

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Modelování a řízení obsahu CO₂
ve vzduchu v obytných budovách**

Praha, 2008

Petr NOVÁK

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze, dne 9.6.2008



podpis

Poděkování

Děkuji zejména vedoucímu práce Doc. Ing. Petru Horáčkovi, CSc. za odborné vedení. Poděkování patří dále všem, kteří se podílí na zajištění a koordinaci projektu vývoje řídicího systému pro pasivní domy, za jejich cenné rady. Bez této pomoci by moje práce nemohla vzniknout.

Abstrakt

Oxid uhličitý je ve vnitřním prostředí obytných budov plyn s dominantním účinkem na lidskou fyzickou a psychickou kondici. Udržení koncentrace oxidu uhličitého nižší než je hodnota prahová, je úkolem větracích systémů. Nadměrná výměna vzduchu je však nežádoucí z hlediska energetické bilance budovy. Vhodný kompromis mezi těmito protichůdnými požadavky umožňuje zajistit zpětnovazební řídicí systém větracích soustav, založený na měření okamžité koncentrace oxidu uhličitého v místnostech.

Tato bakalářská práce se zabývá modelováním produkce a šíření oxidu uhličitého v obytných budovách, jelikož simulace bilance tohoto kontaminantu jsou nutné pro optimální návrh větracího systému. V práci jsou rozebrány faktory ovlivňující množství CO_2 ve vzduchu a je navržena struktura modelu, která zajišťuje použitelnost modelu pro různé obytné budovy. S využitím vzniknuvšího modelu je proveden též návrh zpětnovazebního řízení větracího systému, využívajícího znalosti koncentrace CO_2 v trvale obývaných místnostech.

Abstract

Carbon dioxide as a component of indoor air of residential buildings has a dominant influence on the human physical and mental condition. Keeping the carbon dioxide concentration lower than a marginal value is a task of ventilation systems. Excessive air renewal is undesirable in light of the energy balance of the building. The solution is to use a closed loop control system of ventilation based on measuring the current carbon dioxide concentration in the rooms.

This bachelor project involves modelling the production and spread of carbon dioxide in residential buildings, because it is necessary to simulate this contaminant in order to design optimal control of the ventilation system. The factors influencing the carbon dioxide concentration are discussed and the structure of the model enabling reuse of the model blocks for any residential building is composed. The next task to be solved is to design the feedback control ventilation system that uses the information about the carbon dioxide concentration in the inhabited rooms.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Petr Novák**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Modelování a řízení obsahu CO₂ ve vzduchu v obytných budovách**

Pokyny pro vypracování:

Hlavním úkolem práce je seznámit se s koloběhem CO₂ v budovách, definovat jeho největší zdroje, určit vliv obyvatel a rostlin na obsah CO₂ ve vzduchu a nalézt způsob jak modelovat produkci a šíření CO₂ v celé budově. Součástí řešení by měl být model typového domu vytvořený v simulačním softwaru Matlab-Simulink. Úloha souvisí s vývojem řídicího systému pro nízkoenergetické pasivní budovy (rodinné domy).

- Seznamte se s koloběhem CO₂ ve vzduchu
- Identifikujte hlavní faktory ovlivňující množství CO₂ ve vzduchu (se zaměřením na vzduch v rodinném domě nebo bytě)
- Pomocí matematicko-fyzikální analýzy navrhnete model koloběhu CO₂ ve vzduchu
- Navrhnete model produkce, šíření a absorpce CO₂ ve vzduchu v budově
- Ověřte správnost modelu porovnáním simulovaných a naměřených dat na reálném objektu
- Navrhnete a v simulaci ověřte algoritmus řízení obsahu CO₂ ve vzduchu pro daný objekt

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: doc. Ing. Petr Horáček, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



n.z. M. Šimák
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

OBSAH

1 Úvod	4
1.1 Větrání budov	4
1.2 Kvalita vnitřního vzduchu budov	4
1.3 Cíle práce	5
2 Koloběh CO₂ ve vzduchu	5
2.1 Chemický popis CO ₂	5
2.2 Zdroje a spotřebiče CO ₂ na Zemi	6
2.3 Míšení CO ₂ a vzduchu	6
3 Přehled aktuálního stavu modelování CO₂ v budovách	7
3.1 Modelování produkce CO ₂	7
3.2 Kategorizace dostupných modelů šíření CO ₂	7
3.2.1 Mono-zone modely	7
3.2.2 Multi-room modely (Multi-zone modely)	7
3.2.3 Zonal modely	8
3.2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD) modely	8
3.3 Srovnání používaných modelů šíření CO ₂	8
3.3.1 Multi-room model	8
3.3.2 Computational fluid dynamics (CFD)	10
3.3.3 Kombinace multi-room a CFD modelu	10
3.4 Srovnání dostupného software	11
3.4.1 Contam	11
3.4.2 Comis	13
3.4.3 LoopDA	13
4 Návrh struktury modelu	14
4.1 Dekompozice problému	14
4.1.1 Volba simulačního nástroje	14
4.1.2 Modulární struktura modelu	14
4.2 Zdroje CO ₂	15
4.2.1 Model osob	15
4.2.2 Model plynových spotřebičů	16
4.2.3 Další zdroje CO ₂	17
4.3 Spotřebiče CO ₂	17
4.3.1 Rostliny	17
4.4 Místnosti a okolí	19
4.4.1 Místnost	19
4.4.2 Okolí	19
4.5 Obálky místností a interakce mezi místnostmi	20
4.5.1 Zdi	20
4.5.2 Interakce mezi místnostmi	20
4.5.3 Kanály s přirozenou ventilací	21
4.5.4 Kanály s nucenou ventilací	21
4.5.5 Okna a dveře	22
4.5.6 Vnitřní dveře	23

