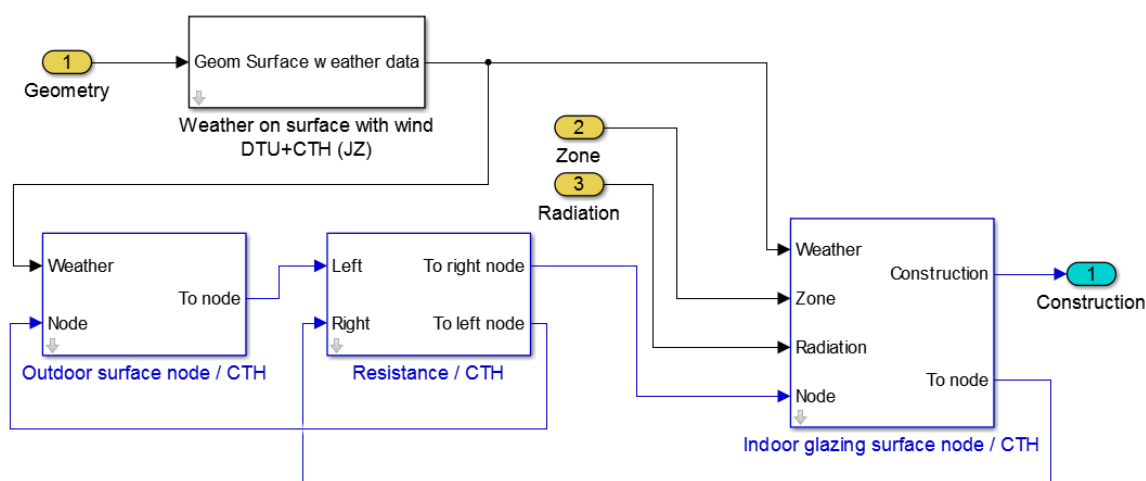
Na obr. 4.6 je znázorněno okno pro nastavení vstupních parametrů uvedeného bloku. Stejně jako v případě bloku *External wall, 2 materials (JZ)* se zadává číslo povrchu, součinitel přestupu tepla pro vnější a vnitřní povrch a součinitele přestupu vlhkosti pro vnější a vnitřní povrch. Vnější povrch se uvažuje povrch přilehlý k zóně 2 a vnitřní povrch přilehlý k zóně 1. Dále je třeba zadat počáteční teplotu a relativní vlhkost, zapnutí či vypnutí výpočtu prostupu (prodýšnosti) vzduchu, časový zesilovač a ve formě textového řetězce název souboru materiálůvých dat. Poté se z roletového menu volí vnější materiál (přilehlý k zóně 2), středový materiál (mezi vnitřním a vnějším materiálem), vnitřní materiál (přilehlý k zóně 1) a také jejich tloušťky.

4.2.3 Blok Windows CTH (JZ)

Blok *Windows CTH (JZ)* se používá k modelování oken, dveří a jiných, většinou prosklených, otvorů v konstrukci budovy. Tento blok je součástí knihovny H-Tools. Nezahrnuje v sobě tedy mechanismus pro výpočet prostupu vlhkosti a vzduchu skrz materiál. Přenos vlhkosti skrz okenní zasklení lze považovat za nulový a infiltraci vzduchu do vnitřního prostředí skrz netěsnosti oken lze do simulačního modelu zavést pomocí bloku pro ventilaci, který je uveden v podkapitole 4.4.2. Blok *Windows CTH (JZ)* má stejné vstupní a výstupní prvky jako blok *External wall, 2 materials (JZ)*. Model bloku *Windows CTH (JZ)* je znázorněn na obr. 4.8. Některé podbloky tohoto bloku jsou popsány v podkapitole 4.5.



Obr. 4.7 – Blok *Windows CTH (JZ)*



Obr. 4.8 – Model bloku *Windows CTH (JZ)*

Function Block Parameters: Windows CTH (JZ) (7), 160°, 90°

Double glass window (mask)

Parameters

Surface number

7

Convective heat transfer coefficient for outdoor surface [W/m2K]

25

Convective heat transfer coefficient for indoor surface [W/m2K]

8

Start temperature [°C]

20

Window resistance [m2K/W]

0.55

Weather data filename (e.g. 'weatherdata.mat')

'weatherdata.mat'

Material data filename (e.g. 'materialdata.mat')

'materialdata.mat'

Material (default: WindowGlass)

WindowGlass

Thickness [m]

2*0.004

Absorptivity (for the glazing)

0.25

OK Cancel Help Apply

Obr. 4.9 – Vstupní parametry bloku *Windows CTH (JZ)*

Na obr. 4.9 je znázorněno okno pro nastavení vstupních parametrů bloku *Windows CTH (JZ)*. Stejně jako v případě předešlých dvou bloků je třeba u tohoto bloku zadat číslo povrchu, součinitel přestupu tepla pro vnější a vnitřní povrch, počáteční teplotu a názvy souborů meteorologických a materiálových dat. Volba materiálu se provádí opět pomocí roletového menu. Blok je primárně určen pro modelování prosklených otvorů, proto je výchozím materiálem okenní sklo. V případě potřeby lze však volit i jiné materiály. Dále je třeba nastavit tloušťku skla [m] (pole *Thickness*) a absorptivitu povrchu skla (příp. jiného materiálu) [–] (pole *Absorptivity for the glazing*). Tloušťkou je zde myšlena pouze tloušťka skla, nikoliv celého okna. Odporové vlastnosti vrstvy výplně prostoru mezi okenními tabulkami jsou zahrnuty v hodnotě tepelného odporu okna [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] (pole *Window resistance*). Jde o tepelný odpor mezi vnějším a vnitřním povrchem okna. Jeho hodnotu lze stanovit pomocí součinitele

prostupu tepla oknem (hodnota udávaná výrobcem) a součinitelů přestupu tepla na vnější a vnitřní straně okna dle vztahu (4.2).

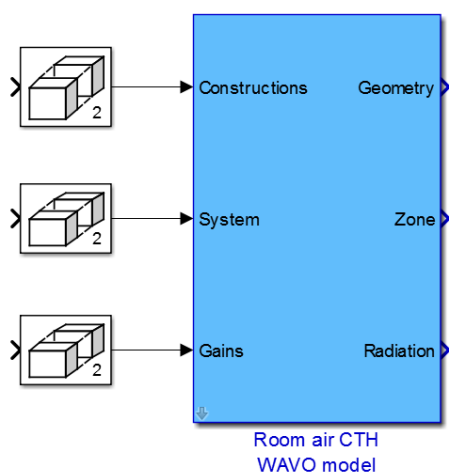
$$R = \frac{1}{u} = R_{out} + R_w + R_{in} = \frac{1}{\alpha_{out}} + R_w + \frac{1}{\alpha_{in}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4.1)$$

$$\Rightarrow R_w = \frac{1}{u} - \frac{1}{\alpha_{out}} - \frac{1}{\alpha_{in}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4.2)$$

kde R_w je tepelný odpor okna [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 u součinitel prostupu tepla oknem [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 α_{out} součinitel přestupu tepla na vnější straně okna [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 α_{in} součinitel přestupu tepla na vnitřní straně okna [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

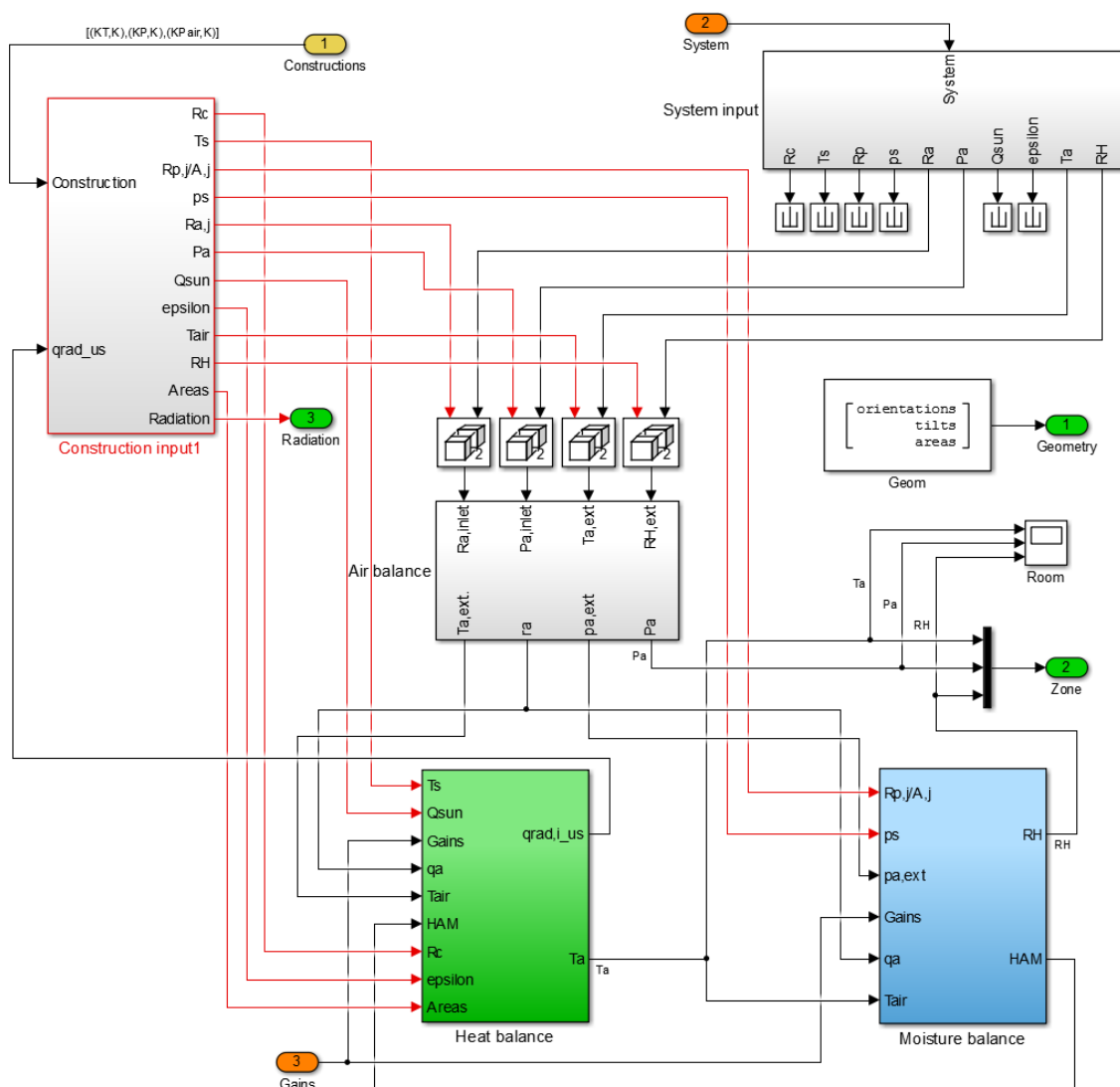
4.3 Výpočetní bloky skupiny ZONES

4.3.1 Blok Room air CTH



Obr. 4.10 – Blok *Room air CTH*

Blok *Room air CTH* reprezentuje vzduch v uzavřeném prostoru (zóně) a slouží ke stanovení průběhu teploty, relativní vlhkosti a tlaku tohoto vzduchu při uvažování tepelných a vlhkostních zisků a dodávek vzduchu skrz stěny a prostřednictvím větracích systémů. Vstupními prvky tohoto bloku jsou matice *Constructions*, *System* a *Gains* a výstupními prvky pak matice *Geometry*, *Zone* a *Radiation*. Jde o nejkomplexnější blok knihovny HAM-Tools. Detailní modely jeho jednotlivých podbloků, použité rovnice a jejich popisy jsou k dispozici ve zdroji [11]. Model bloku tohoto bloku je znázorněn na obr. 4.11.

Obr. 4.11 – Model bloku *Room air CTH*

Na obr. 4.12 je okno s parametry bloku *Room air CTH*. První tři parametry definují jednotlivé části stavební konstrukce modelovaného objektu. Jde o tři vektory, přičemž prvním z nich obsahuje velikosti ploch stavebních částí [m^2] (pole *Areas*), druhý jejich azimuty [$^\circ$] (pole *Orientations*) a třetí jejich sklony [$^\circ$] (pole *Tilts*). Orientace vůči světovým stranám je specifikována v hlavičce okna. Pro směr sever je hodnota orientace 180° , pro směr východ -90° , směr jih 0° a směr západ 90° . Co se týče sklonů, jeho hodnota pro svislou část stavební konstrukce je 90° , pro vodorovnou část pak 0° . Jak již bylo zmíněno výše, číslo povrchu v blocích *External wall, 2 materials (JZ)* a *Windows CTH (JZ)* koresponduje s pořadím prvků ve vektorech, které jsou zadávány jako vstupní parametry v bloku *Room air CTH*. Pro parametry uvedené na obr. 4.12 tedy platí, že povrch číslo 1 má velikost $17,4 m^2$, orientaci 180° a sklon 90° . Na obr. 4.12 jsou uvedeny parametry pro dům se sedlovou střechou, přičemž právě střecha má číslo povrchu 4 a 5. Sklon střechy je 30° vůči vodorovné rovině. Dalšími parametry jsou objem vnitřního vzduchu zóny [m^3] (pole *Room volume*), vektor počátečních podmínek – počáteční teploty [$^\circ C$], relativní vlhkosti [–] a tlaku vzduchu ve vnitřním prostoru [Pa] (pole *Initial conditions (temperature [$^\circ C$], relative humidity [–] and air pressure [Pa])*), dále přídavná kapacita reprezentující materiál, do kterého lze

akumulovat teplo (např. nábytek, vnitřní stěny) [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$] (pole *Additional vol. heat and capacity*), konvektivní podíl solárních zisků [–] (pole *Convective fraction of solar gains*), počet systémů (pole *Number of systems*) a počet zisků (pole *Number of gains*), které budeme k bloku připojovat, a hodnota časového zesilovače.

Function Block Parameters: Room air CTH WAVO model1

Room air (HAM model) (mask)

Wall orientation: S= 0, W= 90, E=-90, N= 180
SW=45, NW=135, SE= -45, NE=-135

Parameters

Areas [m2]
[17.4 47.7 26.4 65 61.3 6 3.9 12.5 12.6]

Orientations [deg]
[160 250 340 160 340 160 160 250 340]

Tilts [deg]
[90 90 90 30 30 90 90 90 90]

Room volume [m3]
594

Initial conditions (temperature [°C], relative humidity [-] and air pressure [Pa])
[20 0.5 0]

Additional vol. heat and capacity [J/K]
32995000

Convective fraction of solar gains [-]
0.3

Number of systems
1

Number of gains
1

Amplifier
1

OK Cancel Help Apply

Obr. 4.12 – Vstupní parametry bloku *Room air CTH*

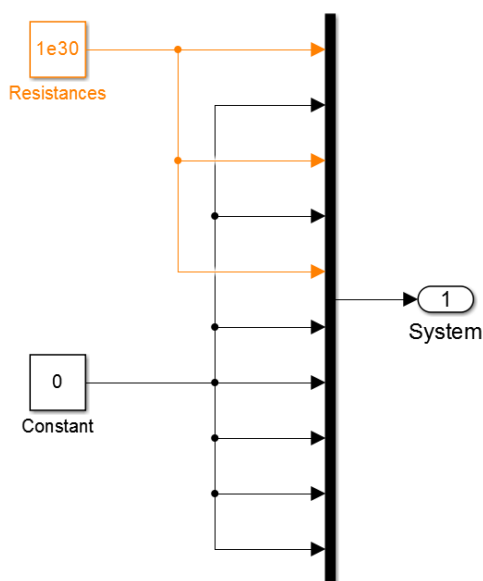
4.4 Výpočetní bloky skupiny SYSTEMS

4.4.1 Blok No ventilation

Tento blok se používá v případě, že v simulaci nechceme uvažovat přívod vzduchu větráním. Nemá žádné vstupní prvky ani vstupní parametry. Výstupní prvkem je matice *System* obsahující „nekonečné“ odpory a nulové konstanty – viz model bloku na obr. 4.14. Blok se spojuje s blokem *Room air CTH*.



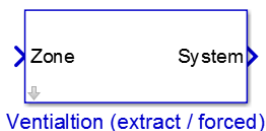
Obr. 4.13 – Blok *No ventilation*



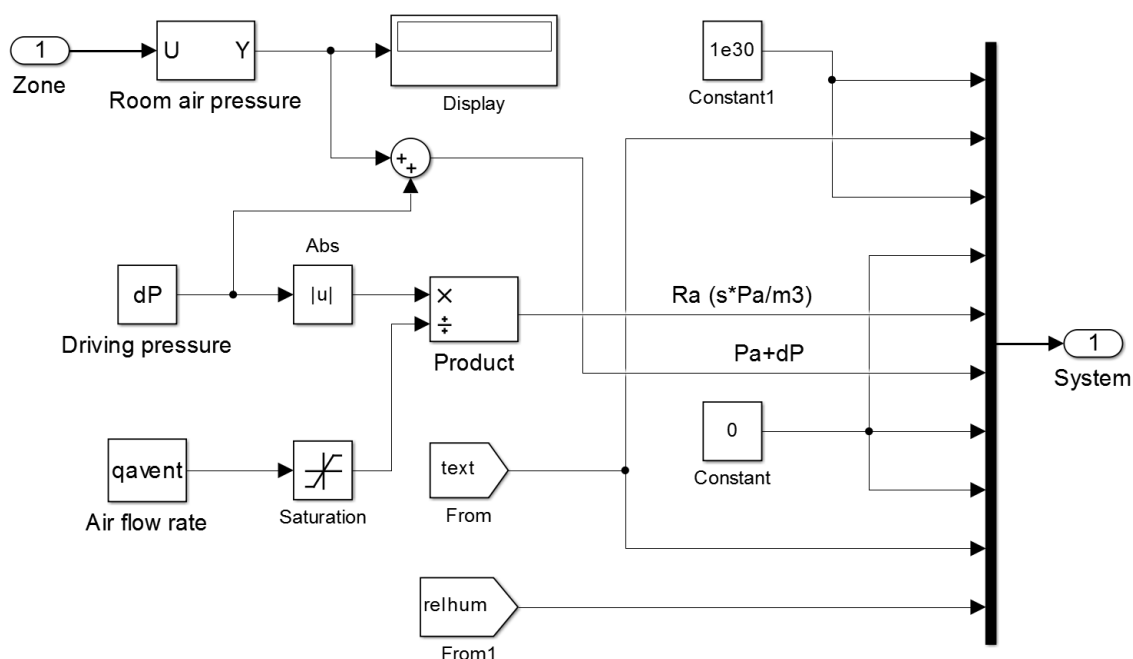
Obr. 4.14 – Model bloku *No ventilation*

4.4.2 Blok Ventilation (extract/forced)

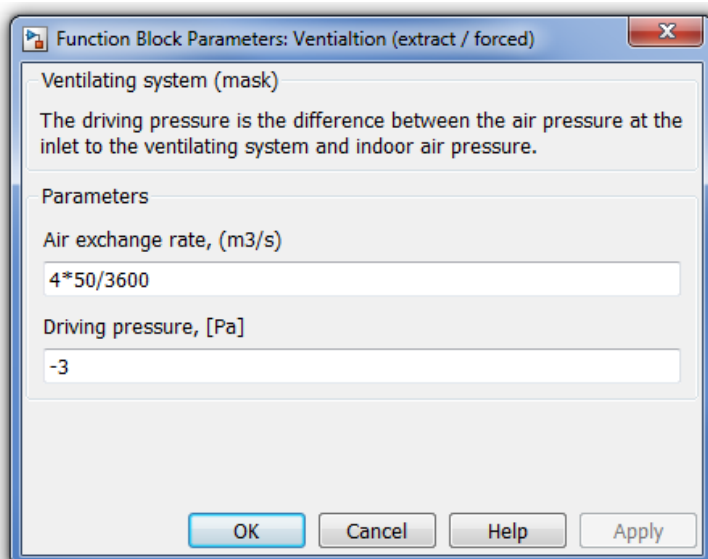
Blok *Ventilation (extract/forced)* se používá k modelování podtlakových a přetlakových větracích systémů. K modelování rovnotlakých větracích systémů není tento blok primárně určen, lze ho však použít. Vstupním prvkem bloku je matice *Zone* a výstupním prvkem matice *System*. Model tohoto bloku je znázorněn na obr. 4.16.



Obr. 4.15 – Blok *Ventilation (extract/forced)*

Obr. 4.16 – Model bloku *Ventilation (extract/forced)*

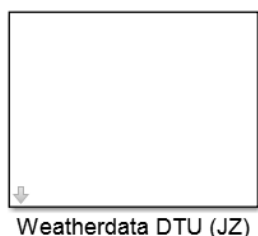
Okno pro nastavení vstupních parametrů je vyobrazeno na obr. 4.15. V případě tohoto bloku se nastavuje požadovaný objemový tok přiváděného venkovního větracího vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] (pole *Air exchange rate*) a rozdíl mezi tlakem vzduchu uvnitř místnosti a tlakem vzduchu na vstupu do ventilačního systému [Pa] (pole *Driving pressure*). Záporná hodnota rozdílu tlaků se zadává pro podtlakové větrání a kladná hodnota rozdílu tlaků pro přetlakové větrání. Pokud bychom chtěli modelovat rovnotlaký větrací systém, je třeba zadat hodnotu blížíící se nule (nikoliv přímo nulu), neboť tento blok není primárně určen k modelování těchto systémů a při zadání nulové hodnoty rozdílu tlaků ohlásí chybu.

Obr. 4.17 – Vstupní parametry bloku *Ventilation (extract/forced)*

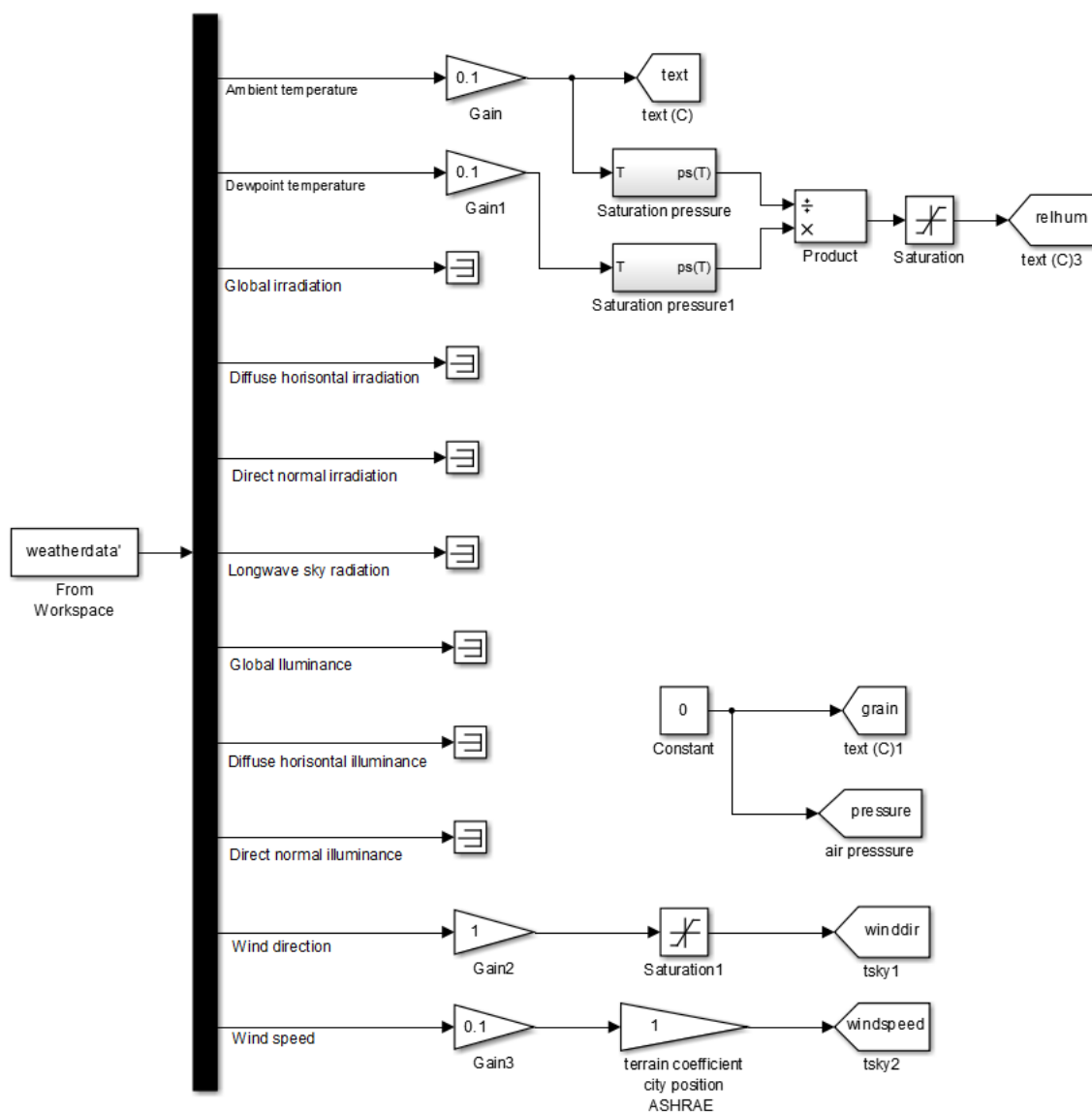
4.5 Výpočetní bloky skupiny HELPERS

4.5.1 Blok Weatherdata DTU (JZ)

Uvedený blok slouží ke zpracovávání souboru meteorologických dat v průběhu simulace, k rozdělení veličin do proměnných a k výpočtu hodnot relativní vlhkosti. Používá se volně, nemá žádné vstupní ani výstupní prvky. Model tohoto bloku je k dispozici na obr. 4.19.

