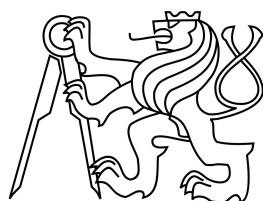


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Automatická tvorba virtuálních senzorů s využitím
informačního modelu budov

Praha, 2015

Autor: Bc.Petr Makeš



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Petr Makeš**

Program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Automatická tvorba virtuálních senzorů s využitím informačního modelu budov**

Název tématu anglicky: **Automated Deployment of Virtual Sensors Using Building Information Model**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte metody pro vytváření virtuálních senzorů s využitím automatické extrakce parametrů modelů ze souborů dle standardu BIM (Building Information Modeling), které obsahují informace o konkrétní budově, zejména geometrii, materiálech a struktuře HVAC systému. Jako ukázkou aplikace metod vytvořte virtuální senzor teploty uvnitř zvolené místnosti v budově. Senzor bude pracovat s využitím fyzikálního modelu tepelných toků v místnosti. Informace, které nejsou v BIM obsaženy, je možné doplnit ručně. Metodiku otestujte na reálné budově a na reálných naměřených teplotách. Uvažujte i informaci o slunečním osvětlení a natočení budovy. Dále se zaměřte na extrakci parametrů souvisejících s HVAC systémem, které jsou využitelné pro jeho diagnostiku. Program realizujte v prostředí MATLAB.

Seznam odborné literatury:

- [1] Dzambazova, T., Krygiel, E., Demchak, G.: Introducing Revit architecture 2010: BIM for beginners. Ind.: Wiley Pub., 2009, p. cm. ISBN 978-047-0473-559.
- [2] Kreider, J. F.: Heating and cooling of buildings: design for efficiency. Rev. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor, ISBN 978-1-4398-1151-1.
- [3] Isermann, R.: Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance. Berlin: Springer, c2006, xviii, 475 p. ISBN 978-3-540-24112-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Horyna

Datum zadání diplomové práce: 16. června 2014

Platnost zadání do¹: 30. ledna 2016

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 6. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Vladimíru Horynovi za odborné konzultace, připomínky a cenné rady, které mi poskytl při tvorbě diplomové práce.

Rovněž děkuji své rodině za věnovanou podporu a trpělivost.

Abstrakt

Tato diplomová práce prezentuje nový přístup automatické tvorby virtuálních senzorů pro budovy. Jako jediný zdroj pro automatickou extrakci statických informací je použit IFC (Industry Foundation Classes) standard, který je jedním z formátů BIM (Building Information Modeling).

V teoretické úvodní části práce jsou představeny a vysvětleny pojmy BIM, IFC a virtuální senzor. Následně je proveden průzkum současného stavu vědy v tomto odvětví. Po teoretickém úvodu následuje popis procesu extrakce dat a jejich zpracování.

Navržená metoda je testována na BIMu reálné budovy, ke které byly poskytnuty všechny potřebné reálně naměřené vstupy. Z BIM ve formátu IFC byly vyextrahovány geometrické informace a pro zvolenou místnost, po manuálním doplnění zbylých nutných parametrů, byl vytvořen virtuální senzor teploty. Výstup virtuálního senzoru teploty a reálně naměřená teplota jsou vykresleny do grafu a porovnány.

Závěrečná část práce je věnována dostupným extrahovatelným parametrům z BIM ve formátu IFC o HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systémech. Za účelem budoucího testování extrakce parametrů je vytvořen BIM obsahující HVAC komponenty.

Abstract

This diploma thesis presents a novel approach of automated deployment of virtual sensors for buildings. Industry Foundation Classes (IFC) standard which is one of the Building Information Modeling (BIM) format, was used as the only automated extracted static information source.

Firstly the BIM IFC and virtual sensors are introduced and the thorough state-of-the-art is performed. Further the structure of IFC hierarchy is described and the process of data extraction and data processing is proposed.

The proposed method was tested on a real building to which the all needed real inputs were provided. For a selected room of the real building was created virtual temperature sensor. The geometric information was extracted from IFC and the rest of needed parameters were added manually. The output of the created semi-automatic virtual temperature sensor and output of real temperature sensor of the selected room are put into graph and compared.

In the end of this paper the capabilities of extraction information about Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) from IFC are discussed. For this purpose the IFC model of real air handling unit was created and described.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Cíle	1
1.2	Motivace	1
2	Teoretický úvod	3
2.1	BIM	3
2.2	Virtuální senzory	4
2.3	Tvorba virtuálních senzorů pomocí BIM	6
3	Realizace virtuálního senzoru	9
3.1	Popis obecného objektu v IFC	9
3.1.1	Rozdělení IFC entit	9
3.1.2	Příklad průchodu IFC hierarchií	10
3.2	Tvorba a zpracování IFC dat	13
3.2.1	Výpočet globálních souřadnic	14
3.2.2	Dělení zdí	17
3.2.3	Přiřazení zdí k místnostem	18
3.3	Tepelný dynamický model místnosti	18
3.4	Tvorba virtuálního senzoru teploty pro skutečnou budovu	23
4	Popis HVAC zařízení v IFC	31
4.1	IFC entity pro HVAC	31
4.1.1	Property sety	32
4.1.2	Porty	33
4.2	Návrh AHU jednotky pro testování	33
5	Závěr	37
	Literatura	40
	Příloha A	I

Seznam obrázků

2.1	Využití BIM.	4
2.2	Obecný virtuální senzor.	5
2.3	Rozdělení virtuálních senzorů. [1]	5
2.4	Blokové schéma tvořeného virtuálního senzoru.	7
3.1	IFC třídy. [2]	10
3.2	Ukázka hierarchického stromu IFC.	12
3.3	Řetězec tvorby a zpracování IFC dat.	13
3.4	Ukázka IFC zápisu.	13
3.5	Vývojový diagram výpočtu globálních souřadnic.	15
3.6	Vizualizace testovacího objektu - jeden pokoj.	16
3.7	Vizualizace testovacího objektu - dvě patra.	17
3.8	Ukázka funkce algoritmu pro dělení zdí.	19
3.9	Výpočet intenzity slunečního záření na obecně položenou plochu [3].	21
3.10	Orientace zpracovávaného domu dle světových stran.	23
3.11	Půdorysný výkres zpracovávaného domu.	24
3.12	Vizualizace extrahovaných geometrických dat z BIM, půdorys.	25
3.13	Vizualizace extrahovaných geometrických dat z BIM, perspektiva.	26
3.14	Surová a předzpracovaná data z reálného teplotního senzoru.	28
3.15	Výsledný graf: vývoj teplot.	29
4.1	Návrh reálné AHU jednotky.	35

Kapitola 1

Úvod

1.1 Cíle

V této práci bude kladen důraz na průzkum možností informačního modelu budovy ve formátu IFC z hlediska kontextových informací, které jsou využitelné pro tvorbu virtuálních senzorů. Následně bude navržen postup, kterým lze obecný virtuální senzor vytvořit a využít tak získané informace z BIM. Od tohoto místa lze práci rozdělit na dva díly.

V prvním dílu bude podle navrženého obecného postupu tvorby virtuálního senzoru konstruován software v prostředí MATLAB, který bude schopen vytvořit virtuální senzor teploty pro skutečnou místnost. Kontextová data virtuálního senzoru dostupná z BIM budou extrahována a zpracována automaticky. Případná další doplňková data budou zadána ručně. K výpočtu teploty v místnosti virtuálním senzorem budou využity skutečné teploty naměřené v okolních místnostech a skutečná intenzita slunečního osvětlení. Pro ověření správnosti budou výstupní údaje z virtuálního senzoru porovnány s údaji obdrženy z reálného senzoru umístěného v měřené místnosti.

Druhý díl této práce bude věnován dostupným informacím, které lze prostřednictvím IFC získat o HVAC komponentách. Rovněž bude vytvořen BIM model obsahující HVAC komponenty ve formátu IFC pro budoucí testování extrakce popsanych dostupných informací.

1.2 Motivace

Podíl spotřebované energie budovami ve vyspělých zemích stále roste a v současné době dosahuje přibližně 40% veškeré vyprodukované energie. Jedny z příčin zvyšující se spotřeby je rostoucí doba strávená lidmi uvnitř kancelářských budov a vyšší nároky na kvalitu vnitřního prostředí. Kvalita vnitřního ovzduší budov je často zajišťována HVAC (Heating, Ventilation and Air Condition) systémy, kterými je spotřebováno až 50% celkové spotřeby budov a jsou tak největším konzumentem energie v budovách [4]. Avšak kvůli rostoucím cenám energií a ekologickým důsledkům je vyvíjen tlak na snižování spotřeby. Vzhledem k provedenému průzkumu, kdy byla zjištěna závada u přibližně 6 z 10 střešních jednotek, která zapříčiňovala zvýšenou spotřebu, lze uvést, že největších úspor by mohlo být dosaženo vhodným návrhem a lepší diagnostikou během celého životního cyklu HVAC systému [5].

HVAC je soustava technických zařízení, kterou je tvořen stav vnitřního prostředí v budovách [6]. Cílem soustavy zařízení je vytvořit vhodnou teplotu a kvalitu vzduchu a tak dosáhnout komfortního prostředí uvnitř budovy [7]. Systém HVAC je již z výroby osazen řadou senzorů určených k řízení systému. Tyto senzory ovšem nestačí pro celkovou diagnostiku systému. Proto je vhodné systém rozšířit o dodatečné senzory, kterými budou poskytovány informace o kontextu systému využitelné k diagnostice.

Informace o stavu HVAC systému mohou být získávány použitím reálných senzorů. Jinou možností je využití virtuálních senzorů, jejichž hlavní výhodou jsou nižší pořizovací náklady oproti senzorům reálným. Dalšími výhodami virtuálních senzorů je jejich aplikace do míst, kde by reálné senzory byly komplikovaně instalovány, pokud by to bylo vůbec možné. Virtuálními senzory je rovněž možné měřit veličiny, pro něž fyzické senzory neexistují. Virtuální senzory však nemohou být realizovány bez použití fyzických senzorů, které poskytují vstupní data senzorům virtuálním, a kontextových informací o prostředí, ve kterém je virtuální senzor umístěn, nutných jako vstupní nastavující parametry virtuálního senzoru [1]. Kontextovou informaci může být např. průřez ventilačního potrubí, objem vytápěného pokoje či materiál zdi vytápěného pokoje.

Univerzálním způsobem získání kontextové informace a usnadnění realizace systému s virtuálními senzory v budovách je využití BIM (Building Information Modeling). BIM je obecně popisován jako proces či technologie tvorby digitální dokumentace o budově od základního kamene po demolici [8]. Výsledkem takového procesu je digitální, strojově čitelný model budovy, jež může být uvažován jako konstrukční výkres nové generace. BIM popisuje nejen geometrická data budovy a použité materiály, ale také data usnadňující konstrukci, koordinaci prací a následnou údržbu budovy.

Existuje více reprezentací BIMu, jako jsou např. formáty IFC (Industry Foundation Classes) či gbXML (green building Extensible Markup Language). V této práci je pracováno s formátem IFC, jelikož tento formát je podporován předními softwarovými společnostmi, jako je např. Autodesk či GRAPHISOFT. V březnu 2013 se IFC stalo oficiálním mezinárodním ISO (International Organization for Standardization) standardem [9].

Kapitola 2

Teoretický úvod

V této kapitole bude charakterizován BIM a jeho formát, který bude použit v této práci. Následně budou uvedeny virtuální senzory a jejich možné rozdělení. Na závěr této kapitoly bude provedena rešerše týkající se současného stavu vědy v propojení BIMu s virtuálními senzory.

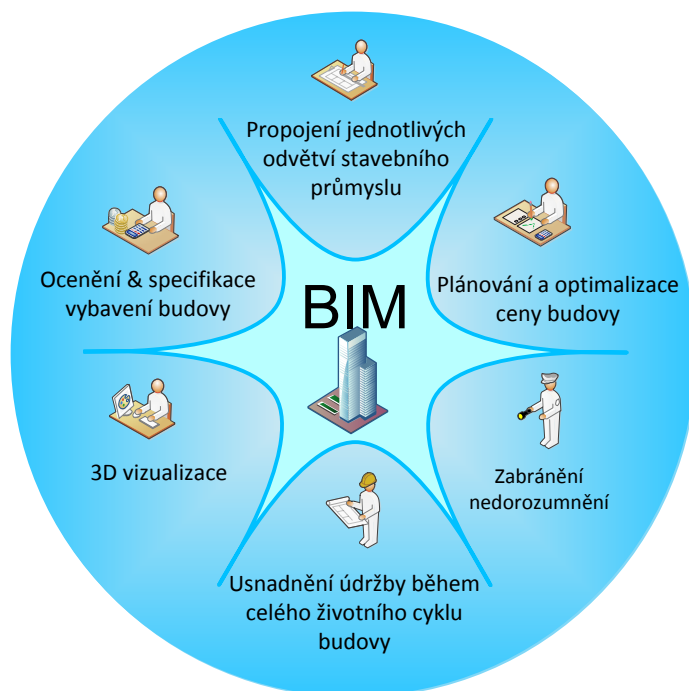
2.1 BIM

BIM (Building Information Modeling), nebo česky též informační model budovy, je způsob návrhu, analýzy a dokumentace budovy během celého životního cyklu budovy, viz Obr. 2.1. Výsledkem tohoto návrhu je digitální model, který uchovává informace o geometrii budovy, materiálech, specifikaci elektrických zařízení a nebo o operacích všech objektů náležících tomuto modelu. Objektem tedy může být zeď, okno nebo např. průtokový ohřívač vody. BIM přístup se od klasického CAD (computer-aided design) přístupu na první pohled liší v pojetí, jakým je celý projekt vytvářen. CAD přístup zahrnuje spoustu jednotlivých dokumentů, naopak BIM shromažďuje veškerá data na jednom místě. Možnost chyby či oppomenutí čehokoliv při návrhu a konstrukci budovy je tak podstatně nižší [10], [8].

BIM lze ukládat do více univerzálních formátů. Pro tuto práci byl zvolen formát IFC. IFC bylo poprvé uvedeno v roce 1994 aliancí IAI (International Alliance for Interoperability), která IFC neustále rozvíjí. V současné době je aktuální verze IFC2x4. Snahou IAI, která od roku 2005 vystupuje pod značkou buildingSMART, je sjednocení výstupů ze softwarů pro návrh a správu staveb právě formou BIM využívající IFC. Tím by se dosáhlo značného zjednodušení a zefektivnění práce, např. při přenosu dat mezi jednotlivými odvětvími stavebního průmyslu. Zároveň je takové sjednocení výhodné z pohledu správy budovy během jejího celého životního cyklu [11], [12].

Z BIM ve formátu IFC lze extrahovat mnoho různorodých informací. Lze např. extrahovat geometrické informace o zdech, polohu oken a dveří, materiály jednotlivých prvků, polohu a parametry technického vybavení budovy. Tyto informace jsou využívány k 3D vizualizaci budovy, odhadu ceny budovy včetně vybavení, generování 2D výkresů, energetické analýze budovy atd. [10]. Veškeré dostupné informace o budově uložené v jednom digitálním modelu lze využít i dalším způsobem. IFC informace lze využít jako kontextové informace k tvorbě matematických modelů. Výstupy těchto modelů mohou potom sloužit jako virtuální senzory.

Nevýhodou technologie BIM v současné době je jeho řídké využití a neexistence



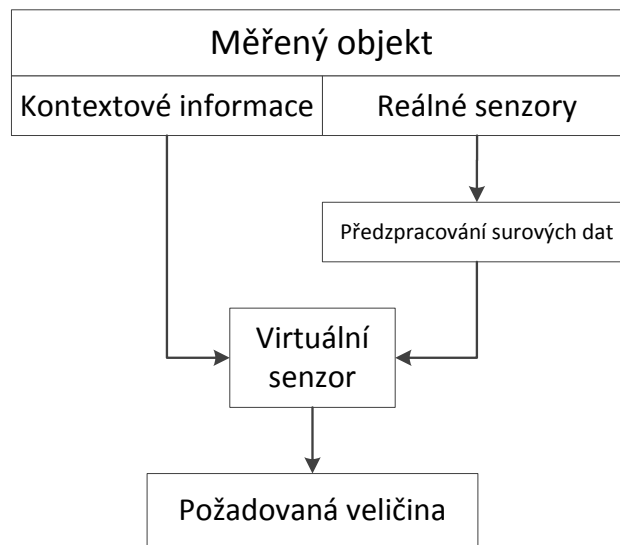
Obrázek 2.1: Využití BIM.