4.5.7	Automatický odtah	24
4.6	Proudění vzduchu uvnitř místností	25
5	Uživatelský popis vytvořeného modelu Bldcdtb3	26
5.1	Bldcdtb3.Osoba	27
5.2	Bldcdtb3.Sporak	28
5.3	Bldcdtb3.Rostlina	29
5.4	Bldcdtb3.Místnost	30
5.5	Bldcdtb3.Okoli	31
5.6	Bldcdtb3.Extender	32
5.7	Bldcdtb3.Ventilace	33
5.8	Bldcdtb3.Interakce.....	34
5.9	Bldcdtb3.Okno.....	35
5.10	Bldcdtb3.Dvere.....	36
5.11	Bldcdtb3.Auto-Odsávání	37
5.12	Bldcdtb3.NeutralníI	38
5.13	Bldcdtb3.NeutralníO	38
6	Návrh řízení koncentrace CO₂ v budovách.....	39
6.1	Požadavky na větrací systém.....	39
6.1.1	Mezní koncentrace oxidu uhličitého v budovách	39
6.2	Struktura větracího systému	40
6.2.1	Koncepce struktury větracího systému.....	40
6.2.2	Přímovazební řízení množství přiváděného vzduchu.....	40
6.2.3	Zpětnovazební řízení množství přiváděného vzduchu	41
6.2.4	Shrnutí požadavků na zpětnovazební řídicí systém.....	41
6.3	Návrh regulátoru.....	42
6.3.1	Identifikace systému	42
6.3.2	Postup návrhu regulátoru.....	42
7	Model typového domu	43
7.1	Typový dům.....	43
7.2	Regulace CO ₂ v typovém domě.....	43
7.2.1	Návrh regulátoru pro typový dům	44
7.2.2	Vliv poruchové veličiny	44
8	Závěr.....	48
	Seznam použité literatury	49
	Příloha A.....	51

Seznam symbolů

Symbol	Název veličiny	Jednotky
a	Koeficient nelinearity závislosti rychlosti fotosyntézy	(-)
c_{CO_2}	Koncentrace oxidu uhličitého	(-) nebo (ppm)
$c_{\text{CO}_2\text{max}}$	Mezní zdravotně nezávadná koncentrace CO_2	(ppm)
C	Přenos regulátoru	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
Δp	Rozdíl tlaku před a za rozhraním dvou zón (místností)	(Pa)
i_{LV}	Součinitel spárové průvzdušnosti	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n})$
L	Délka spáry	(m)
m	Hmotnost vzduchu v objemu V	(kg)
n	Exponent určený pro jednotlivé typy spár experimentálně nebo látkové množství – vysvětleno v kontextu	(-) nebo (mol)
n_{CO_2}	Látkové množství oxidu uhličitého v dané místnosti	(mol)
n_{Vzduch}	Látkové množství vzduchu (včetně CO_2) v dané místnosti	(mol)
p	Tlak plynu	(Pa)
p_A	Tlak v místnosti A	(Pa)
p_B	Tlak v místnosti B	(Pa)
P	Rychlost fotosyntézy rostlin	různé
P_{max}	Saturační hodnota rychlosti fotosyntézy rostlin	různé
Q	Tok	různé
Q_0	Měrný objemový tok	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$
$Q_{\text{CO}_2\text{osoba}}$	Tok CO_2 vyprodukovaného obyvatelem	různé
$Q_{\text{CO}_2\text{sporak}}$	Tok CO_2 vyprodukovaného plynovým sporákem	různé
Q_{LV}	Objemový tok vzduchu skrz okno	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
Q_v	Objemový tok	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
R	Molární plynová konstanta	$(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
S	Plocha (průvzdušné části či plocha místnosti)	(m^2)
t	Čas nebo teplota – vysvětleno v kontextu	(s) nebo ($^{\circ}\text{C}$)
T	Termodynamická teplota	(K)
V	Objem	(m^3)
φ	Relativní ozáření rostliny	(-)
ρ	Hustota	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

1 ÚVOD

1.1 Větrání budov

Snaha o snižování energetické náročnosti budov vede k používání takových materiálů a jejich zpracování, které maximálním možným způsobem omezují ztrátovou výměnu vzduchu. Ztrátovou výměnou vzduchu se rozumí neřízená látková výměna skrz vnější obálku budovy. Použití moderních technologií omezuje tuto výměnu natolik, že bez řízené ventilace vnitřního vzduchu dochází k nárůstu nežádoucích látek v prostoru budov nad zdravotně nezávadné úrovně.

Pro zábranu překročení mezních koncentrací znečišťujících látek jsou budovy vybavovány větracími systémy. Při klasickém návrhu těchto systémů se využívá znalosti předpokládaného množství osob v místnostech. Takto navržený ventilační systém však není schopen vhodným způsobem reagovat na netypické případy. Proto se vypočtené množství přiváděného vzduchu do budovy zpravidla násobí opravným koeficientem větším než jedna, čímž dochází k zajištění dostatečné vzdušné výměny i při singulárních situacích. Snadno zjistíme, že takto navržený ventilační systém nedosahuje maximální možné účinnosti.

Rostoucí ceny energií a požadavky na trvale udržitelný rozvoj jsou v oblasti budov reflektovány v konstrukci nízkoenergetických a zejména pasivních domů. Vývoj řídicího systému právě pro uvedené typy domů dal vznik této bakalářské práci. U nízkoenergetických a pasivních domů je totiž pozornost věnována neprodyšnosti vnější obálky budovy a vhodně dimenzovanému ventilačnímu systému. Efektivně řešeným systémem je systém zpětnovazební, v anglosaské literatuře označovaný demand-controlled ventilation. Podstatou těchto systémů je regulace množství přiváděného vzduchu do budovy vycházející z naměřených hodnot koncentrací škodlivých látek ve vnitřním prostředí budovy.

1.2 Kvalita vnitřního vzduchu budov

Nedochází-li k dostatečné výměně vnitřního vzduchu budov, koncentrace znečišťujících látek ve vnitřním vzduchu narůstá nad zdravotně nezávadné meze. Nežádoucí látky mohou být různé chemické povahy, jejich složení závisí především na určení budov. Jelikož se tato bakalářská práce zabývá obytnými budovami, technologické objekty nebudou dále uvažovány.

Hlavními znečišťujícími látkami, které se mohou vyskytovat v obytných budovách, jsou oxid uhličitý, formaldehyd, oxidy síry, oxidy dusíku, oxid uhelnatý, ozon, prachové částice, oděry z vaření, cigaretový kouř, mikroby a radon. Lze empiricky ukázat, že pro identifikaci kvality vnitřního vzduchu budov není nutné analyzovat koncentraci všech zmíněných látek, ale jako referenční ukazatel kvality mikroklimatu lze uvažovat koncentraci

oxidu uhličitého. U některých typů domů je pro zajištění dobré kvality vnitřního vzduchu nutno uvažovat též koncentraci a teplotu vodní páry.