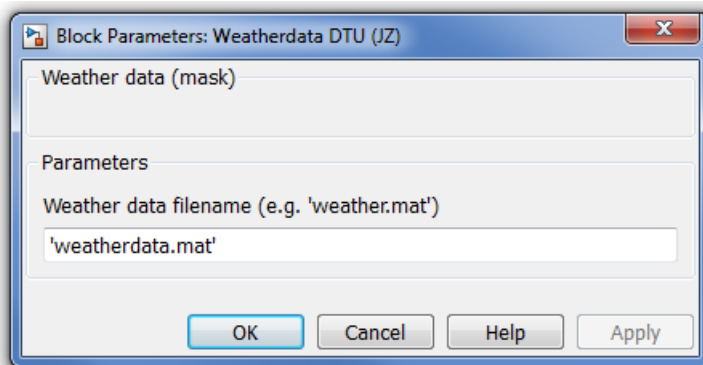


Obr. 4.18 – Blok *Weatherdata DTU (JZ)*



Obr. 4.19 – Model bloku *Weatherdata DTU (JZ)*

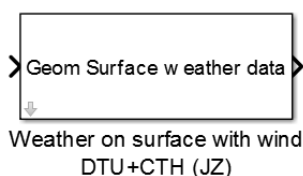
Blok *Weatherdata DTU (JZ)* má pouze jeden vstupní parametr, a sice textový řetězec s názvem souboru meteorologických dat – viz obr. 4.20.



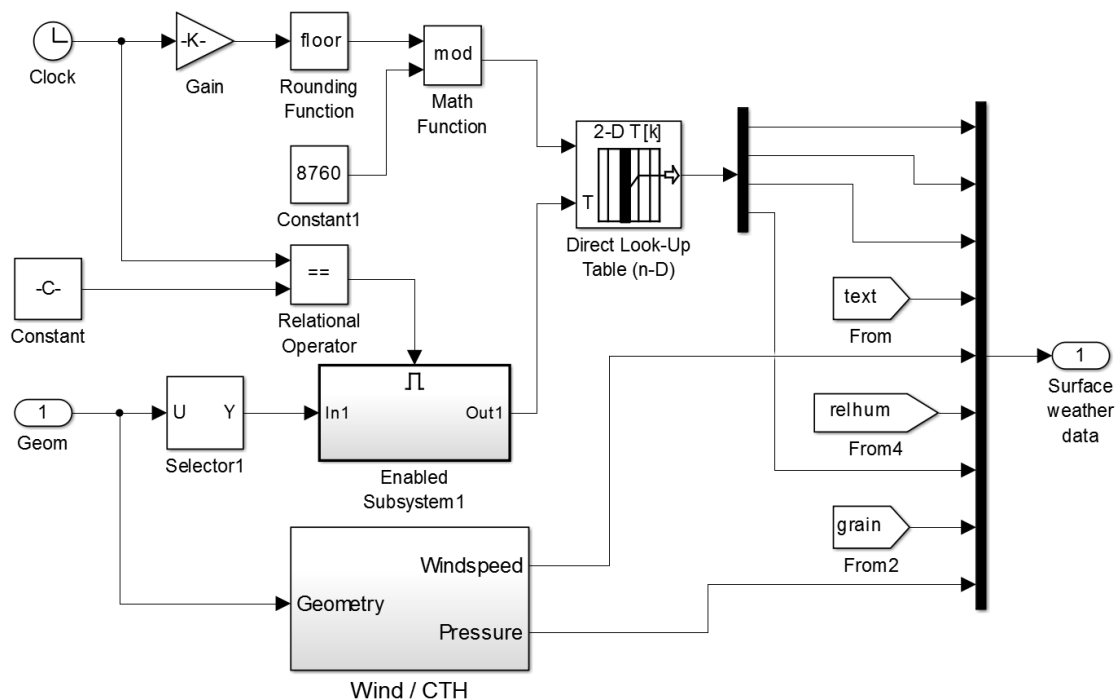
Obr. 4.20 – Vstupní parametry bloku *Weatherdata DTU (JZ)*

4.5.2 Blok *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*

Tento blok se používá v blocích *Windows CTH (JZ)* a *External wall, 2 materials (JZ)* a slouží k výpočtu dat slunečního záření a dlouhovlnného záření pro konkrétní povrch. Blok pracuje se souborem meteorologických dat a s funkcemi knihovny HAM-Tools, jejichž význam je popsán v podkapitole 4.8. Vstupním prvkem bloku je matice *Geom* a výstupním prvkem matice *Surface weather data*. Model bloku je na obr. 4.22.

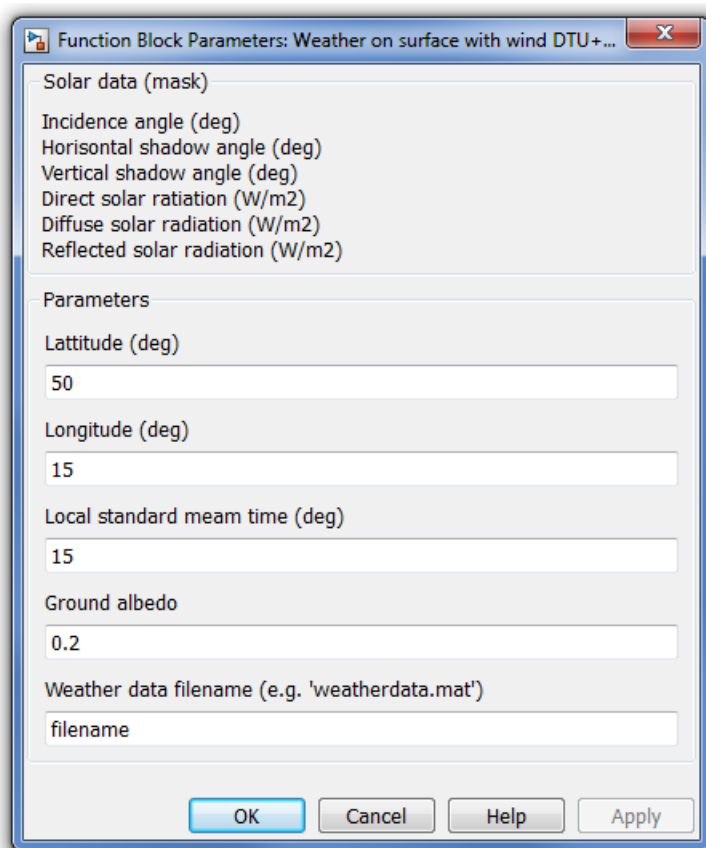


Obr. 4.21 – Blok *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*



Obr. 4.22 – Model bloku *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*

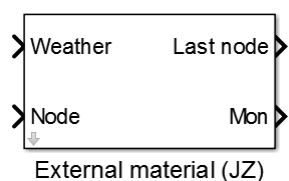
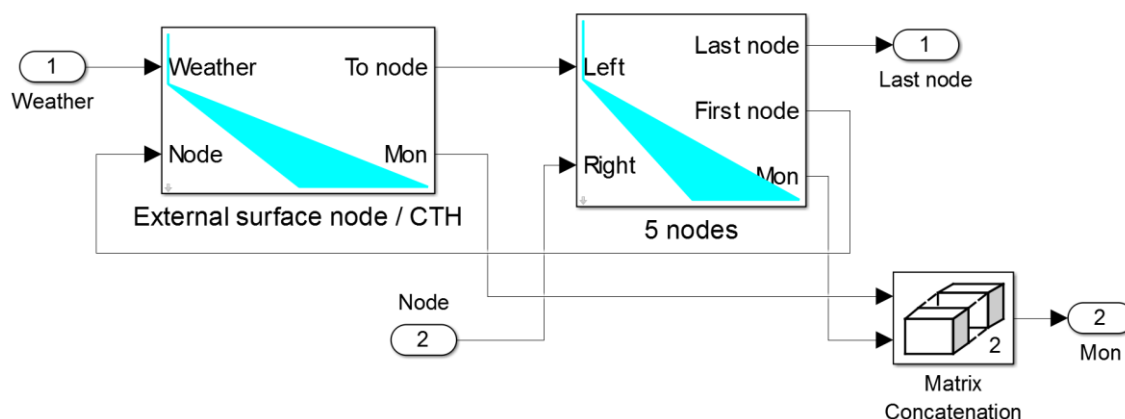
Vstupní parametry tohoto bloku se nastavují v okně vyobrazeném na obr. 4.23. Hlavními vstupními parametry jsou zeměpisná šířka [°] (pole *Latitude*), zeměpisná délka [°] (pole *Longitude*), souřadnice poledníku, ke kterému je vztažen lokální čas [°] (pole *Local standard mean time*), a míra odrazivosti zemského povrchu [–] (pole *Ground albedo*). Všechny tyto parametry jsou zadávány číselnými hodnotami. Posledním parametrem je textový řetězec s názvem souboru meteorologických dat. V tomto případě, kdy je blok *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)* používán jako podblok, byl textový řetězec uložen do proměnné *filename* definované v nadřazeném bloku. Tato proměnná je pak vstupním parametrem bloku *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*. Hodnoty parametrů uvedené na obr. 4.23 jsou hodnoty nastavené pro použití v ČR.



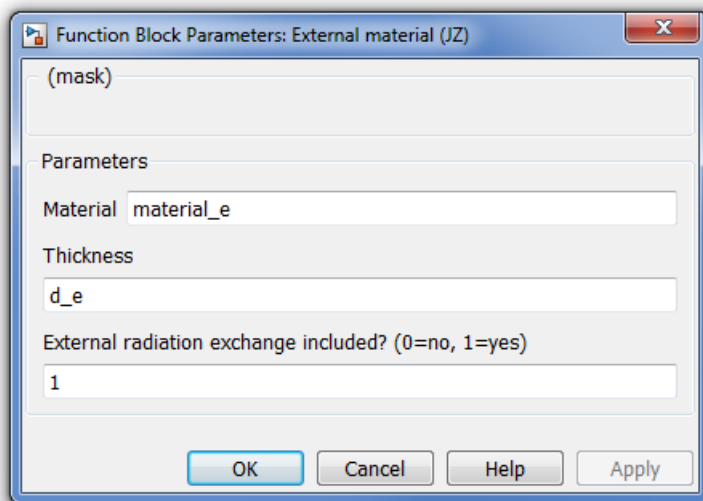
Obr. 4.23 – Vstupní parametry bloku *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*

4.5.3 Blok External material (JZ)

Blok *External material (JZ)* reprezentuje vrstvu konkrétního materiálu ve stěně, která sousedí s venkovním prostředím definovaným okolními meteorologickými podmínkami. Blok je vytvořen ze dvou hlavních podbloků – *External surface node / CTH* a *5 nodes*, který obsahuje 5 bloků *One node*. Vstupními prvky bloku jsou matice *Weather* a *Node* a výstupními prvky pak matice *Last node* a *Mon*. Tento blok je v knihovně HAM-Tools používán jako součást bloku *External wall, 2 materials (JZ)*, viz obr. 4.2. Model bloku *External material (JZ)* je znázorněn na obr. 4.25.

Obr. 4.24 – Blok *External material (JZ)*Obr. 4.25 – Model bloku *External material (JZ)*

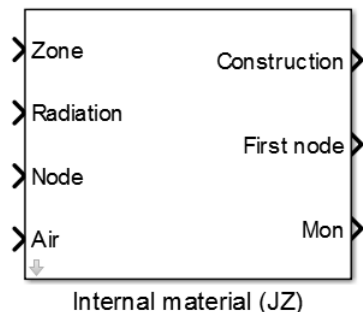
Vstupními parametry uvedeného bloku jsou materiál, tloušťka materiálu a údaj o zapnutí nebo vypnutí výpočtového mechanismu pro přenos vnějšího slunečního záření (pole *External radiation Exchange included?*). V případě uvedeném na obr. 4.26, kdy je blok *External material (JZ)* používán jako podblok, jsou první dva parametry zaváděny pomocí proměnných, jejichž hodnoty byly definovány v nadřazených blocích tohoto bloku.

Obr. 4.26 – Vstupní parametry bloku *External material (JZ)*

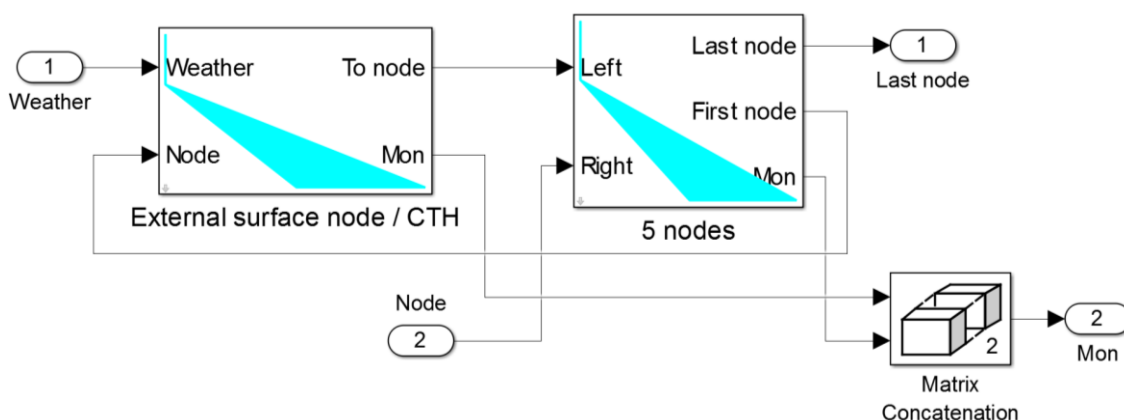
4.5.4 Blok *Internal material (JZ)*

Tento blok je analogický k bloku *External material (JZ)*. Reprezentuje vrstvu konkrétního materiálu ve stěně sousedící s vnitřním prostředím, které je definované vnitřními podmínkami (teplota, tlak, relativní vlhkost). Blok tvoří dva podbloky –

Internal surface node a 5 nodes, který obsahuje 5 bloků *One node*. Vstupními prvky bloku jsou matice *Zone*, *Radiation*, *Node* a *Air*, výstupními pak matice *Construction*, *First node* a *Mon*. Blok *Internal material (JZ)* je stejně jako blok *External material (JZ)* používán v bloku *External wall, 2 materials (JZ)*. Model bloku *Internal material (JZ)* je k dispozici na obr. 4.28.

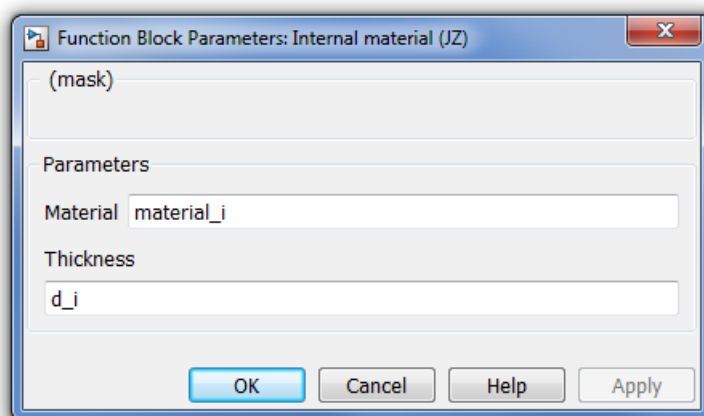


Obr. 4.27 – Blok *Internal material (JZ)*



Obr. 4.28 – Model bloku *Internal material (JZ)*

Vstupní parametry bloku *Internal material (JZ)* jsou materiál a tloušťka materiálu. Na obr. 4.29 je znázorněn případ, kdy je blok *Internal material (JZ)* použit jako podblok a uvedené parametry jsou stejně jako u předchozích dvou bloků zadávány pomocí proměnných definovaných v nadřazeném bloku.



Obr. 4.29 – Vstupní parametry bloku *Internal material (JZ)*

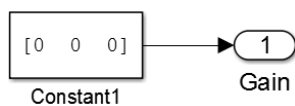
4.6 Výpočetní bloky skupiny GAINS

4.6.1 Blok No gains

Blok *No gains* je obdobou bloku *No ventilation*. Používá se v případech, kdy v simulaci nechceme uvažovat žádné tepelné zdroje. Blok nemá žádné vstupní prvky ani vstupní parametry, výstupním prvkem je matice *System* obsahující „nekonečné“ odpory a nulové konstanty – viz model bloku na obr. 4.31. Blok se spojuje s blokem *Room air CTH*.



Obr. 4.30 – Blok *No gains*



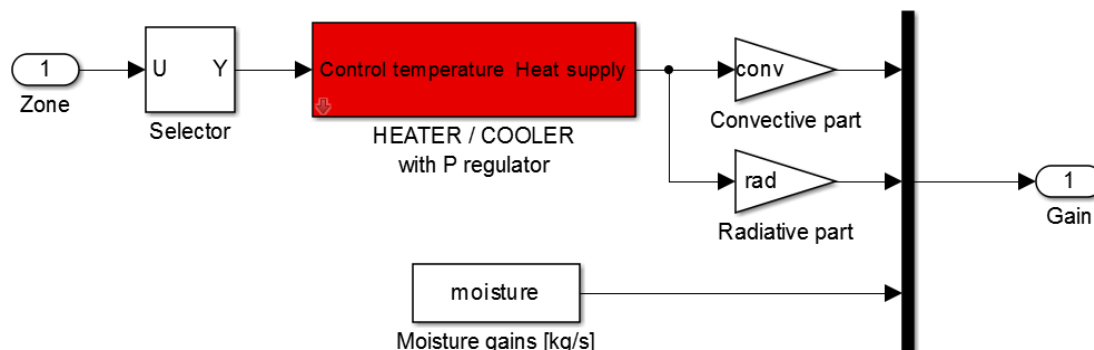
Obr. 4.31 – Model bloku *No gains*

4.6.2 Blok HAM gains (JZ)

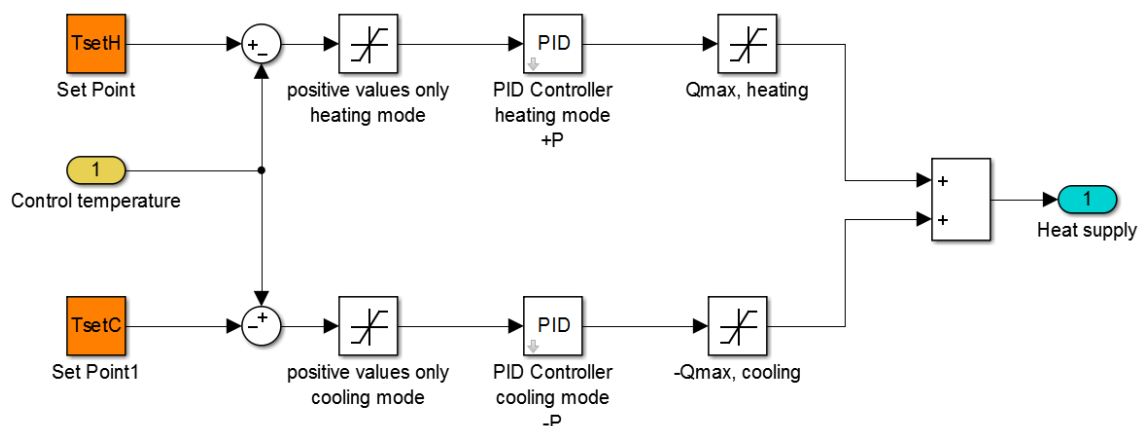
Uvedený blok slouží pro simulování zdrojů tepla, chladu a vlhkosti. Dodávka zdrojů tepla a chladu je řízena P regulátorem (příp. lze použít i PID regulátor). Zdroje vlhkosti jsou při simulacích prostřednictvím tohoto bloku uvažovány jako konstantní. Vstupním prvkem bloku je matice *Zone*, výstupním pak matice *Gain*. Na obr. 4.33 je uveden model bloku *HAM gains (JZ)*. Na obr. 4.34 je pak znázorněn model bloku *HEATER / COOLER with P regulator*, který je blíže popsán ve zdroji [11].



Obr. 4.32 – Blok *HAM gains (JZ)*



Obr. 4.33 – Model bloku *HAM gains (JZ)*

Obr. 4.34 – Model bloku *HEATER / COOLER* with *P* regulator

Function Block Parameters: HAM gains (JZ)

(mask)

Parameters

Set temperature for heating [°C]
20

Set temperature for cooling [°C]
26

P
1000

Maximum generated heat [W]
12000

Minimum generated heat (<0 for cooling) [W]
-5000

Convective part [-]
0.6

Radiative part [-]
0.4

Moisture gains [kg/s]
4*0.2/3600

OK Cancel Help Apply

Obr. 4.35 – Vstupní parametry bloku *HAM gains (JZ)*

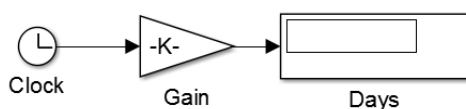
Vstupní parametry bloku *HAM gains (JZ)* jsou uvedeny na obr. 4.35. Patří mezi ně požadovaná teplota pro vytápění [°C] (pole *Set temperature for heating*), požadovaná teplota pro chlazení [°C] (pole *Set temperature for cooling*), hodnota parametru *P* pro *P* regulátor (pole *P*), maximální generované teplo [W] (pole *Maximum generated heat*), minimální generované teplo tedy teplo odebírané při chlazení [W]

(pole *Minimum generated heat*, <0 for cooling), konvektivní část dodávaného tepla [–] (pole *Convective part*) a radiační část dodávaného tepla [–] (pole *Radiative part*) a množství dodávané vlhkosti [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] (pole *Moisture gains*).

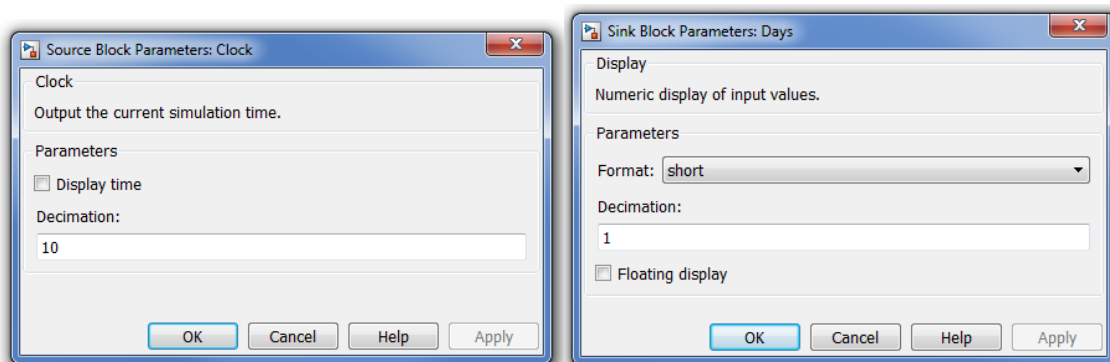
4.7 Ostatní bloky používané v simulacích

4.7.1 Bloky času simulace

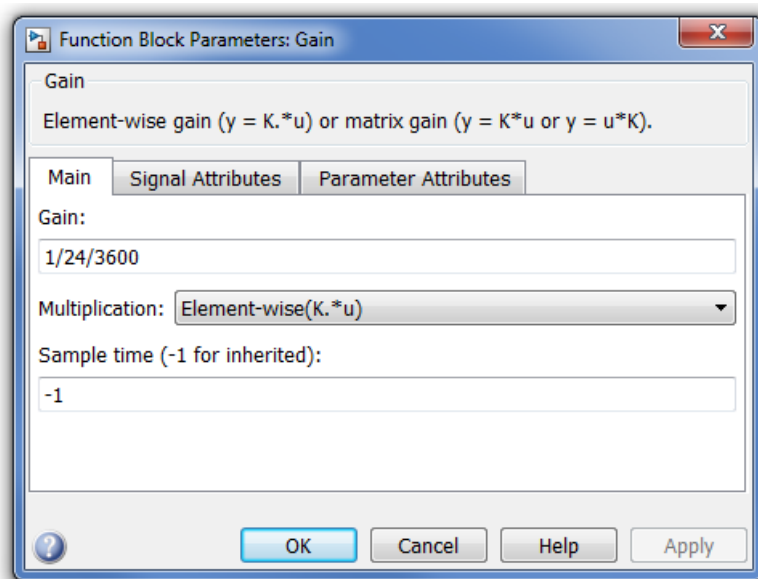
Blok *Clock* poskytuje v každém kroku simulace simulační čas v sekundách. Tento blok je užitečný pro ostatní bloky, které simulační čas využívají. Dalším blokem je blok *Gain*, který slouží pro vynásobení hodnoty času hodnotou ($1/24/3600$), tedy k převodu časových hodnot ze sekund na dny. Blok označený jako *Days* (původní název *Display*) slouží pro zobrazení času simulace ve dnech. Všechny bloky jsou součástí knihovny výpočetních bloků programu Simulink. Nastavení vstupních parametrů uvedených bloků je zobrazeno na obr. 4.34 a obr. 4.38.