BIMů pro starší budovy. Automatická extrakce dat z informačního modelu je rovněž ztížena faktem, že jeden reálný objekt lze pomocí IFC nadefinovat více způsoby. Generátory IFC souboru z různých BIM softwarů tak nemusí pro stejný objekt poskytnout totožný zápis v IFC.

2.2 Virtuální senzory

Virtuální senzor nemá jednu obecně uznávanou definici. Jedna z interpretací definice virtuálního senzoru zní: *"Virtuální senzor odhaduje vlastnosti objektu či okolní podmínky na základě matematického modelu. Takovéto matematické modely využívají na svém vstupu fyzických senzorů k výpočtu odhadované vlastnosti či odhadovaného okolního stavu."*[13] Podle této definice je virtuální senzor matematický model, který na svých vstupech využívá jiných fyzických senzorů. Velice často jsou však pro tvorbu matematického modelu kromě vstupů z reálných senzorů nutné také kontextové informace o prostředí, ve kterém se virtuální senzor nachází. Kontextovou informaci může být myšlen jakýkoliv statický parametr, jako je např. maximální výkon ventilátoru, který vhání vzduch do prostoru. Schéma obecného virtuálního senzoru je znázorněno na Obr. 2.2.

Virtuální senzory zažily veliký rozvoj v posledních 20 letech a to především v automobilové a letecké dopravě. Před 50 lety automobily disponovaly čtyřmi základními fyzickými senzory, zatímco dnes jsou automobily vybaveny přibližně 40 fyzickými senzory, které jsou doplněny spolupracujícími virtuálními senzory. Naproti tomu systémy k diagnostice a zvýšení energetické účinnosti technického zařízení v budovách nejsou o mnoho lepší než před 50 lety. Samostatné komponenty technického zařízení budov prošly jistým vývojem, avšak nevhodnou instalací a údržbou je

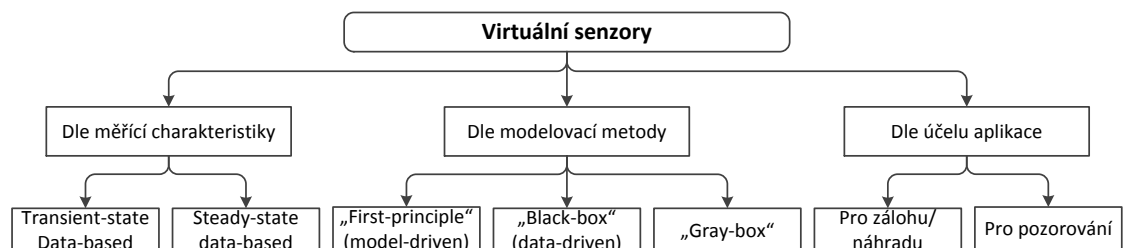


Obrázek 2.2: Obecný virtuální senzor.

účinnost celého systému o 20 až 30% snížena. Důvodem pro nízké využití automatizace v budovách může být vysoká cena vývoje systému pro každou budovu, která není dělena tisíci kusy masové výroby jako např. v automobilovém průmyslu. Každá budova je jedinečná a proto je nutné navrhnout systém na míru [1].

Virtuální senzory jsou uplatňovány zejména v případech, kdy [13]:

- vlastnost či stav nelze měřit fyzickým senzorem,
- fyzický senzor je příliš pomalý,
- fyzický senzor je umístěn příliš daleko, čímž je způsobena pomalá odezva,
- nákladná implementace fyzického senzoru,
- nedostatek místa pro umístění fyzického senzoru,
- fyzický senzor vyžaduje nákladnou údržbu.



Obrázek 2.3: Rozdělení virtuálních senzorů. [1]

Virtuální senzory mohou být děleny více způsoby, jak je zobrazeno na Obr. 2.3. Mohou být děleny na základě měřicí charakteristiky, způsobu modelování virtuálního senzoru či na základě aplikace virtuálního senzoru.

Virtuální senzory lze dle měřicí charakteristiky rozdělit na „transient-state“ a „steady-state“. První skupinou jsou virtuální senzory využívané k měření systémů především ve fázích přechodových dějů. Takové virtuální senzory jsou často schopné predikce a jsou využívány jako zpětná vazba v systému. Naopak druhou skupinou jsou virtuální senzory určené pro měření ustálených fází průběhu. Tyto virtuální senzory jsou dobře využitelné pro detekci závad a diagnostiku.

Virtuální senzory dělené na základě způsobu modelování virtuálního senzoru lze rozdělit do tří skupin. První skupinou je tzv. „first-principle“ či také „white-box“ přístup. Virtuální senzor je modelován na základě známých fyzikálních definic a vzorců. Tento přístup pro tvorbu matematického modelu však není vždy možný z důvodu složitého fyzikálního popisu systému. Opakem „first-principle“ přístupu, je „black-box“ přístup. Modelování virtuálního senzoru tímto způsobem je založeno jen na empirických vztazích bez znalosti fyzikálních procesů probíhajících v systému. Třetím způsobem je tzv. „gray-box“ přístup. Tento přístup spojuje „white-box“ a „black-box“, kdy jsou k modelování systému kombinovány empirické vztahy s fyzikálními principy.

Virtuální senzory jsou podle způsobu využití tříděny do dvou skupin. První skupinou je náhrada či záloha fyzického senzoru senzorem virtuálním. V tomto případě je možné porovnávat výstupy z fyzického senzoru s výstupem z virtuálního senzoru a kontrolovat přesnost fyzického senzoru. Druhou skupinou jsou virtuální senzory pro samostatné měření veličiny. Virtuální senzory jsou samostatně využívány v situacích, kdy veličina není přímo měřitelná fyzickým senzorem, jako je např. výkon motoru [1].

Postup vývoje virtuálního senzoru lze obecně rozdělit do dvou základních kroků. Prvním krokem je výběr vhodného matematického modelu, což bývá obvykle nejtěžší úlohou při vývoji virtuálního senzoru. Je nutné zvolit vhodný matematický model pro daný virtuální senzor a zvážit, dle výše uvedeného rozdělení, pro jaký účel bude sloužit a na jakém systému bude aplikován. Druhým krokem je implementace a validace vzniklého virtuálního senzoru. V této části vývoje je virtuální senzor testován v laboratoři a na místě, pro které byl vyvíjen. Zde je prováděna validace a ověření správné funkce virtuálního senzoru.

2.3 Tvorba virtuálních senzorů pomocí BIM

Téma automatické extrakce dat z BIM modelu ve formátu IFC je uvedeno např. v práci [14]. Automatická extrakce je zde využívána pro tvorbu časového plánu konstrukce budovy. Technika extrakce dat z BIM je použita rovněž pro účely energetické analýzy budov. Software podporující energetickou analýzu budovy založenou na BIM je např. EnergyPlus [15]. Budovu tak není nutné kreslit zvlášť v každém softwaru pro jiný účel. Mnoho prací bylo rovněž publikováno na téma virtuální senzory v budovách. Práce na toto téma však velmi často nejsou publikovány přímo pod titulem využívající termín virtuální senzor či soft senzor. Obsahem těchto prací jsou matematické modely technického zařízení budov využívající na vstupu data z reálných senzorů, čímž odpovídají definici virtuálního senzoru. Výčet některých prací zaměřených na tematiku návrhu virtuálních senzorů v budovách lze nalézt v [1, Tabulka 2.].

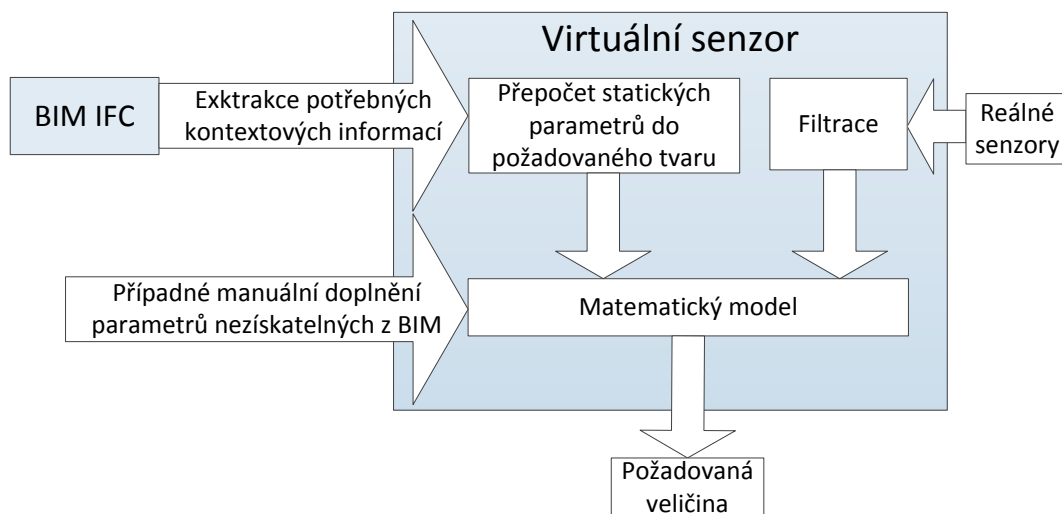
Využití zmíněných dvou metodik je možné ukázat např. na virtuálním senzoru pro měření účinnosti filtru v HVAC systémech [16]. K tvorbě virtuálního senzoru je

třeba znát informace o:

- rychlosti toku vzduchu potrubím,
- úbytku tlaku vzduchu na filtru - obsaženo v BIM (IFC),
- ploše filtru - obsaženo v BIM (IFC),
- velikosti případné mezery vzniklé nedokonalým usazením filtru.

Označené položky lze z informačního modelu budovy vyextrahovat a ušetřit tak časově náročné hledání parametrů v dokumentaci, která již nemusí existovat, či rovněž ušetřit časově náročné manuální měření potřebných parametrů přímo na zařízení, které nemusí být snadno dostupné. Značné úspory času při automatické extrakci parametrů z BIM by bylo dosaženo především u budovy s větším počtem použitých filtrů ve vzduchotechnice.

Extrakcí dat z BIM a jejich využití pro matematické modelování se zabývá práce [17], kde BIM je vytvořen pomocí softwaru Autodesk Revit. Statické informace o budově a HVAC systému jsou následně extrahovány, jak z BIM ve formátu IFC, tak z BIM ve formátu gbXML, který lze rovněž vyexportovat z Revitu. BIM ve formátu gbXML je využit k extrakci geometrických a architektonických informací o budově, zatímco IFC je využito k extrakci dat o HVAC zařízení. Tepelný model budovy je vytvořen v prostředí MATLAB založený na 3R2C síti.



Obrázek 2.4: Blokové schéma tvoření virtuálního senzoru.

BIM vytvořený pro tuto prezentovanou práci byl rovněž vytvořen v prostředí Autodesk Revit. K extrakci dat o budově byl však použit BIM pouze ve formátu IFC, ze kterého byla extrahována geometrická a architektonická data. Tato data byla následně využita pro tvorbu tepelného modelu budovy využitím stochastických diferencálních rovnic [18]. Zároveň byly ověřeny možnosti extrakce dostupných dat o HVAC zařízení v budově. Extrakce dat z BIM a následné modelování tepelné dynamiky budovy je prováděno automaticky prostřednictvím napsaného kódu v prostředí MATLAB. Blokové schéma navrhovaného způsobu vytváření virtuálního senzoru je naznačeno na Obr. 2.4.

Kapitola 3

Realizace virtuálního senzoru

V následujících podkapitolách je obsažen popis extrakce dat z BIM ve formátu IFC a předzpracování vyextrahovaných dat. Následně je uveden popis použitého dynamického tepelného modelu budovy a popis vstupů tepelného modelu.

3.1 Popis obecného objektu v IFC

IFC obsahuje velké množství entit unifikujících způsob ukládání či poskytování informací v průběhu celého životního cyklu budovy. Pomocí IFC entit lze popsat libovolnou budovu. Popis a definice všech entit lze nalézt v IFC dokumentaci [2]. Pomocí IFC lze popsat architektonické vlastnosti, ale také vzduchotechnické či elektrické rozvody v budově.

Pro základní seznámení se strukturou IFC je v následující podkapitole uveden přehled tříd, do kterých jsou entity rozděleny. Grafický přehled tříd je zobrazen na Obr. 3.1.

3.1.1 Rozdělení IFC entit

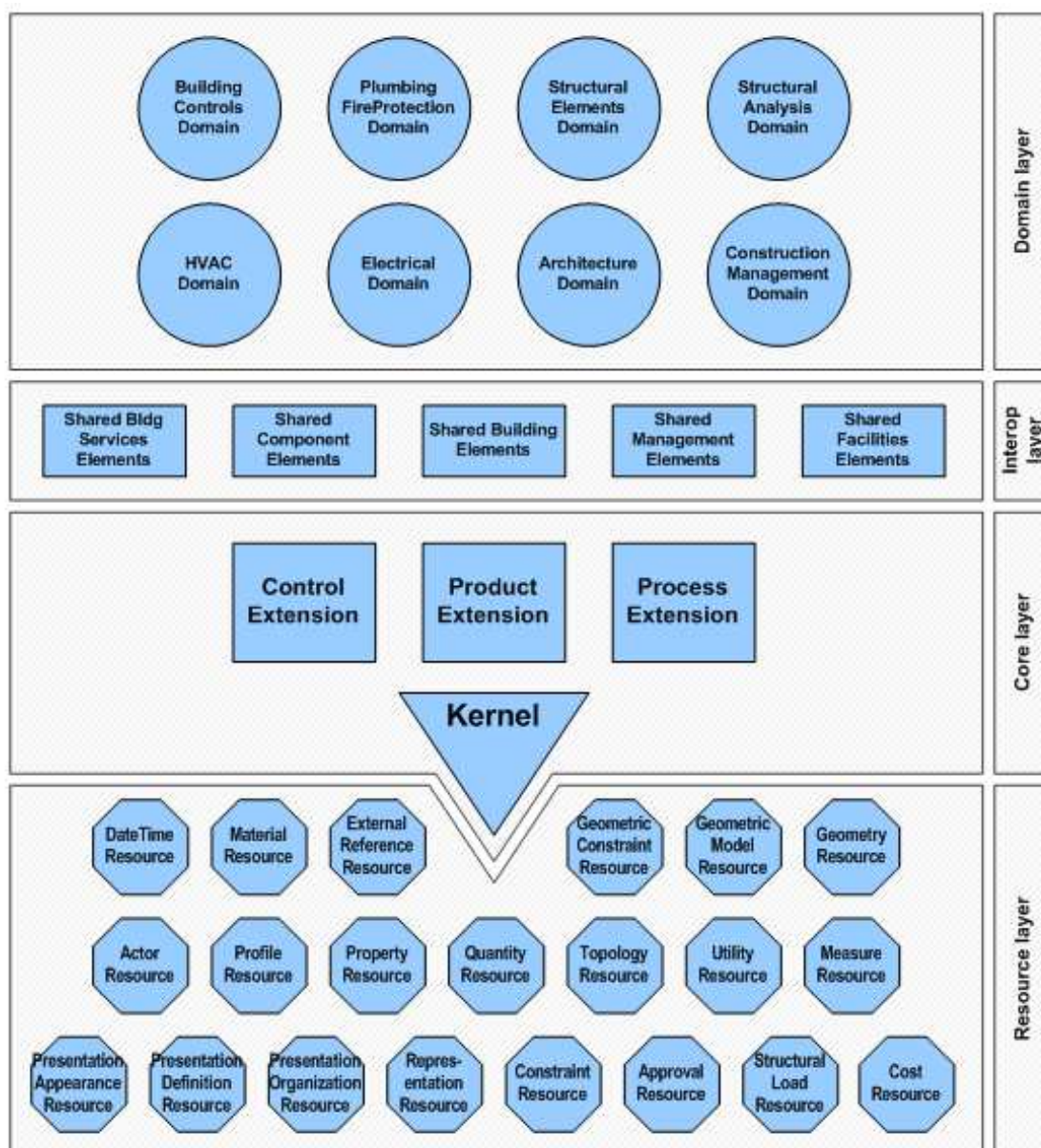
První a nejnižší vrstvou je *Resource layer*, která poskytuje entity a typy, které slouží k definici entit ve vyšších vrstvách. Entity v této vrstvě neobsahují jedinečné globální id a nemohou být definovány samostatně, aniž by na ně nebylo odkazováno z vyšší vrstvy. Je vhodné využívat možnosti vícenásobného odkazování na entity v této vrstvě. Pokud by například dvě křivky měly společný bod, je sémanticky totožný jak zápis, kde budou vytvořeny dvě entity definující stejný bod a každá křivka bude odkazovat na jednu z těchto entit, tak i zápis, kde bude vytvořena pouze jediná entita pro tento bod a bude na něj odkazováno oběma křivkami. Z důvodu přehlednosti a redukce kódu je žádoucí druhý způsob zápisu. Tato třída obsahuje např. entity popisující geometrické tvary, kartézský bod či směrové vektory.