Při překročení maximální koncentrace oxidu uhličitého ve vnitřním vzduchu budov¹ dochází k fyziologickým dopadům vnitřního vzduchu na jednotlivé obyvatele. Projevuje se tzv. sick building syndrom – SBS. Sick building syndrom spočívá ve zhoršení reakcí centrální nervové soustavy, a má tak negativní vliv na lidské soustředění i reakci na vnější podněty. Uvedená hodnota je běžně překračována, typicky např. ve školních třídách nevybavených ventilačním systémem, rovněž však též v domácnostech.

1.3 Cíle práce

Při návrhu ventilačních systémů obytných domů je nutná volba kompromisu mezi nízkou energetickou náročností budov a dobrou kvalitou vnitřního vzduchu. Tyto protichůdné požadavky lze s výhodou řešit zpětnovazebním řízením ventilace, která využívá znalosti aktuálních koncentrací oxidu uhličitého v jednotlivých obytných místnostech domu.

Cílem práce je vytvořit model produkce a šíření oxidu uhličitého v budovách takovým způsobem, aby byla umožněna snadná rekonfigurovatelnost modelu pro libovolný typ obytné budovy. S využitím tohoto obecného modelu je cílem též simulovat reálný typový objekt. Následně je úkolem práce návrh regulátoru pro automatickou regulaci ventilace, realizující ideální kompromis mezi dobrou kvalitou vnitřního vzduchu (reprezentovanou koncentrací oxidu uhličitého) a nízkou energetickou náročností dané obytné budovy.

2 KOLOBĚH CO₂ VE VZDUCHU

Předtím, než se zaměříme na popis produkce, šíření a absorpce oxidu uhličitého v obytných budovách, uveďme základní chemické vlastnosti tohoto plynu a jeho koloběh ve vzduchu v globálním stupni abstrakce.

2.1 Chemický popis CO₂

CO₂ je bezbarvý plyn bez chuti a bez zápachu. Molekula CO₂ je tvořena jedním atomem uhlíku a dvěma atomy kyslíku, navázanými na atom uhlíku dvojnými kovalentními vazbami. Délka těchto vazeb je 116,3 pm. Název podle mezinárodně uznávané metodologie IUPAC² je carbon dioxide, česky oxid uhličitý. Latinský název zní dioxidum carbonis. V české literatuře se lze setkat též se zastaralým označením kysličník uhličitý, zřídka též archaickým uhlec. V pevném stavu má CO₂ triviální název suchý led.

¹ ASHRAE standard 62 z roku 1999 definuje mezní ustálenou hodnotu $c_{\max} = 1000$ ppm, podrobněji viz dále

² IUPAC je zkratka International Union of Pure and Applied Chemistry, organizace zabývající se mj. normalizací chemického názvosloví

2.2 Zdroje a spotřebiče CO₂ na Zemi

Oxid uhličitý je jedním z nejvýznamnějších plynů na Zemi. CO₂ je produktem či reaktantem významných biochemických pochodů, nalézá též významné uplatnění v průmyslovém použití, kde se vyskytuje jako vstupní nebo odpadní produkt.

Jedněmi z přirozených zdrojů oxidu uhličitého na Zemi jsou živé organismy. K produkci tohoto plynu dochází při biochemickém pochodu zvaném obecně dýchání (respirace). Jedná se o chemický děj, při němž je rozkládána glukóza za přítomnosti kyslíku a produkty jsou energie, voda a odpadní oxid uhličitý. CO₂ je též produktem spalování (reakcí jednoatomové molekuly uhlíku s dvouatomovou molekulou kyslíku vzniká molekula oxidu uhličitého). Dalšími zdroji CO₂ jsou aerobní rozkladné procesy látek a některé technologické procesy.

Jedinými, v globálním pohledu efektivními, spotřebiči CO₂ jsou fototrofní organismy. Jedná se o takové organismy, které získávají energii pomocí fotosyntézy. Při vnějším popisu fotosyntézy se jedná o proces opačný k buněčnému dýchání. Fotosyntézu lze vyjádřit jako chemickou reakci, jejímiž reaktanty jsou oxid uhličitý a voda, produkty pak glukóza a kyslík.

Vývoj bilance spotřeby a absorpce oxidu uhličitého v globálním měřítku prochází fázemi růstu i poklesu, v posledních desetiletích je dominantní tendencí nárůst koncentrace tohoto plynu v atmosféře.

2.3 Míšení CO₂ a vzduchu

Vzduch je homogenní směs plynů. Jelikož jednotlivé plynné složky vzduchu nemají při daném tlaku a teplotě stejnou hustotu, rozlišujeme objemovou a hmotnostní koncentraci parciálních plynných složek. Jednou ze složek vzduchu je též oxid uhličitý. Přestože je objemová jednotka oxidu uhličitého těžší než objemová jednotka vzduchu, při normálních teplotách, tlacích a koncentracích složek vzduchu se přibližně jedná o homogenní směs. Tento fakt značně zjednodušuje popis simulačního modelu.

Stojí za zdůraznění, že z důvodu, že vzduch je homogenní směs plynů, včetně oxidu uhličitého, v dalším textu bude dodržována konvence uvažovat vzduch jako směs čerstvého vzduchu a příslušného oxidu uhličitého, bez explicitního zdůraznění, že se jedná o tuto směs.

Plyn	Objemová koncentrace
Dusík	78,09 %
Kyslík	20,95 %
Argon	0,93 %
Oxid uhličitý	0,03 %
Ostatní složky	< 1 %

Tab 2.1 – Složení vzduchu v blízkosti zemského povrchu

[<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=74&h=38&obor=1>]

3 PŘEHLED AKTUÁLNÍHO STAVU MODELOVÁNÍ CO₂ V BUDOVÁCH

V současné době se v praktickém nasazení modelování produkce a šíření oxidu uhličitého v budovách využívají modely, které nemodelují výhradně vliv oxidu uhličitého. Uplatňují se modely pro všeobecné použití, umožňující modelovat koncentraci libovolných škodlivých látek i dalších veličin. Významnou nevýhodou běžně používaných aplikací pro simulaci vnitřního prostředí budov je absence podpory pro zpracování dat a návrh řídicího algoritmu.