Obr. 4.36 – Bloky času simulace



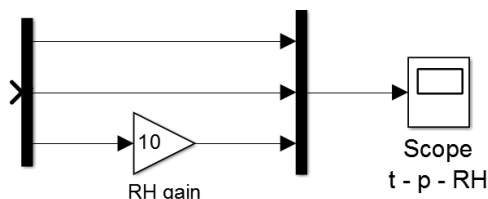
Obr. 4.37 – Vstupní parametry bloků *Clock* a *Days*



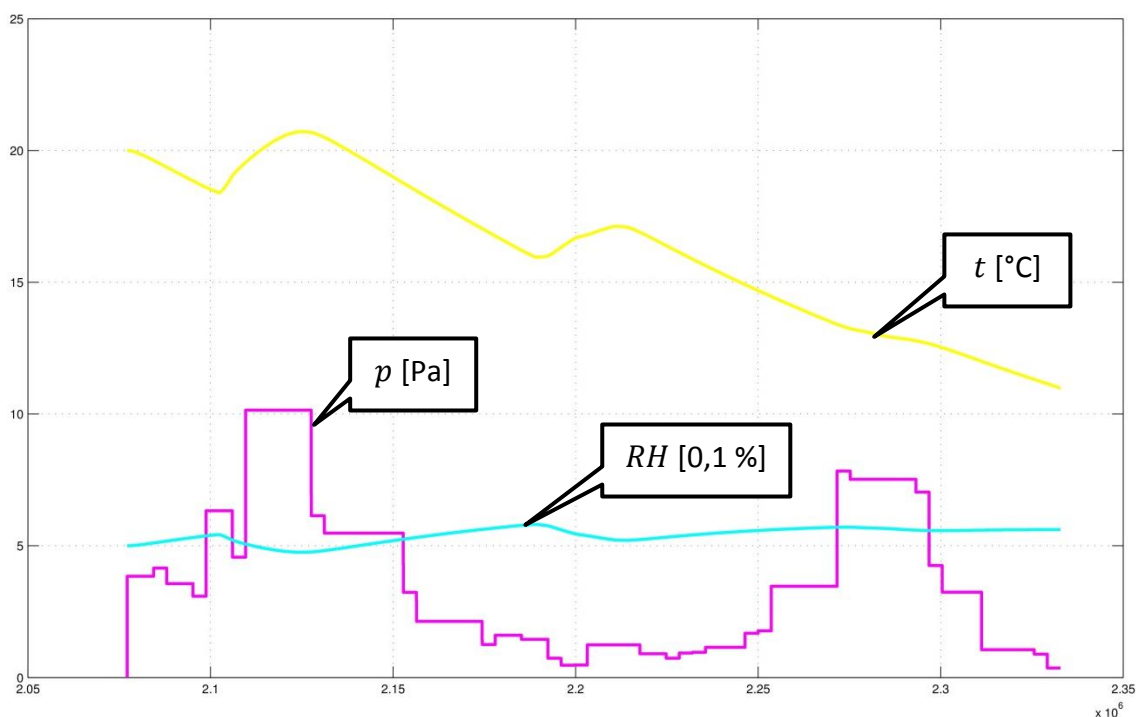
Obr. 4.38 – Vstupní parametry bloku *Gain*

4.7.2 Bloky pro vyobrazení průběhu veličin vnitřního prostředí

Pro zobrazení průběhu teploty, tlaku a relativní vlhkosti vzduchu uzavřeného uvnitř simulované zóny do grafu slouží soustava bloků vykreslená na obr. 4.39. Všechny bloky, které jsou součástí soustavy, lze získat z knihovny Simulinku. Pro správnou funkci soustavy je třeba přivést na vstupní šipku matici *Zone*, která je výstupním prvkem bloku *Room air CTH*. Po rozkliknutí bloku *Scope* se zobrazí graf průběhů uvedených veličin v závislosti na čase simulace, přičemž uvedená teplota je ve [°C], tlak v [Pa] a relativní vlhkost v [0,1 %] (hodnotě 10 v grafu odpovídá 100 % relativní vlhkosti). Názorná ukázka grafu, který lze získat použitím právě těchto bloků, je na obr. 4.40.



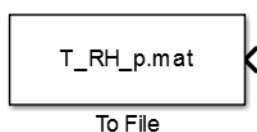
Obr. 4.39 – Bloky pro vyobrazení průběhu veličin vnitřního prostředí



Obr. 4.40 – Příklad grafu získaného ze simulace pomocí knihovny HAM-Tools

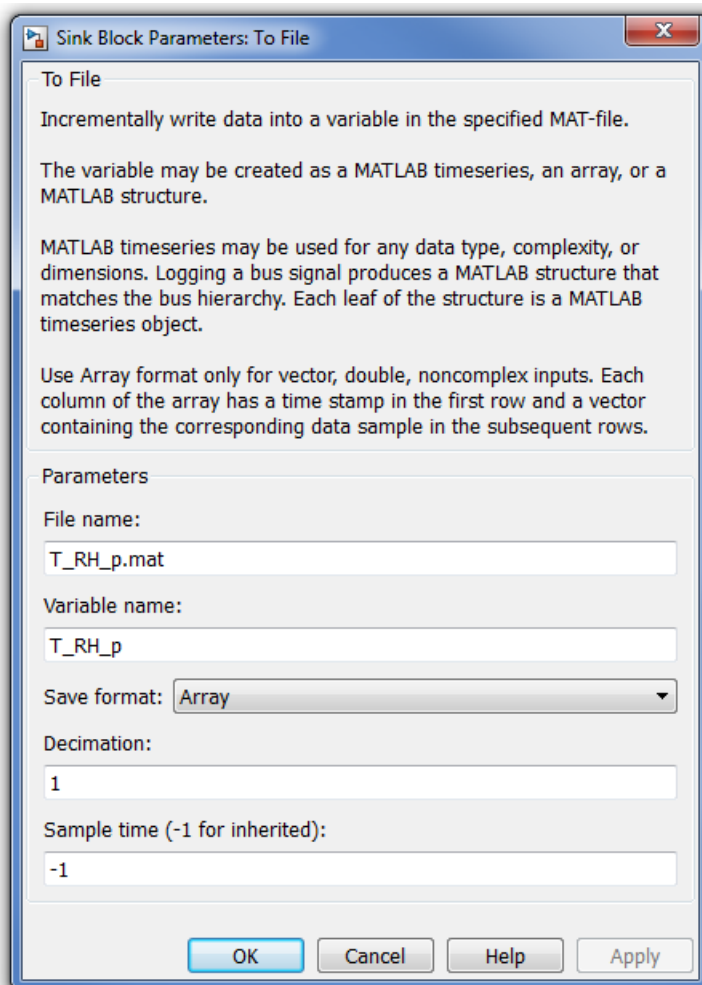
4.7.3 Blok pro uložení dat do souboru

Data ze simulace je někdy výhodné uložit do souboru. K tomu lze využít blok *To File*, který uloží data do MATLABovského souboru *.mat. Tento blok je součástí knihovny Simulinku a je znázorněn na obr. 4.41. Vstupním prvkem tohoto bloku je pro náš případ matice *Zone*. Ukázka použití bloku je předvedena na obr. 8.1 níže.



Obr. 4.41 – Blok *To File*

Na obr. 4.42 je znázorněno okno se vstupními parametry bloku *To File*. V tomto okně je třeba zadat zejména název souboru (pole *File name*), název proměnné (pole *Variable name*) a z roletového menu ukládaný formát (pole *Save format*). Ostatní parametry je výhodné ponechat v původním nastavení.



Obr. 4.42 – Vstupní parametry bloku *To File*

4.8 Funkce knihovny HAM-Tools

Funkce knihovny HAM-Tools *weatherconv.m*, *irradh.m*, *irrad.m* a *sun.m* jsou během simulací využívány výpočetním blokem *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*. Tyto funkce slouží k výpočtu intenzity přímého a difúzního slunečního záření na libovolně orientovanou a skloněnou plochu a k výpočtu úhlu dopadu přímého slunečního záření na tuto plochu.

Při výpočtech intenzity slunečního záření je třeba stanovit polohu slunce na obloze. Ta je závislá na zeměpisných souřadnicích a na souřadnicích poledníku, ke kterému je vztažen lokální čas. Tyto hodnoty byly ve funkcích nastaveny tak, aby odpovídaly použití v ČR. Zeměpisná šířka byla nastavena na 50°, zeměpisná délka na 15° a souřadnice poledníku, ke kterému je vztažen lokální čas na 15°. Jde tedy o stejné nastavení těchto parametrů jako v případě výpočetního bloku *Weather on surface with wind DTU+CTH (JZ)*.

5 SIMULACE JEDNOZÓNOVÉ OBÁLKY

Jedním z cílů práce je ukázka použití modifikované knihovny HAM-Tools při simulaci konkrétního rodinného domu. V této kapitole je demonstrováno použití knihovny při simulaci jednozónové obálky rodinného domu. Je zde uvedena stručná charakteristika pojmu obálky budovy, dále popis simulovaného objektu spolu s jeho 3D modelem a simulačním modelem jednozónové obálky, včetně podrobného přehledu nastavení jednotlivých výpočetních bloků. V poslední části je provedeno srovnání výsledků simulace jednozónové obálky, které byly dosaženy pomocí knihovny HAM-Tools, s výsledky simulace, jež byly získány v programu TRNSYS.

5.1 Pojem „obálka budovy“

Obálkou budovy je nazýván soubor teplosměnných konstrukcí na systémové hranici budovy nebo zóny, jež jsou vystaveny přilehlému prostředí (venkovní vzduch, přilehlá zemina atd.) Do tohoto souboru konstrukcí patří zejména obvodové stěny, okna, vstupní dveře, střecha, střešní okna a podlahy oddělující přilehlou zeminu a vnitřní prostředí budovy. Názorná ukázka obálky je k dispozici na obr. 5.1. [30], [31]



Obr. 5.1 – Obálka budovy – k vysvětlení pojmu [31]

5.2 Objekt pro simulaci jednozónové obálky

Pro simulaci v rámci diplomové práce byla vybrána novostavba rodinného domu v Bílovicích nad Svitavou. Jedná se o dvojdoměk bez podsklepení, se dvěma nadzemními podlažími a sedlovou střechou. Hlavní rozměry domu jsou délka 13,45 m, šířka 8,65 m a výška nejvyššího bodu střechy 7,6 m. Orientační půdorysné rozměry a plochy jednotlivých místností jsou uvedeny v tab. 5.1 a tab. 5.2. Výška stropu

v 1. nadzemním podlaží (1. NP) je 2,6 m a v 2. nadzemním podlaží (2. NP) 2,4 m. Sklon střechy domu je 30° vůči vodorovné rovině.

Tab. 5.1 – Orientační rozměry a plochy místností v 1. NP

Číslo	Místnost	Orientační rozměry [m] × [m]	Plocha [m ²]
1	Zádveří	1,5 × 5,0	7,3
2	Chodba	1,5 × 3,0	4,5
3	Závěť	1,5 × 0,5	0,75
4	Sprcha+WC	3,0 × 1,6	4,7
5	Garáž	3,0 × 5,2	15,6
6	Kuchyňský kout	2,8 × 3,0	8,2
7	Obývací pokoj	4,8 × 3,3 + 3,0 × 3,7	27,1
8	Pracovna	3,0 × 3,4	10,7
9	Schodiště	3,4 × 2,0	7,1
	Celkem 1.N.P.	13,5 × 8,7	86,0

Tab. 5.2 – Orientační rozměry a plochy místností v 2. NP

Číslo	Místnost	Orientační rozměry [m] × [m]	Plocha [m ²]
1	Chodba	1,5 × 3,4	5,1
2	Koupelna+WC	2,9 × 4,0	11,6
3	Šatna	1,6 × 2,7	4,3
4	Pokoj 1	4,8 × 3,2	15,3
5	Pokoj 2	4,6 × 3,2	14,8
6	Pokoj 3	4,6 × 3,6	16,7
7	Schodiště	3,4 × 2,0	6,9
	Celkem 2.N.P.	10,5 × 8,7	74,5

Výkresy svého domu poskytl Ing. Petr Porteš, Ph.D. Na jejich základě byl vytvořen 3D model objektu pro simulaci jednozónové obálky – viz obr. 5.2–5.5 a 3D model objektu pro simulaci dvouzónové obálky, kterou se blíže zabývá kapitola 6. Tyto modely jsou ze stavebního hlediska částečně zjednodušené, avšak pro účely znázornění zkoumaného objektu plně dostačující.

3D model pro simulaci jednozónové obálky sestává z prvků vnější konstrukce budovy, tedy ze stěn, oken, vstupních dveří, garážových vrat a střechy, přičemž vstupní dveře se v simulačních modelech považují za okno. Pro simulaci prvků téhož typu se stejnými materiálovými parametry, orientací a sklonem je v simulačních modelech použit pouze jeden výpočetní blok. To znamená, že například pro okna s orientací 250° a se sklonem vůči vodorovné rovině 90° je použit jediný výpočetní blok. Pro znázornění spojitosti mezi 3D modelem a simulačním modelem popsáním v podkapitole 5.3 jsou v obr. 5.2–5.5 uvedena také čísla povrchů (*Surface number*) konkrétních prvků stavební konstrukce, která korespondují s čísly povrchů použitými právě v simulačním modelu. V tab. 5.3 jsou pak pro přehlednost vypsány orientace, sklony a obsahy jednotlivých prvků stavební konstrukce. V případě vnějších stěn jsou z hlediska tepelného chování hlavními materiály Porotherm (tl. 0,3 m) a polystyren EPS (tl. 0,1 m). V případě střechy je to pak minerální vlna (tl. 0,21 m) a sádkartón (tl. 12,5 mm). Garážová vrata uvažujeme dřevěná (tl. 0,05 m). Okna uvažujeme z dvojskel, přičemž jedno sklo má

tloušťku 4 mm a součinitel prostupu tepla oknem je $1,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Tepelný odpor okna stanovený dle vztahu (4.2) je pak $0,55 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Tab. 5.3 – Prvky stavební konstrukce jednozónové obálky RD

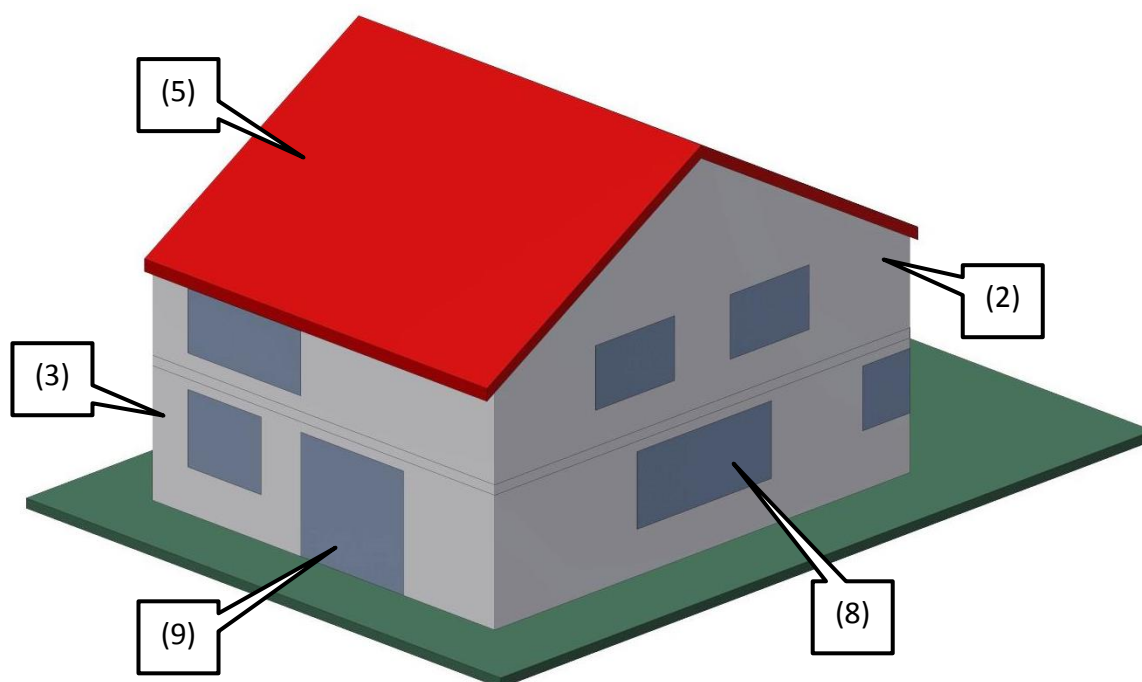
Číslo povrchu	Stavební prvek	Orientace (dle HAM-Tools)	Sklon	Obsah [m ²]
(1)	Vnější stěny	160°	90°	17,4
(2)	Vnější stěny	250°	90°	47,7
(3)	Vnější stěny	340°	90°	26,4
(4)	Střecha	160°	30°	65,0
(5)	Střecha	340°	30°	61,3
(6)	Garážová vrata	160°	90°	6,0
(7)	Okna, dveře	160°	90°	3,9
(8)	Okna	250°	90°	12,5
(9)	Okna	340°	90°	12,6

Jak bylo zmíněno výše, jedná se o dvojdoměk. Za předpokladu, že je v sousedním domě stejná teplota jako v našem simulovaném domě, platí, že stěna, která je přilehlá k sousednímu domu, ovlivňuje tepelné chování zkoumaného domu pouze svojí kapacitou. Pokud dále uvažujeme nahrazení vnitřního prostoru budovy jednou zónou a lze tedy předpokládat stejnou teplotu v celém tomto prostoru, pak i vnitřní stěny domu a případné vnitřní vybavení ovlivňují tepelné chování domu svojí kapacitou. Kapacita stěny přilehlé k sousednímu domu a kapacita vnitřních stěn je v simulačním modelu zohledněna přídatnou tepelnou kapacitou C . Její hodnota je pro simulační model jednozónové obálky $C = 32\,995 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$. Tato hodnota byla stanovena dle vztahu:

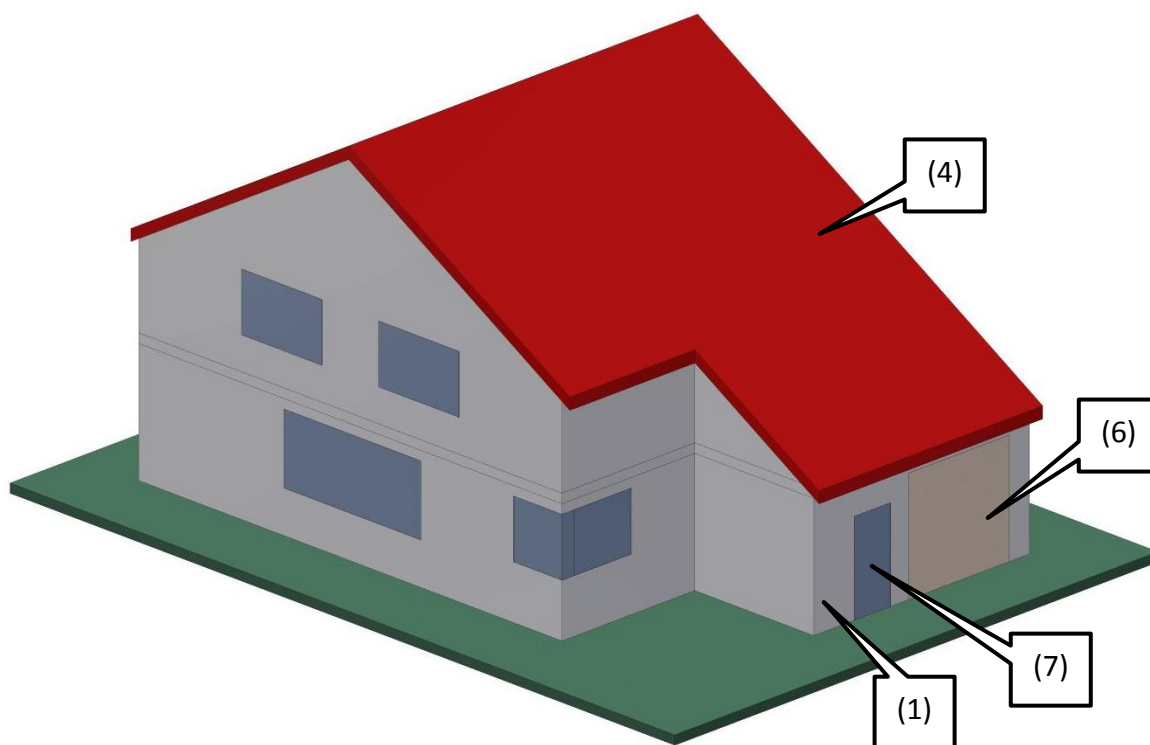
$$C = \sum_i c_i \cdot m_i = \sum_i c_i \cdot \rho_i \cdot V_i \quad [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.1)$$

kde c_i je měrná tepelná kapacita i-tého materiálu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 m_i hmotnost i-tého materiálu [kg],
 ρ_i hustota i-tého materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 V_i objem i-tého materiálu [m^3].

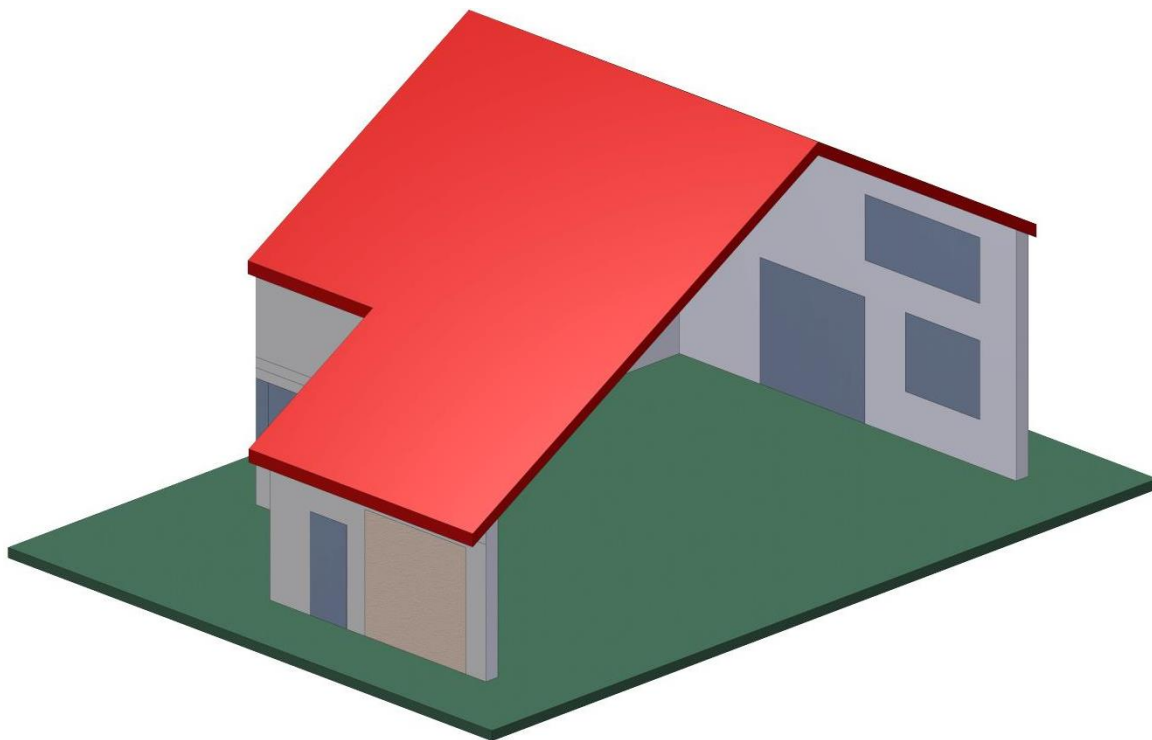
Dalším parametrem simulace je objem vnitřního prostoru, tj. objem zkoumané zóny. Model neuvažuje rozdělení vnitřního prostoru rodinného domu do více zón, nýbrž bere v úvahu pouze jedinou zónu, ve které je pak v průběhu simulace zkoumána teplota, tlak a relativní vlhkost vzduchu. Hodnota objemu simulované vnitřní zóny rodinného domu je 594 m^3 .



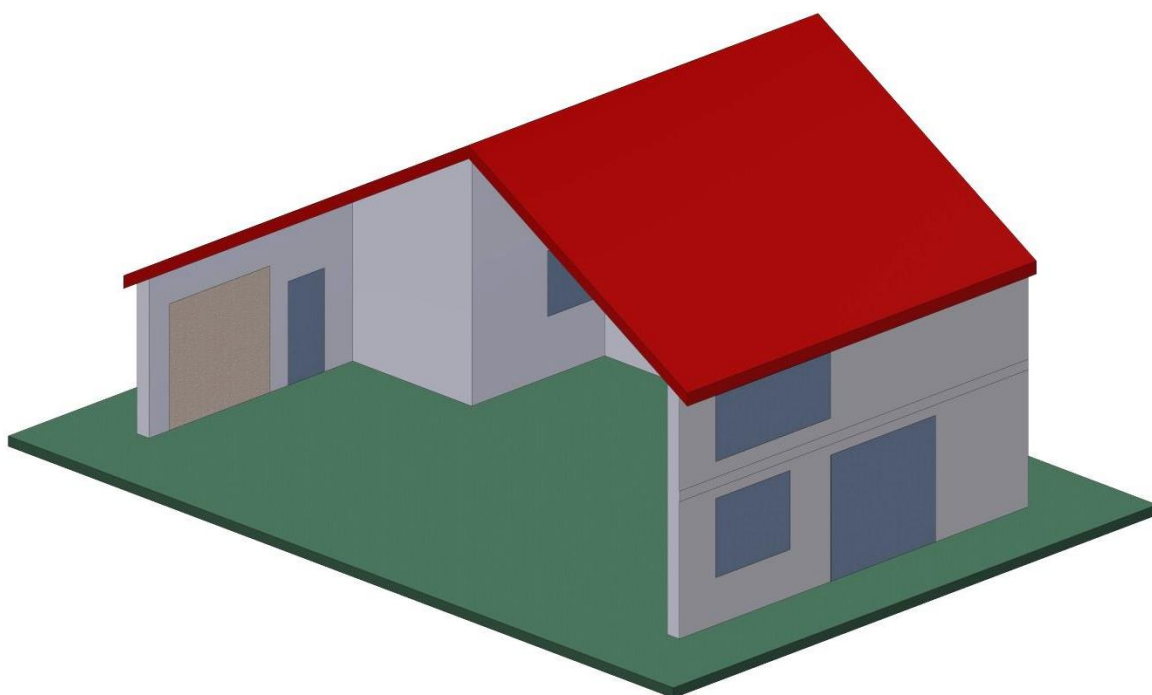
Obr. 5.2 – 3D model RD pro simulaci jednozónové obálky – pohled JV



Obr. 5.3 – 3D model RD pro simulaci jednozónové obálky – pohled SV



Obr. 5.4 – 3D model RD pro simulaci jednozónové obálky – pohled SZ



Obr. 5.5 – 3D model RD pro simulaci jednozónové obálky – pohled JZ

5.3 Simulační model jednozónové obálky - HAM-Tools

Parametry simulačního modelu vycházejí z parametrů výše uvedeného modelu rodinného domu. Model neuvažuje přívod venkovního vzduchu infiltrací ani větráním a prostupem (prodyšností) skrz póry stěn a střechy. Součinitele přestupu tepla a vlhkosti jsou zavedeny jako konstantní parametry. Hodnoty součinitelů přestupu tepla jsou voleny dle normy pro výpočet tepelného výkonu (tepelných ztrát)

ČSN EN 12831, tj. pro vnější povrch $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a pro vnitřní povrch $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Hodnoty součinitele přestupu vlhkosti jsou voleny jako nulové.