Druhou vrstvou je *Core layer* definující nejobecnější entity z celého IFC schématu, pomocí nichž je vytvářena základní struktura. Na entity z této vrstvy mohou odkazovat a přesněji specifikovat jakékoliv entity z vyšších vrstev. Entitám v této a všech vyšších vrstvách je již přiřazeno jedinečné globální id.

Třetí vrstva s názvem *Interoperability layer* obecně specifikuje reálné objekty či procesy, které jsou většinou sdíleny ve vyšší vrstvě pro více entit. Jinými slovy tato vrstva slouží k výměně či sdílení konstrukčních informací. V této třídě jsou

obsaženy entity, které budou předmětem zájmu pro extrakci geometrických dat o budově, jelikož obsahují entity definující zdi, okna či dveře a další stavební prvky.

Nejvyšší vrstvou je *Domain layer*, jejíž entity definují specifické objekty reálného světa. Na tyto entity již nelze odkazovat. Jednotlivé domény odpovídají přesným odvětvím průmyslu. Zajímavé z pohledu prezentované práce se jeví především HVAC doména obsahující popis HVAC prvků. Entitám z této domény bude věnována závěrečná část této práce.



Obrázek 3.1: IFC třídy. [2]

3.1.2 Příklad průchodu IFC hierarchií

Příklad průchodu IFC hierarchií je zobrazen na Obr. 3.2. Na obrázku je zobrazena ukázka IFC hierarchie standardní zdi. Vše začíná v nejdříve umístěném obdélníku představující instanci entity *IfcRelContainedInSpatialStructure* označenou jedinečným identifikačním číslem 5841, které této instanci přiřadil IFC generátor. Každá

instance entity *IfcRelContainedInSpatialStructure* sdružuje objekty jistého logického bloku. Na zmíněném obrázku lze vidět objekty náležících do jednoho podlaží.

Diagram je dále zaměřen na jednu zeď reprezentovanou entitou *IfcWallStandardCase*. Entitou *IfcWallStandardCase* jsou obvykle reprezentovány standardní zdi s obdélníkovým půdorysem. Tvar této zdi z diagramu lze vyčíst procházením hierarchie skrze entitu *IfcProductDefinitionShape*. Postupně se tak lze přes entitu *IfcShapeRepresentation* dostat k extrudovanému tvaru zdi popsanému entitou *IfcExtrudedAreaSolid*. Tato zeď má obdélníkovou podstavu popsanou entitou *IfcRectangleProfileDef* a směr vysunutí popsaný entitou *IfcDirection*. Rozměry zdi lze vyčíst z parametrů *Xdim* a *Ydim* entity *IfcRectangleProfileDef*.

Globální souřadnice bodů zdi v prostoru jsou dány lokálními souřadnicemi zdi a vztažným bodem. Vztažný bod lze vyčíst skrze entitu *IfcLocalPlacement* k entitě *IfcAxis2Placement3D*. Entita *IfcAxis2Placement3D* odkazuje na vztažný bod soustavy reprezentovaný entitou *IfcCartesianPoint*, kterou může být popsán jakýkoliv obecný bod. Natočení této soustavy je dáno dvěma směrovými vektory pomocí entit *IfcDirection*.

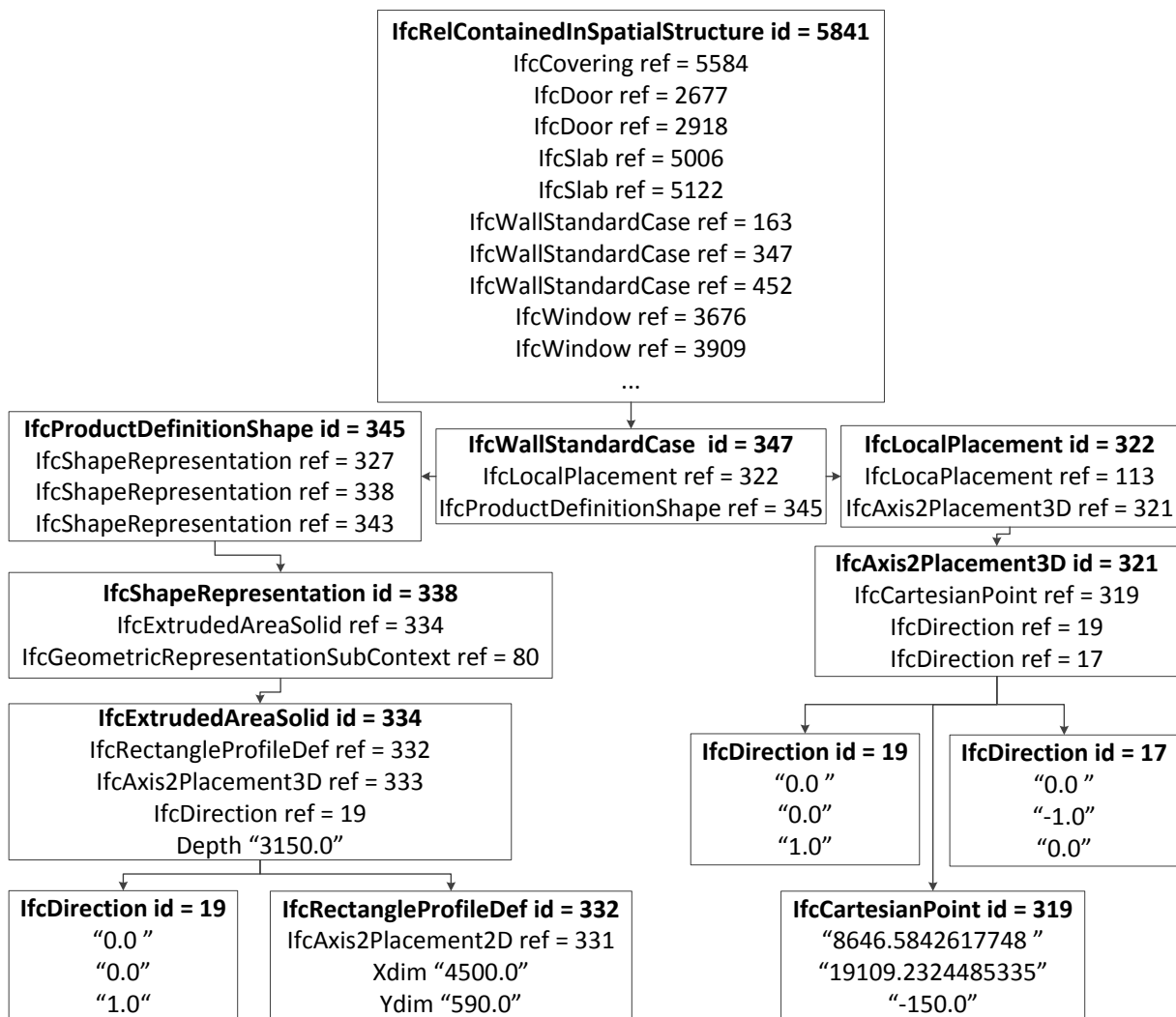
Je vhodné uvést, že k popisu zdí či tvarů ovšem nemusí být využity pouze entity uvedené v příkladu na Obr. 3.2. Zdi s jiným než obdelníkovým půdorysem či jinak neobvyklé zdi jsou reprezentovány entitou *IfcWall*. Tvar zdi může být reprezentován např. entitou *IfcArbitraryClosedProfileDef*. Tato entita popisuje libovolný víceúhelník pomocí výčtu jednotlivých bodů.

Kromě informací o zdech byly dále extrahovány geometrické informace o oknech a dveřích reprezentované entitami *IfcWindow* a *IfcDoor*. Obsahem těchto entit jsou kromě polohy a tvaru oken a dveří také parametry *OverallHeight* a *OverallWidth* udávající velikost dveří a oken. Popis polohy a tvaru dveří a oken je principiálně totožný s příkladem zdi na Obr. 3.2. Zápis se může mírně lišit např. v entitách popisujících tvar okna či dveří.

Rovněž byla extrahována data z entit *IfcSlab*, *ifcCovering* a *ifcBuildingStorey*. První dvě zmíněné entity popisují podlahové a stropní desky. Entita *ifcBuildingStorey* je využívána k určení počtu podlaží budovy a k definici výšky, ve které se dané podlaží nachází.

Informace o materiálech lze z IFC struktury extrahovat průchodem skrze několik entit. U objektů obsahujících jednotlivé vrstvy z rozdílných materiálů je na vrcholu hierarchie k danému předmětu přiřazena entita *IfcMaterialLayerSetUsage*, která definuje orientaci vrstev v objektu. Tato entita odkazuje na entitu *IfcMaterialLayerSet*, jež odkazuje podle počtu materiálů vždy pro každý objekt na určitý počet entit *IfcMaterialLayer*. Entita *IfcMaterialLayer* obsahuje definici tloušťky dané vrstvy materiálu a odkazuje na entitu *IfcMaterial*, která obsahuje název použitého materiálu. Takovéto definice materiálu je v IFC využíváno např. pro zdi, kde je možné určit z jakého materiálu a o jaké tloušťce je izolace a samotné zdivo.

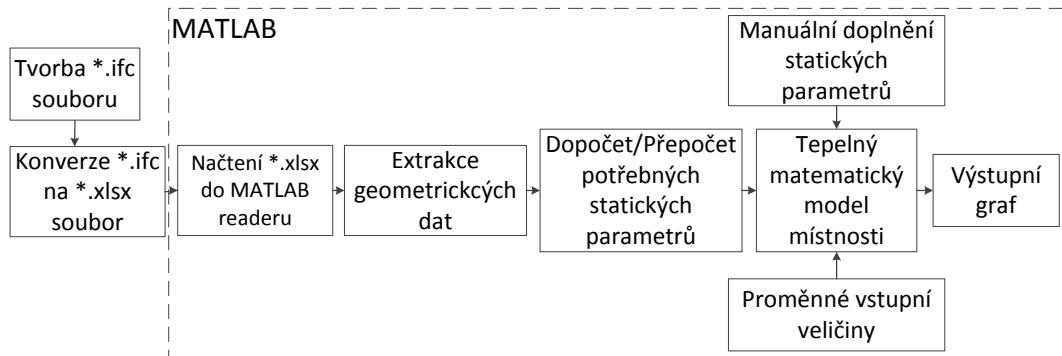
Pro objekty, jež jsou složeny z více materiálů, avšak nelze přesně definovat jednotlivé vrstvy, je na vrcholu hierarchie popisu materiálu k danému předmětu přiřazena entita *IfcMaterialList*, která podle počtu použitých materiálů odkazuje přímo na určitý počet entit *IfcMaterial*. Takovéto definice materiálu je v IFC využíváno např. pro železobeton, o kterém víme, že obsahuje železo a beton, ale materiály nejsou uspořádány do jednotlivých vrstev.



Obrázek 3.2: Ukázka hierarchického stromu IFC.

3.2 Tvorba a zpracování IFC dat

Celý postup procedury vytváření virtuálního senzoru za pomoci automatické extrakce dat z IFC souboru je zobrazen na Obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Řetězec tvorby a zpracování IFC dat.

```

#230= IFCRELDEFINESBYPROPERTIES('2eF3K5IVzBuP98GwyUJqgC',#41,$,$,(#179),#228);
#233= IFCCCLASSIFICATION('http://www.csiorg.net/uniformat','1998',$,'Uniformat');
#235= IFCCARTESIANPOINT((-5143.25700030021,8046.67882566989,0.));
#237= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#235,#19,#17);
#238= IFCLOCALPLACEMENT(#136,#237);
#239= IFCCARTESIANPOINT((3000.,0.));
#241= IFCPOLYLINE((#9,#239));
#243= IFCSHAPE REPRESENTATION(#86,'Axis','Curve2D',(#241));
#245= IFCCARTESIANPOINT((1500.,0.));
#247= IFCAXIS2PLACEMENT2D(#245,#25);
#248= IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$,#247,3000.,200.);
#249= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#6,$,$);
#250= IFCEXTRUDEDAREASOLID(#248,#249,#19,2500.);
#251= IFCSTYLEDITEM(#250,(#167),$);
#254= IFCSHAPE REPRESENTATION(#88,'Body','SweptSolid',(#250));
#256= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,(#243,#254));
  
```

Obrázek 3.4: Ukázka IFC zápisu.

Prvním krokem je vytvoření BIM modelu ve formátu IFC. V této práci byl k tomuto účelu využit BIM software Revit od společnosti Autodesk, který v době vzniku této práce měl implementovanou verzi IFC2x3. Po vygenerování je k dispozici soubor s koncovkou *.ifc obsahující tisíce řádků, které jsou jen obtížně čitelné člověkem. Část vygenerovaného IFC zápisu lze vidět na Obr. 3.4. V prezentovaném postupu byl proto zvolen mezikrok k zřehlednění IFC zápisu. Mezikrok je založen na konverzi *.ifc souboru do formátu *.xlsx pomocí freeware softwaru IFC File Analyzer [19]. Sešit vygenerovaný tímto softwarem obsahuje počet listů odpovídající počtu IFC entit použitých v původním *.ifc souboru. A každý sešit má tolik řádků, kolik je použito instancí od dané IFC entity v původním *.ifc souboru. Atributy každé entity jsou v listech sešitu přehledně rozděleny ve sloupcích s hlavičkami.

Soubor *.xlsx je následně nahrán naprogramovaným softwarem v prostředí MATLAB. Ze sešitu s IFC informacemi jsou vyextrahovány pouze listy neboli entity zájmu, z nichž jsou vyextrahovány potřebné informace do několika tabulek:

- soustava tabulek se souřadnicemi všech zdí,
- soustava tabulek se souřadnicemi všech podlahových desek,
- soustava tabulek se souřadnicemi všech stropních desek,
- soustava tabulek s rozměry a polohou oken,
- soustava tabulek s rozměry a polohou dveří.

Nutno uvést, že poloha oken a dveří je určována pomocí souřadnic jednoho rohu daného elementu. Souřadnice jednoho rohu jsou snadno extrahovatelné a přesná orientace okna ve zdi pro účel tepelného modelu není nutná. Přiřazení oken či dveří ke zdi je prováděno porovnáním souřadnic jednotlivých zdí se souřadnicemi jednoho rohu dveří či oken.

Dále je nutné uvést, že souřadnice bodů všech objektů jsou po extrakci pouze lokální ve vztahu k souřadnicím jiného bodu. Proto jsou po extrakci všechny souřadnice přepočítány do jednotných globálních souřadnic. Každý bod je potom jednoduše určen třemi souřadnicemi. Po přepočtu vzniknou nové tabulky:

- tabulka s globálními souřadnicemi všech zdí,
- tabulka s globálními souřadnicemi všech podlahových desek,
- tabulka s globálními souřadnicemi všech stropních desek,
- tabulka s globálními souřadnicemi oken a dveří.