Ve stavební praxi se zpravidla jako zdroj oxidu uhličitého uvažuje člověk, případně plynový sporák. Ostatní zdroje se zanedbávají. Rovněž se obvykle zanedbává vliv rostlin a jako jediný kompenzační mechanismus vlivu člověka je uvažován přívod čerstvého vzduchu (a odvod použitého).

3.1 Modelování produkce CO₂

Současné modely užívané ve stavební praxi umožňují definovat libovolný zdroj znečišťujících látek. Jako zdroj znečišťujících látek se rozumí objekt uvolňující uživatelem definované množství látky s explicitně definovanými vlastnostmi. Zpravidla lze též zadat funkci, podle které zdroj emituje příslušnou látku. Uživatel však musí disponovat znalostí parametrů jednotlivých zdrojů, v manuálu zpravidla nejsou uvedeny.

Při simulacích obytných budov se v současnosti uvažuje jako zdroj oxidu uhličitého výhradně lidmi vydechaný vzduch. Pro účely stavebního modelování je uváděna konstantní hodnota $Q_{CO_2\text{osoba}} = 19 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{os}^{-1}$.

Vzhledem k univerzalitě užívaných systémů lze definovat též spotřebiče oxidu uhličitého či další zdroje, ve stavební praxi se však většinou uvažuje výhradně popsany vliv osob.

3.2 Kategorizace dostupných modelů šíření CO₂

3.2.1 Mono-zone modely

Mono-zone modely předpokládají, že vzduch v celé budově je dobře promísen a je homogenní a isotropní. Tento velice zjednodušující, v běžných případech nesplnitelný, předpoklad tak činí tyto modely nepřesné a použitelné jen v omezeném spektru aplikací.

Příkladem mono-zone modelu je AIDA.

3.2.2 Multi-room modely (Multi-zone modely)

Multi-room modely vývojově vycházejí z mono-zone modelu. Uvažují budovu složenou z dobře promísených zón (místností). Pro každý bod zóny platí, že koncentraci

znečišťujících látek, teplota a tlak je ve všech bodech dané zóny konstantní. K interakci mezi zónami dochází v explicitně definovaných diskrétních bodech.

Příkladem multi-room modelů jsou CONTAM, COMIS, HOT2000, DOE, Type 56 TRNSYS, EnergyPlus.

3.2.3 Zonal modely

Zonal modely vznikly jako snaha o zpřesnění multi-room modelů. Zónou zde není místnost (jako u multi-room), ale místnost sestává z několika zón, pro něž platí stejná pravidla, jaká jsou uvedena v podkapitole multi-room. Empirická srovnání ukazují, že oproti multi-room je zpřesnění velmi malé, avšak požadavky na uživatele značně vzrostly (složitě a zdlouhavě zadávání parametrů interakcí mezi zónami).

Příkladem zonal modelů je POMA nebo CWSZ. Avšak stejného efektu lze docílit též použitím multi-room modelů (např. CONTAM či COMIS) při rozdělení reálné místnosti na několik zón.

3.2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD) modely

Computational fluid dynamics modely jsou založeny na numerickém řešení Navier-Stokesovy rovnice. Nacházejí uplatnění zejména v simulaci šíření znečišťujících látek uvnitř jedné místnosti. Vzhledem k časové náročnosti nelze v současné době efektivně simulovat šíření CO₂ pomocí CFD modelů v celé budově.

Příkladem CFD modelů jsou STAR-CD, EXACT3, FLOVENT, FLUENT.

3.3 Srovnání používaných modelů šíření CO₂

Při praktickém použití jsou nejčastěji využívány multi-room (multi-zone) modely. Zrychlování výpočetní techniky umožňuje vývoj CFD modelů. Jako perspektivní řešení se jeví kombinace multi-room (multi-zone) a CFD modelů. Popíšme proto tyto modely podrobněji.

3.3.1 Multi-room model

Na úvod zmiňme, že v literatuře není používána jednotná terminologie u modelů multi-zone a multi-room. V této práci bude dále voleno výstižné označení multi-room model, byť v některých zdrojích je totéž označováno jako multi-zone. Pro úplnost dodejme, že pro odstranění této terminologické nejednoznačnosti se lze v pramenech setkat též s názvem modelu „typu Contam“ či „typu Comis“.

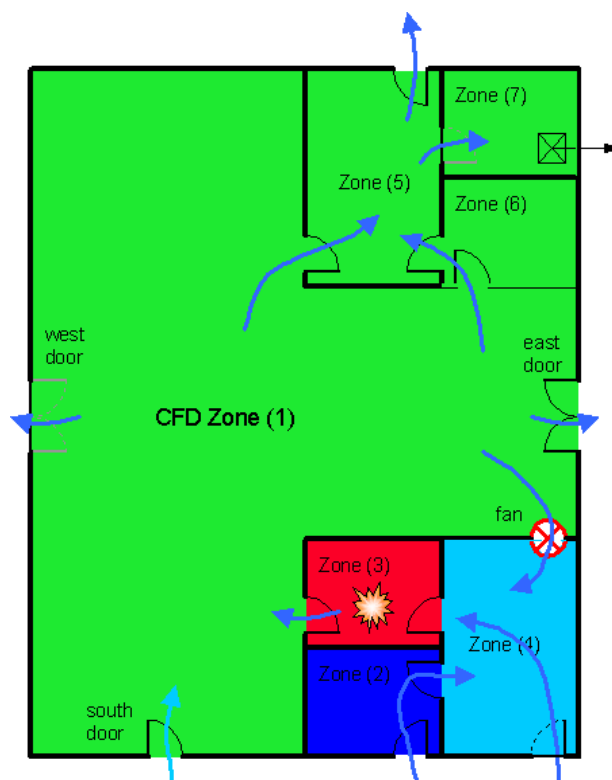
Multi-room modely jsou založeny na předpokladu, že budovu lze rozdělit na sektory (neboli zóny), které mají homogenní isotropní vlastnosti. Empiricky bylo zjištěno, že těmito sektory jsou místnosti, odtud plyne název modelu. Multi-room modely tedy vycházejí z makroskopického pohledu na plyny obsažené v místnostech a makroskopicky popisují látkovou výměnu mezi jednotlivými místnostmi. Jednotlivé místnosti jsou proto

charakterizovány tlakem, teplotou, objemem, zdroji znečištění a diskretními spoji, kvantifikujícími interakce mezi jednotlivými místnostmi.