Simulační model jednozónové obálky je znázorněn na obr. 5.6. V levé části modelu jsou pod sebou seřazeny všechny bloky představující vnější obalovou konstrukci budovy. V prvním řádku popisu bloku je uveden název bloku, ve druhém pak v závorce číslo povrchu, jeho orientace, sklon a případně popis. V pravé horní části modelu se nachází blok pro zpracování meteorologických dat, pod ním bloky času simulace, dále blok vzduchu uvnitř zóny s připojenými bloky nulové ventilace a nulových zisků a konečně bloky pro vyobrazení průběhu sledovaných veličin vnitřního prostředí. Nastavení parametrů jednotlivých bloků je uvedeno v tab. 5.4–5.6. Soubor meteorologických dat *weatherdata.mat* obsahuje v tomto případě meteorologická data vybraných dní roku 2014, která byla získána ze stanice TUBO. Soubor materiálových dat *materialdata.mat* je totožný se souborem popsáním v kapitole 3.

Tab. 5.4 – Parametry bloků *External wall, 2 materials (JZ)* v modelu obálky RD

Blok	External wall, 2 materials (JZ)					
Doplňující popis bloku	(1), 160°, 90°	(2), 250°, 90°	(3), 340°, 90°	(4), 160°, 30° - roof	(5), 340°, 30° - roof	(6), 160°, 90° - garage door
Surface number	1	2	3	4	5	6
Convective heat transfer coeff.:						
- for outdoor surface [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	25	25	25	25	25	25
- for indoor surface [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	8	8	8	8	8	8
Convective vapor transfer coeff.:						
- for outdoor surface [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$]	0	0	0	0	0	0
- for indoor surface [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$]	0	0	0	0	0	0
Start temperature [°C]	20	20	20	20	20	20
Start rel. humidity [–]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Air flow active? (1 for yes, 0 for no)	0	0	0	0	0	0
Amplifier	1	1	1	1	1	1
Shading (0–1)	0	0	0	0	0	0
Weather data filename	'weatherdata.mat'					
Material data filename	'materialdata.mat'					
External material	Polystyrene EPS		RockWool39		Spruce	
External material thickness [m]	0.1	0.1	0.1	0.21	0.21	0.02
Internal material	POROTHERM		Plaster		Spruce	
Internal material thickness [m]	0.3	0.3	0.3	0.0125	0.0125	0.03

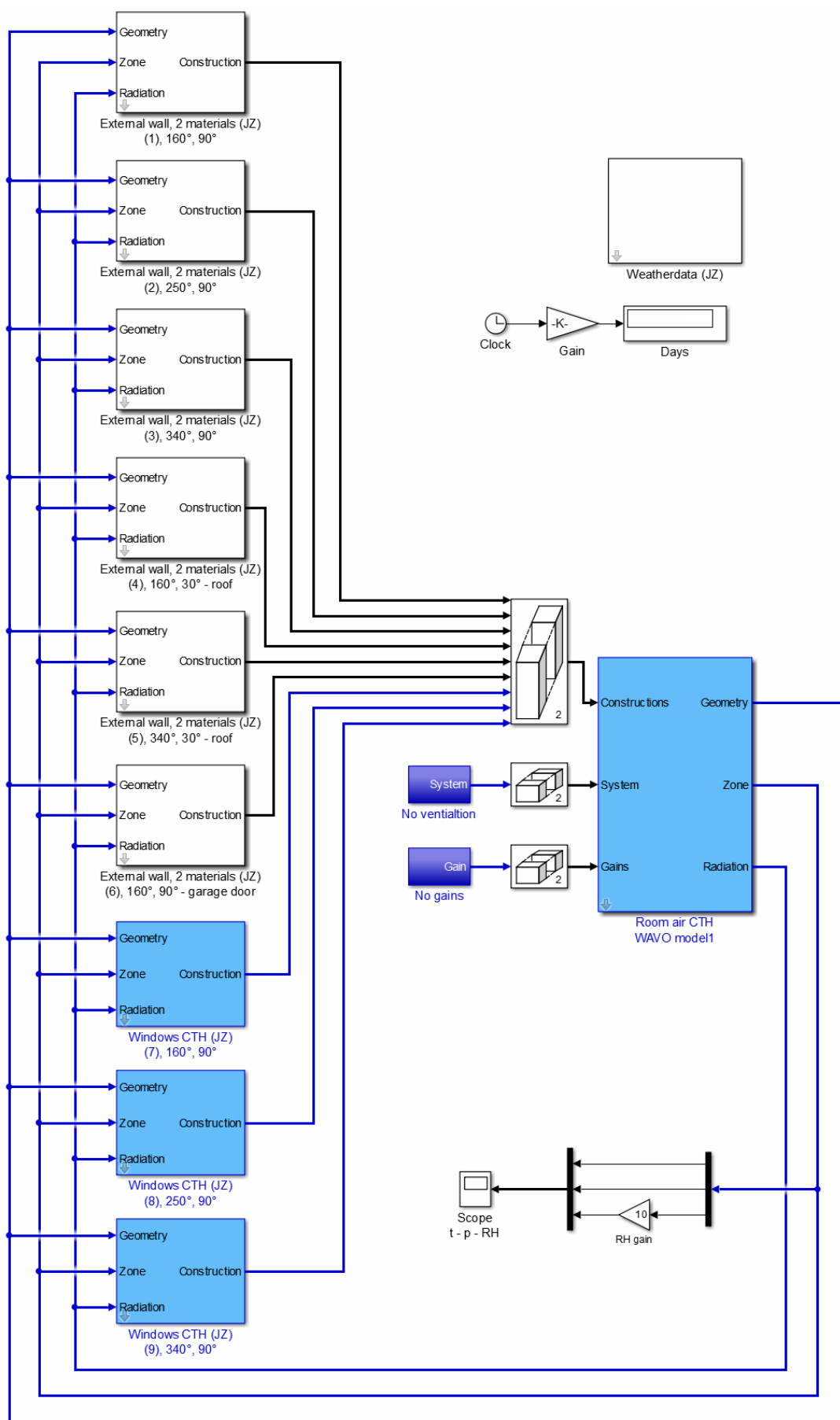
Tab. 5.5 – Parametry bloků *Windows CTH (JZ)* v modelu obálky RD

Blok	Windows CTH (JZ)		
Doplňující popis bloku	(7), 160°, 90°	(8), 250°, 90°	(9), 340°, 90°
Surface number	7	8	9
Convective heat transfer coeff.:			
- for outdoor surface [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	25	25	25
- for indoor surface [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	8	8	8
Start temperature [°C]	20	20	20
Window resistance [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]	0.55	0.55	0.55
Weather data filename	'weatherdata.mat'		
Material data filename	'materialdata.mat'		
Material (default: WindowGlass)	WindowGlass		
Material thickness [m]	2*0.004	2*0.004	2*0.004
Absorptivity (for the glazing)	0.05	0.05	0.05

Tab. 5.6 – Parametry bloku *Room air CTH* v modelu obálky RD

Blok	Room air CTH
Doplňující popis bloku	WAVO model1
Areas [m^2]	[17.4 47.7 26.4 65 61.3 6 3.9 12.5 12.6]
Orientations [°]	[160 250 340 160 340 160 160 250 340]
Tilts [°]	[90 90 90 30 30 90 90 90 90]
Room volume [m^3]	594
Initial conditions (temp., rel. humidity, air pressure) [°C, –, Pa]	[20 0.5 0]
Additional vol. heat and capacity [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$]	32995000
Convective fraction of solar gains [–]	0.3
Number of systems	1
Number of gains	1
Amplifier	1

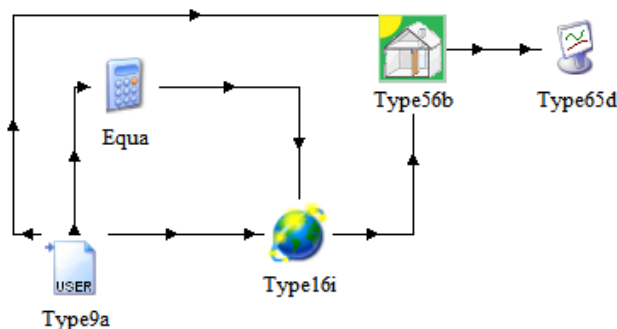
V této kapitole jsou provedeny celkem 4 simulace jednozónové obálky RD – pro 3 nejchladnější, nejteplejší, nejjasnější a nejzataženější po sobě jdoucí dny roku 2014. Nejchladnější a nejteplejší dny představují zástupce období extrémních meteorologických podmínek, nejjasnější a nejzataženější dny pak zástupce období přechodných meteorologických podmínek. Nejchladnější a nejteplejší dny byly stanoveny na základě třídních průměrů průměrných denních teplot. Nejjasnější a nejzataženější dny byly stanoveny z průměrných hodnot průzračnosti oblohy, rovněž pro tři po sobě následující dny. Data o průzračnosti oblohy byla získána z observatoře Masarykovy univerzity na Kraví hoře a poskytl je RNDr. Jan Janík, Ph.D. z Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Masarykovy univerzity. Po vyhodnocení všech dat bylo zjištěno, že nejchladnější dny roku 2014 jsou 25. – 27.1., nejteplejší pak 9. – 11.6., nejjasnější 11. – 13.3. a nejzataženější 16. – 18.5.



Obr. 5.6 – Simulační model jednozónové obálky RD v knihovně HAM-Tools

5.4 Simulační model jednozónové obálky – TRNSYS

Simulační model jednozónové obálky vytvořený v grafickém prostředí programu TRNSYS je znázorněn na obr. 5.7. V tomto programu se simulační model tvoří obdobně jako v prostředí Simulink, tedy přetažením výpočetních bloků z knihovny, jejich spojováním mezi sebou a nastavením vstupních parametrů jednotlivých bloků. Popisu vstupních parametrů a jejich hodnotám nebudeme nyní věnovat tolik pozornosti. Konstatujeme pouze, že jsou tyto parametry nastaveny tak, aby simulační model obálky vytvořený v TRNSYSu co nejvíce odpovídal simulačnímu modelu, který byl vytvořen pomocí knihovny HAM-Tools.



Obr. 5.7 – Simulační model jednozónové obálky RD v programu TRNSYS

Blok *Type9a* slouží k načtení meteorologických dat ze souboru *weatherdata.txt*. Náhled tohoto souboru je na obr. 5.8. Uvedený soubor byl vytvořen na základě souboru *weatherdata.mat* použitého v simulacích s knihovnou HAM-Tools, přičemž sloupce souboru *weatherdata.txt* odpovídají řádkům souboru *weatherdata.mat* a poslední sloupec souboru *weatherdata.txt* obsahuje relativní vlhkosti vzduchu.

Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápvěda								
580	-60	-76	0	0	0	270	0	0	0	-124	35	87
581	-58	-76	0	0	0	270	0	0	0	-128	22	85.6
582	-55	-79	0	0	0	270	0	0	0	-66	28	81.2
583	-55	-78	0	0	0	270	0	0	0	78	29	81.9
584	-60	-84	35	35	0	270	0	0	0	-8	39	81.2
585	-57	-83	157	156	2	270	0	0	0	25	35	79.8
586	-49	-85	258	253	18	270	0	0	0	72	34	73.2
587	-42	-99	351	338	37	270	0	0	0	-55	49	60.9
588	-36	-101	374	359	42	270	0	0	0	-3	45	56.9
589	-35	-99	351	338	38	270	0	0	0	6	43	57.4
590	-34	-99	274	267	25	270	0	0	0	-34	43	57
591	-35	-97	162	160	8	270	0	0	0	11	46	58.5
592	-43	-88	46	46	0	270	0	0	0	70	39	67.7
593	-54	-99	1	1	0	270	0	0	0	49	33	67.5
594	-68	-96	0	0	0	270	0	0	0	-125	29	78.2
595	-79	-107	0	0	0	270	0	0	0	-127	34	78.1

Obr. 5.8 – Náhled souboru meteorologických dat pro simulaci v TRNSYSu

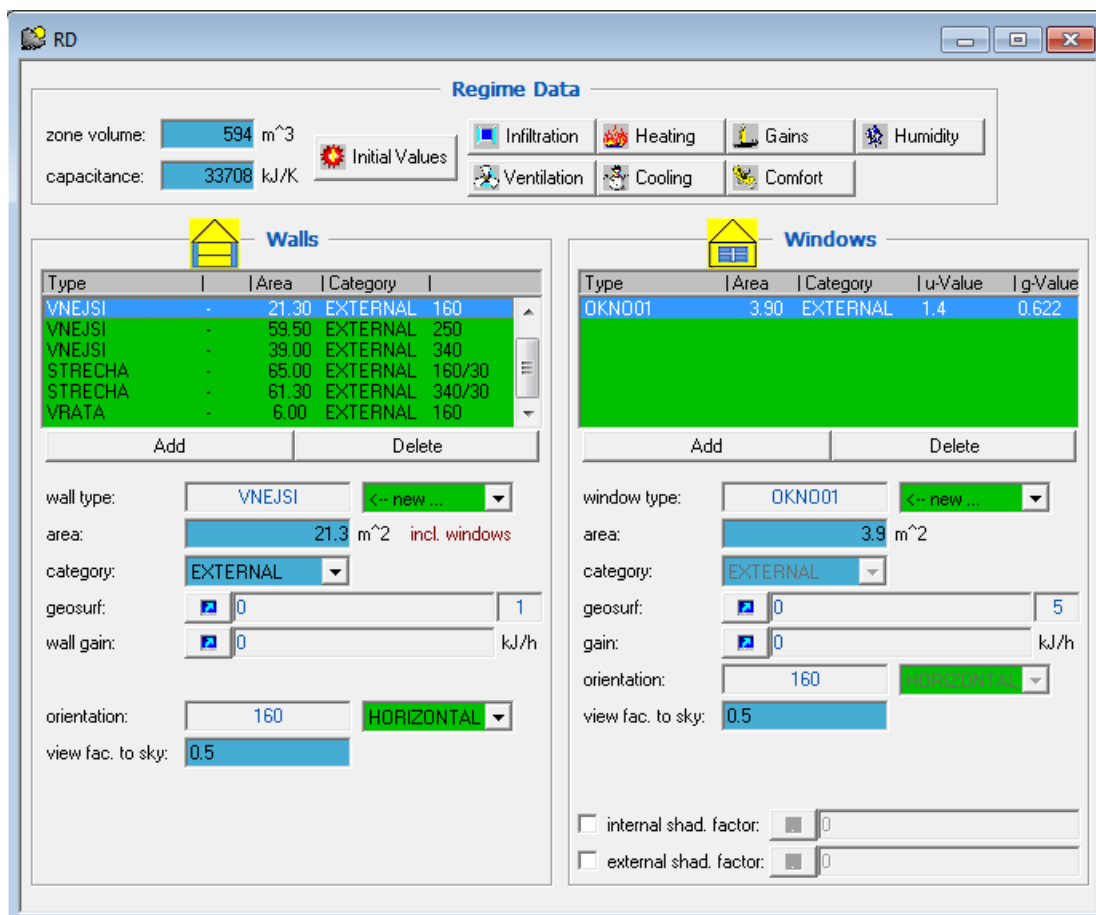
Blok *Type16i* slouží ke zpracování meteorologických dat a k jejich přepočtu, zejména pak k přepočtu slunečního záření na plochy simulovaného modelu, které jsou definovány orientací a sklonem jako vstupní parametry uvedeného bloku.

Blok *Equa* slouží pro převod intenzity slunečního záření z $[W \cdot m^{-2}]$ na $[kJ \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$, tedy pro převod intenzity slunečního záření z jednotek používaných v souboru meteorologických dat na jednotky používané programem TRNSYS.

Blok *Type56b* se používá k nastavení parametrů simulovaného objektu nebo zóny. Nastavují se zde parametry prvků vnější obalové konstrukce, vnitřních stěn,

parametry zdrojů tepla a chladu, větrání, parametry dalších vnitřních zdrojů atd. Náhled prostředí bloku *Type56b* spolu s nastavenými parametry pro simulaci jednozónové obálky RD je uveden na obr. 5.9.

Blok *Type65d* slouží v našem případě pro zobrazení průběhu teploty uvnitř simulovaného objektu.



Obr. 5.9 – Nastavení simulačního modelu jednozónové obálky RD v TRNBuild

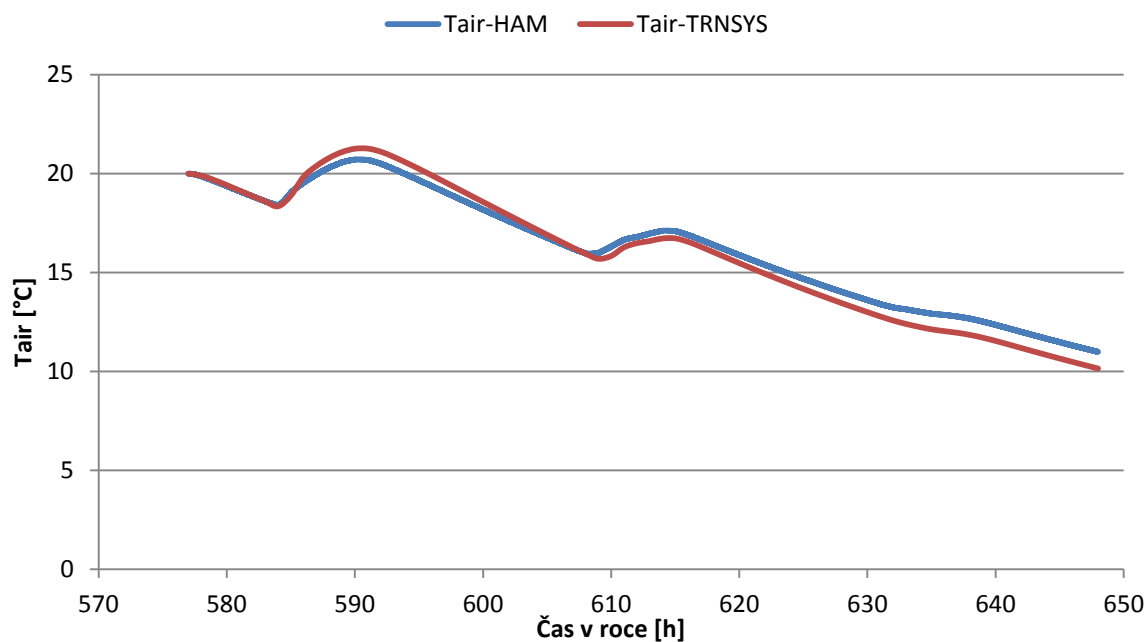
5.5 Porovnání výsledků simulace jednozónové obálky

Pokud bychom chtěli provést porovnání samotných simulačních nástrojů na odpovídající úrovni, je třeba velmi dobře rozumět oběma porovnávaným nástrojům a všem jejich funkcím, prvkům, nastavovaným parametrům atd. V našem případě provedeme pouze srovnání výsledků získaných při simulaci v knihovně HAM-Tools a v programu TRNSYS téhož rodinného domu v obou simulačních nástrojích.

V grafech na obr. 5.10–5.13 jsou vyobrazeny výsledky simulací z konkrétních dnů získané pomocí knihovny HAM-Tools a programu TRNSYS. Srovnáme-li výsledné průběhy teplot vzduchu uvnitř simulované zóny, které byly získány ze simulací v knihovně HAM-Tools a v programu TRNSYS, zjistíme, že uvedené průběhy jsou přibližně stejné. Odpovídající si lokální maxima i lokální minima se nachází přibližně ve stejných časech simulace a jejich hodnoty se liší jen minimálně. Totéž lze říci o konečných teplotách, kde rozdíly mezi hodnotami dosaženými pomocí knihovny HAM-Tools a pomocí programu TRNSYS nepřekračují 2 K. Lze tedy prohlásit, že výsledky dosažené při simulacích jednozónové obálky budovy popsané výše v této

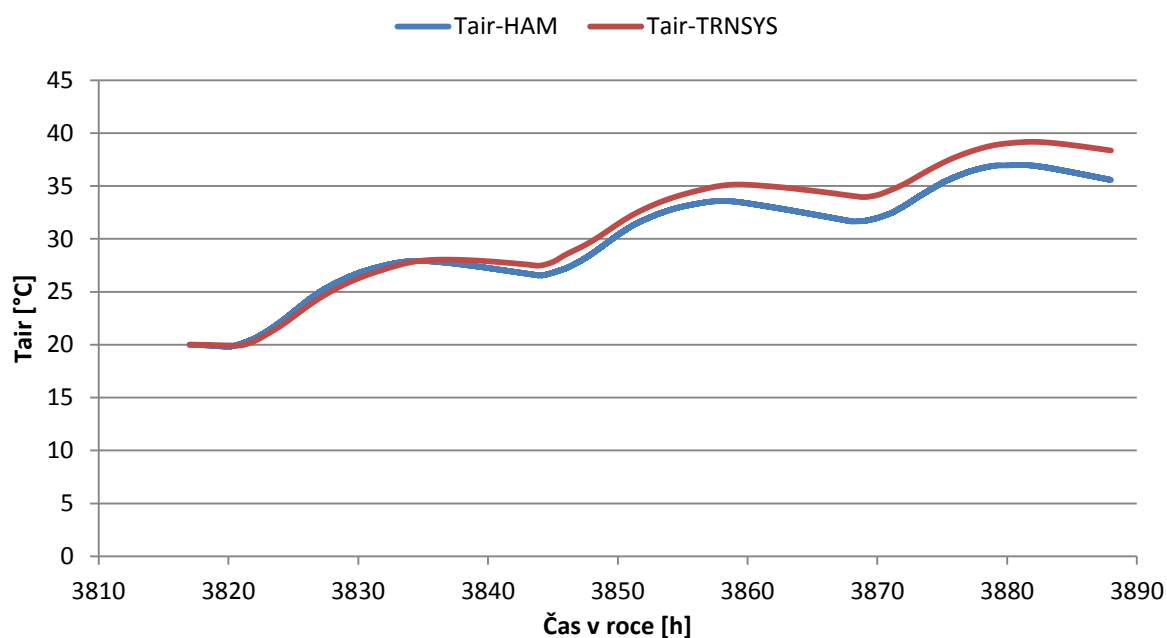
kapitole přibližně odpovídají výsledkům dosaženým při simulaci téže obálky pomocí programu TRNSYS.