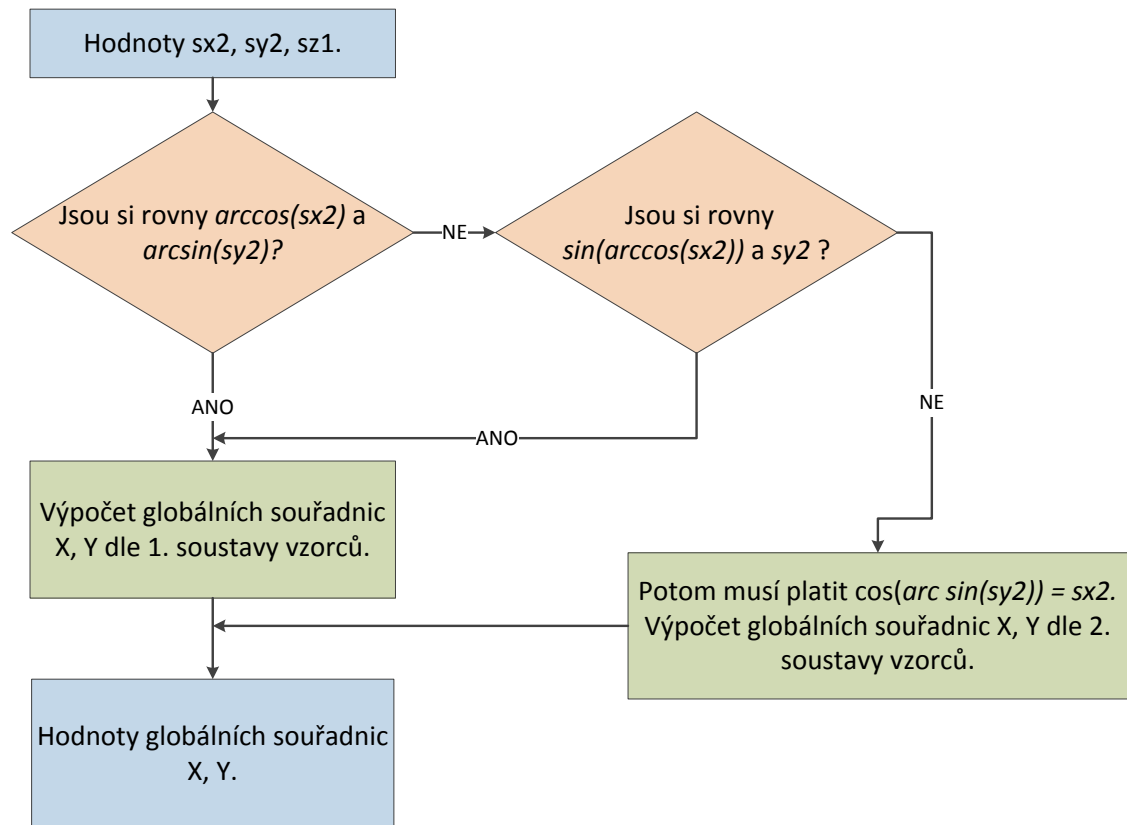
Následuje zpracování dat, kdy jsou děleny zdi zasahující do více pokojů. Po rozdělení zdí jsou dopočítány údaje o ploše a objemu zdí, ploše a objemu podlah, ploše oken a dveří a o objemu vzduchu v místnosti. Tato geometrická data jsou použita při tvorbě tepelného modelu místnosti. Podrobnější postup každého kroku zpracování vyextrahovaných dat je popsán v následujících podkapitolách.

3.2.1 Výpočet globálních souřadnic

Již výše bylo zmíněno, že po extrakci dat z IFC souboru je každý bod jistého objektu určen jeho souřadnicemi, souřadnicemi vztažného bodu a směrovými vektory určující natočení lokální soustavy vzhledem ke globální soustavě. Pro usnadnění dalších operací s jednotlivými geometrickými útvary představující zdi, podlahy atp., je nutné získat globální souřadnice každého bodu.

Pro usnadnění zápisu použitých matematických vzorců budou zavedeny tyto zkratky:

- souřadnice X, Y lokálního bodu b_x, b_y ,
- dva směrové vektory dané kombinací vektorů X, Y, Z $s_{x1}, s_{y1}, s_{z1}, s_{x2}, s_{y2}, s_{z2}$,



Obrázek 3.5: Vývojový diagram výpočtu globálních souřadnic.

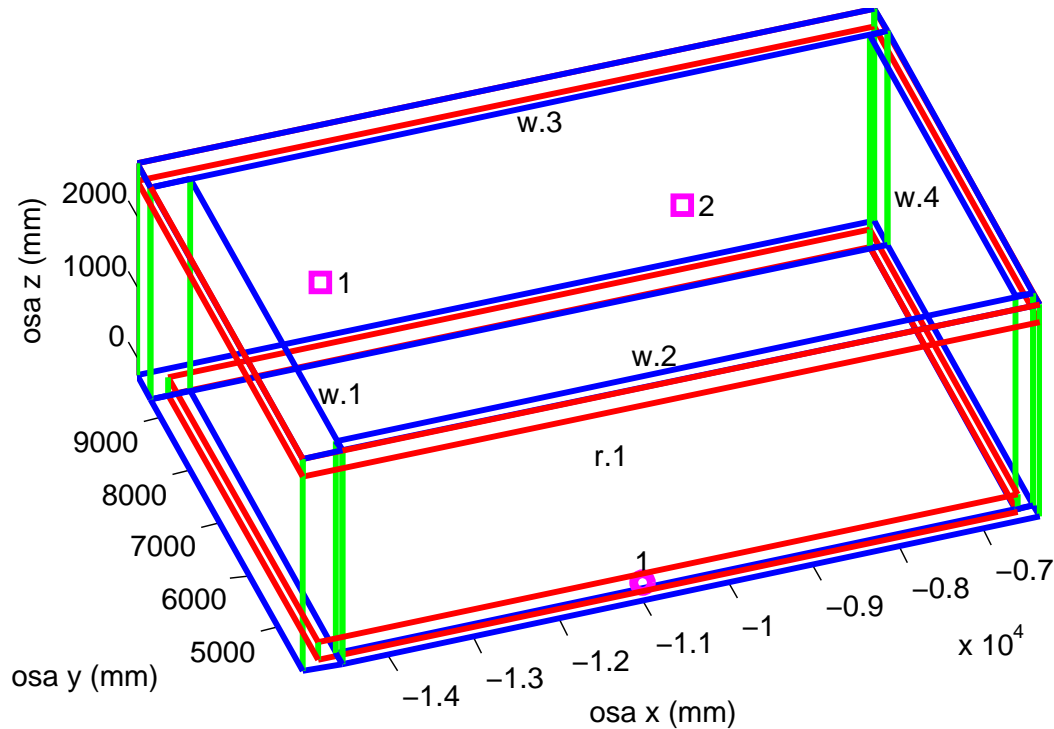
- souřadnice X, Y, Z vztahného bodu v_x, v_y, v_z ,

, kde každý ze dvou směrových vektorů je dán kombinací třech vektorů v osách X, Y, Z s maximální délkou 1. Všechny doposud odzkoušené IFC modely domů či místností měly vždy s_{x1} , s_{y1} a s_{z2} rovny 0. Vektor s_{z1} nabýval hodnot 1 či -1 a určoval tak horizontální natočení lokální soustavy v horizontální ose. Vektory s_{x2} a s_{y2} nabývaly různých hodnot v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$ a jejich kombinací vznikl směrový vektor určující natočení lokální soustavy okolo vertikální osy.

Vývojový diagram výpočtu globálních souřadnic je zobrazen na Obr. 3.5, kde 1. soustavou vzorců je myšlena soustava 3.1 a 2. soustavou vzorců je myšlena soustava 3.2. Přepočítání globálních souřadnic spočívá ve výpočtu funkcí arccos a arcsin, kde jako argument jsou použity proměnné s_{x2} a s_{y2} . Následně jsou tyto výsledné hodnoty porovnány. Rovnají-li se, je proveden výpočet dle 3.1.

$$\begin{aligned} X &= (b_x \cdot \cos(\arccos(s_{x2})) - s_{z1} \cdot b_y \cdot \sin(\arccos(s_{x2}))) + v_x, \\ Y &= (b_x \cdot \sin(\arccos(s_{x2})) + s_{z1} \cdot b_y \cdot \cos(\arccos(s_{x2}))) + v_y. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Pokud se ovšem výsledné hodnoty nerovnají, výsledek z operace $\arccos(s_{x2})$ je použit jako argument funkce sin a výsledek z operace $\arcsin(s_{y2})$ je použit jako argument funkce cos. Následuje porovnání, zda-li se výsledek operace $\sin(\arccos(s_{x2}))$ rovná s_{y2} , pokud ano, je použita soustava vzorců 3.1. Pokud tato rovnost neplatí, potom musí platit rovnost $\cos(\arcsin(s_{y2})) = s_{x2}$ a je použita soustava vzorců



Obrázek 3.6: Vizualizace testovacího objektu - jeden pokoj.

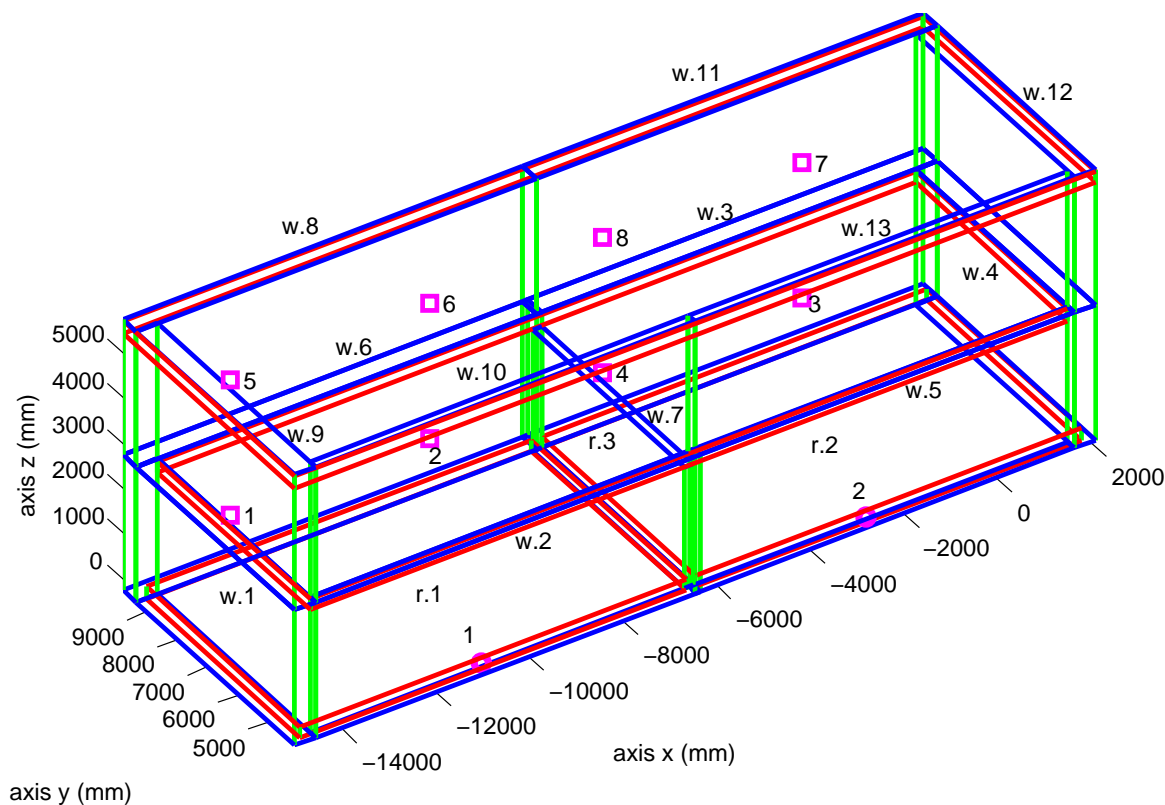
3.2. Souřadnice Z je dopočítána součtem vbz a výškou patra, ve kterém se daný objekt nachází.

$$\begin{aligned} X &= (b_x \cdot \cos(\arccos(s_{y2})) - s_{z1} \cdot b_y \cdot \sin(\arccos(s_{y2}))) + v_x, \\ Y &= (b_x \cdot \sin(\arccos(s_{y2})) + s_{z1} \cdot b_y \cdot \cos(\arccos(s_{y2}))) + v_y. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Extrakce dat z IFC a výpočet globálních souřadnic byl testován na několika testovacích místnostech či domech. Prvním testovacím objektem byla jedna místnost. Kontrolní vizualizace v MATLABu je zobrazena na Obr. 3.6. Modře jsou vyznačeny vodorovné linie zdí, zeleně svislé linie zdí. Červeně jsou vyznačeny linie stropních a podlahových desek. Růžové čtvercové značky symbolicky naznačují přítomnost okna ve zdi a růžové kulaté značky naznačují přítomnost dveří ve zdi. Všechny místnosti, zdi, okna i dveře jsou očíslovány. Číslo místností obsahuje prefix r., čísla zdí obsahují prefix w. Na Obr. 3.6 lze vidět dvě naznačená okna ve zdi w.3 a dveře ve zdi w.2.

Dále byl testován IFC model vícepodlažního objektu, který je zobrazen na Obr. 3.7. Lze si opět všimnout vyznačené dvojice oken růžovými čtverečky ve zdech w.3, w.6, w.8 a w.11. Vstupní dveře do objektu jsou vyznačené růžovou kulatou značkou ve zdech w.2 a w.5.

Vhodné je upozornit na podlahové desky, které jsou oddělené pro každou místnost. Pro využití prezentované metody je nutné podlahové desky již při kreslení v BIM softwaru kreslit pro každou místnost zvlášť. Podlahovými deskami jsou tak jednoznačně určeny hranice místností a lze tak snadno programem určit místnost, pro kterou má být virtuální senzor teploty vytvořen. Zároveň lze snadno dopočítávat parametry, jako je např. objem vzduchu v místnosti.



Obrázek 3.7: Vizualizace testovacího objektu - dvě patra.

3.2.2 Dělení zdí

Dalším krokem ve zpracování dat po výpočtu globálních souřadnic je dělení zdí. Dělení zdí je nutné s ohledem na výpočet tepelného modelu budovy, kdy tepelný model je počítán vždy pro jednotlivé místnosti, pro které je nutné znát plochu zdí. Problém vzniká již při kreslení návrhu domu v BIM softwaru. Při tvorbě návrhu budovy jsou obvykle nejdříve nakresleny obvodové zdi objektu a následně vloženy vnitřní příčky. Obvodové zdi tak zasahují do více místností a nelze přesně spočítat plochu či objem zdi, skrze kterou probíhá výměna tepla mezi vnitřním a vnějším prostředím místnosti.

Algoritmus dělení zdí spočívá ve vyhledávání rohových bodů ostatních zdí ležících na pohledové straně dělené zdi. Pohledovou stranou zdi je myšlena delší strana obdélníku, jehož obrys má standardní zeď při půdorysném pohledu. Předpokládá se, že pohledová strana zdi je delší v porovnání s tloušťkou zdi. Při tomto způsobu identifikace pohledové strany zdi může dojít k chybné identifikaci pohledové zdi v případě, že by se délka pohledové strany zdi rovnala či byla menší než tloušťka zdi. Chybná identifikace pohledové strany zdi by mohla mít za následek nerozdělení zdi či rozdělení zdi v rovnoběžném směru s pohledovou stranou zdi. V tomto případě se předpokládá malá chyba v porovnání malé plochy zdi s celkovou plochou všech zdí v místnosti.