Multi-room model je v praktickém nasazení velmi oblíben. Výsledky simulací se s požadovanou přesností shodují s empirickými daty v běžných budovách. Vytváření modelů je poměrně intuitivní, většina nástrojů poskytuje kreslicí plochu, kde uživatel vynáší půdorysné plány jednotlivých pater budovy. Následná simulace šíření látek je realizována algebraickými rovnicemi řešením vzdušných smyček vznikajících definovanými diskretními interakcemi mezi zónami.

Bylo již řečeno, že multi-room modely dosahují dobrých výsledků v běžných budovách. Definujme přesněji pojem běžné budovy. Jedná se o takové budovy, které jsou rozčleněny na velké množství místností vůči velikosti domu. Omezením tohoto modelu je fakt, že nelze použít na budovy s velkými místnostmi, jako jsou auly či zastřešená atria. Tyto prostory totiž nesplňují nutný předpoklad homogenního a isotropního rozmístění koncentrací parciálních plynných složek mikroprostředí, teplot a tlaků. Ani rozdělení místností na více zón³, které umožňuje aproximaci teplotního a koncentračního gradientu, nevede na požadované zpřesnění v porovnání s naměřenými daty.

Přesto je pro většinu obytných domů multi-room popis šíření kontaminantů vhodným simulačním modelem, díky čemuž je běžně používán a vzhledem k přijatelné výpočetní náročnosti též velmi oblíben.



Obr 3.1 – Grafický výstup multi-room modelu. [Jayaraman, 2004]

Výpočet realizován programem COMIS, koncentrace indikována teplotou barvy

³ Rozdělením multi-room modelu na subzóny vzniká tzv. zonal model

3.3.2 Computational fluid dynamics (CFD)

Modely Computational fluid dynamics jsou založeny na použití Navier-Stokesovy rovnice. Lze ji psát ve více tvarech, pro ilustraci jeden z nich uvedme:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + \vec{f} \quad (1)$$

kde:

- v ... Rychlost pohybu
- ρ ... Hustota látky
- p ... Tlak
- t ... Čas
- f ... Součet objemových sil
- T ... Tenzor napětí

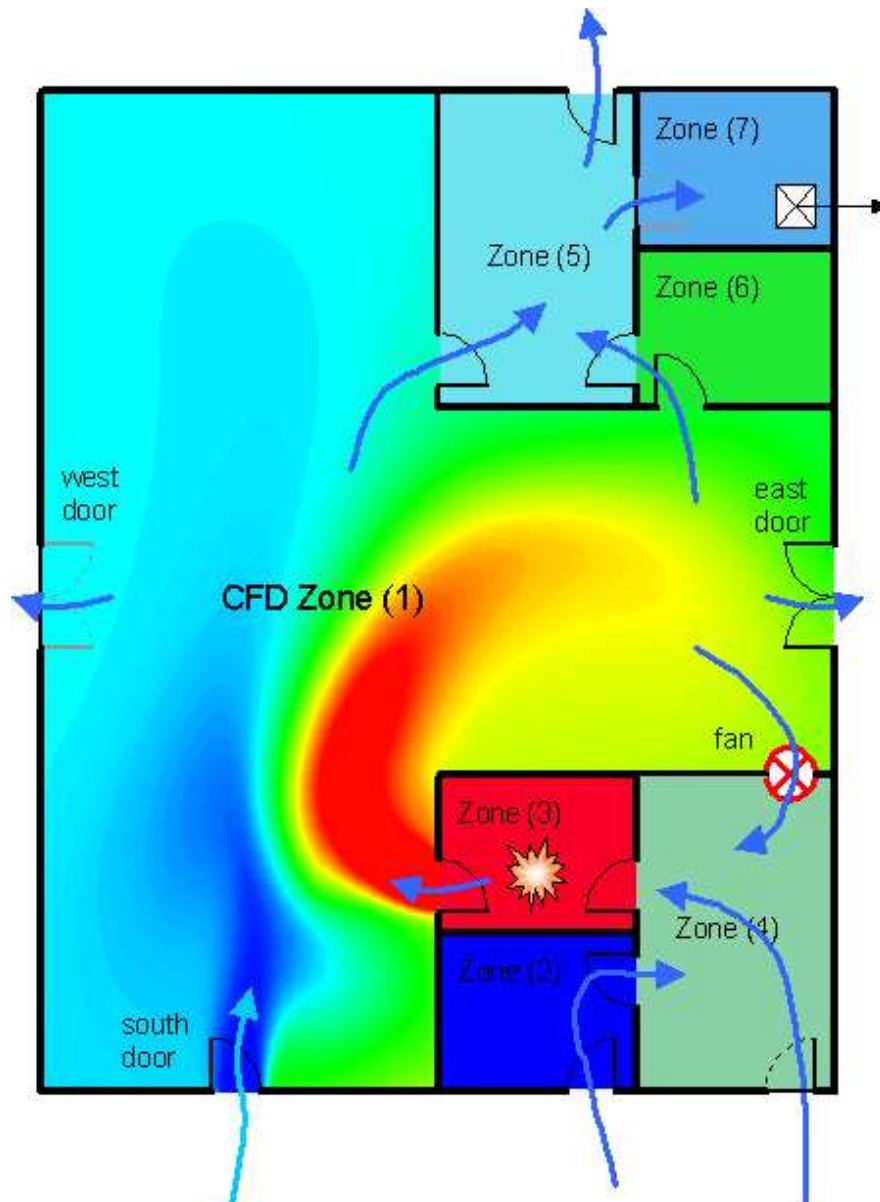
Navier-Stokesova rovnice je parciální diferenciální rovnice, která modeluje tekutiny jako soubor infinitizimálně malých bodů. Řešení rovnice je v praktických aplikacích, zejména díky turbulentnímu chování, extrémně výpočetně náročné. Modelování šíření CO₂, respektive všech nežádoucích plynů, s využitím Computational fluid dynamics bylo proto v nedávné minulosti nemožné z důvodu nepostačujícího výpočetního výkonu. V současnosti jsou do simulačních modelů využívajících CFD vkládány velké naděje, jelikož je jako jediný prakticky ověřený model schopen řešit turbulentní proudění. V oblasti simulačních modelů tekutin tak computational fluid dynamics umožňuje počítat proudění a rozložení koncentrace znečišťujících látek i v rozsáhlých místnostech velmi přesně.