Simulace jednozónové obálky - nejchladnější dny

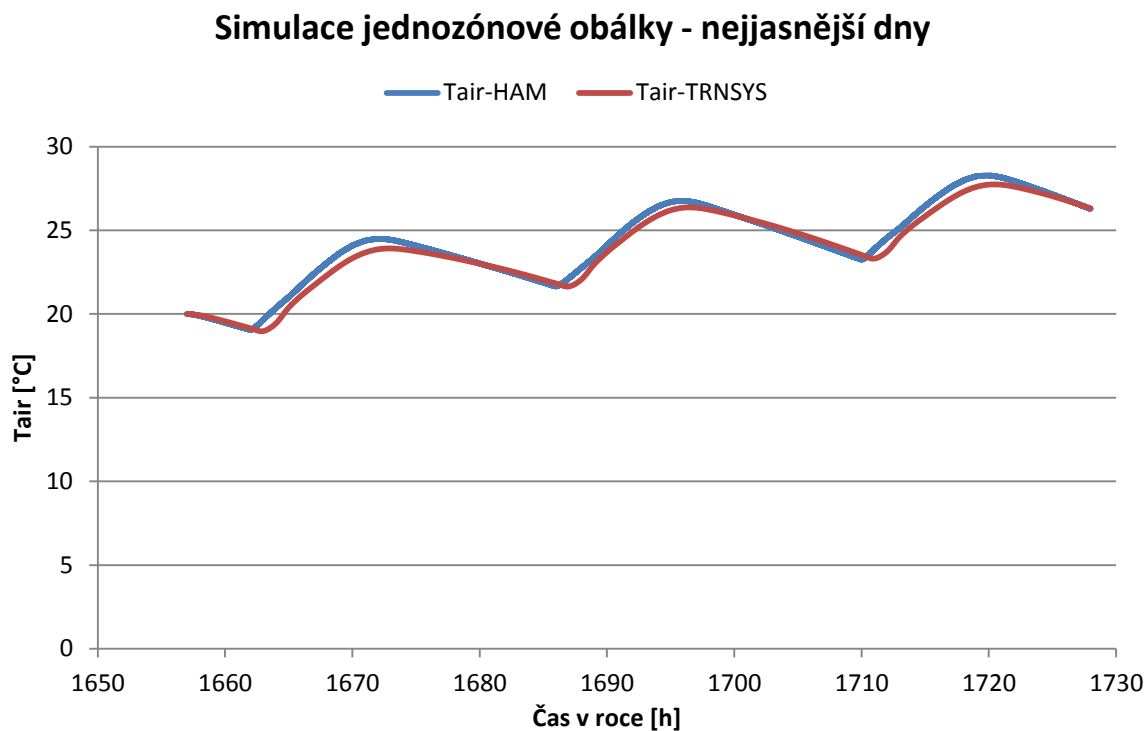


Obr. 5.10 – Simulace jednozónové obálky při nejchladnějších dnech

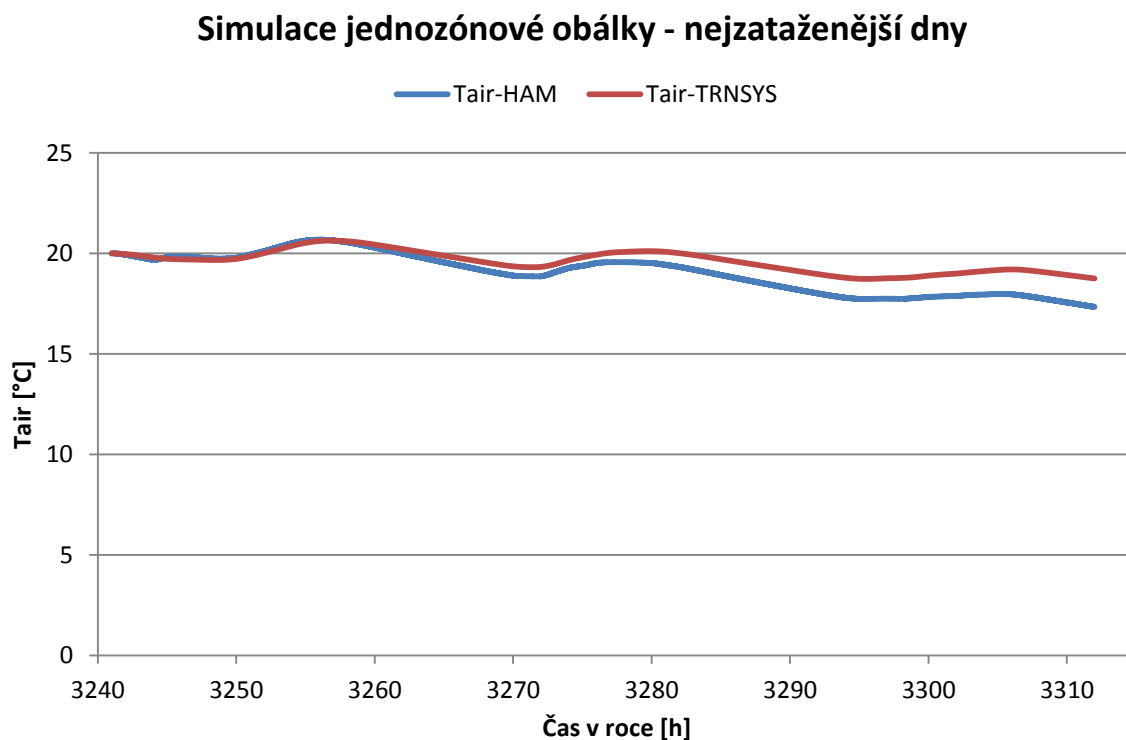
Simulace jednozónové obálky - nejteplejší dny



Obr. 5.11 – Simulace jednozónové obálky při nejteplejších dnech



Obr. 5.12 – Simulace jednozónové obálky při nejjasnějších dnech



Obr. 5.13 – Simulace jednozónové obálky při nejzataženějších dnech

6 SIMULACE DVOUZÓNOVÉ OBÁLKY

V této části práce je provedena ukázka použití upravené knihovny HAM-Tools při simulaci dvouzónové obálky. Výsledky dosažené prostřednictvím této simulace jsou stejně jako v případě simulace jednozónové obálky srovnány s výsledky simulace dvouzónové obálky dosaženými pomocí programu TRNSYS.

6.1 Objekt pro simulaci dvouzónové obálky

3D model rodinného domu pro simulaci dvouzónové obálky je znázorněn na obr. 6.1–6.4. Tento model odpovídá modelu domu pro simulaci jednozónové obálky, který je uveden v kapitole 5, pouze s tím rozdílem, že stavební konstrukce i vnitřní prostředí jsou rozděleny na 2 části přilehlé k jednotlivým zónám. Zóny jsou zvoleny tak, že 1. NP představuje zónu 1 (Z1) a 2. NP pak zónu 2 (Z2), přičemž tyto zóny jsou od sebe odděleny stropní (resp. podlahovou) konstrukcí. Pro simulaci prvků téhož typu, které jsou přilehlé ke stejné zóně a mají stejné materiálové parametry, orientaci a sklon, je v simulačních modelech vícezónové obálky použit pouze jeden výpočetní blok. Takže například pro okna ve 2. NP s orientací 250° a se sklonem vůči vodorovné rovině 90° je použit jediný výpočetní blok. Parametry všech stavebních konstrukcí simulačního modelu jsou totožné s parametry uvedenými v kapitole 5. Jediný rozdíl nastal ve zmíněném rozdělení na dvě zóny. Pro znázornění spojitosti mezi 3D modelem a simulačním modelem popsaným v podkapitole 6.2 jsou v obr. 6.1–6.4 uvedena čísla povrchů konkrétních prvků s popisem označujícím, zda prvek náleží k zóně 1 (Z1) či k zóně 2 (Z2). Tato čísla opět korespondují s čísly použitými v simulačním modelu. Orientace, sklony a obsahy jednotlivých prvků stavební konstrukce příslušících k odpovídajícím zónám jsou pro přehlednost uvedeny v tab. 6.1 a tab. 6.2. Složení stěn, střechy, garážových vrat a oken odpovídá složení popsanému v podkapitole 5.2.

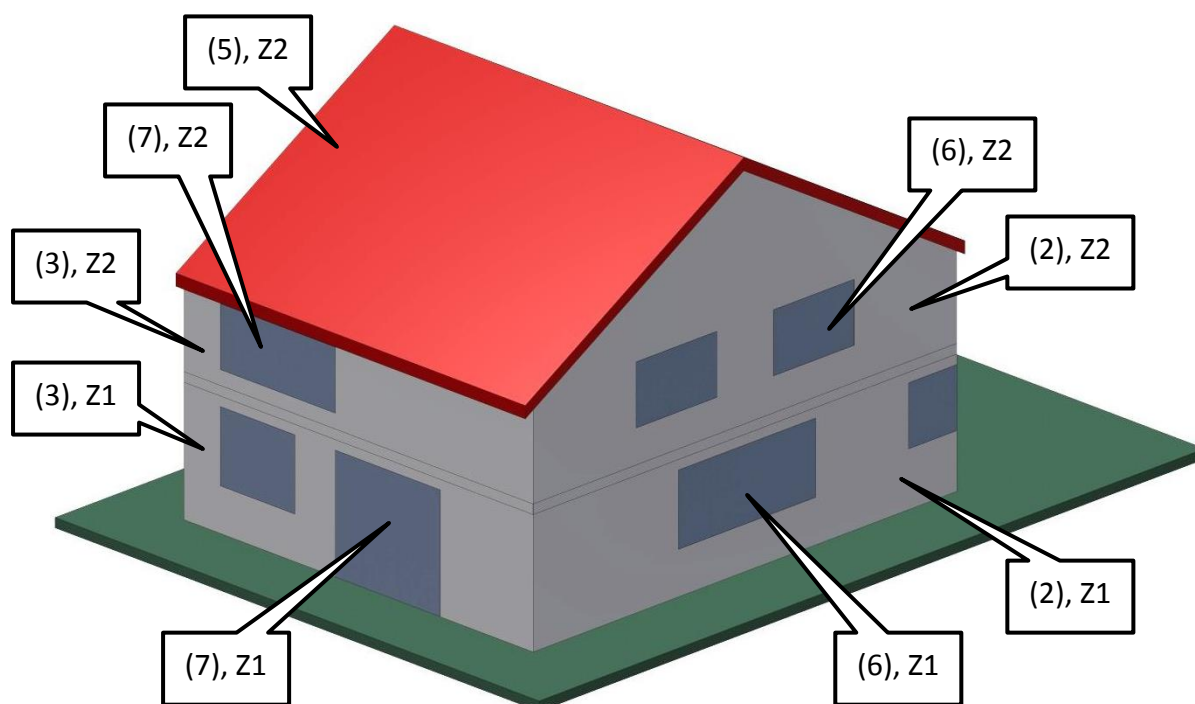
Stejně jako v případě simulačního modelu jednozónové obálky je i do modelu dvouzónové obálky zahrnut vliv stěny společné se sousedním RD a vliv vnitřních stěn. Kapacita stěny přilehlé k sousednímu domu a kapacita vnitřních stěn je v zóně 1 zohledněna přídatnou tepelnou kapacitou C_1 , jejíž hodnota je $C_1 = 21\,967 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$ a v zóně 2 přídatnou tepelnou kapacitou C_2 , jejíž hodnota je $C_2 = 11\,028 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tab. 6.1 – Prvky stavební konstrukce dvouzónové obálky RD – zóna 1

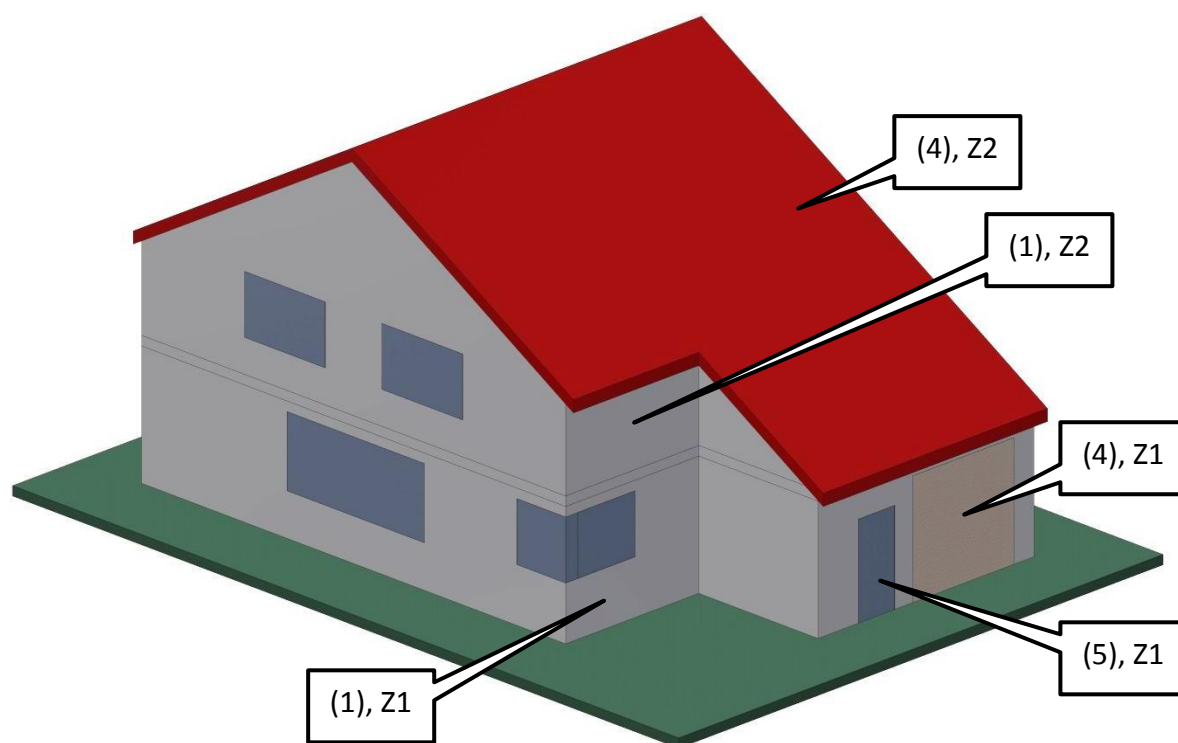
Číslo povrchu, zóna	Stavební prvek	Orientace (dle HAM-Tools)	Sklon	Obsah [m^2]
(1), Z1	Vnější stěny	160°	90°	12,5
(2), Z1	Vnější stěny	250°	90°	27,5
(3), Z1	Vnější stěny	340°	90°	13,5
(4), Z1	Garážová vrata	160°	90°	6,0
(5), Z1	Okna, dveře	160°	90°	3,9
(6), Z1	Okna	250°	90°	7,5
(7), Z1	Okna	340°	90°	9,0
(8), Z1, Z2	Strop	0°	0°	94,0

Tab. 6.2 – Prvky stavební konstrukce dvouzónové obálky RD – zóna 2

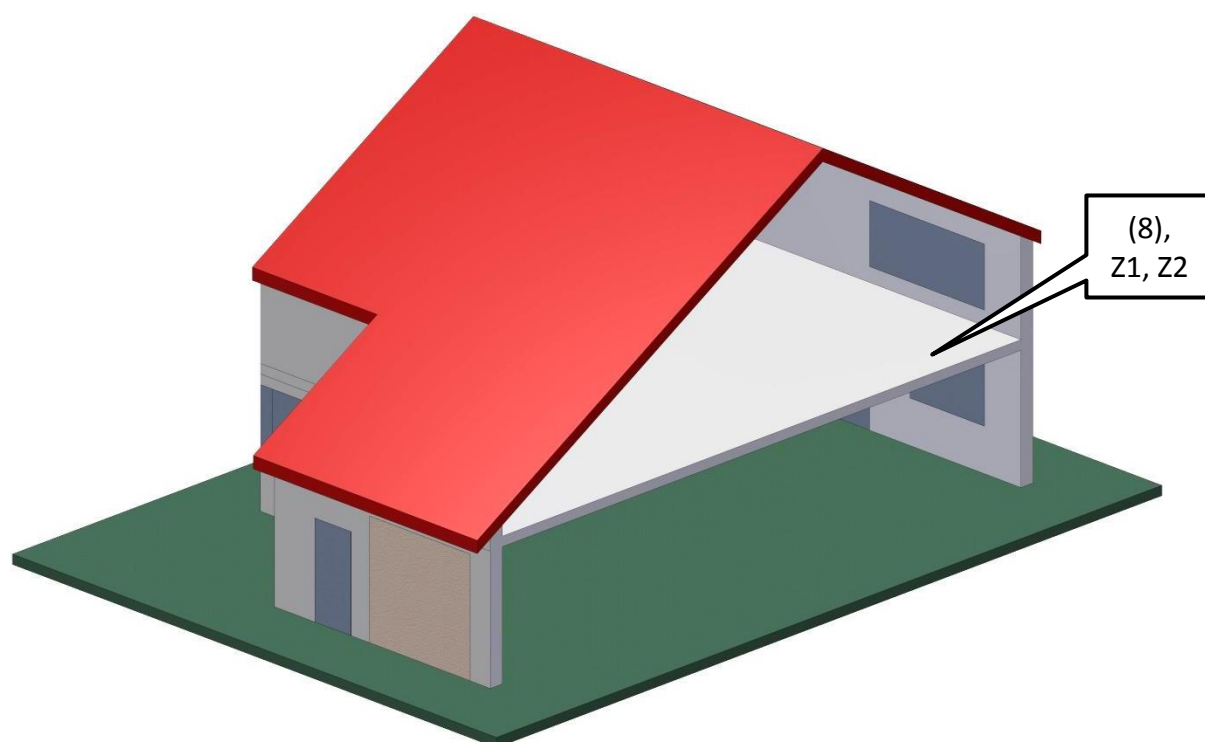
Číslo povrchu, zóna	Stavební prvek	Orientace (dle HAM-Tools)	Sklon	Obsah [m ²]
(1), Z2	Vnější stěny	160°	90°	4,9
(2), Z2	Vnější stěny	250°	90°	20,2
(3), Z2	Vnější stěny	340°	90°	12,9
(4), Z2	Střecha	160°	30°	65,0
(5), Z2	Střecha	340°	30°	61,3
(6), Z2	Okna	250°	90°	5,0
(7), Z2	Okna	340°	90°	3,6
(8), Z1, Z2	Strop	0°	0°	94,0



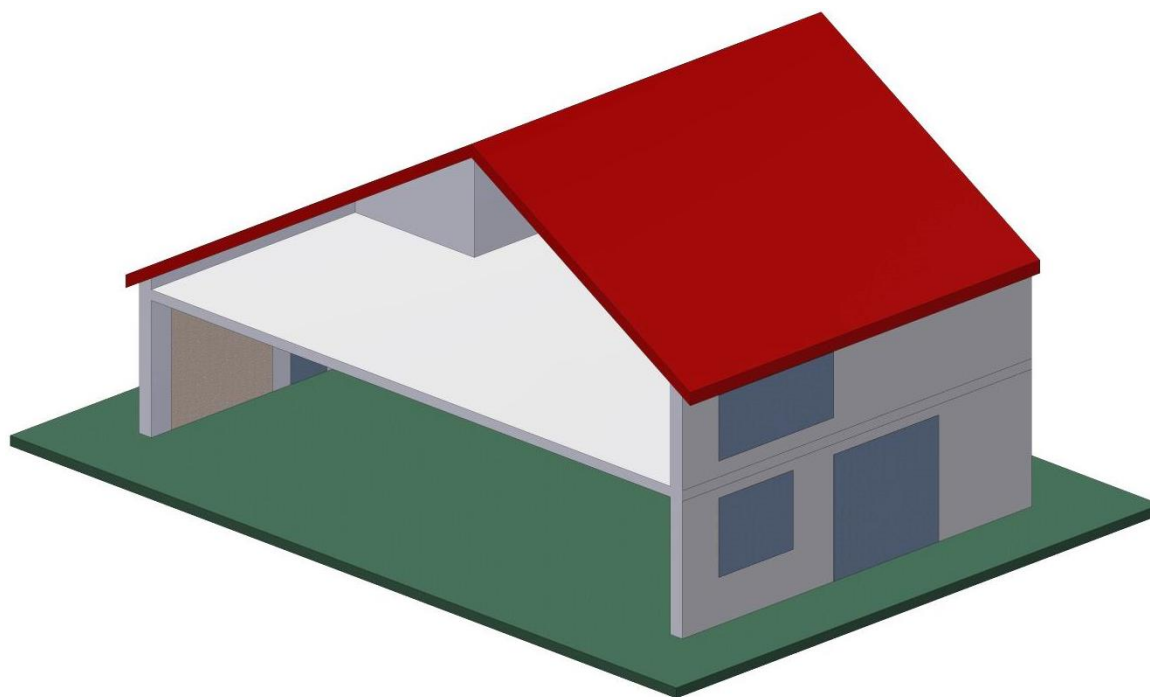
Obr. 6.1 – 3D model RD pro simulaci dvouzónové obálky – pohled JV



Obr. 6.2 – 3D model RD pro simulaci dvouzónové obálky – pohled SV



Obr. 6.3 – 3D model RD pro simulaci dvouzónové obálky – pohled SZ



Obr. 6.4 – 3D model RD pro simulaci dvouzónové obálky – pohled JZ

6.2 Simulační model dvouzónové obálky – HAM-Tools

Parametry simulačního modelu vycházejí z parametrů modelu rodinného domu popsaného výše. Stejně jako v případě jednozónového modelu tento model neuvažuje přívod venkovního vzduchu infiltrací ani větráním a prostupem skrz póry stěn a střechy. Součinitele přestupu tepla a vlhkosti mají rovněž stejné hodnoty jako v případě simulace jednozónové obálky.

Simulační model dvouzónové obálky je znázorněn na obr. 6.5. Obrázek je otočený o 90°. Pokud se na něj podíváme ze směru původního natočení, vidíme v levé části modelu bloky představující zónu 1, v pravé části pak bloky představující zónu 2 a mezi nimi blok reprezentující stropní konstrukci. O výpočetních blocích uvedených na obr. 6.5 a jejich popiscích platí to, co bylo napsáno v podkapitole 5.3 o blocích z obr. 5.6. Parametry bloků *External wall, 2 materials (JZ)* zastupujících stěny, konstrukci střechy a vrata a parametry bloků *Window CTH (JZ)* jsou v tomto modelu vyjma čísel povrchu stejné jako v případě modelu jednozónové obálky. Nastavení parametrů u bloků *Room air CTH* pro jednotlivé zóny je uvedeno v tab. 6.3 a tab. 6.4. V tab. 6.5 jsou uvedeny parametry bloku *Internal Wall (JZ)*, který reprezentuje stropní konstrukci. Pro simulaci dvouzónové obálky byly použity stejné soubory meteorologických a materiálových dat jako v případě simulace v kapitole 5. Simulace byly provedeny také pro stejné dny – nejchladnější, nejteplejší, nejjasnější a nejzataženější 3 po sobě jdoucí dny roku 2014.

Tab. 6.3 – Parametry bloku *Room air CTH* – zóna 1

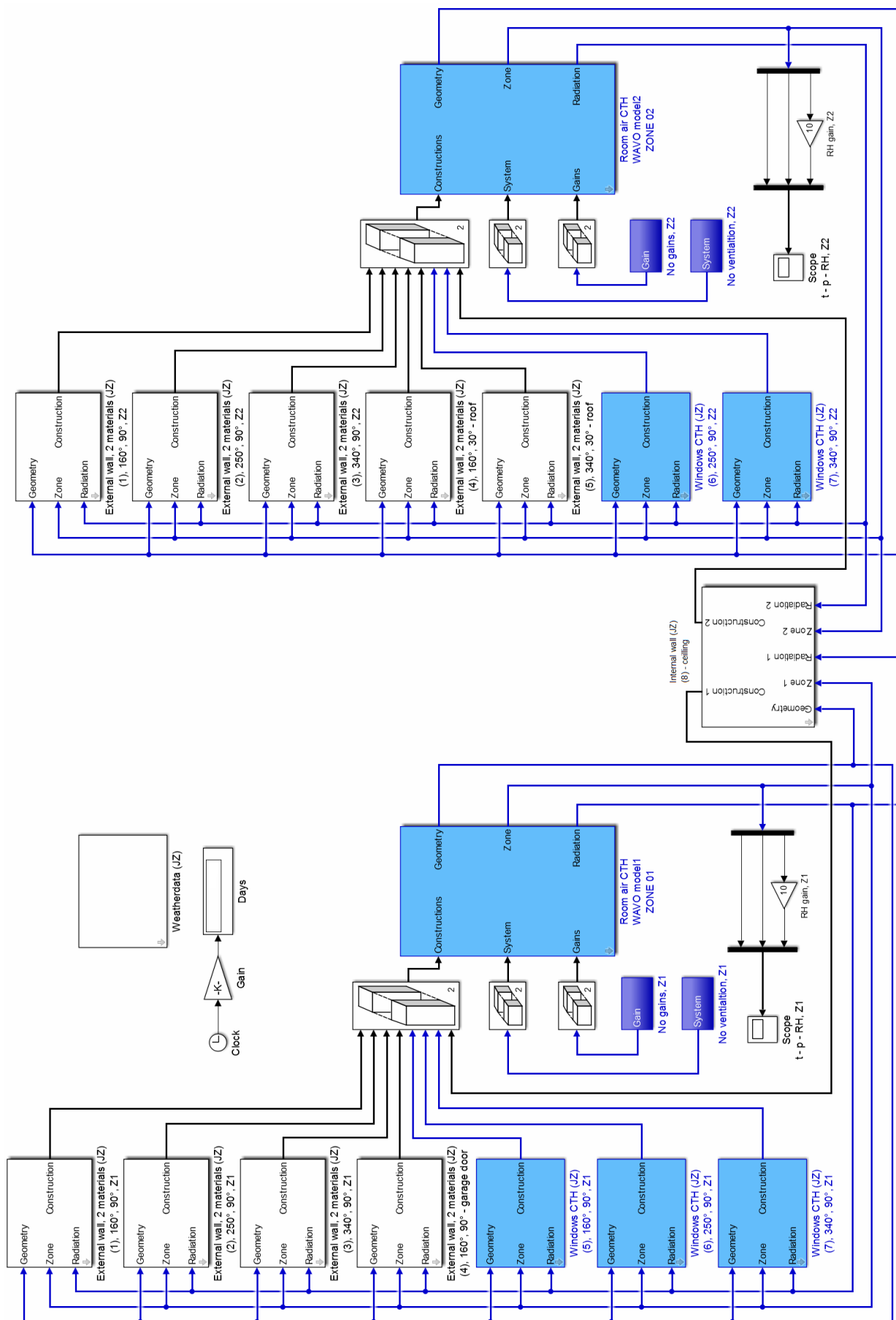
Zóna 1: Blok	Room air CTH
Doplňující popis bloku	ZONE 01
Areas [m ²]	[12.5 27.5 13.5 6 3.9 7.5 9 94]
Orientations [°]	[160 250 340 160 160 250 340 0]
Tilts [°]	[90 90 90 90 90 90 90 0]
Room volume [m ³]	223
Initial conditions (temp., RH, air press.) [°C, –, Pa]	[20 0.5 0]
Additional vol. heat and capacity [J·K ⁻¹]	21967000
Convective fraction of solar gains [–]	0.3
Number of systems	1
Number of gains	1

Tab. 6.4 – Parametry bloku *Room air CTH* – zóna 2

Zóna 2: Blok	Room air CTH
Doplňující popis bloku	ZONE 02
Areas [m ²]	[4.9 20.2 12.9 65 61.3 5 3.6 94]
Orientations [°]	[160 250 340 160 340 250 340 0]
Tilts [°]	[90 90 90 30 30 90 90 0]
Room volume [m ³]	232
Initial conditions (temp., RH, air press.) [°C, –, Pa]	[20 0.5 0]
Additional vol. heat and capacity [J·K ⁻¹]	11028000
Convective fraction of solar gains [–]	0.3
Number of systems	1
Number of gains	1

Tab. 6.5 – Parametry bloku *Internal Wall (JZ)* - společný pro zónu 1 a 2

Zóna 1+2: Blok	Internal Wall (JZ)
Doplňující popis bloku	(8) - ceiling
Surface number	8
Convective heat transfer coeff.:	
- for outdoor surface [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	8
- for indoor surface [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	8
Convective vapor transfer coeff.:	
- for outdoor surface [kg·s ⁻¹ ·m ⁻² ·Pa ⁻¹]	0
- for indoor surface [kg·s ⁻¹ ·m ⁻² ·Pa ⁻¹]	0
Start temperature [°C]	20
Start rel. humidity [–]	0.5
Air flow active? (1 for yes, 0 for no)	0
Amplifier	1
Material data filename	'materialdata.mat'
External material	Concrete
External material thickness [m]	0.075
Central material	RockWool39
Central material thickness [m]	0.1
Internal material	Concrete
Internal material thickness [m]	0.075



Obr. 6.5 – Simulační model obálky RD v knihovně HAM-Tools – dvouzónový

6.3 Simulační model dvouzónové obálky – TRNSYS

Samotný simulační model dvouzónové obálky vytvořený v grafickém simulačním prostředí programu TRNSYS se nijak neliší od modelu jednozónové obálky, který je uveden na obr. 5.7 v kapitole 5.4. Zásadněji se simulační model liší až v části TRNBuild, kde bylo třeba vytvořit novou zónu a nastavit nové hodnoty parametrů. Náhled nastavení simulačního modelu dvouzónové obálky je znázorněn na obr. 6.6 a obr. 6.7. Všechny parametry simulačního modelu byly opět nastaveny tak, aby simulační model dvouzónové obálky vytvořený v programu TRNSYS co nejvíce odpovídal simulačnímu modelu, který byl vytvořen pomocí knihovny HAM-Tools.