Vyhledávání rohových bodů je realizováno pomocí výpočtu obecné rovnice přímky, kde přímkou je myšlena spojnice bodů delší strany obdélníku při půdorysném pohledu na standardní zeď. Následně jsou do těchto rovnic dosazovány body z ostatních zdí, kromě zdí, které mají např. jeden stejný bod jako zeď, od které jsou určeny

obecné rovnice. Je totiž pravděpodobné, že zdi, které mají alespoň jeden stejný bod, na sebe budou konci navazovat. V případě zjištění některých bodů jiných zdí, ležících na dělené zdi, jsou tyto body, z každé strany zdi samostatně seřazeny podle vzdálenosti. Body jsou řazeny od stejného konce dělené zdi. Potom jsou k dispozici dvě množiny bodů, kde každá množina obsahuje body seřazené podle vzdálenosti od jednoho konce zdi z každé strany zdi. Následně jsou vždy porovnány první body v pořadí z každé množiny a podle nejbližšího bodu k jednomu konci zdi je zeď dělena. Nově vytvořená zeď je uložena do tabulky se zdmi. Druhý kus zdi je případně dělen podle dalšího bodu v pořadí atd.

Ukázka dělení zdí je zobrazena na následujících obrázcích. Byl zvolen objekt obsahující dvě místnosti. Na Obr. 3.8a jsou vidět zdi označené w.3 a w.4, ke kterým je kolmo připojena příčná zeď w.5. Vzhled objektu po rozdělení zdí je zobrazen na Obr. 3.8b. Zeď w.1 byla rozdělena na zdi w.1 a w.2. Zeď w.3 byla rozdělena na zdi označené w.5 a w.4.

3.2.3 Přiřazení zdí k místnostem

Nezbytným údajem pro tvorbu tepelného modelu, který bude fungovat jako virtuální senzor, je identifikace zdí obléhající místnost, pro který je virtuální senzor teploty vytvářen. Záměrem bylo vytvořit algoritmus k automatické identifikaci.

Nápadem na jednoduchou realizaci tohoto algoritmu bylo určení prvních N zdí s nejkratší spojnici mezi půdorysným středem místnosti, resp. podlahy a půdorysným středem zdi, kde N je rovno počtu stran mnohoúhelníku, který představuje půdorysný tvar podlahy. Střed podlah i zdi jsou myšleny v půdorysném pohledu, tedy v rovině XY . Výška těchto středových bodů by byla pro všechny podlahy a zdi v jednom patře stejná. Takovýto způsob identifikace zdí by byl ovšem spolehlivý pouze v jednoduchých případech. Při složitějších tvarech místností by mohlo docházet k chybné identifikaci.

Dalším složitějším způsobem, jak automatickou identifikaci zdí realizovat, je hledání uzavřené cesty, jelikož zdi si lze představit jako cesty grafu a spoje dvou či více zdí jako vrcholy. Problémem by mohlo být určení všech vrcholů grafu, jelikož zdi mohou mezi sebou být napojeny více způsoby.

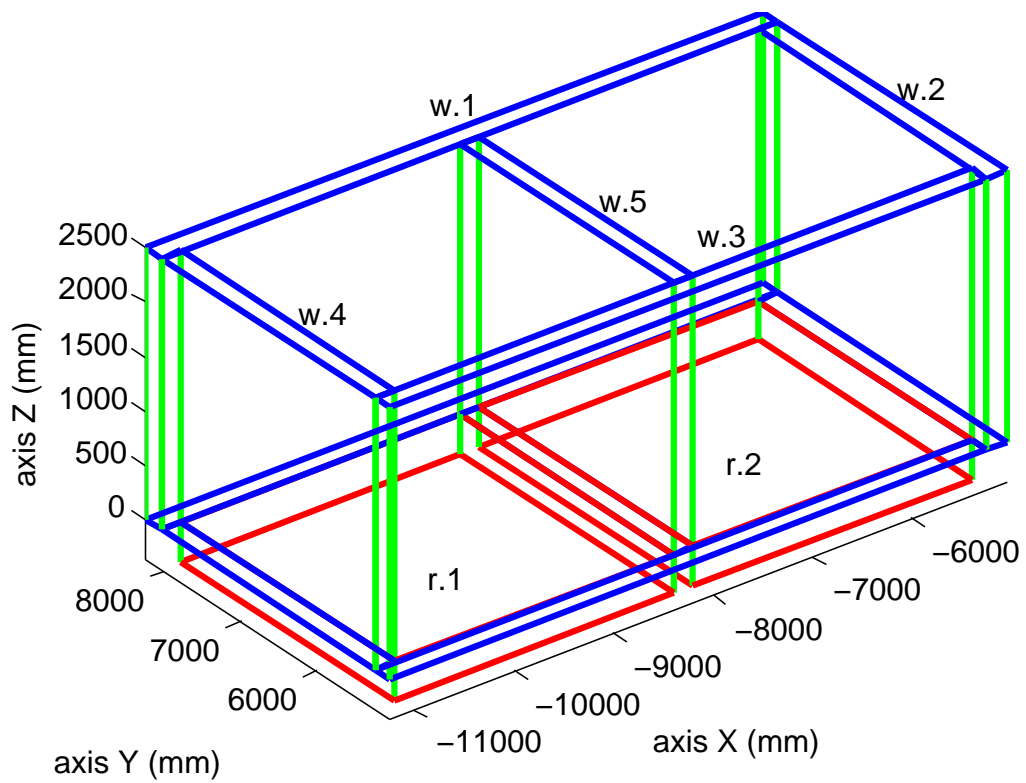
V tomto prezentovaném případě byl nakonec zvolen nejspolehlivější způsob manuálního zadání. Na základě očíslovaných zdí ve vizualizaci budovy v prostředí MATLAB jsou programu zadána čísla zdí obléhající místnost, pro kterou má být matematický model počítán.

3.3 Tepelný dynamický model místnosti

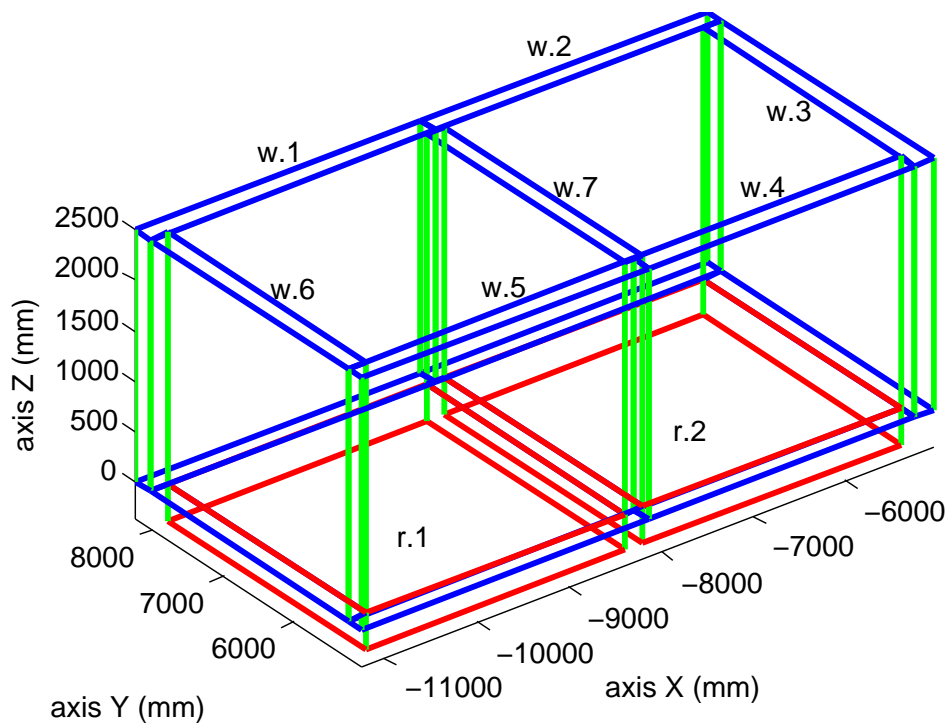
Pro modelování tepelné dynamiky místnosti byl zvolen matematický model představený v práci [18]. Požadavkem na modelování tepelné dynamiky místnosti pro prezentovaný účel bylo použití exaktních rovnic s minimem empiricky odvozených parametrů. Tento požadavek je splněn také např. v práci [20] založené na přirovnání zdí k RC síti. Ovšem při modelování místnosti nabývá model značné složitosti a vysokého řádu.

Základem zvoleného modelu je rovnice:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum \phi_{in} - \sum \phi_{out}, \quad (3.3)$$



(a) Dvoupokoj se zdmi bez rozdělení.



(b) Dvoupokoj s rozdělenými zdmi.

Obrázek 3.8: Ukázka funkce algoritmu pro dělení zdí.

představující rovnost mezi levou stranou vyjadřující změnu teploty T_i ($^{\circ}\text{C}$) násobenou tepelnou kapacitou C_i ($\text{J}/(^{\circ}\text{C})$) místnosti a pravou stranou vyjadřující rozdíl sum všech vstupujících ϕ_{in} (J/h) a vystupujících tepelných toků ϕ_{out} (J/h) v místnosti.

Druhou podstatnou rovnicí je zápis tepelného toku skrze zeď:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \phi_w = B_w(T_j - T_i), \quad (3.4)$$

kde B_w ($\text{J}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) je tepelná vodivost zdi, T_j a T_i ($^{\circ}\text{C}$) jsou teploty na každé straně zdi. Pomocí této diferenciální rovnice prvního řádu lze rovněž vyjádřit tepelný tok skrze podlahu, okno či dveře.

Výsledné rovnice pro vývoj teploty vzduchu a teploty podlahy v místnosti lze zapsat:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{w=1}^n B_w(T_{j_w} - T_{i_w}) + (1 - p)\phi_s, \quad (3.5)$$

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = B_a(T_i - T_a) + p\phi_s, \quad (3.6)$$

kde B_a ($\text{J}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) je tepelná vodivost podlahy a C_a ($\text{J}/(^{\circ}\text{C})$) je tepelná kapacita podlahy. V rovnici 3.5 je uveden součet tepelných toků skrze všechny zdi a započítané sluneční záření ϕ_s (J/h), jež je podstatným zdrojem tepla ve vnitřních prostorech. Je předpokládáno, že slunečním zářením je ohříván částečně vzduch a částečně podlaha. Množství tepla využitého pro ohřev vzduchu v místnosti je dáno bezrozměrným parametrem p (-). Sluneční záření je dáno vztahem:

$$\phi_s = I \cdot A, \quad (3.7)$$

kde A (m^2) je efektivní plocha okna, I ($\text{J}/\text{h} \cdot \text{m}^2$) je intenzita slunečního záření. Efektivní plochou okna je myšleno skutečné množství slunečního záření, které skrze sklo projde. Je předpokládáno, že část slunečního záření bude sklem odražena a část pohlcena. Efektivní plocha okna je uvažována na 60% nominální plochy okna.

Dynamickými vstupy tepelného modelu místnosti jsou teplota a intenzita slunečního záření za každou zdi. Intenzita slunečního záření je velmi často měřena globálně. Globální sluneční osvit je vhodné přepočítat na intenzitu slunečního záření dopadajícího na obecně položenou plochu [3]:

$$\cos \gamma = \sin h \cdot \cos \alpha + \cos h \cdot \sin \alpha \cdot \cos (a - a_s), \quad (3.8)$$

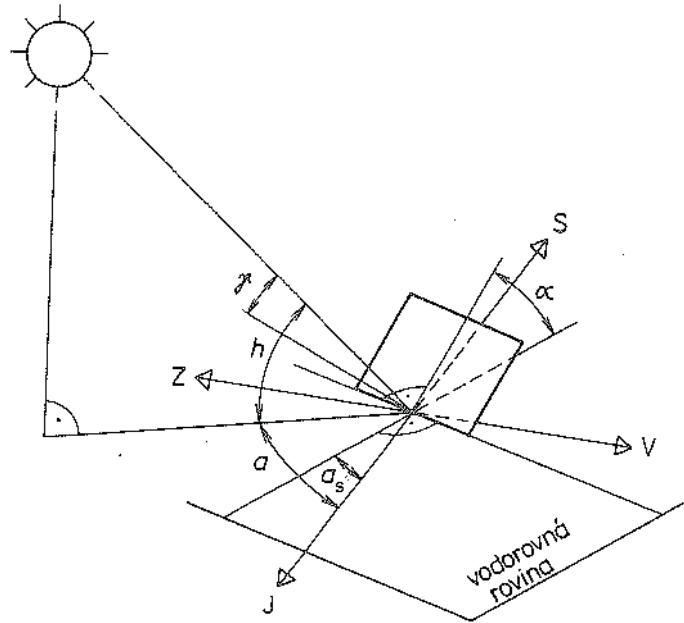
$$I_p = I_g \cdot \cos \gamma, \quad (3.9)$$

kde h ($^{\circ}$) je výška slunce nad obzorem, a ($^{\circ}$) je azimut slunce, a_s ($^{\circ}$) je azimut osluněné plochy, α ($^{\circ}$) je sklon osluněné plochy od vodorovné roviny a γ ($^{\circ}$) je úhel dopadu slunečních paprsků, viz Obr. 3.9.

Statické parametry C a B nutné k výpočtu rovnic 3.5 a 3.6 jsou dopočítány použitím vztahů:

$$C = c \cdot m; m = V \cdot \rho \quad \Rightarrow \quad C = c \cdot V \cdot \rho, \quad (3.10)$$

$$B = U \cdot S, \quad (3.11)$$



Obrázek 3.9: Výpočet intenzity slunečního záření na obecně položenou plochu [3].

kde c (J/(kg · K)) je měrná tepelná kapacita daného materiálu, m (kg) je hmotnost daného materiálu, V (m³) objem a ρ (kg/m³) hustota daného materiálu. Tepelná vodivost B je vypočítána vynásobením koeficientu prostupu tepla U (W/m² · K) materiálu daného objektu a plochy S objektu.

Z výše zmíněných statických parametrů byly automaticky extrahovány z BIM tyto:

- S_n - celková plocha oken należící dané zdi (m²),
- S_d - celková plocha dveří należící dané zdi (m²),
- S_w - celková plocha zdi bez ploch oken a dveří (m²),
- V_w - celkový objem zdi bez oken a dveří (m³),
- V_r - celkový objem vzduchu v místnosti (m³),
- S_f - celková plocha podlahy v místnosti (m²),
- V_f - celkový objem podlahy v místnosti (m³).

Automaticky extrahované parametry z BIM nejsou ovšem dostupné přímo v požadovaném tvaru obsahu plochy či objemu tělesa. Extrahovány jsou jednotlivé body, jak již bylo popsáno výše v kapitole 3.2. Z bodů jsou získávány rozměry objektů a z těch dopočítávány obsahy a objemy. Obsah pohledové strany zdí, oken a dveří je počítán užitím obecně známého vzorce pro výpočet obdélníku. Pro výpočet obsahu podlah ve tvaru mnohoúhelníku byla použita tzv. Gaussova metoda pro výpočet plochy [21]:

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right|, \quad (3.12)$$

kde (x_i, y_i) jsou souřadnice vrcholů mnohoúhelníka, x_{n+1} a y_{n+1} jsou x_1 a y_1 .

Dále bylo nutné manuálně dodat parametry:

- U_n - součinitel prostupu tepla okna ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),
- U_d - součinitel prostupu tepla dvermi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),
- U_w - součinitel prostupu tepla zdi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),
- c_w - měrná tepelná kapacita materiálu zdi ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$),
- ρ_r - hustota vyduchu v místnosti (kg/m^3),
- c_r - měrná tepelná kapacita vyduchu v místnosti ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$),
- ρ_f - hustota materiálu podlahy v místnosti (kg/m^3),
- c_f - měrná tepelná kapacita materiálu podlahy ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$),
- B_a - tepelná vodivost mezi podlahou a vzduchem v místnosti ($\text{J}/^\circ\text{C} \cdot \text{h}$),
- E_f - efektivní plocha okna např. 0,6 (–),
- p - podíl ohřátí podlahy a vzduchu v místnosti, 0 znamená ohřev pouze vzduchu v místnosti (–).