Vzhledem k tomu, že současná výpočetní technika neumožňuje díky přílišné výpočetní náročnosti řešení komplexních budov metodou CFD, model se používá pouze pro analýzu podproblémů. Těmi mohou být například zkoumání vlivu tvaru vyústek ventilačního systému pro vhodné šíření vzduchu v místnosti apod.

3.3.3 Kombinace multi-room a CFD modelu

Vzhledem k výše popsané výpočetní náročnosti CFD modelu se jako perspektivní možnost vývoje jeví kombinace multi-room a CFD modelu. Vzniklý model by umožňoval modelovat šíření látek na úrovni místností prostřednictvím multi-room simulace a uvnitř rozsáhlých místností by se využívalo vysoké přesnosti CFD modelu.

Kombinace multi-room modelu a computational fluid dynamics analýzy poskytuje perspektivní možnosti, ale v současné době k jejímu většímu rozšíření zatím nedošlo.



Obr 2.2 – Grafický výstup kombinace multi-room a CFD modelu. [Jayaraman, 2004]
 CFD model použit na zónu (1), koncentrace indikována teplotou barvy

3.4 Srovnání dostupného software

Dosud jsme se zabývali obecným popisem užívaných modelů. Popíšme nyní základní vlastnosti běžně užívaných simulačních aplikací. Všechny zmíněné programy implementují model multi-room, v literatuře též označovaný multi-zone.

3.4.1 Contam

Contam je multi-room (multi-zone) modelovací nástroj simulující vzdušné proudy a šíření znečišťujících látek. Aplikace se skládá z grafického uživatelského rozhraní ContamW a simulačního jádra ContamX.

Vstup: Půdorysné schéma budovy vytvořené v ContamW SketchPad nástroji. Každá zóna je ohraničena zdmi. Spojení jednotlivých zón je explicitně definováno diskretními prostředky – link nebo duck. Model vyžaduje definici tlaků a teplot v každé zóně a parametrů spojovacích prvků. Modelování koncentrace oxidu uhličitého vyžaduje umístění zdroje tohoto plynu do některé zóny. Model neobsahuje zdroj oxidu uhličitého implicitně, avšak v manuálu jsou uvedeny fyzikální vlastnosti tohoto plynu, nutné pro jeho simulaci. Ukázka použití Contam pro simulaci šíření a koncentrace oxidu uhličitého v jednoduché budově je implicitně obsažena mezi tutoriály produktu.

Výstup: Rozložení tlaků, vzdušných proudů a koncentrací znečišťujících látek ve schématu budovy i přehled v tabulce. Umožňuje též export do souboru vhodného pro zpracování aplikacemi analyzujícími šíření uvnitř jednotlivých zón či celé budovy.

Použitý jazyk: C

Popis činnosti ContamX: Pro ilustraci uveďme vztahy, pomocí kterých je realizováno výkonné jádro ContamX. Bylo čerpáno z [CONTAM manual].

Vychází se z předpokladu, že vzduch lze za běžných podmínek považovat za ideální plyn. K výpočtu hustoty vzduchu je kromě definičního vztahu použita stavová rovnice ideálního plynu:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p}{RT} \quad (2)$$

kde	ρ ... hustota vzduchu	(kg·m ⁻³)
	m ... hmotnost vzduchu v objemu V	(kg)
	V ... objem vzduchu	(m ³)
	p ... absolutní tlak	(Pa)
	R ... molární plynová konstanta	(J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)
	T ... absolutní teplota	(K)

Koncentrace znečišťující látky α v zóně i je rovna

$$C_i^\alpha = m_i^\alpha / m_i \quad (3)$$

Znečišťující látka α vzniká působením zdroje této látky, je přiváděna nebo odváděna vzdušnými proudy.

Výpočet interakce mezi zónami je založen na rovnici (1. Kirchhoffův zákon):

$$\sum_j Q_{j,i} = 0 \quad (4)$$

kde $Q_{j,i}$... tok mezi zónami i a j . Kladná hodnota tohoto koeficientu reprezentuje tok z j do i a záporná tok opačným směrem

Tok mezi jednotlivými zónami $F_{j,i}$ je definován předpisem:

$$Q_{j,i} = f(p_j - p_i) \quad (5)$$

kde $f()$ je nějaký funkční předpis. Většinou se jedná o nelineární funkci, jak je ukázáno dále. Jelikož se jedná o nelineární rovnice, pro jejich řešení je použita Newton-Raphsonova metoda, řešící nelineární úlohu iterací lineárních úloh.

Od verze 2.4 je možné simulovat chemickou reakci prvního řádu mezi dvěma znečišťujícími látkami.

Pro látku α platí:

$$\frac{dm_i^\alpha}{dt} = \sum_j Q_{j \rightarrow i} (1 - \eta_j^\alpha) c_j^\alpha + G_i^\alpha + m_i \sum_\beta \kappa^{\alpha\beta} c_i^\beta - \sum_j Q_{i \rightarrow j} c_i^\alpha - R_i^\alpha c_i^\alpha \quad (6)$$

kde $\kappa \dots$ reakční koeficient

$\eta_j^\alpha \dots$ koeficient infiltrace dané látky

Jelikož je v každém kroku simulace počítána výše uvedená rovnice pro každou znečišťující látku, při využití Gaussovy eliminační metody by výpočetní náročnost byla N^3 . Proto jsou v aplikaci Contam použity tři způsoby řešení:

- Direct skyline algorithm
- Iterative biconjugate gradient (BCG)
- Iterative successive over-relaxation (SOR)

3.4.2 Comis

COMIS (Conjunction of Multizone Infiltration Specialists) je multi-zone (multi-room) model, velmi podobný výše blíže specifikovanému Contam.