Regime Data

zone volume: 223 m³
 capacitance: 22234.5 kJ/K

Walls

Type	Area	Category
Additional Windows		
VNEJSI	12.50	EXTERNAL 160
VNEJSI	27.50	EXTERNAL 250
VNEJSI	13.50	EXTERNAL 340
VRATA	6.00	EXTERNAL 160
PODLAHA	94.00	ADJACENT 2NP

Add Delete

wall type: VNEJSI <-- new ...
 area: 12.5 m² incl. windows
 category: EXTERNAL
 geosurf: 0 10
 wall gain: 0 kJ/h
 orientation: 160 HORIZONTAL
 view fac. to sky: 0.5

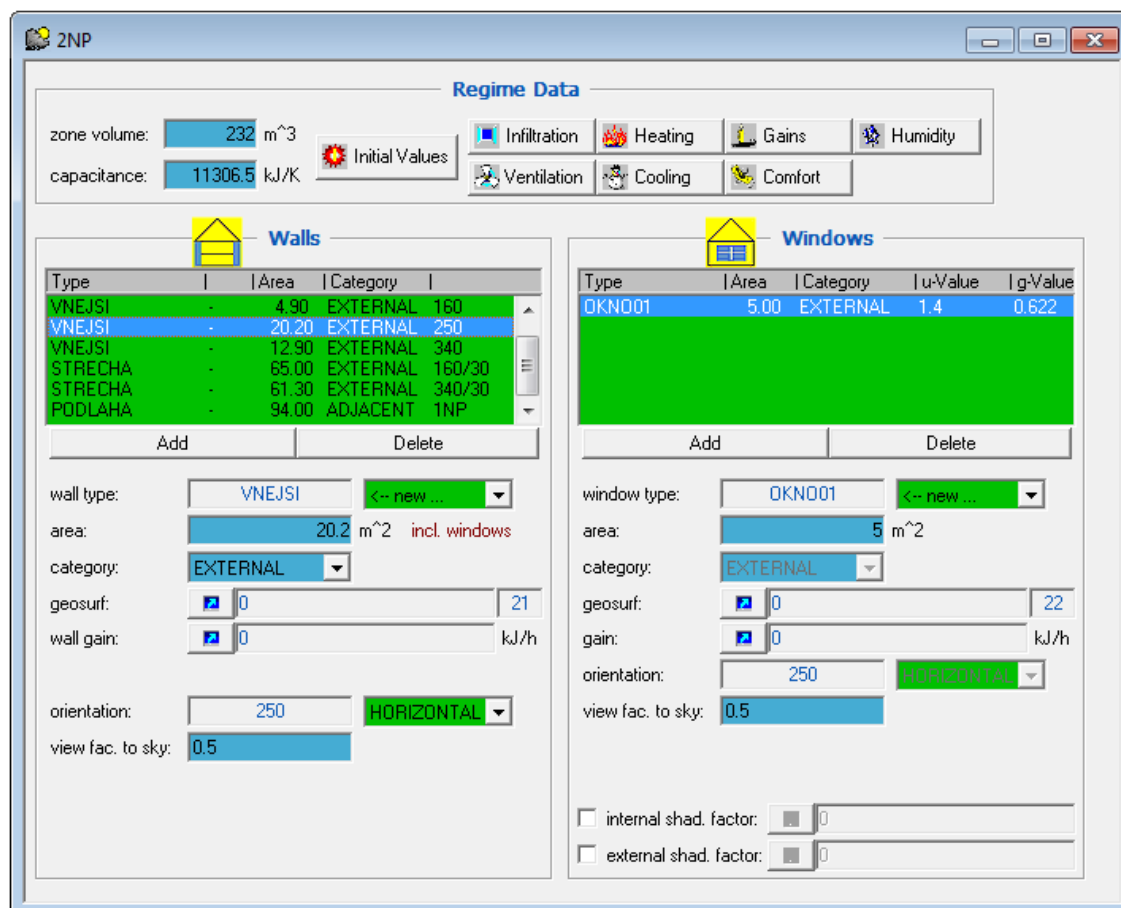
Windows

Type	Area	Category	u-Value	g-Value
OKND01	3.90	EXTERNAL	1.4	0.622

Add Delete

window type: OKND01 <-- new ...
 area: 3.9 m²
 category: EXTERNAL
 geosurf: 0 11
 gain: 0 kJ/h
 orientation: 160 HORIZONTAL
 view fac. to sky: 0.5
☐ internal shad. factor: 0
☐ external shad. factor: 0

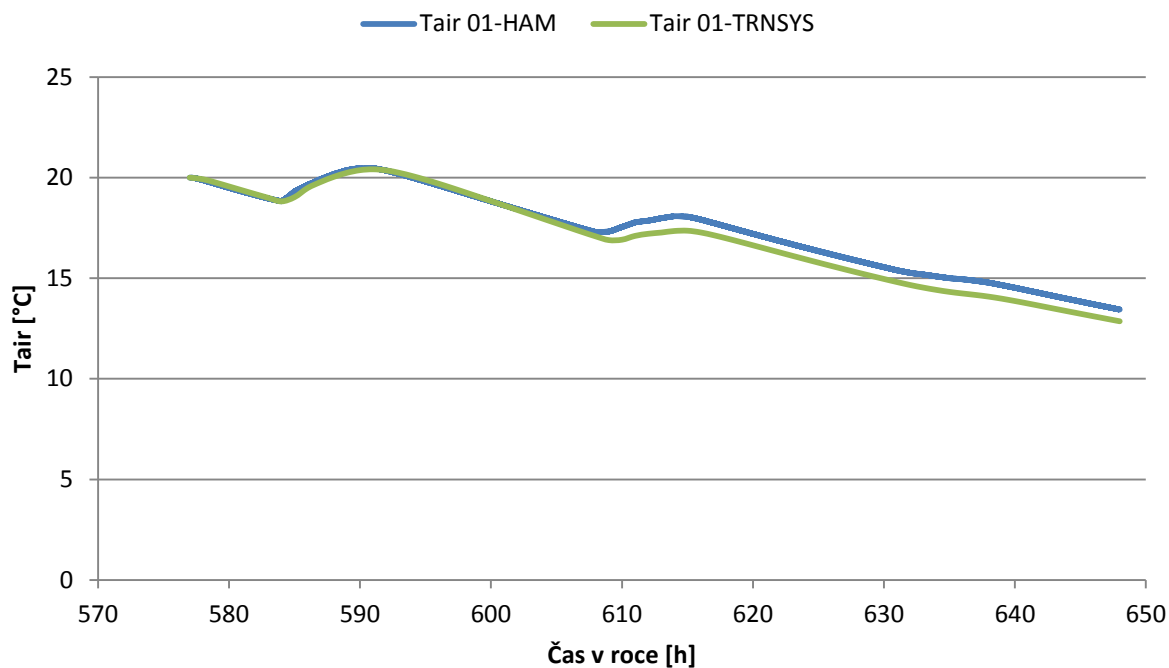
Obr. 6.6 – Nastavení modelu dvouzónové obálky RD v TRNBuild – zóna 1



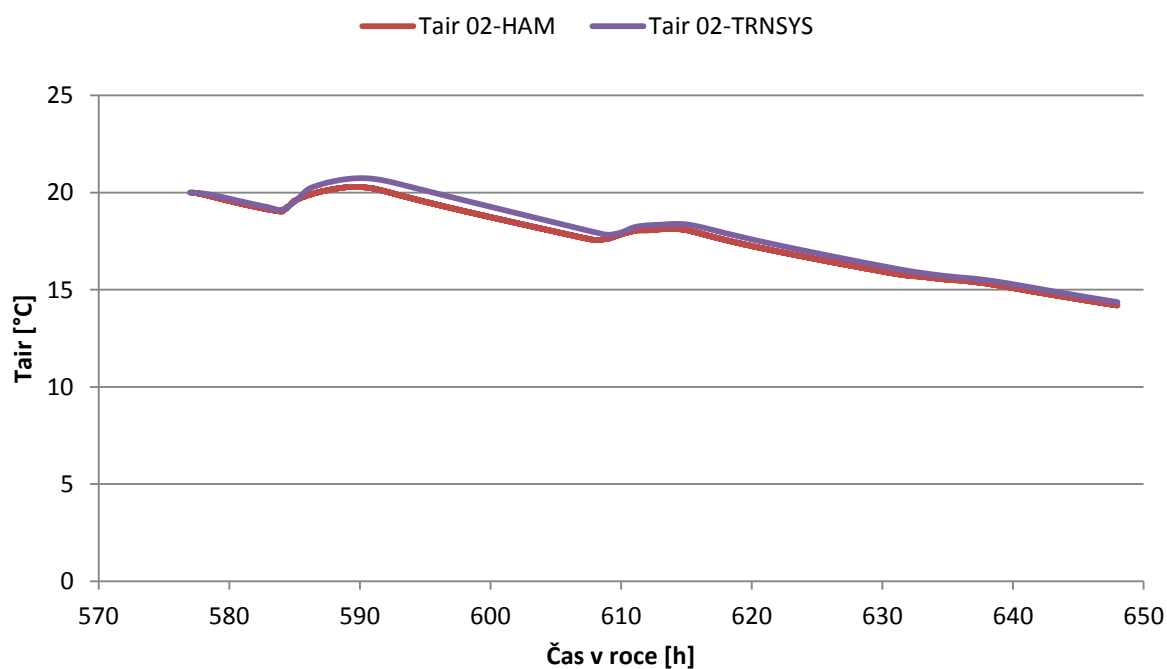
Obr. 6.7 – Nastavení modelu dvouzónové obálky RD v TRNBuild – zóna 2

6.4 Porovnání výsledků simulace dvouzónové obálky

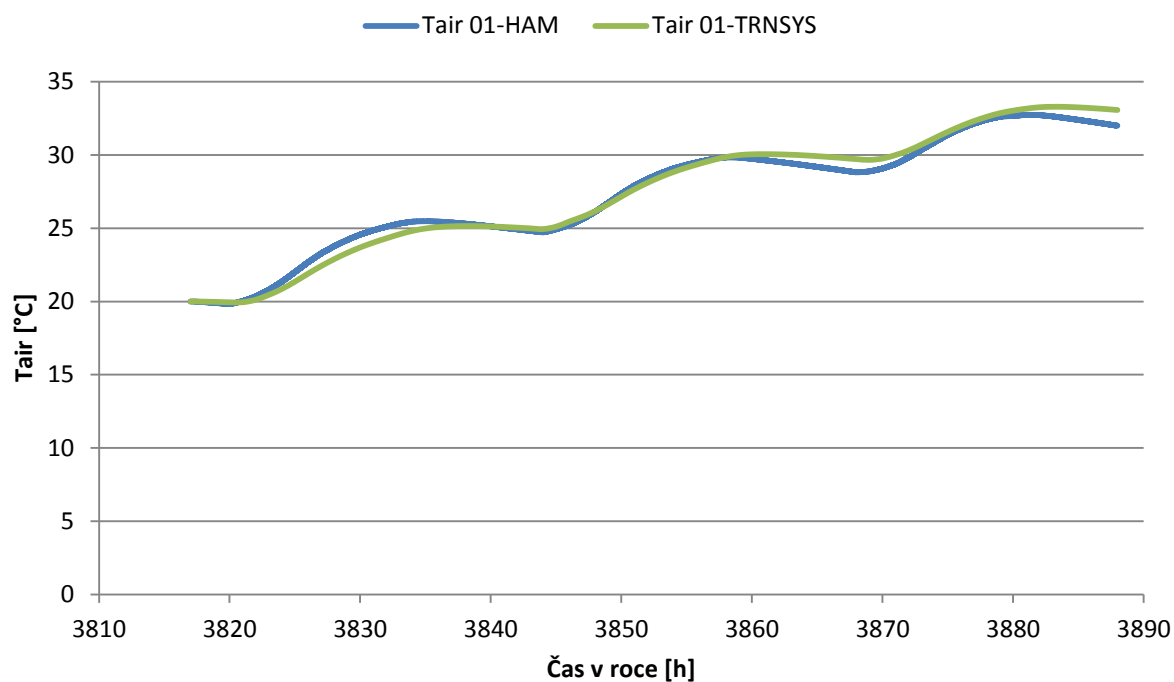
Výsledky simulací získané pomocí knihovny HAM-Tools a programu TRNSYS jsou pro jednotlivé zóny a jednotlivé časové úseky vyobrazeny v grafech na obr. 6.8–6.15. Pokud provedeme srovnání výsledných průběhů teplot získaných ze simulací v knihovně HAM-Tools a v programu TRNSYS pro odpovídající si zóny a odpovídající si dny, zjistíme, že tyto průběhy jsou si opět velmi podobné. Odpovídající si lokální maxima i lokální minima (pro simulaci odpovídajících si zón a dnů) se také v případě simulací dvouzónové obálky nacházejí přibližně ve stejných časech simulace, přičemž rozdíly mezi jejich hodnotami jsou opět minimální. Rozdíly mezi hodnotami konečných teplot získanými pomocí knihovny HAM-Tools a pomocí programu TRNSYS ani v případě simulací dvouzónové obálky nepřekračují 2 K. Můžeme tedy konstatovat, že výsledky dosažené při simulaci dvouzónové obálky pomocí knihovny HAM-Tools jsou si velmi podobné s výsledky dosaženými pomocí programu TRNSYS.

Simulace dvouzónové obálky - nejchladnější dny - zóna 1

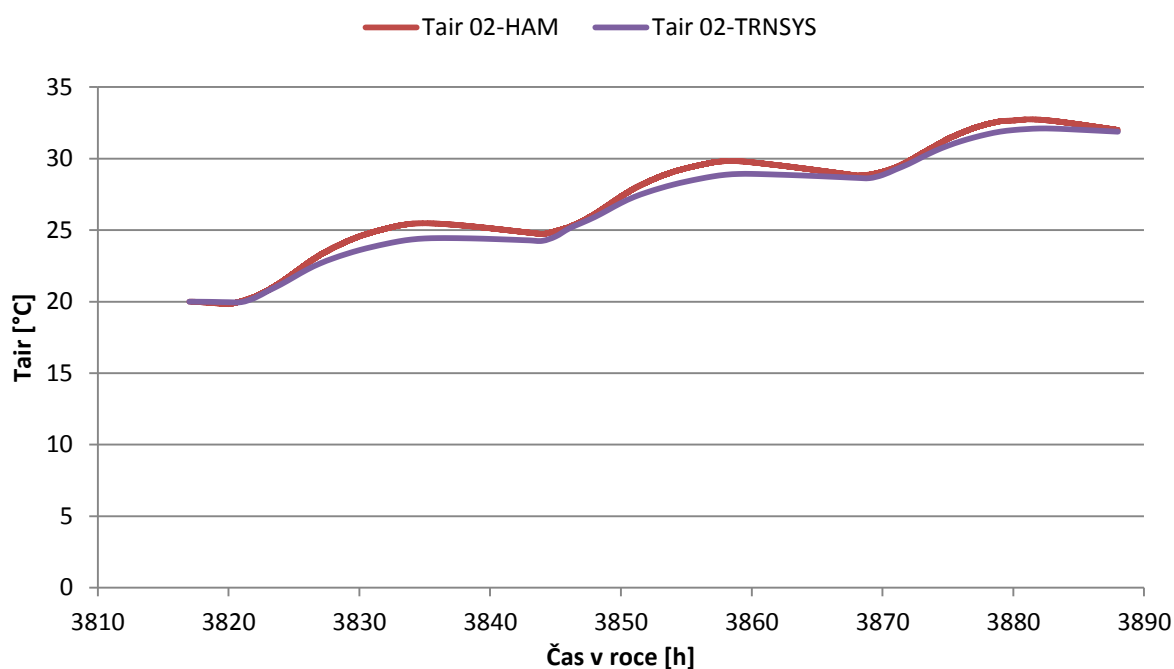
Obr. 6.8 – Simulace dvouzónové obálky při nejchladnějších dnech – zóna 1

Simulace dvouzónové obálky - nejchladnější dny - zóna 2

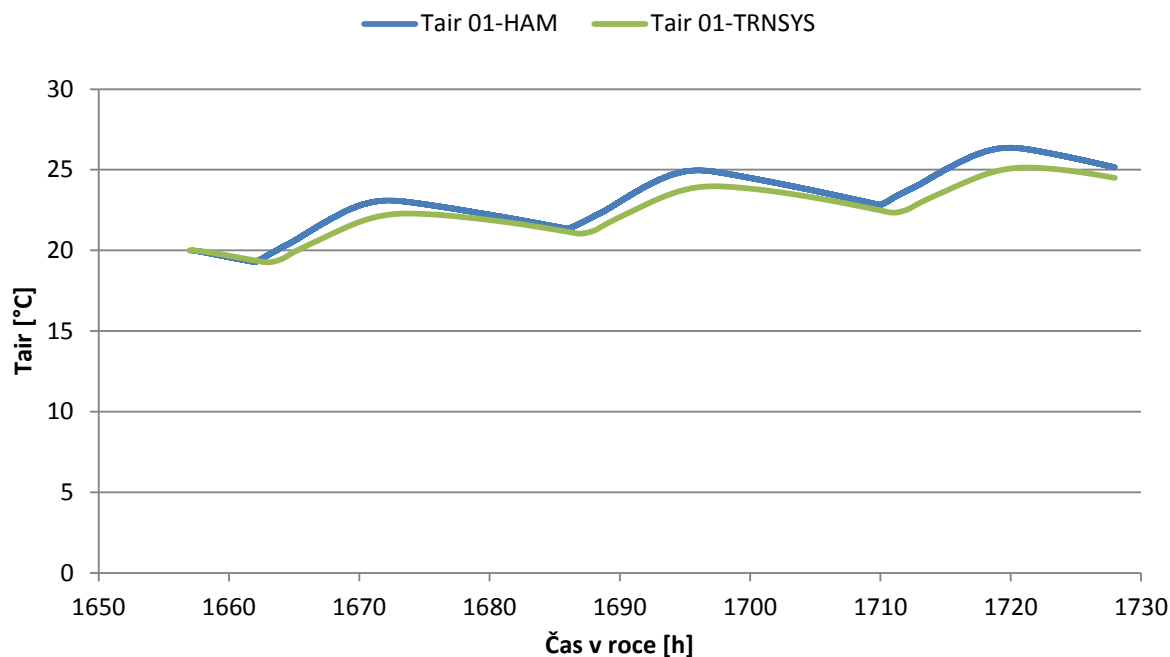
Obr. 6.9 – Simulace dvouzónové obálky při nejchladnějších dnech – zóna 2

Simulace dvouzónové obálky - nejteplejší dny - zóna 1

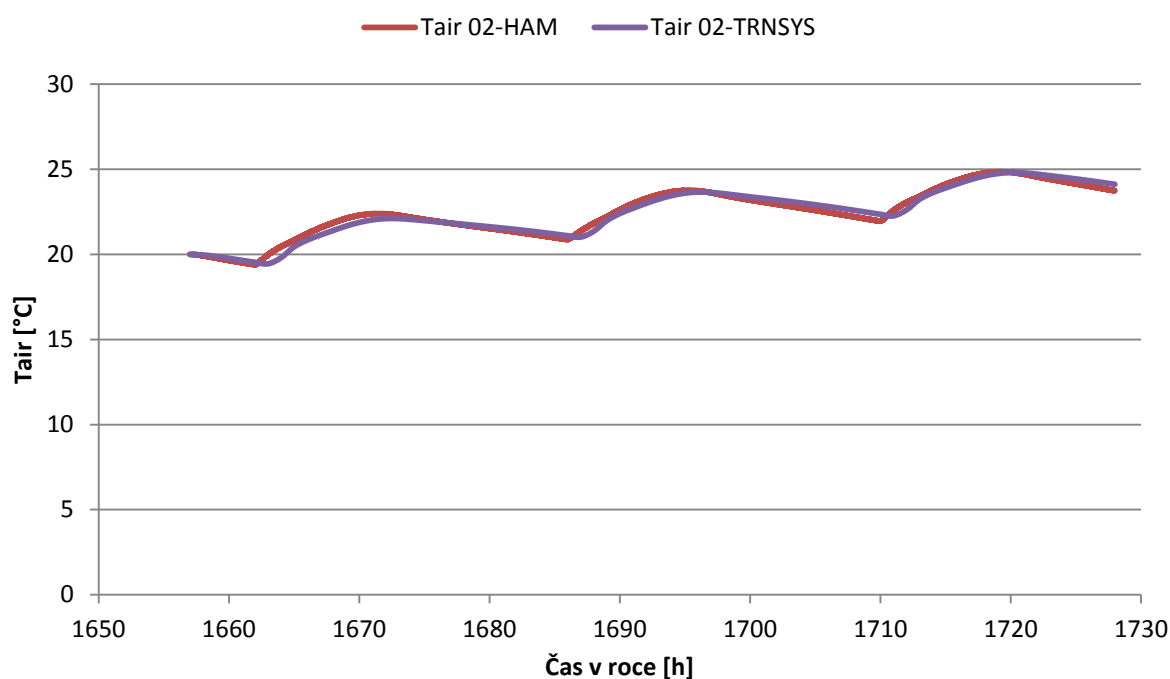
Obr. 6.10 – Simulace dvouzónové obálky při nejteplejších dnech – zóna 1

Simulace dvouzónové obálky - nejteplejší dny - zóna 2

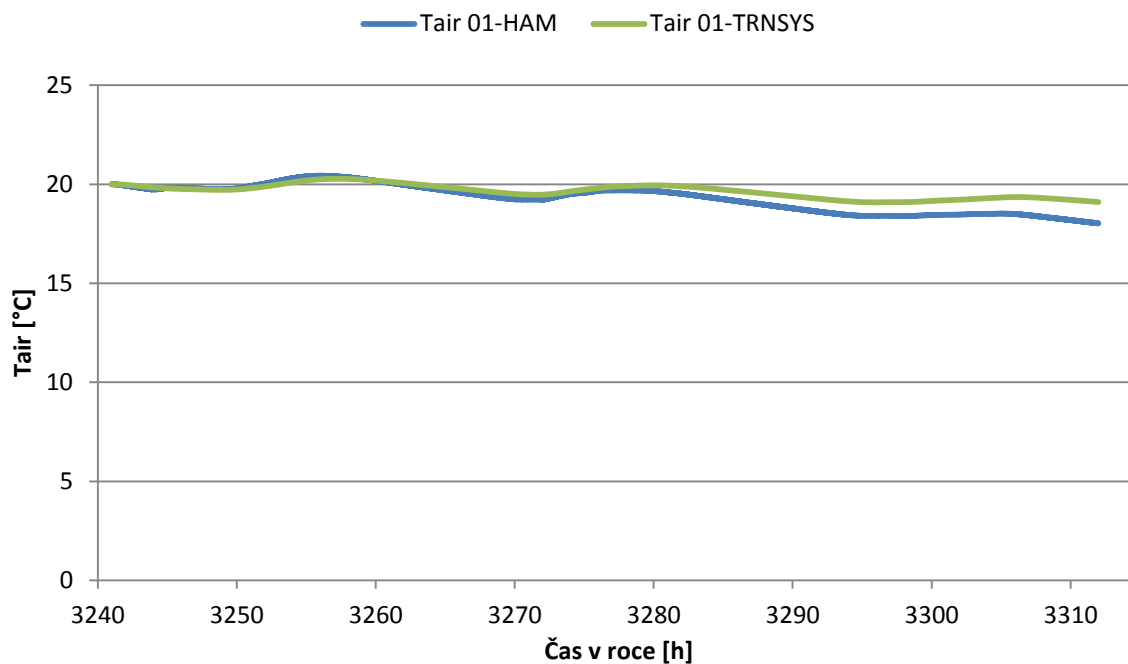
Obr. 6.11 – Simulace dvouzónové obálky při nejteplejších dnech – zóna 2