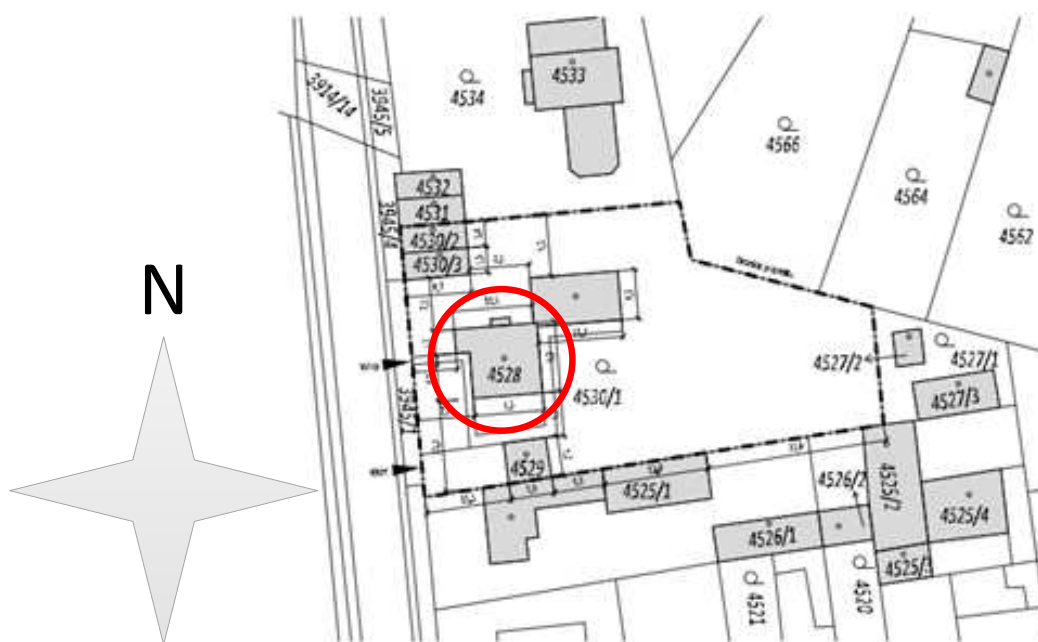
Jelikož BIM ve formátu IFC umožňuje ukládání materiálů objektů a např. u zdí lze zapisovat i vícevrstvé materiály, značné redukce manuálně zadávaných parametrů by bylo možné dosáhnout čtením materiálů jednotlivých objektů z BIM a pomocí vytvořené spojovací tabulky obsahující databázi materiálů určit potřebné koeficienty. Způsob ukládání materiálů v IFC struktuře byl popsán v kapitole 3.1.2. Pro software vytvořený v této práci je nutné materiálové konstanty dohledat a potřebné veličiny dopočítat.

K výpočtu součinitele prostupu tepla byl použit vzorec [22]:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{n=1}^m R_n + R_{se}}, \quad (3.13)$$

$$R_n = \frac{d_n}{\lambda_n}, \quad (3.14)$$

kde U ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) je požadovaný součinitel prostupu tepla materiálu, R_{si} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) je vnitřní tepelný odpor při prostupu tepla, R_{se} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) je vnější tepelný odpor při prostupu tepla, R_n ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) je tepelný odpor n -tého materiálu, d_n (m) je tloušťka n -té vrstvy stěny stavební konstrukce a λ_n ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$) je součinitel tepelné vodivosti n -té vrstvy stěny stavební konstrukce. Hodnoty $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ a $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ jsou pro rovinné neprůsvitné plochy při vodorovném směru tepelného toku stanoveny v ČSN EN ISO 6946.



Obrázek 3.10: Orientace zpracovávaného domu dle světových stran.

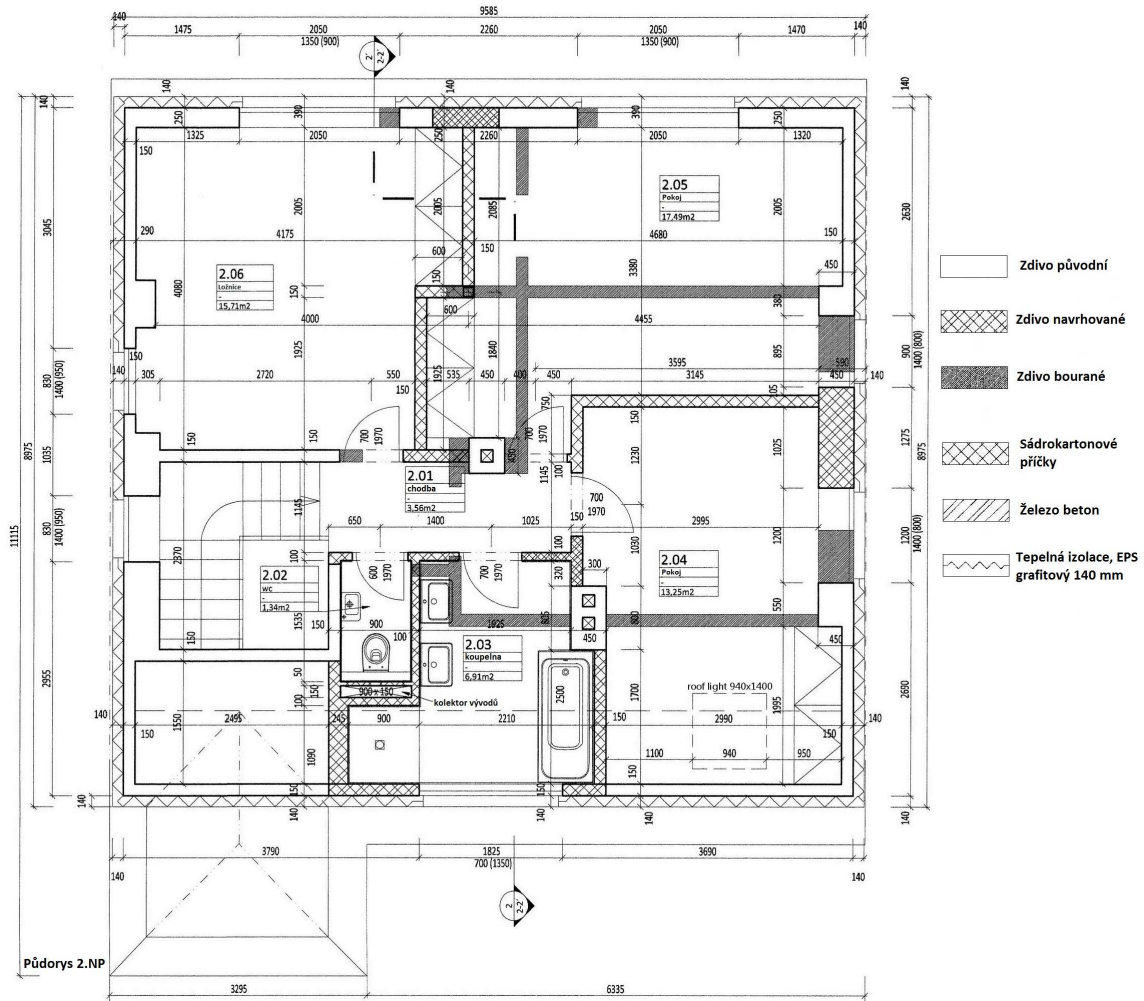
3.4 Tvorba virtuálního senzoru teploty pro skutečnou budovu

Pro testování představované metodiky vytváření virtuálního senzoru teploty při použití automatické extrakce dat z BIM byl použitý reálný dům. Použitý dům byl vybrán z důvodu dostupných teplotních dat k jednotlivým pokojům. Dům je dvou-podlažní, avšak pro účel testování bylo uvažováno pouze první nadpodlaží. Orientace domu dle světových stran je ukázána na Obr. 3.10.

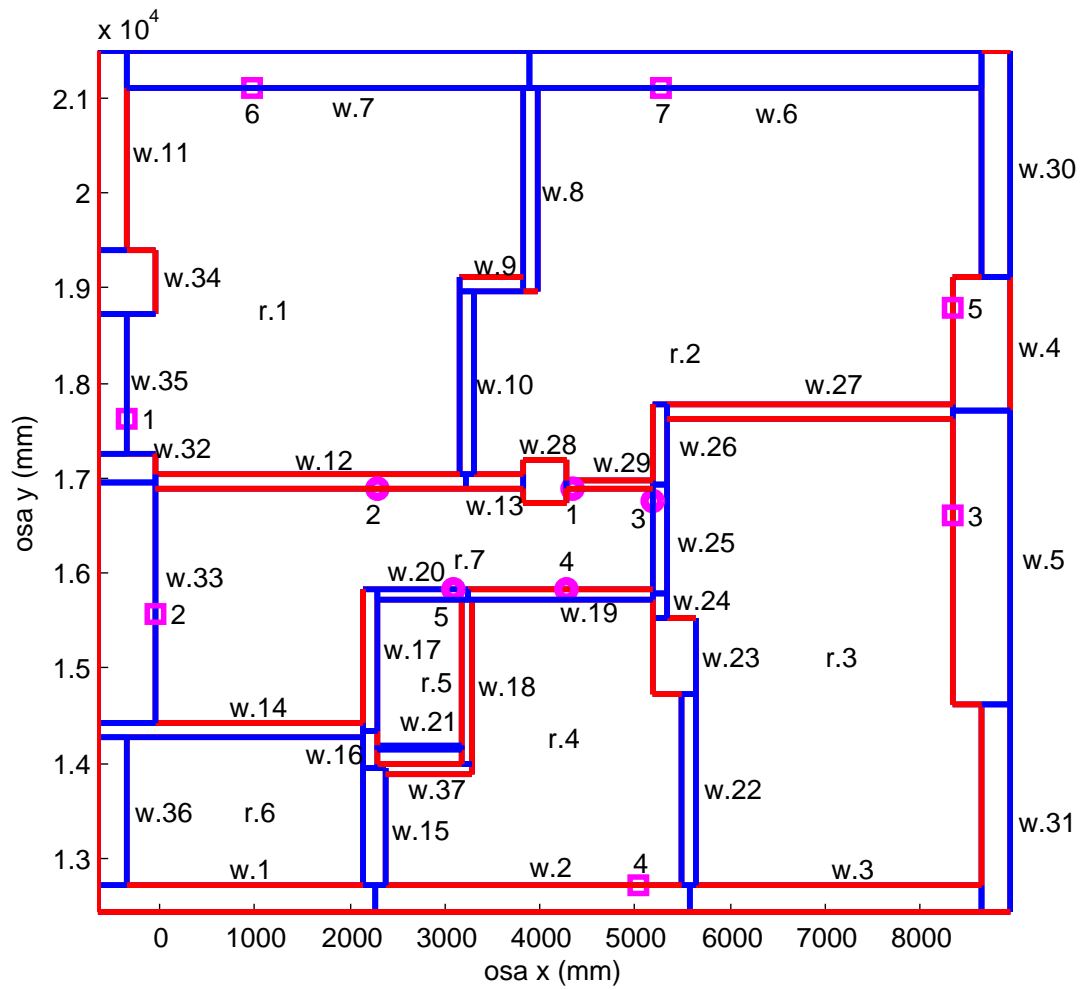
Podle výkresu na Obr. 3.11 byl dům překreslen v softwaru Autodesk Revit a procesem, jež byl naznačen a popsán na Obr. 3.3, byla získána geometrická data umožňující kontrolní vizualizaci budovy v prostředí MATLAB zobrazenou na Obr. 3.12 a Obr. 3.13.

Na základě vizualizace je uživatelem sdělena programu informace o čísle pokoje, pro který má být tepelný model vytvářen a čísla zdí náležející danému pokoji. V tomto případě byl matematický model tvořen pro místnost r.1, jelikož v jistém období nebyla vytápěna, což vyhovovalo zvolenému tepelnému matematickému modelu, kde nebyly uvažovány jiné zdroje tepla než-li slunce a sousední místnosti. Zdi tohoto pokoje w.32, w.35, w.34 a w.11 jsou orientovány severním směrem a zeď w.7 je orientována východním směrem. Zbylé zdi w.8, w.9, w.10 a w.12 jsou orientovány do sousedních místností.

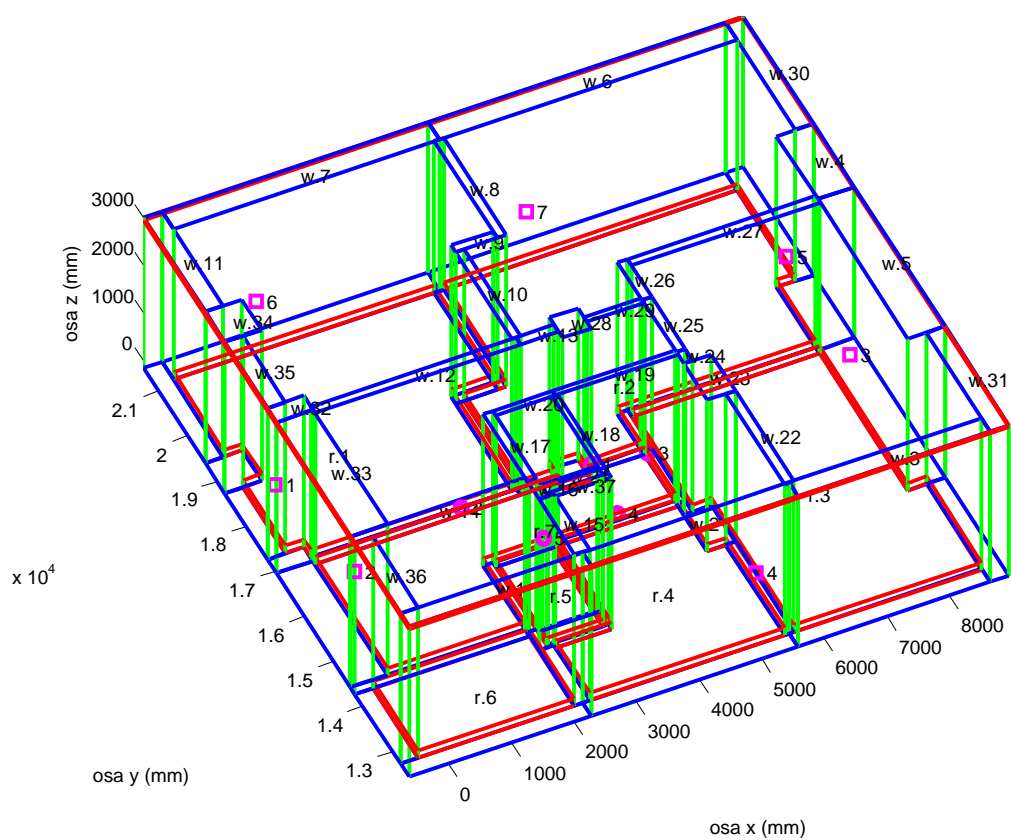
Každé zdi musí být uživatelem přiřazen vstup z reálných senzorů informujících o teplotě za danou zdi a slunečním osvětlení této zdi. Jako testovací vstupní data byly použity teploty naměřené v jednotlivých pokojích za období měsíc Leden 2014. Venkovní teplota a globální sluneční osvětlení pro stejné období nejsou v domě zazname-



Obrázek 3.11: Půdorysný výkres zpracovávaného domu.



Obrázek 3.12: Vizualizace extrahovaných geometrických dat z BIM, půdorys.



Obrázek 3.13: Vizualizace extrahovaných geometrických dat z BIM, perspektiva.

Čas	Výška slunce nad obzorem	Azimut slunce
8:00	0°	90°
12:00	23°	180°
16:40	0°	270°

Tabulka 3.1: Určené mezní hodnoty polohy slunce v čase.

Materiál	λ (W/m · K)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg · K)
Cihla [24]	0.8	1477.836	1620
Sádrokarton [25]	0.22	1477.386	1620
EPS grafitový [26]	0.032	16.5	1270
Vzduch [27]	0.025	1.188	1010
Beton [25]	1.43	2300	1020

Tabulka 3.2: Konstanty použitých materiálů.

návány, proto byly získány z meteorologické stanice ČZU vzdálené necelých 20 km. Vzkovovací perioda všech vstupních dat je 10 min. Před použitím byla reálná vstupní data o teplotě předzpracována. Předzpracování spočívalo v odstranění nespojitostí a zákmitů signálů, jak je ukázáno na Obr. 3.14.