Vstup: Schéma vzdušných proudů

Výstup: Hodinová data, přehledy podle definic uživatele, grafický výstup

Jazyk: Fortran

3.4.3 LoopDA

LoopDA je nástroj pro simulaci šíření látek řešením tzv. Loop Equation Design Method. LoopDA je integrován do nástroje CONTAM.

Vstup: Grafické uživatelské rozhraní umožňuje schematicky znázornit budovu.

Výstup: Výstup je podobný výše popsané aplikaci CONTAM.

Jazyk: C

4 NÁVRH STRUKTURY MODELU

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že dostupné simulační nástroje implicitně neobsahují parametry zdrojů ani spotřebičů oxidu uhličitého. Od modelu v této práci se očekává obsažení těchto parametrů a je požadováno, aby byla volena taková struktura modelu, která zajistí snadné použití i na jiný dům, než na který byl model naladěn.

4.1 Dekompozice problému

4.1.1 Volba simulačního nástroje

Při volbě simulačního nástroje bylo uvažováno o běžných programovacích jazycích (zejména C# a Java) a specializovaném simulačním softwaru (zejména MATLAB-Simulink).

V souladu s návrhem vedoucího práce bylo rozhodnuto o použití MATLABu-Simulink, jelikož tato aplikace umožňuje velmi efektivní práci, snadnou realizaci modulární struktury bloků s danou funkcionalitou a realizaci matematického popisu. Rovněž je simulačním standardem a umožní tak snadné zapojení modelu produkce a šíření CO₂ do dalších modelů, řešících simulaci budov. Dalším, velmi důležitým, faktorem preferujícím MATLAB-Simulink, byla snadná možnost využití simulovaných dat pro návrh a následné ověření regulátoru větracího systému.

4.1.2 Modulární struktura modelu

Fundamentální otázkou pro syntézu modelu byla volba popisu šíření oxidu uhličitého. V duchu předchozí kapitoly bylo uvažováno o modelu multi-room a CFD. Po zvážení výhod a nevýhod zmíněných typů byl vybrán model šíření multi-room. Důvodem byly relativně dobré výsledky již existujících simulačních nástrojů, které svědčí o tom, že tento model je u běžných budov pro simulaci a následný návrh řízení ventilace vhodný. V neprospěch CFD hovořila přílišná algoritmická složitost, nesnadná implementovatelnost a velmi vysoká složitost.

Požadavek snadné změny struktury modelu byl řešen modulární strukturou. Obytná budova byla dekomponována na zdroje a spotřebiče CO₂, místnosti a okolí. Pro obecnou použitelnost modelu byla volena absolutní struktura. Dynamiku systému zajišťují bloky místnost. Základním vztahem, o který se model produkce, absorpce a šíření CO₂ v obytných budovách opírá, je stavová rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT \quad (\text{Pa, m}^3; \text{mol, J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (7)$$

kde molární plynová konstanta $R = (8,314510 \pm 0,000070) \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [Mikulčák, 2004]

Kromě stavové rovnice ideálního plynu je základním předpokladem modelu Daltonův zákon. Tento fyzikální zákon praví, že celkový tlak směsi ideálních plynů je roven součtu parciálních tlaků jednotlivých složek. Princip aditivity je velmi výhodný, protože ze znalosti makroskopických veličin popisujících vzduch v daném objemu V a koncentrace oxidu uhličitého v témže objemu V lze snadno dopočítat (typicky) látkové množství oxidu uhličitého.

Již bylo zmíněno výše, že vytvořený model je absolutní. Dynamiku modelu zajišťují místnosti. Stavovými veličinami jsou látkové množství oxidu uhličitého a látkové množství vzduchu⁴ obsažené v dané místnosti.

V modelu je uvažována konvence spotřebičové a zdrojové orientace navazujících bloků. Spotřebiče a zdroje CO_2 , tj. bloky jejichž výstupy tvoří vstupy do místnosti, mají na výstupu kladný (tj. jsou zdroji) respektive záporný (tj. jsou spotřebiči) látkový tok Q ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$). Tyto toky jsou v bloku místnost (systém typu kapacitor) sčítány a následně integrovány.

4.2 Zdroje CO_2

4.2.1 Model osob

Osoby jsou hlavními zdroji oxidu uhličitého v obytných budovách. Množství CO_2 ve vydechovaném vzduchu závisí na mnoha faktorech. Dominantními faktory jsou momentální aktivita jedince a tělesné dispozice. Jelikož je závislost množství vydechovaného oxidu uhličitého na jmenovaných faktorech nelineární funkcí, která je charakteristická pro každého jednotlivce, lze s ohledem na účel modelu připustit zjednodušení v podobě produkce dle konstantní funkce.

Vydechovaný vzduch obsahuje přibližně $c_{\text{CO}_2} = 4$ obj. % oxidu uhličitého při teplotě $t = (34\text{--}36)^\circ\text{C}$ [Cihelka, 1985]. Uvážíme-li objem vydechovaného vzduchu za jednotku času, dostáváme tok oxidu uhličitého vyprodukovaného dýcháním obyvatele za jednotku času, který leží v intervalu $Q_{\text{CO}_2\text{osoba}} \in \langle 12; 20 \rangle \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{os}^{-1}$. Na látkové množství vzduchu v místnosti nemají osoby vliv. Pro simulaci použijeme nejčastěji užívanou hodnotu toku oxidu uhličitého $Q_{\text{CO}_2\text{osoba}} = 19 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{os}^{-1}$ [Doležálková, 2006]. Převedeme-li poslední jmenovaný údaj s uvažováním normálního tlaku a pokojové teploty s užitím vztahu (7) na látkový tok, dostáváme produkci CO_2 obyvatelem:

$$Q_{\text{CO}_2\text{osoba}} = 2,1935 \cdot 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{os}^{-1} \quad (8)$$

$$Q_{\text{vzduchosoba}} = 0 \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{os}^{-1} \quad (9)$$

⁴ Vzduchem se rozumí směs všech parciálních plynů, včetně oxidu uhličitého

4.2.2 Model plynových spotřebičů

V obytných domech se zpravidla vyskytují dva typy plynových spotřebičů – plynové sporáky a plynové kotle.