Simulace dvouzónové obálky - nejjasnější dny - zóna 1

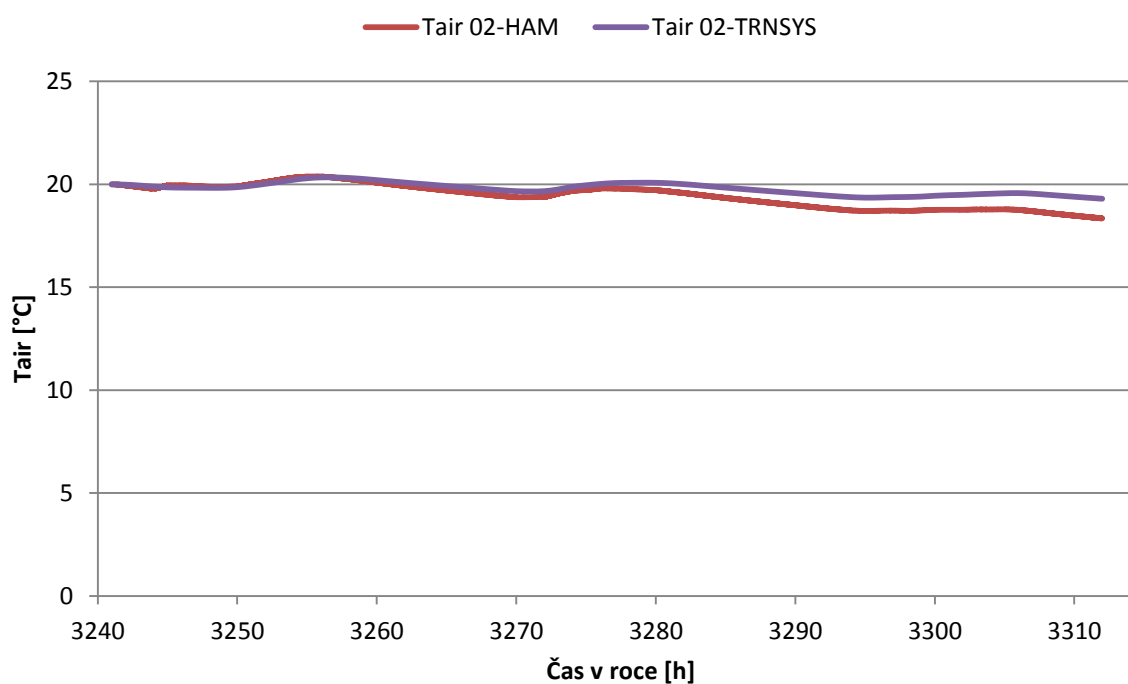
Obr. 6.12 – Simulace dvouzónové obálky při nejjasnějších dnech – zóna 1

Simulace dvouzónové obálky - nejjasnější dny - zóna 2

Obr. 6.13 – Simulace dvouzónové obálky při nejjasnějších dnech – zóna 2

Simulace dvouzónové obálky - nejzataženější dny - zóna 1

Obr. 6.14 – Simulace dvouzónové obálky při nejzataženějších dnech – zóna 1

Simulace dvouzónové obálky - nejzataženější dny - zóna 2

Obr. 6.15 – Simulace dvouzónové obálky při nejzataženějších dnech – zóna 2

7 Vliv tloušťky izolace na úspory při vytápění

Úkolem v této kapitole je zjistit, zda má izolace budov vždy pouze pozitivní dopad na úspory při vytápění nebo zda mohou nastat takové vnější podmínky, při kterých bude izolace na škodu. Vycházíme z předpokladu, že v některých dnech v roce mohou nastat takové podmínky, kdy izolace eliminuje vliv solárních zisků a zabraňuje prostupu tepla do vnitřního prostředí budovy a může tak negativně působit na případné úspory při vytápění. Mezi takové dny by podle našich očekávání měly patřit přechodné dny, tedy nejjasnější a nejzataženější dny.

7.1 Objekty ke zkoumání vlivu tloušťky na úspory při vytápění

Ke stanovení, zda je náš předpoklad správný nebo mylný, využijeme simulace jednozónové obálky rodinného domu se čtyřmi různými tloušťkami izolací. U výsledků získaných pomocí simulací pak budeme srovnávat teploty uvnitř zkoumané zóny dosažené při použití různých tloušťek izolace právě při nejjasnějších a nejzataženějších dnech. Čím vyšší teploty budou, tím vyšší úspory při vytápění lze předpokládat. Objekty pro simulace se všemi svými parametry a způsobem rozdělení jsou stejné jako objekt popsáný v kapitole 5.2. Jediným rozdílem je, že v našem případě jsou použity čtyři různé tloušťky izolací, ty jsou popsány v tab. 7.1. Provedení 1 odpovídá původním tloušťkám izolací, provedení 2 polovičním tloušťkám původních izolací, provedení 3 pak čtvrtinovým a provedení 4 osminovým tloušťkám původních izolací. K izolaci stěn je jako v předchozích případech použit polystyren EPS a k izolaci střechy minerální vlna.

Tab. 7.1 – Tloušťky izolací pro zkoumání vlivu tloušťky na úspory při vytápění

Číslo provedení izolace	1	2	3	4
Tloušťka izolace stěn [m]	0,1	0,05	0,025	0,0125
Tloušťka izolace střechy [m]	0,21	0,105	0,0525	0,02625

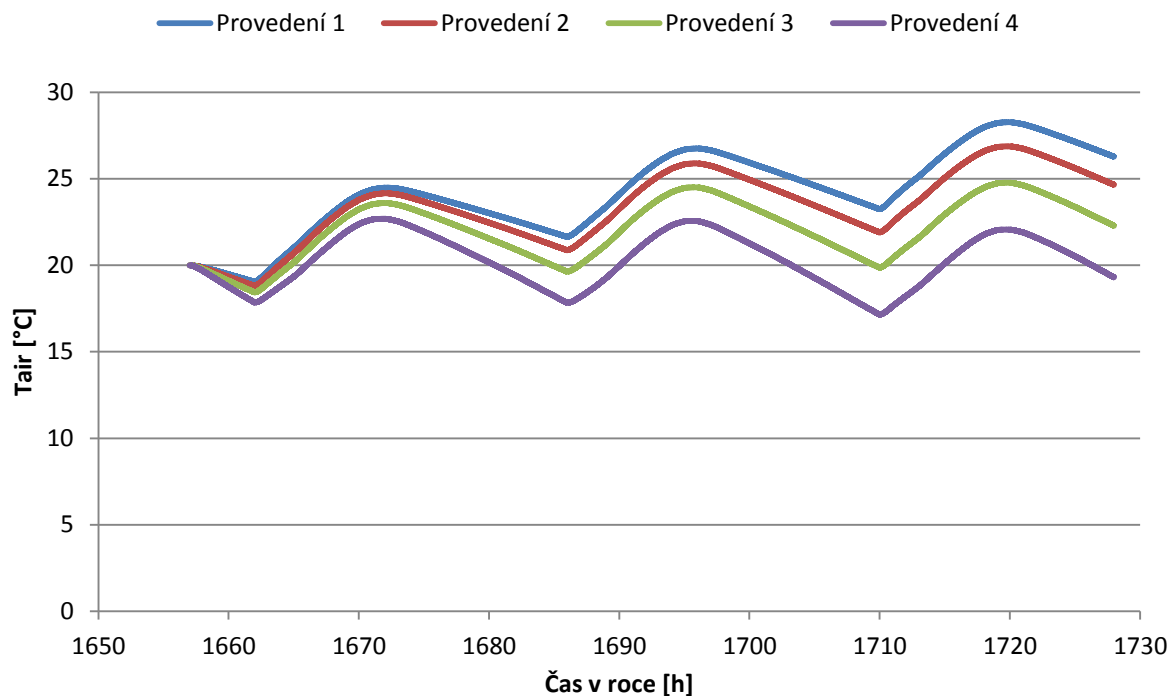
7.2 Simulační modely ke zkoumání vlivu tloušťky izolace na úspory při vytápění

Simulační modely jsou opět totožné se simulačním modelem popsáním v kapitole 5.3 pouze s jedním rozdílem, kterým je použití čtyř různých tloušťek izolačních materiálů stěn a střechy. Nastavení tloušťky těchto materiálů je v našem případě třeba provést v simulačních blocích *External wall, 2 materials (JZ)* v polích označených jako *External material thickness [m]*. Nastavení parametrů bloků *External wall, 2 materials (JZ)* použitých v simulačním modelu jednozónové obálky je uvedeno kapitole 5.3 v tab. 5.2.

Simulace ke zkoumání vlivu tloušťky izolace na úspory při vytápění jsou provedeny při nejjasnějších dnech (11. – 13.3.) a nejzataženějších dnech (16. – 18.5.) roku 2014.

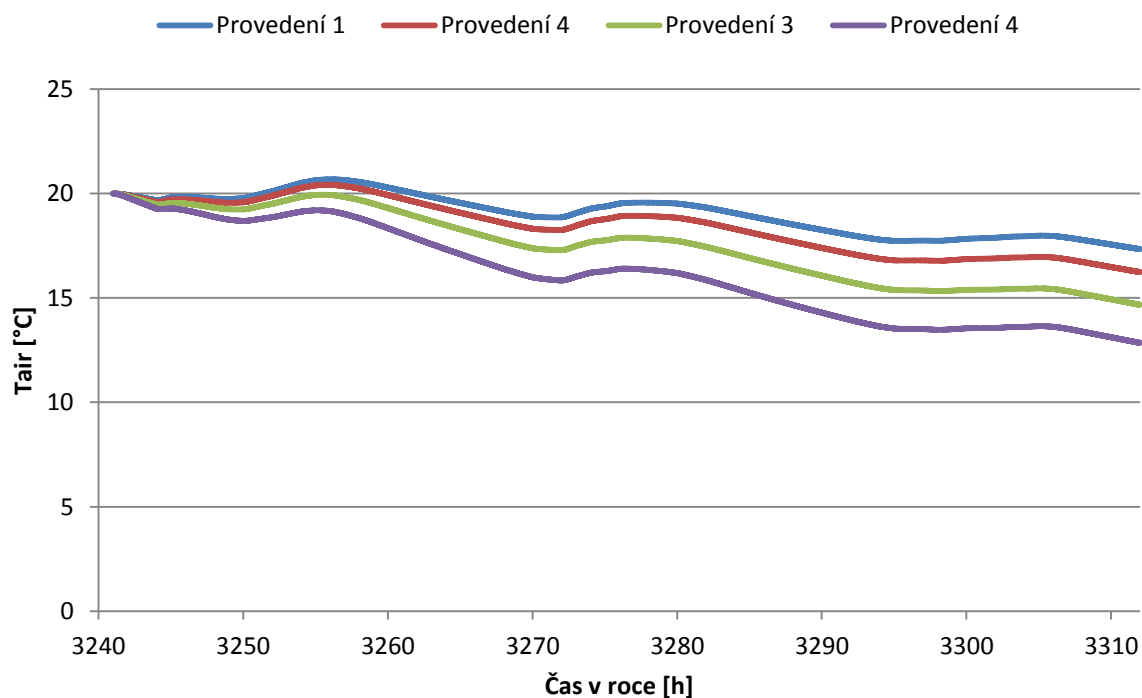
7.3 Výsledky simulací ke zkoumání vlivu tloušťky izolace na úspory při vytápění

Simulace při různých tloušťkách izolace - nejjasnější dny



Obr. 7.1 – Simulace při různých tloušťkách izolace – nejjasnější dny

Simulace při různých tloušťkách izolace - nejzataženější dny



Obr. 7.2 – Simulace při různých tloušťkách izolace – nejzataženější dny

Jak můžeme vidět na obr. 7.1 a obr. 7.2, ukázalo se, že izolace o větší tloušťce je v případě nejjasnějších i nejzataženějších dní z hlediska úspor na vytápění vždy výhodnější. Abychom toto tvrzení mohli obecně potvrdit, provedeme ještě tytéž simulace s meteorologickými daty pro celý rok a prozkoumáme, zda je větší tloušťka izolace opravdu výhodnější po celý rok. Z důvodů kratší doby trvání simulace využijeme pro tento případ program TRNSYS.

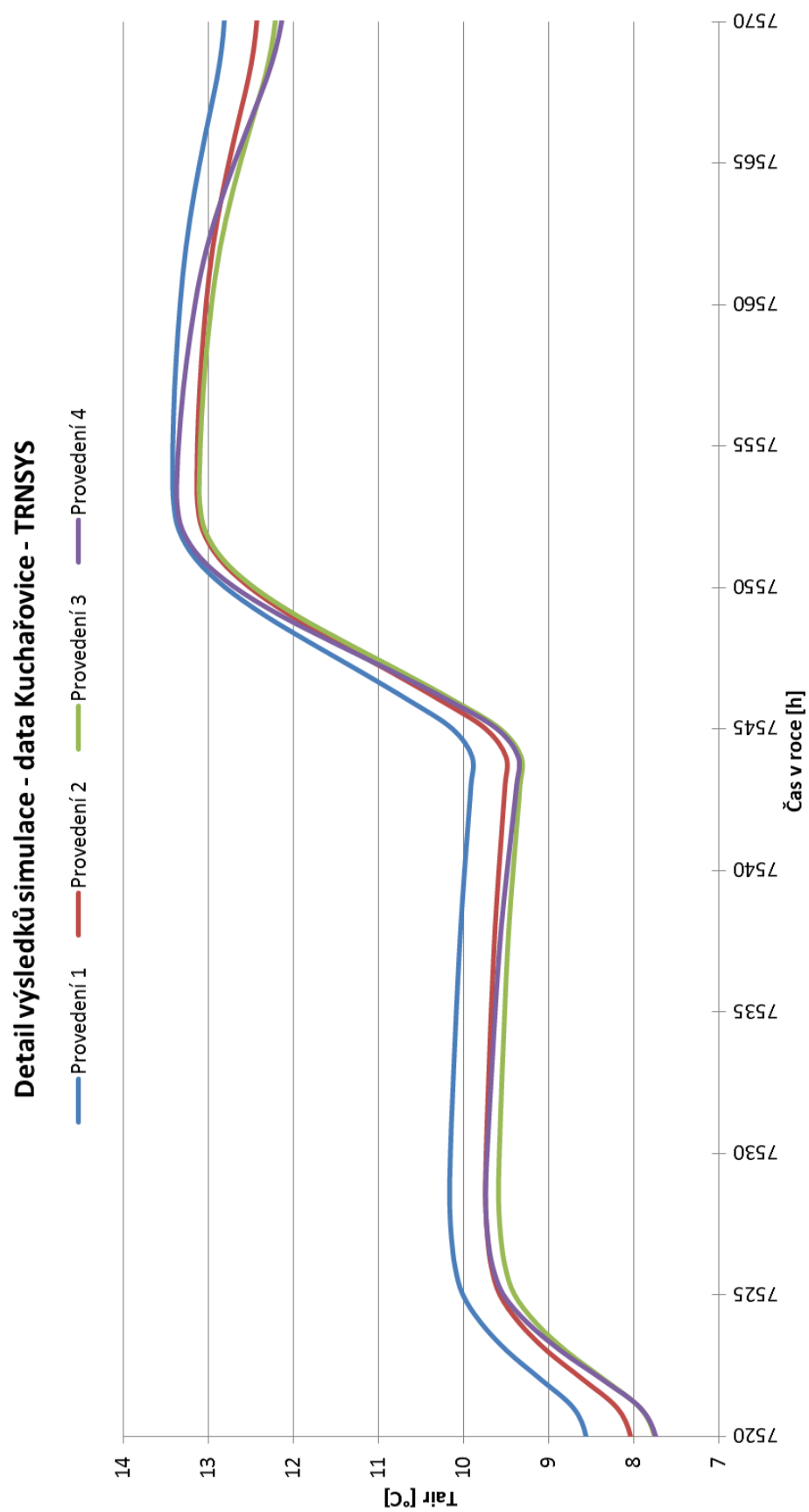
7.4 Vliv tloušťky izolace na úspory při vytápění simulace v programu TRNSYS

V programu TRNSYS byly provedeny simulace stejného objektu jako v podkapitole 7.1, tedy jednozónové obálky se čtyřmi různými tloušťkami izolací stěn a střechy, a to pro meteorologická data pro celý rok. Meteorologická data byla pro tuto simulaci získána z programu Meteonorm pro stanici Kuchařovice.

Výsledky simulace ukázaly, že lepší vliv izolací o menších tloušťkách na úspory při vytápění nastane okolo časů simulace 7520–7570 h, přibližně 10. – 12.11. Detail výsledků simulace pro toto období je vykreslen v grafu na obr. 7.3. Z tohoto grafu můžeme vyzkoušet, že izolace v provedení 4 je během přibližně 42 h v roce výhodnější než izolace v provedení 3 a během zhruba 17 h dokonce výhodnější než izolace v provedení 2. Avšak rozdíly mezi teplotami uvnitř zkoumané zóny dosaženými při simulacích s izolací o menší tloušťce a s izolací o větší tloušťce jsou menší než 0,5 K. Izolace v původním provedení 1 je potom po celou dobu simulace z hlediska úspor na vytápění nejvýhodnější.

7.5 Závěr ke zkoumání vlivu tloušťky izolace na úspory při vytápění

Časy, kdy je z hlediska úspor na vytápění výhodnější izolace o menší tloušťce, jsou v porovnání s délkou otopného období velmi malé. Totéž platí o rozdílech mezi teplotami uvnitř zkoumané zóny dosaženými při simulacích s izolací o menší tloušťce. Můžeme tedy prohlásit, že z hlediska úspor na vytápění je vždy výhodnější používat izolaci o větší tloušťce. Pokud bychom však měli vzít v úvahu k nákladům na vytápění ještě pořizovací náklady, situace by se mohla změnit. Tímto problémem se ale zabývat již nebudeme.



Obr. 7.3 – Detail simulace při různých tloušťkách izolace – program TRNSYS

8 SIMULACE VĚTRÁNÍ A ZDROJŮ TEPLA A VLHKOSTI

Knihovnu HAM-Tools lze mimo jiné také využít k simulaci větrání, vytápění, chlazení a zdrojů vlhkosti. Ukázka použití knihovny k tomuto účelu je předvedena právě v této části práce.

8.1 Objekt pro simulaci větrání a zdrojů tepla a vlhkosti

Objekt se všemi svými parametry a způsobem rozdělení, jehož simulaci budeme provádět, je naprosto totožný s objektem popsáním v kapitole 5.2. Jedná se tedy o jednozónovou obálku rodinného domu popsáno v kapitole 5.

8.2 Simulační model pro simulaci větrání a zdrojů tepla a vlhkosti

Simulační model pro tento případ vychází ze simulačního modelu popsáno v kapitole 5.3. Jediným rozdílem mezi simulačním modelem v kapitole 5.3 a simulačním modelem zpracovávaným v této části je, že v simulačním modelu v této části jsou navíc použity výpočetní bloky pro ventilaci (blok *Ventilation (extract/forced)*) a zdroje tepla a vlhkosti (blok *HAM gains (JZ)*). Uvažujeme stejné materiály i stejná meteorologická data jako v případě simulace v kapitole 5. Simulační model pro simulaci větrání a zdrojů tepla a vlhkosti je znázorněn na obr. 8.1.

Dodávka venkovního vzduchu je uvažována jako kontinuální. Objemový tok venkovního vzduchu pro větrání byl stanoven na základě doporučené intenzity výměny vzduchu dle ČSN EN 12831. Uvažujeme, že celkový vnitřní prostor budovy tvoří obytné místnosti. Intenzitu výměny vzduchu pro větrání koupelny a WC uvažujeme tedy stejnou jako pro větrání obytných místností. Dle uvedené normy je doporučená intenzita výměny vzduchu pro obytné místnosti $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$. Objem vnitřního prostoru obálky je $O = 594 \text{ m}^3$. Objemový tok venkovního vzduchu se pak určí ze vztahu:

$$n = \frac{\dot{V}_p}{O} \Rightarrow \dot{V}_p = n \cdot O \quad (8.1)$$

$$\dot{V}_p = 0,5 \cdot 594 = 297 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 0,0825 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Hodnota objemového toku venkovního vzduchu je vstupním parametrem bloku *Ventilation (extract/forced)* a zadává se v poli označeném *Air Exchange rate [m³/s]*. Dalším vstupním parametrem tohoto bloku je parametr udávající rozdíl mezi tlakem vzduchu uvnitř místnosti a tlakem vzduchu na vstupu do ventilačního systému, který se zadává v poli *Driving pressure [Pa]*. V našem případě uvažujeme podtlakové větrání a hodnotu tohoto parametru volíme -3 Pa .

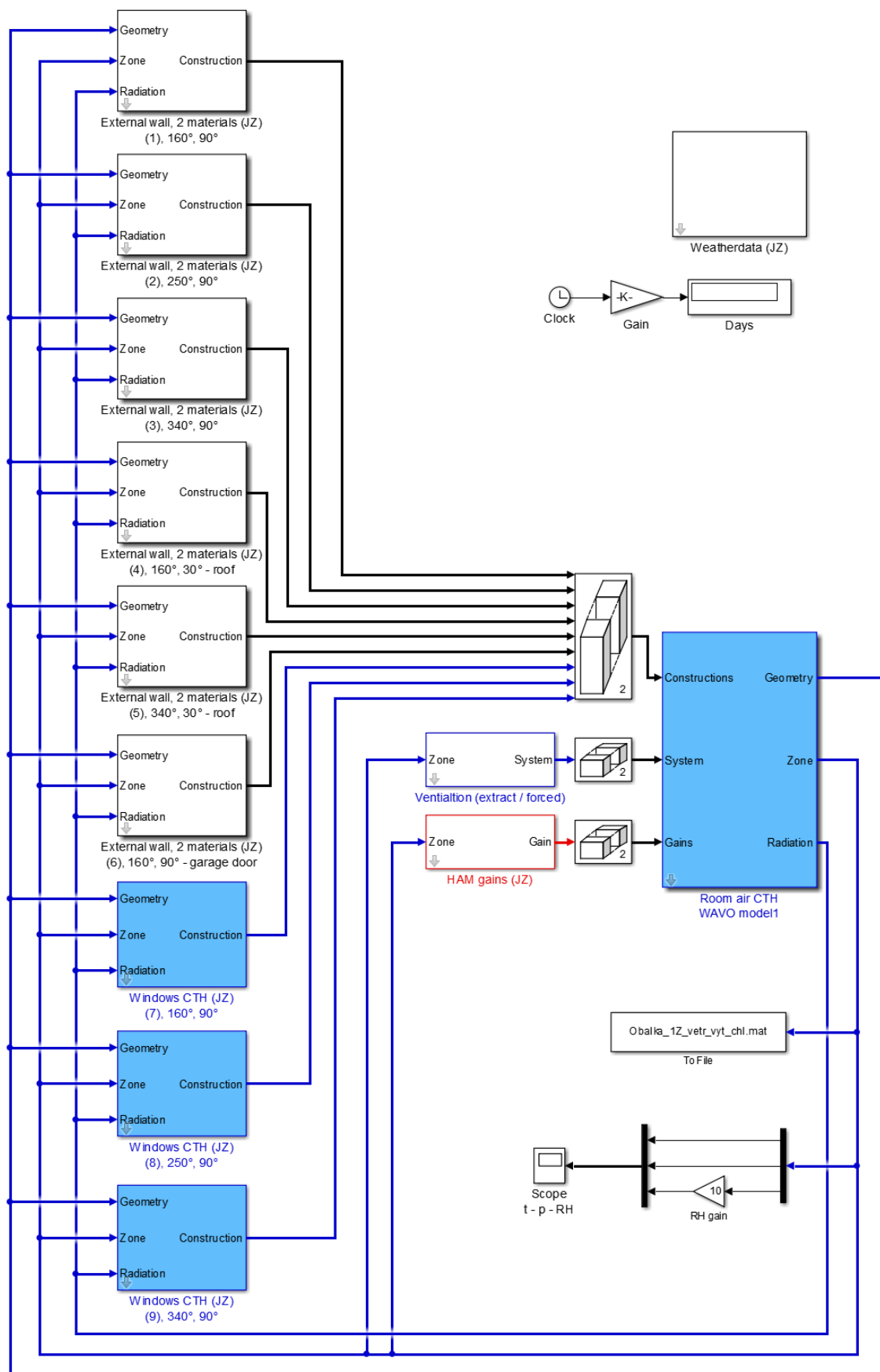
Vytápění či případné chlazení jsou řízeny pomocí P regulátoru (resp. PID regulátoru s parametry I a D rovnými 0). P regulátor byl zvolen pouze z ilustrativních důvodů použití regulátoru. Vnitřní teplotu pro vytápění volíme $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Tato teplota odpovídá dle ČSN EN 12831 výpočtové vnitřní teplotě pro obytné místnosti. Vnitřní teplotu pro klimatizaci pak volíme $26 \text{ }^\circ\text{C}$, což je hodnota výpočtové teploty v klimatizovaných místnostech pro nejteplejší dny stanovená dle ČSN 73 0548. Hodnotu parametru P pro ukázkou použití P regulátoru volíme 1000. Maximální generované teplo pro vytápění volíme 12 kW a minimální generované teplo (chlazení)

volíme -8 kW . Dále uvažujeme, že 60 % tepelného výkonu se do vnitřního prostoru přenáší konvekcí a zbývajících 40 % radiací, což přibližně odpovídá vytápění pomocí otopných těles teplovodní otopné soustavy. Tento způsob přenášení tepelného výkonu neodpovídá použití klimatizačního zařízení. Pokud bychom vzali v úvahu klimatizaci a chlazení vnitřního prostoru prostřednictvím přiváděného vzduchu, byla by konvektivní část výrazně větší. V našem případě však budeme i při simulaci nejteplejších dní, kdy se předpokládá s použitím chlazení pomocí klimatizace, uvažovat uvedené rozdělení způsobů přenosu tepla. Dodávka vlhkosti do vnitřního prostoru se v případě výpočetního bloku *HAM gains (JZ)* bere jako konstantní. Přibližná produkce vlhkosti od mírně aktivních lidí se pohybuje okolo $100 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$. V našem případě uvažujeme v simulovaném objektu přítomnost 4 lidí, proto volíme hodnotu zdrojů vlhkosti $400 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$. Nastavení všech parametrů bloku pro simulaci zdrojů tepla a vlhkosti je uvedeno v tab. 8.1.