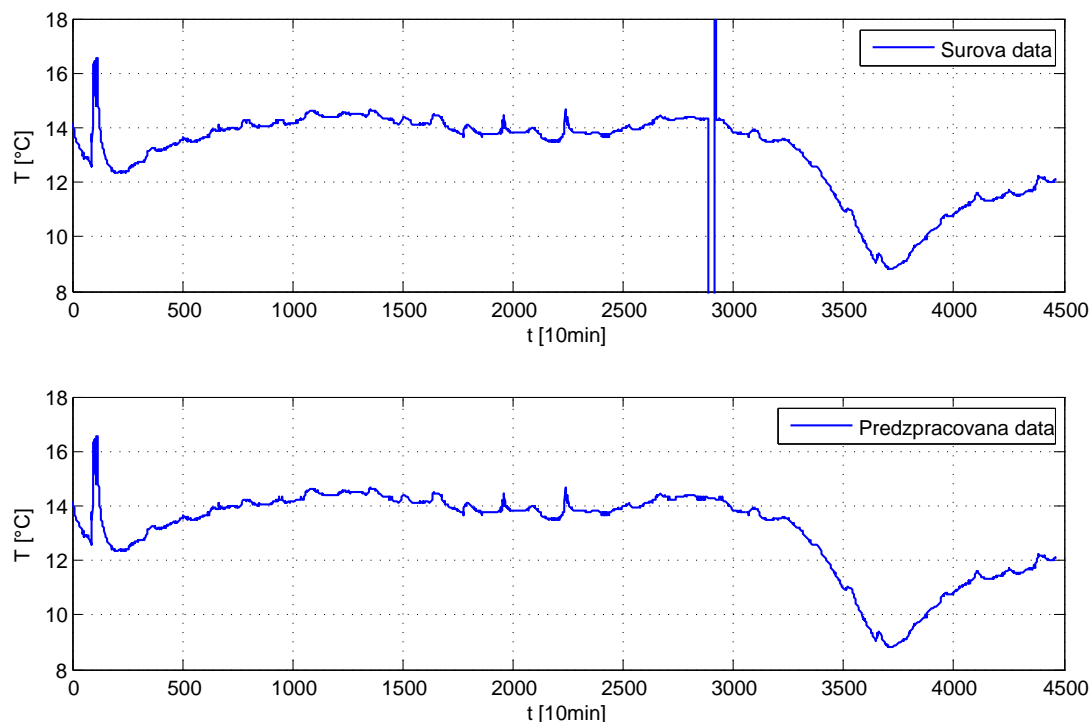
Jelikož zvolený matematický model počítá pouze s teplem ze slunečního svitu prostupujícího skrze okna, ne skrze zdi, byl globální sluneční osvit přepočítán na plošný osvit svislé východní plochy. Tedy jediné zdi pokoje, oddělující vnitřní od venkovního prostředí, obsahující okno. Přepočet byl proveden pomocí vzorců 3.8 a 3.9. Zbylé zdi zvolené místnosti oddělující vnitřní a venkovní prostředí jsou severní orientace a tak neobsahují okno.

Maximální výška slunce nad obzorem pro měsíc leden byla určena na 23°. Tato hodnota byla získána jako průměrná maximální výška slunce nad obzorem každý den za měsíc leden. Výšky slunce nad obzorem pro každý den v měsíci Lednu byly aproximovány lineární interpolací mezi zimním prosincovým slunovratem a jarní březnovou rovnodenností, kdy jsou výšky slunce nad obzorem rovny 16,5° a 40° [23]. Je předpokládáno, že této maximální výšky slunce dosahuje každý den v poledne. Azimut slunce je uvažován v rozmezí 90° až 270° s tím, že v poledne je azimut slunce roven 180°. Východ slunce byl průměrně stanoven pro měsíc leden na 8 h a západ na 16 h 40 min. V tomto časovém rozmezí byly po deseti minutách lineární interpolací mezi výše uvedenými mezními hodnotami aproximovány hodnoty výšky slunce nad obzorem a azimutu slunce. Shrnutí mezních hodnot polohy slunce je uvedeno v Tab. 3.1

Hodnoty statických parametrů zadaných modelu manuálně byly dopočítány pro jednotlivé zdi podle výše zmíněných vzorců a jsou shrnuty v následujících tabulkách. V Tab. 3.3 jsou uvedeny statické parametry zadané do tepelného modelu, které

Č. zdi	35	34	11	7	8	9	10	12	32
U_n (J/h · °C)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
U_d (J/h · °C)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
U_w (J/h · °C)	0.211	0.198	0.211	0.206	0.196	0.196	0.196	2.793	0.196
ρ_w (kg/m ³)	772.432	1105.86	772.432	953.247	125.99	125.99	125.99	1477.836	1133.985
C_w (J/kg°C)	2890	2890	2890	2890	3130	3130	3130	1620	2890

Tabulka 3.3: Použité statické parametry jednotlivých zdí.

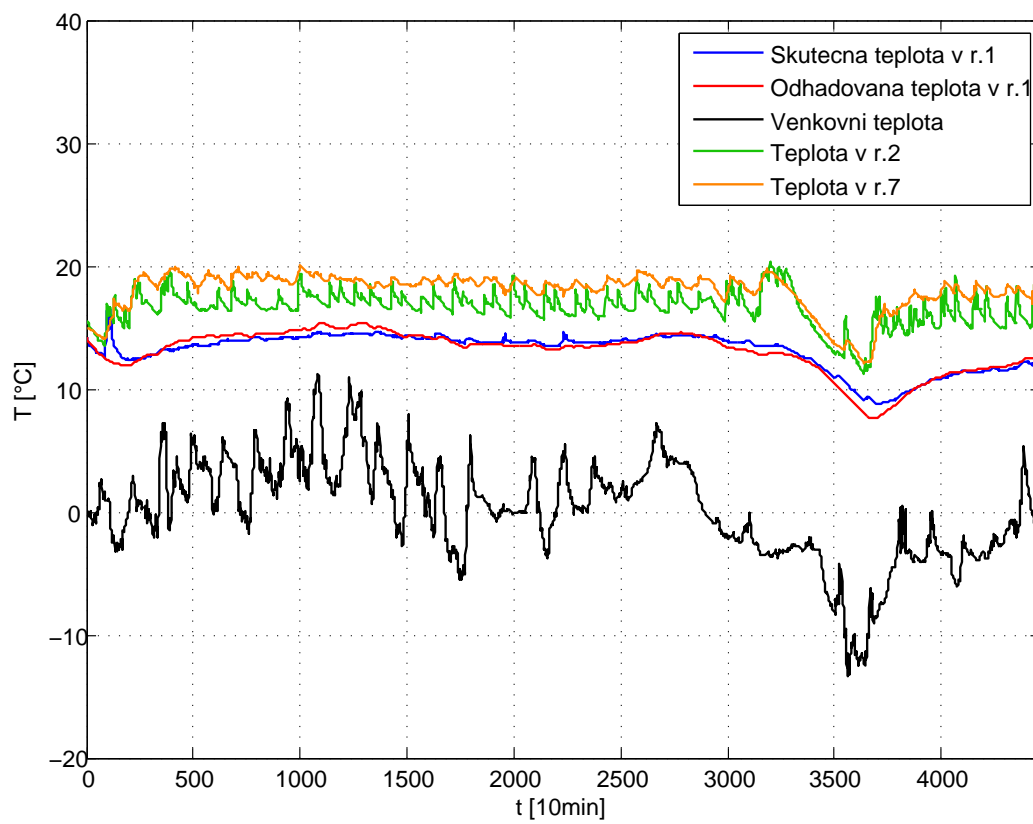


Obrázek 3.14: Surová a předpracovaná data z reálného teplotního senzoru.

byly vypočítány z konstant použitých materiálů uvedených v Tab. 3.2. Z těchto statických parametrů byly pomocí vyextrahovaných geometrických dat automaticky dopočítány hodnoty tepelných vodivostí B a tepelných kapacit C .

Výstupní graf virtuálního senzoru je zobrazen na Obr. 3.15. Vodorovná osa grafu odpovídá časové ose, zatímco svislá odpovídá teplotě. Na grafu lze vidět celkem pět průběhů. Oranžový, zelený a černý průběh odpovídají vývoji teplot v sousedních místnostech a vývoji venkovní teploty. Červený průběh odpovídá průběhu teplot odhadovaný vytvořeným virtuálním senzorem. Změřený vývoj teploty v místnosti r.1 je reprezentován modrým průběhem. Počáteční podmínky tepelného modelu byly nastaveny na teplotu 14.18°C . Tato hodnota odpovídá první hodnotě změřené reálným teplotním senzorem.

Odchytky výstupního signálu z virtuálního senzoru od změřeného průběhu mohou být způsobeny různými faktory, které použitý matematický model nezohledňuje. Mezi tyto faktory může patřit např. koberec položený na podlaze či skříň přisunutá ke zdi atd., jelikož všechny tyto předměty ovlivňují tepelnou propustnost zdi. Dalšími faktory ovlivňující tepelný model mohly být dočasně otevřené dveře od měřené místnosti či zatažené žaluzie v oknech.



Obrázek 3.15: Výsledný graf: vývoj teplot.

Kapitola 4

Popis HVAC zařízení v IFC

HVAC (Heating, Ventilation and Air Condition) komponenty, jak bylo již uvedeno v podkapitole 3.1, jsou obsaženy v nejvyšší IFC vrstvě nazvané *Domain layer*, ve schématu *IfcHvacDomain*. Pomocí entit v této doméně lze v IFC popsát [2]:

1. segmenty, spojky a redukce potrubí¹ vodovodního či vzduchového využívaného pro systémy v budovách umožňující klimatizaci ovzduší, ventilaci a odvod starého vzduchu; potrubí teplé a chladné vody, potrubí pitné vody, potrubí páry, odpadní potrubí, potrubí zemního plynu či LPG atd.,
2. vybavení technického zařízení budov jako jsou bojler, chladicí zařízení, ventilátory, pumpy atd.
3. zakončovací prvky potrubí či prvky pro řízení průtoku v potrubí jako jsou ventilační otvory, mřížky, ventily či modulátory průtoku atd.

V následujících kapitolách budou obecně představeny IFC entity pro HVAC, jakým způsobem jsou v IFC definována zařízení HVAC a jakým způsobem jsou ukládány parametry k těmto zařízením. Bude také představen návrh reálné AHU (Air Handling Unit) jednotky z dílčích HVAC komponent pro testování extrakce parametrů o HVAC zařízení z IFC.

4.1 IFC entity pro HVAC

Schéma *IfcHvacDomain* obsahuje celkem 66 entit pro definici 33 různých zařízení. I v tomto schématu, stejně jako v jiných IFC schématech, pro určité reálné zařízení existují vždy dvě entity. Entita definující typ zařízení a entita definující výskyt tohoto zařízení. Entity definující typ zařízení jsou zavedeny z praktických důvodů, aby v případě vícenásobného použití určitého přístroje jistého typu v budově nemusel být vždy v IFC znovu definován. Může tak dojít ke značné úspoře řádků v IFC souboru. Entity definující výskyt tohoto zařízení poté odkazují pouze na jednu instanci entity definující stejný typ zařízení. Název těchto dvou druhů entit je téměř shodný a liší se pouze tak, že entita definující typ zařízení obsahuje na konci názvu slovo *Type*. Každé

¹Při čtení v originální IFC dokumentaci je vhodné upozornit na rozdíl významu anglických slov „duct“ a „pipe“, jež jsou do češtiny obecně překládána jako „potrubí“. Výraz „duct“ je chápán pro potrubí s obdélníkovým průřezem vedoucí médium pod nízkým tlakem, obvykle vzduch. Výraz „pipe“ je myšlen pro potrubí s kulatým průřezem vedoucí médium pod vyšším tlakem, např. voda či pára.

entitě zařízení je přiřazen obecný typ zařízení z výčtu možností. Výčet možností se nachází v entitě, která nese opět jméno entity zařízení a na konci názvu je připojen text *TypeEnum*.

Vše lze ukázat na praktickém příkladu. Lze uvažovat potrubí vzduchotechniky budovy. K filtraci proudícího vzduchu bude použit několikrát stejný filtr. Typ tohoto filtru bude definován pomocí entity *IfcFilterType*. Každý výskyt tohoto filtru bude definován entitou *IfcFilter* a bude odkazovat na tutéž instanci entity *IfcFilterType*, jelikož jsou všechny filtry stejné. V entitě *IfcFilter* lze průchodem IFC hierarchie dohledat polohu a tvar zařízení stejným způsobem, jak bylo předvedeno v kapitole 3.1.2. Výčet možností obecného typu filtru je pro tuto entitu zařízení obsažen v *IfcFilterTypeEnum*. Jedna z těchto možností je vždy přiřazena k typu filtru.

4.1.1 Property sety

Kromě údajů o poloze zařízení a jeho tvaru lze k tvorbě virtuálních senzorů využít i některých údajů v tzv. property setech, do nichž jsou ukládány vlastnosti jednotlivých zařízení. Property sety si lze představit jako tabulky obsahující parametry daného zařízení. Počet a názvy property setů pro jednotlivé entity zařízení jsou jasně definovány v IFC dokumentaci. Jasně definovány jsou rovněž i položky obsažené v jednotlivých property setech. Jména všech property setů začínají slovem *Pset_*. Za podtržítkem následuje specifický název každého property setu.

Jako příklad lze uvést property set *Pset_FlowMeterTypeCommon* náležící entitě *IfcFlowMeter*, definující zařízení měřící průtok systémem. Tento property set obsahuje čtyři parametry informující:

- Reference - ID zařízení,
- Status - stav zařízení, lze vybrat z výčtu NEW, EXISTING, DEMOLISH, TEMPORARY, OTHER, NOTKNOWN, UNSET,
- ReadOutType - způsob odečtu stavu, lze vybrat z výčtu DIAL, DIGITAL, OTHER, NOTKNOWN, UNSET,
- RemoteReading - Boolean parametr, zda-li je možné odečítat stav na dálku.

Toto byl příklad property setu, který je specifický pro dané zařízení. Existují však i obecné property sety, které jsou obsaženy u více entit zařízení. Takovým property setem je např. *Pset_ElectricalDeviceCommon* obsahující údaje o napětí, proudu či frekvenci, pro který je zařízení navrženo.

Jako další lze uvést property set *Pset_ServiceLife*, který obsahuje parametry o servisním cyklu a střední době poruchy zařízení. Nebo property set *Pset_EnvironmentalImpactValues* obsahující údaje o dopadu funkčního zařízení na životní prostředí jako je např. spotřeba vody či množství vyprodukovaného CO₂. Nutno dodat, že poslední dva zmíněné property sety s těmito parametry nejsou pravděpodobně využitelné pro tvorbu virtuálních senzorů.

Přehled položek vybraných property setů, které byly uváženy jako využitelné pro tvorbu virtuálních senzorů od všech entit zařízení, byly zpracovány do dokumentu, který je obsahem elektronické přílohy A.4.

4.1.2 Porty

Každá entita zařízení má kromě property setů definované porty, které představují vstupy a výstupy reálného zařízení. Jako příklad lze uvést entitu *IfcFan*. Tato entita představuje motor sloužící k zajištění proudění vzduchu ve vzduchotechnickém potrubí budovy. Při pohledu do IFC dokumentace lze zjistit, že entita *IfcFan* má dva porty. Port pro vstup vzduchu nazvaný *AirIn* a port pro výstup vzduchu nazvaný *AirOut*.

Pomocí potrubí jsou porty jednotlivých zařízení propojeny. Průchodem potrubí tak lze prostřednictvím IFC souboru dohledat zařízení, která jsou na sebe napojená. Toho by bylo možné využít při automatizované tvorbě virtuálních senzorů v případě potřeby informace o tom, jaké zařízení je připojeno ke zpracovávanému zařízení.