Tab. 8.1 – Parametry bloku *HAM gains (JZ)* v simulačním modelu

Blok	HAM gains (JZ)
Doplňující popis bloku	–
Set temperature for heating [°C]	20
Set temperature for cooling [°C]	26
P	1000
Maximum generated heat [W]	12000
Minimum generated heat (<0 for cooling) [W]	-8000
Convective part [–]	0.6
Radiative part [–]	0.4
Moisture gains [kg/s]	0.4/3600

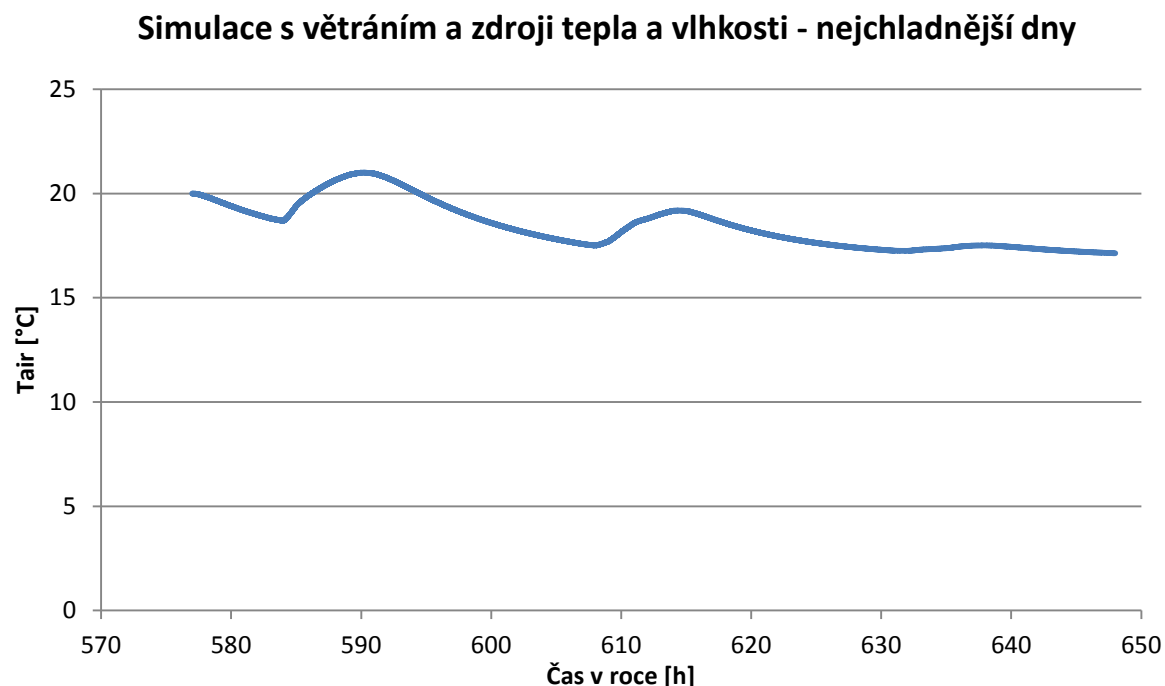
Simulace jednozónové obálky s větráním a zdroji tepla a vlhkosti je stejně jako v případě simulací jednozónové a dvouzónové obálky, které jsou uvedeny v kapitole 5 a 6, provedena pro nejchladnější, nejteplejší, nejjasnější a nejzataženější dny roku 2014.



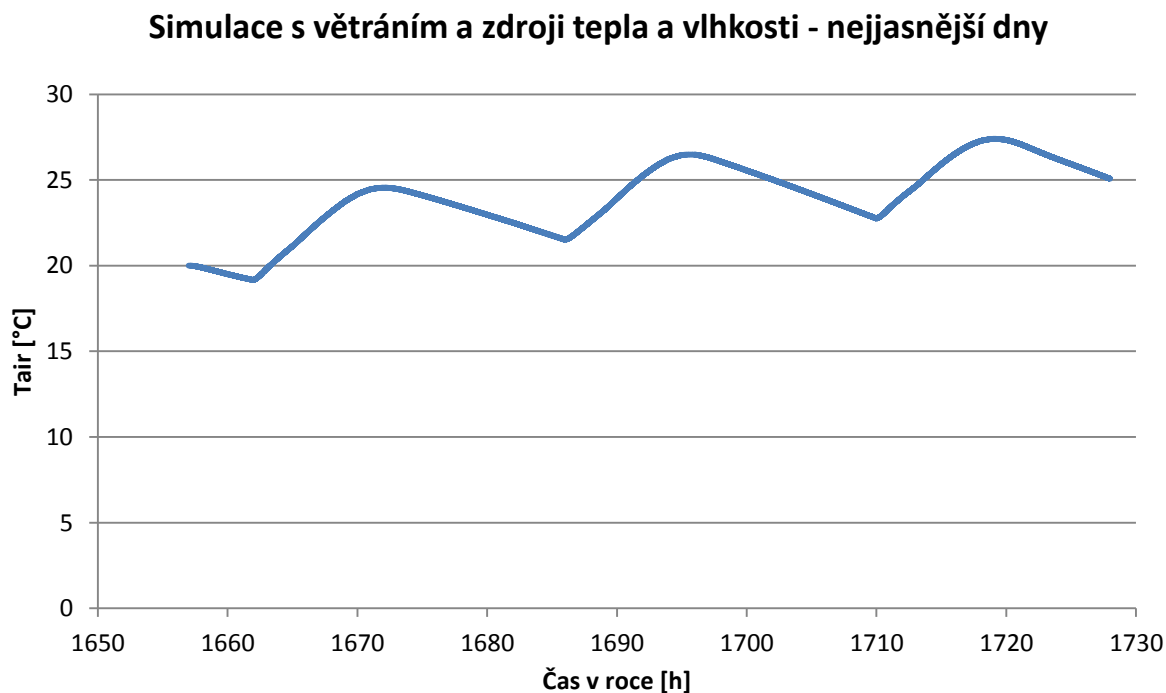
Obr. 8.1 – Simulační model jednozónové obálky s větráním, zdroji tepla a vlhkosti

8.3 Výsledky simulace větrání a zdrojů tepla a vlhkosti

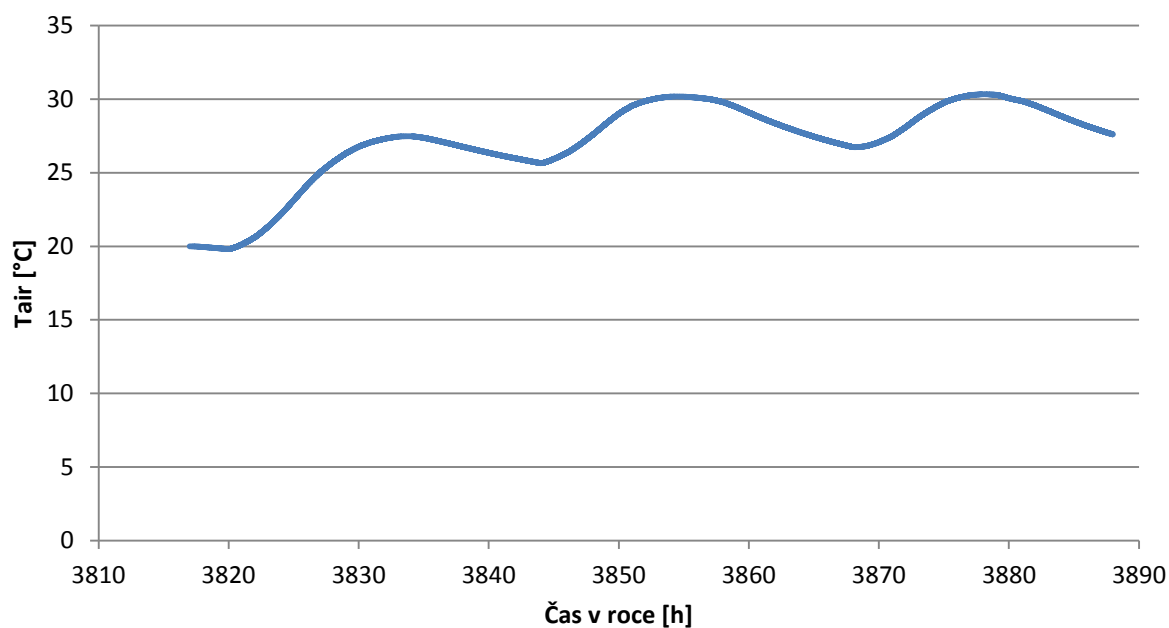
Na obr. 8.2–8.5 jsou vykresleny výsledné grafy průběhů teplot při simulaci jednozónové obálky s větráním a zdroji tepla a vlhkosti. V tomto případě jde pouze o ukázkou jednoho ze způsobů použití knihovny HAM-Tools. Z toho důvodu zde není uvedeno srovnání s programem TRNSYS jako v kapitolách 5 a 6.



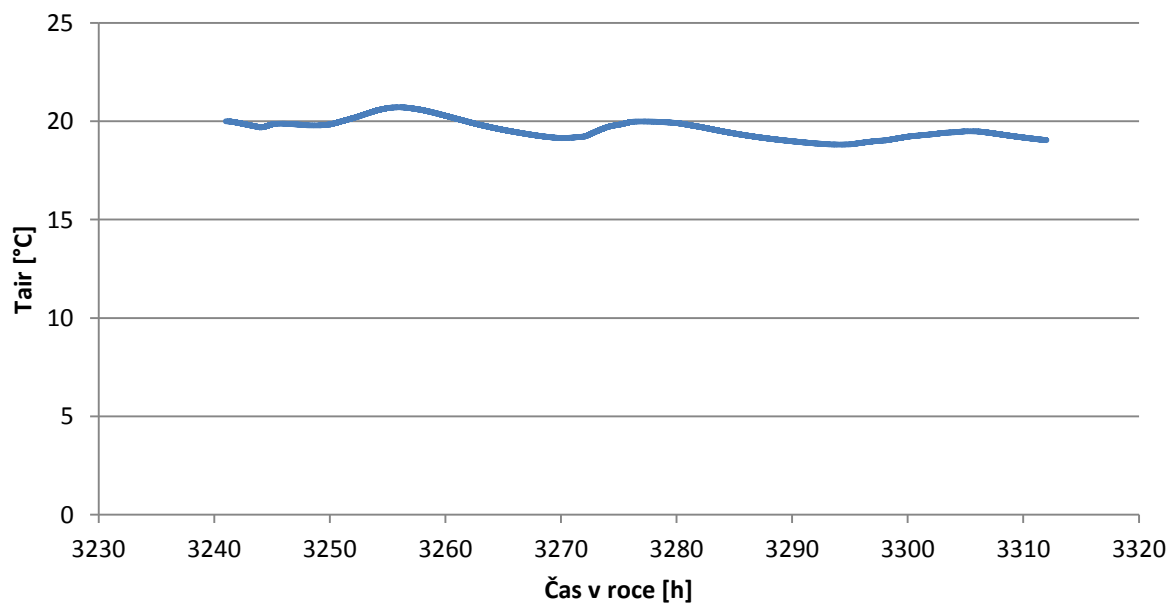
Obr. 8.2 – Simulace obálky – větrání a zdroje tepla a vlhkosti – nejchladnější dny



Obr. 8.3 – Simulace obálky – větrání a zdroje tepla a vlhkosti – nejjasnější dny

Simulace s větráním a zdroji tepla a vlhkosti - nejteplejší dny

Obr. 8.4 – Simulace obálky – větrání a zdroje tepla a vlhkosti – nejteplejší dny

Simulace s větráním a zdroji tepla a vlhkosti - nejzataženější dny

Obr. 8.5 – Simulace obálky – větrání a zdroje tepla a vlhkosti – nejzataženější dny

ZÁVĚR

Upravená knihovna HAM-Tools pro MATLAB/Simulink vytvořená v rámci diplomové práce představuje volně dostupný simulační nástroj vhodný ke zkoumání tepelného chování budov v ČR. Součástí knihovny je soubor materiálových dat obsahující běžně používané materiály v ČR a také funkce a nástroje pro zpracování běžně dostupných formátů meteorologických dat do formátu požadovaného pro simulaci. Snahou bylo upravit knihovnu, aby byla použitelná pro oblast ČR a aby principy práce s knihovnou byly pro uživatele co nejsnáze pochopitelné. Na základě popisu jednotlivých výpočetních bloků, který je uveden v kapitole 4, a na základě příkladů zpracovaných v kapitolách 5, 6 a 8 je běžný uživatel programu MATLAB/Simulink schopen pracovat s knihovnou HAM-Tools a vytvářet s její pomocí nejrozumnější simulační modely pro zkoumání tepelného chování budov.

Knihovna byla testována při simulacích modelů jednozónové a dvouzónové obálky novostavby rodinného domu z Bílovic nad Svitavou. Pokud porovnáme výsledky simulací dosažené pomocí upravené knihovny HAM-Tools a pomocí programu TRNSYS u stejných simulačních modelů a shrneme dílčí závěry z kapitol 5 a 6, zjistíme, že průběhy teplot získané z uvedených simulačních nástrojů se ve všech případech liší jen nepatrně. Můžeme tedy prohlásit, že knihovna HAM-Tools je vhodným nástrojem pro simulaci tepelného chování budov.

Dále je zde provedena ukázka použití knihovny při simulaci obálky rodinného domu s větráním a zdroji tepla a vlhkosti, přičemž výkon zdrojů tepla je pro ilustraci řízen P regulátorem.

Součástí práce je také ukázka praktického využití simulací tepelného chování budov, a to při zkoumání vlivu tloušťky izolace na úspory při vytápění. Předpoklad, že existují podmínky, při kterých má použití izolace o menší tloušťce ve srovnání s použitím izolace o větší tloušťce za následek větší úspory při vytápění, se sice potvrdil, avšak z praktického hlediska je jeho význam téměř nulový. Tyto podmínky totiž nastanou pouze po několik málo hodin v roce, což je ve srovnání s délkou otopného období jen nepatrná část. Navíc rozdíly mezi teplotami uvnitř zkoumané zóny při použití izolace o menší tloušťce a izolace o větší tloušťce pro tento případ nepřekračují 0,5 K. Pokud uvažujeme pouze úspory na vytápění bez pořizovacích nákladů na izolační materiál, lze říci, že izolace o větší tloušťce je vždy výhodnější.

Knihovna HAM-Tools je vytvořena pro MATLAB/Simulink. Tento program je považován za standard v oblasti vývoje řídicích systémů a regulátorů. Simulační modely chování budov jsou vhodné pro tento vývoj a mohou být prostřednictvím nástrojů v programu MATLAB/Simulink přeneseny přímo do regulátorů. MATLAB/Simulink nabízí nespočet možností využití. Od zpracování výsledků simulace, přes úpravy jednotlivých částí knihovny, tvorbu nových výpočetních bloků až po již zmíněné využití simulačních modelů při vývoji řídicích systémů a regulátorů.

Práce je zaměřena zejména na simulace přenosu tepla mezi venkovním prostředím a vnitřním mikroklimatem budovy. Přenosu vlhkosti a jeho vlivu na tepelné chování budov nebyla věnována taková pozornost jako v případě přenosu tepla. S přenosem vlhkosti jsou spojeny vlhkostní vlastnosti materiálů, kterými se práce

rovněž zabývá jen okrajově. Jedním z tipů pro pokračovatele nechť je část knihovny spojená s problematikou přenosu vlhkosti a jeho vlivu na tepelné chování budov.

Během zpracovávání diplomové práce jsem nabyl nové zkušenosti týkající se simulací tepelného chování budov pomocí knihovny HAM-Tools v programu MATLAB/Simulink a v programu TRNSYS. Za největší ze zkušeností považuji získaný základní přehled týkající se metodiky práce při vytváření simulačních modelů v části Simulink a rozšíření znalostí v programu MATLAB a TRNSYS. Při tvorbě funkcí pro zpracování meteorologických dat do formátu požadovaného pro simulaci jsem se mimo jiné naučil pracovat s velkými objemy dat pomocí programu MATLAB i pomocí tabulkového editoru Excel. Za zmínku stojí také získaný přehled o dostupnosti různých formátů meteorologických dat, o jednotlivých meteorologických veličinách a také o základních materiálových parametrech.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KŘIVÝ, Ivan a Evžen KINDLER. *Simulace a modelování*. Vyd. 1. Ostrava: Ostravská univerzita Ostrava, 2001, 146 s. ISBN 80-704-2809-0
- [2] GREPL, Robert. *Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 151 s. ISBN 978-80-7300-226-8
- [3] VAVERKA, Jiří. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Brno: Vutium, 2006, 648 s. ISBN 80-214-2910-0
- [4] *Topenářská příručka: Svazek 1. 120 let topenářství v Čechách a na Moravě*. 1. vyd. Praha: GAS, 2001, 1122 s. ISBN 80-861-7682-7
- [5] CHAPMAN, Stephen J. *Essentials of MATLAB programming*. 2nd ed. Stamford, CT: CENGAGE Learning, 2009, xv, 412 p. ISBN 04-952-9568-X
- [6] *MATLAB: The Language of Technical Computing* [online]. 2012 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/matlab.pdf>
- [7] PALM, William J. *Introduction to MATLAB for engineers*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2011, xii, 564 p. ISBN 00-735-3487-0
- [8] *Simulink: Simulation and Model-Based Design* [online]. 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/simulink.pdf>
- [9] KLEIN, S.A., W.A. BECKMAN, J.W. MITCHELL, J.A. DUFFIE, N.A. DUFFIE a T.L. FREEMAN. *TRNSYS 16: Help: a TRaNsient SYstem Simulation program*
- [10] *TRNSYS: Transient System Simulation Tool* [online]. 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.trnsys.com/>
- [11] SASIC KALAGASIDIS, Angela. *HAM-Tools: Block documentation* [online]. 2003 (Report R-02:6): 61 R [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.ibpt.org/Libraries/IBPT-2%20package.zip>
- [12] RODE, Carsten, Angela SASIC KALAGASIDIS, Charlotte GUDUM a Carl-Eric HAGENTOFT. *International Building Physics Toolbox: General report* [online]. (Report R-02:4): 26 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.ibpt.org/Documents/General%20report.pdf>
- [13] KALAGASIDIS, Angela Sasic. *HAM-tools: an integrated simulation tool for Heat, Air and Moisture transfer analyses in building physics*. Göteborg: Chalmers tekniska högsk, 2004. ISBN 91-729-1439-4
- [14] VYSOUDIL, Miroslav. *Meteorologie a klimatologie* [online]. [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://distgeo.upol.cz/uploads/vyuka/skripta-vysoudil.pdf>
- [15] ŽALUD, Zdeněk. *Bioklimatologie* [online]. 2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/ke_stazeni/bioklimatologie/bioklimatologie_texty.pdf
- [16] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.chmi.cz/>

- [17] RUDA, Aleš. *Úvod do studia meteorologie a klimatologie* [online]. 2014 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/01-uvod.html
- [18] TUBO: *Permanentní GPS stanice* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://tubo.fce.vutbr.cz/>
- [19] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. 1. vyd. Praha: T. Malina, 1994, 203 s. ISBN 80-900-7595-9
- [20] HORVÁTH, J. *Solární záření v lokalitě VUT v Brně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42 s., 4 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [21] *Meteonorm: Irradiation data for every place on Earth*. [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://meteonorm.com/>
- [22] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013, 254 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2
- [23] MARION, William a Ken URBAN. *Users Manual for TMY2s* [online]. 1995 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/PDFs/tmy2man.pdf>
- [24] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. *Typical Meteorological Year Data (TMY)* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/typical-meteorological-year-data>
- [25] REMUND, Jan, Stefan MÜLLER, Stefan KUNZ, Daniel KLAUSER a Christoph SCHILTER. *Meteonorm: Handbook Part I: Software* [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://meteonorm.com/images/uploads/downloads/mn71_software.pdf
- [26] MYERS, Daryl a Stephen WILCOX. *TMY2reader* [online]. 2006 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.colorado.edu/MCEN/SustainableEnergy/Documents/TMYreader2.xls>
- [27] MATUŠKA, Tomáš. *Alternativní zdroje energie* [online]. 2010 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/AZE/Matuska_Alternativni_zdroje_energie.pdf
- [28] SASIC KALAGASIDIS, Angela. *H-Tools: Block documentation* [online]. 2003, (Report R-02:3): 34 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.ibpt.org/Libraries/IBPT-1%20package.zip>
- [29] RAMMER NIELSEN, Toke, Ruut PEUHKURI, Peter WEITZMANN a Charlotte GUDUM. *Modeling Building Physics in Simulink*. 2002, 39 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://www.ibpt.org/Libraries/IBPT-1%20package.zip>
- [30] *Energetická náročnost budov - definice pojmů* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/239-energeticka-narocnost-budov-definice-pojmu>
- [31] *Obalové konstrukce budovy - Obálka budovy* [online]. 2010 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.benvelop.com/obalka-budovy.php>

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Tab. S.1 – Použité veličiny – latinka

Symbol	Jednotka	Název veličiny
c	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
c_d	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita suchého materiálu
c_l	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita tekuté fáze
c_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku
c_v	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita při stálém objemu
C	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	přídavná tepelná kapacita
C_1	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	přídavná tepelná kapacita – zóna 1
C_2	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	přídavná tepelná kapacita – zóna 2
h	$^\circ$	výška slunce nad obzorem
I_0	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	sluneční konstanta
I_{diff}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita difúzního záření
$I_{dir,h}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita přímého záření na vodorovnou plochu
I_{dir}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita přímého záření na plochu kolmou ke směru paprsků
I_{glob}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	intenzita globálního záření
k_T	–	poměr intenzity globálního záření ku solární konstantě
m	kg	hmotnost
m_d	kg	hmotnost suchého materiálu
m_v	kg	hmotnost vlhkého materiálu
n	h^{-1}	intenzita výměny vzduchu
n_d	–	pořadí dne v roce
O	m^3	objem vnitřního prostoru
p	Pa	atmosférický (celkový) tlak vzduchu
p_p''	Pa	parciální tlak vodní páry
R	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	tepelný odpor
R_w	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	tepelný odpor okna
t	$^\circ\text{C}$	teplota
t_m	$^\circ\text{C}$	teplota mokrého teploměru
t_r	$^\circ\text{C}$	teplota rosného bodu
t_{ref}	$^\circ\text{C}$	referenční teplota
u	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel prostupu tepla oknem
V	m^3	objem
V_p	m^3	objem dané látky včetně pórů a mezer
$\dot{V}_p$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	objemový tok venkovního vzduchu pro větrání
w	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	objemová vlhkost
w_{ref}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	referenční objemová vlhkost
x	kg/kg_{sv}	měrná vlhkost

Tab. S.2 – Použité veličiny – řecká abeceda

Symbol	Jednotka	Název veličiny
α_{in}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně okna
α_{out}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla na vnější straně okna
δ	°	sluneční deklinace
φ	–	relativní vlhkost
$\varnothing$	°	zeměpisná šířka
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_{o,ref}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti suchého materiálu při t_{ref}
λ_T	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$	faktor závislosti λ na teplotě
λ_w	$W \cdot m^2 / (kg \cdot K)$	faktor závislosti λ na objemové vlhkosti
ρ_d	$kg \cdot m^{-3}$	objemová hmotnost suchého materiálu
ρ_v	$kg \cdot m^{-3}$	objemová hmotnost vlhkého materiálu
τ	°	sluneční časový úhel

Tab. S.2 – Použité indexy

Index	Význam
1	stav vzduchu 1
R	rosný bod R

SEZNAM PŘÍLOH

CD-ROM:

- elektronická verze diplomové práce
- nástroje pro zpracování meteorologických dat
- upravená knihovna HAM-Tools (vč. všech součástí)
- simulační modely knihovny HAM-Tools v programu Simulink:
 - simulační model jednozónové obálky
 - simulační model dvouzónové obálky
 - simulační model jednozónové obálky s větráním a zdroji tepla a vlhkosti
- simulační modely programu TRNSYS:
 - simulační model jednozónové obálky
 - simulační model dvouzónové obálky
- soubory s výsledky a grafy z jednotlivých simulací v tabulkovém editoru Excel