4.2 Návrh AHU jednotky pro testování

Za účelem ověření teoreticky nabytých informací a pro budoucí testování extrakce dat byl hledán způsob tvorby HVAC systémů s výstupem ve formátu IFC. V tomto směru se osvědčil již použitý BIM software Revit od společnosti Autodesk.

Cílem bylo vytvořit AHU (Air Handling Unit) jednotku z přesně daných komponent, které budou reprezentovány jednotlivými entitami. Běžně dostupné již vytvořené prvky AHU jednotek jsou v prostředí Revit uvažovány jako celky, které nejsou konfigurovatelné a nelze volit součásti, ze kterých je AHU jednotka složena. Takováto AHU jednotka je ve vygenerovaném IFC souboru reprezentována jedinou entitou jako „black-box“. Pro účel této práce je takto vygenerovaný IFC soubor pro extrakci dat o dílčích komponentách nepoužitelný.

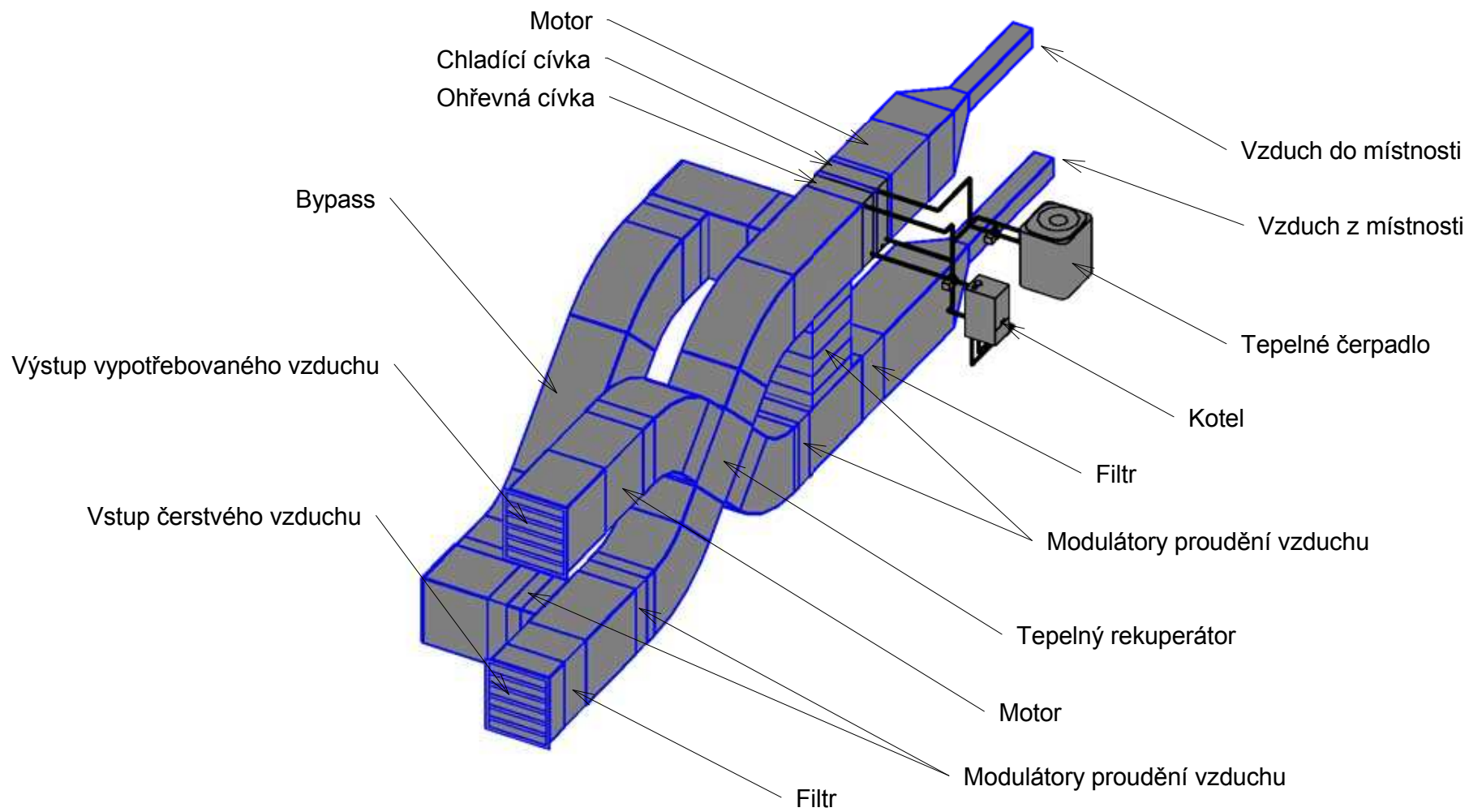
Z tohoto důvodu byl zvolen alternativní postup, kdy požadované prvky byly vytvořeny vlastnoručně a následně těmto prvkům byly nadefinovány IFC entity, pod kterými jsou exportovány do IFC souboru. Do celku jsou tyto komponenty pospojovány vzduchotechnickým potrubím. Výslednou vizualizaci této práce z prostředí Revit lze vidět na Obr. 4.1.

Šipkami jsou na tomto obrázku ukázány vstup čerstvého vzduchu, výstup vypočítaného vzduchu, výstup čerstvého vzduchu do místnosti, vstup vypočítaného vzduchu z místnosti a také bypass sloužící k minutí tepelného rekuperátoru. Dale jsou vyznačeny jednotlivé použité komponenty. Všechny tyto komponenty jsou uvedeny v následujícím seznamu s entitou a typem, pod kterým byly vyexportovány do IFC souboru:

- Modulátory proudění vzduchu - *IfcDamper*, CONTROLDAMPER
- Motory - *IfcFan*, CENTRIFUGALAIRFOIL
- Tepelný rekuperátor - *IfcAirToAirHeatRecovery*, FIXEDPLATECROSSFLOWEXCHANGER
- Filtr - *IfcFilter*, AIRPARTICLEFILTER
- Kotel - *IfcBurner*, USERDEFINED
- Tepelné čerpadlo - *IfcHeatExchanger*, USERDEFINED
- Chladicí cívka - *IfcCoil*, WATERCOOLINGCOIL

- Ohřevná cívka - *IfcCoil*, WATERHEATINGCOIL

Takto navržená jednotka byla exportována do textového formátu IFC a opět pomocí IFC File Analyzeru konvertována do tabulkového formátu s příponou *.xlsx. Všechny tyto vzniklé soubory jsou obsahem přílohy A.5.



Obrázek 4.1: Návrh reálné AHU jednotky.

Kapitola 5

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout způsob pro tvorbu virtuálních senzorů s využitím automatické extrakce dat ze souboru dle standardu BIM ve formátu IFC, který obsahuje informace o dané budově. Záměrem bylo prozkoumat možnosti extrakce informací o geometrii budovy, materiálech a o prvcích HVAC systému. Na základě těchto znalostí byl v prostředí MATLAB vytvořen algoritmus k získání informací z BIM a algoritmus pro tvorbu virtuálního senzoru teploty, který využívá vyextrahovaných dat z BIM. Zbylé potřebné informace, které nebylo možné vyextrahovat, jsou programu zadány manuálně. Vytvořený software byl otestován na reálné budově s dostupnými reálně naměřenými daty o teplotách a slunečním osvětlení, která posloužila jako vstupy virtuálního senzoru teploty.

Prvním krokem ve zpracování této práce bylo prostudování IFC dokumentace a způsob zápisu IFC struktury. Studování struktury IFC kódu probíhalo na základních BIM modelech samostatných zdí a následně na jednoduchých čtyřstěnných místnostech. Na těchto modelech byl prostudován způsob, jakým lze vyčíst tvar a polohu jednotlivých objektů. Na základě těchto vědomostí bylo možné začít konstruovat software v prostředí MATLAB, který lze rozdělit do tří částí. První částí je extrakce dat z IFC souboru. Druhou částí jsou přepočty a výpočty ze získaných dat a příprava dat pro naplnění do matematického modelu. Poslední částí je aplikace těchto dat do matematického modelu tepelných toků mezi místnostmi.

Požadavkem tohoto softwaru byla maximální možná automatizace od načtení IFC souboru až po vykreslení výstupních veličin do grafu virtuálního senzoru. Největší úskalí v tomto ohledu byla shledána v druhé části, kde jsou připravována získaná data z IFC struktury pro matematický model. Problémem byla především identifikace jednotlivých zdí náležející zvolené místnosti, což je nutná informace pro tvorbu zvoleného tepelného modelu. V IFC struktuře tato informace není dohledatelná a nepovedlo se ani vytvořit spolehlivý algoritmus. Proto je zde nutný manuální zásah uživatele. V kapitole 3.2.3 byla navržena možná automatizovaná řešení.

Dalším a posledním manuálním zásahem je zadání materiálových konstant zdí, oken a dveří, které byly popsány v kapitole 3.3 a 3.4. Informace o materiálu jsou v BIM ve formátu IFC obsaženy a jsou extrahovatelné, avšak v doposud vytvořeném softwaru není implementována automatická extrakce dat o materiálech. Extrakce dat o materiálech byla popsána v kapitole 3.1.2 a návrh na způsob automatizace při získávání materiálových konstant byl navržen v kapitole 3.3 pod výčtem manuálně zadávaných parametrů.

S identifikací zdí náležející místnostem souvisí i další problém, který vzniká již při

kreslení v BIM softwaru. Problémem jsou zdi zasahující do více pokojů. Takoveto zdi je nutné rozdělit, aby bylo možné určit přesné plochy a objemy skrze které probíhá tepelná výměna. Tento problém byl vyřešen algoritmem pro automatické dělení zdi a je popsán v kapitole 3.2.2.

Možným omezením prezentované metody pro automatickou tvorbu virtuálního senzoru teploty byl shledán předpoklad, že každá místnost musí být v BIM softwaru zakreslena s vlastní podlahovou deskou. Zdůvodnění tohoto předpokladu bylo uvedeno 3.2.1 v kapitole . Stanovený předpoklad je omezující zejména u již existujících BIM modelů budov, u kterých není předpokládáno splnění.

Pro tvorbu samotného virtuálního senzoru byl použit tepelný model prezentovaný Andersenem, Madsenem a Hansenem v roce 2000 [18]. Tento model byl zobecněn pro obecnou místnost s libovolným počtem zdí, oken a dveří vyrobených z libovolných materiálů. Výslednou funkčnost zvoleného matematického tepelného modelu lze vidět na grafu Obr. 3.15, kde je možné porovnat průběh vypočítané teploty s teplotou naměřenou reálným senzorem. Veškeré vytvořené zdrojové kódy z prostředí MATLAB jsou obsaženy v příloze A.2. Programová dokumentace je obsahem přílohy A.3.

Závěr práce byl věnován popisu HVAC komponent v IFC, kde je uvedeno jakým způsobem je možné vyhledat parametry, které by mohly být využitelné pro tvorbu virtuálních senzorů o HVAC systémech. Automatická extrakce dat z IFC o jednotlivých HVAC komponentách nebyla testována, ačkoliv lze předpokládat principiální podobnost se způsobem extrakce geometrických dat. Za účelem budoucího možného testování extrakce dat o HVAC jednotkách, byl vytvořen BIM využívající entity z HVAC domény, který je obsahem přílohy A.5. Je nutné zmínit, že popis HVAC jednotek v IFC tak, jak je uveden v této práci, je obsažen ve verzi IFC 2x4, která byla uvolněna v březnu 2013 a nižší verze neumožňují dostatečně podrobný popis HVAC komponent. Ovšem IFC generátor, podporující HVAC doménu z IFC 2x4 v BIM softwaru Autodesk Revit, byl dostupný až o několik měsíců později.

Literatura

- [1] H. Li, D. Yu, James E. Braun. A review of virtual sensing technology and application in building systems. *HVAC&R Research*, 17(5), 2011.
- [2] Building Smart. IFC documentation. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/>. [Online; accessed 21-November-2014].
- [3] ČZU. Využití sluneční energie pro výrobu tepla. [Online; navštíveno 23.11.2014].
- [4] L. Pe´rez-Lombard, J. Ortiz, Ch. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394–398, 2008.
- [5] D. Moser. Commissioning existing airside economizer systems. *ASHRAE Journal*, 2013.
- [6] G. Gebauer, O. Rubinová, H. Horká. *Vzduchotechnika*. ERA group spol. s r.o., 2 edition, 2007. ISBN 978-80-7366-091-8.
- [7] Wikipedia. Hvac - wikipedia, the free encyclopedia, 2014. [Online; accessed 22-October-2014].
- [8] Ch. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons, Inc., 2008. ISBN 978-0-470-18528-5.
- [9] ISO. Industry foundation classes (ifc) for data sharing in the construction and facility management industries, 2013. [Online; accessed 22-October-2014].
- [10] T. Dzambazova, E. Krygiel, G. Demchak. *Introducing Revit Architecture 2010: BIM for beginners*. Wiley Publishing, 2009. ISBN 978-0-470-47355-9.
- [11] Ch. Clemen, L. Gründig. The industry foundation classes (ifc) - ready for indoor cadastre?, 2006.
- [12] Wikipedia. Industry foundation classes - wikipedia, the free encyclopedia, 2014. [Online; accessed 15-October-2014].
- [13] IntelliDynamics. Virtual sensors. <http://www.intelldynamics.net/content/technologies/virtual-sensors.html>, 2003. [Online; accessed 30-October-2014].
- [14] H. Kim, K. Anderson, S. Lee, J. Hildreth. Generating construction schedules through automatic data extraction using open bim (building information modeling) technology. *Automation in Construction*, 35, 2013.

- [15] U. S. Department of Energy. Energyplus. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, 2013. [Online; accessed 19-November-2014].
- [16] M. Ward, J. Siegel. Modeling filter bypass: Impact on filter efficiency. *ASHRAE Transactions*, 111(1), 2005.
- [17] B. Dong, Z. O'Neill, Z. Li. A bim-enabled information infrastructure for building energy fault detection and diagnostics. *Automation in Construction*, 44, 2014.
- [18] K. K. Andersen, H. Madsen, L. H. Hansen. Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations. *Energy and buildings*, 31, 2000.
- [19] NIST. IFC File Analyzer. <http://www.nist.gov/el/msid/infotest/ifc-file-analyzer.cfm>. [Online; accessed 21-November-2014].
- [20] M. Vašak, A. Starčić, A. Martinčević. Model predictive control of heating and cooling in family house. *University of Zagreb*, 2011.
- [21] Wikipedie. Mnohoúhelník - wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2014. [Online; navštíveno 23. 11. 2014].
- [22] R. Vvřička. Výpočet tepelných ztrát. http://users.fs.cvut.cz/~vavrirom/Vytapeni/VYT_cv_1_2011.pdf. [Online; navštíveno 23.11.2014].
- [23] Geografický portál Zemepis.com. Pohyby země. <http://www.zemepis.com/pohybyzeme.php>. [Online; navštíveno 24.11.2014].
- [24] Vysoke Myto s.r.o. Cihelna. Cihla plná pálená. <http://cihelna.hrabcuk.cz/cihla-palena.php>. [Online; navštíveno 24.11.2014].
- [25] Tzb info. Katalog stavebních materiálů. http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html. [Online; navštíveno 24.11.2014].
- [26] ISOVER. Isover eps greywall. <http://www.isover.cz/data/files/tl-isover-eps-greywall-253.pdf>. [Online; navštíveno 24.11.2014].
- [27] Tzb info. Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa. <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>. [Online; navštíveno 24.11.2014].

Příloha A

Obsah příloženého CD

1. *makespet_DP_2015.pdf* - elektronická verze diplomové práce
2. *Virt_senzor* - Všechny soubory vytvořeného virtuálního senzoru v prostředí MATLAB
3. *Dokumentace* - Programová dokumentace virtuálního senzoru teploty
4. *IFC_HVAC_ontologie* - textový dokument obsahující ontologii HVAC prvků v IFC
5. *AHU_jednotka* - projekt z Autodesk Revit obsahující vytvořenou AHU jednotku a vytvořené rodiny HVAC komponent