Plynové kotle (resp. karmy) jsou kategorizovány jako plynové spotřebiče typu B a spotřebiče typu C. Spotřebiče typu C mají řešen přívod vzduchu i odvod spalin odděleně od prostředí, kde se spotřebič nachází. Proto spotřebiče typu C neovlivňují koncentraci oxidu uhličitého ani vzduchu v budově, kde se nacházejí. Je-li plynový kotel realizován jako spotřebič typu B, odebírá vzduch pro spalování z místnosti, ve které je umístěn, ale spaliny jsou odváděny do venkovního prostoru (komínem, kouřovodem). Spalovací prostor tedy není od vnitřního prostoru budovy striktně oddělen. Díky jeho provedení však lze množství produkovaného oxidu uhličitého, který se dostává do místnosti, za běžných podmínek zanedbat. Vliv na množství vzduchu v místnosti je rovněž zanedbatelné. Proto není tento plynový spotřebič modelován, jeho vlastnosti však lze aproximovat blokem interakce.

Vliv plynových sporáků zanedbat nelze. Plynové sporáky jsou realizovány jako plynové spotřebiče typu A (tj. odebírají vzduch pro spalování z prostoru, ve kterém jsou umístěny, a produkty spalování zůstávají v tomtéž prostoru). Pro lepší uživatelskou přívětivost modelu nebude rozlišováno mezi plynovým sporákem s plynovou troubou, plynovým sporákem s elektrickou troubou a elektrickým sporákem s plynovou troubou – tyto budou dále nazývány sporák.

Emise CO₂ jsou závislé zejména na okamžitém výkonu sporáku. Uvažujme data požadovaného přívodu vzduchu do interiéru, čerpáno z [Doležilková, 2008]. Při použití jednoho hořáku je pro koncentraci oxidu uhličitého v okolním vzduchu sporáku $c_{\text{CO}_2} = 1000$ ppm nutno přivádět do místnosti $Q_{\text{vzduch}} = 450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ vnějšího vzduchu za hodinu. (respektive pro koncentraci $c_{\text{CO}_2} = 15000$ ppm je nutno přivádět $Q = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ za hodinu). Koncentrace oxidu uhličitého ve vnějším vzduchu je pro uvedené hodnoty uvažována $c_{\text{CO}_2} = 350$ ppm. Pokud je nad spotřebičem umístěna digestoř, je požadavek přívodu vnějšího vzduchu o 25 % nižší. Vliv sporáku na látkové množství vzduchu v místnosti je zanedbatelný.

Z uvedených hodnot vyplývá:

$$Q_{\text{přívod}} = \frac{Q_{\text{sporak}}}{(c_{\text{vnitřní}} - c_{\text{přívod}}) \cdot 10^{-3}} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}; \text{l} \cdot \text{h}^{-1}, \text{ppm}, \text{ppm}) \quad (10)$$

Dosadíme-li do vztahu výše uvedené hodnoty, dostáváme objem oxidu uhličitého vyprodukovaný jedním hořákem za jednotku času $Q_{\text{CO}_2\text{sporak}} = 293 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Převedeme-li poslední jmenovaný údaj s užitím vztahu (7) na látkový tok, dostáváme vztahy:

$$Q_{\text{CO}_2\text{sporak}} = 3,3826 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11)$$

$$Q_{\text{vzduchsporak}} = 0 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{os}^{-1} \quad (12)$$

4.2.3 Další zdroje CO₂

Mezi další zdroje oxidu uhličitého v budovách patří svítidla či topidla s plynovými, petrolejovými nebo lihovými hořáky bez odtahu spalin. Vzhledem k tomu, že jejich použití se v současnosti již nepředpokládá, jejich vliv lze zanedbat.

4.3 Spotřebiče CO₂

4.3.1 Rostliny

Jedinými spotřebiči oxidu uhličitého v obytných budovách jsou rostliny. Intenzita spotřeby (resp. produkce) oxidu uhličitého je u rostlin závislá na mnoha faktorech. Proces, při němž zelená rostlina spotřebovává vzdušný oxid uhličitý, nazýváme fotosyntézou. Proces, při němž rostlina emituje oxid uhličitý do svého okolí, nazýváme dýcháním.

Hlavními faktory ovlivňujícími rychlost fotosyntézy je plocha a ozáření chlorofylu. Rychlost fotosyntézy je dále závislá na spektru dopadajícího záření, na stavbě listů rostliny a koncentraci oxidu uhličitého v okolním vzduchu. Vyjma plochy chlorofylu jsou závislosti toku oxidu uhličitého na výše uvedených faktorech nelineární. Jedná se o statické nelinearity, které jsou charakteristické pro danou rostlinu.

Poměrně přesně lze aproximovat bilanci oxidu uhličitého např. u kolonie zelených řas, avšak pro vyšší rostliny neexistuje univerzální funkční předpis dosahující shody s empiricky zjištěnými daty. Kompenzační světelný bod, při kterém dochází z hlediska produkce CO₂ k dynamické rovnováze fotosyntézy a buněčného dýchání, nastává u různých rostlin při různých hodnotách ozáření, rovněž normované maximální hodnoty látkové výměny při fotosyntéze či dýchání nejsou konstantní.

Pro odvození aproximace bilance oxidu uhličitého rostlin je dominantní proměnnou ozáření části rostliny provozující fotosyntézu. Označme relativní ozáření φ . Relativní ozáření φ je definována jako ozáření dělená hodnotou saturační konstanty. Odvození a rovnice (13) až (16) byly čerpány z [Šetlík, 2000].

Pro rychlost fotosyntézy můžeme psát:

$$P = P_{\max} \cdot f(\varphi) \quad (13)$$

Funkci $f(\varphi)$ můžeme aproximovat rovnosou hyperbolou

$$f(\varphi) = \frac{\varphi}{1 + \varphi} \quad (14)$$

Lepší shody aproximace s naměřenými výsledky lze dosáhnout funkcí

$$f(\varphi) = \frac{\varphi}{\sqrt[a]{1 + \varphi^a}} \quad (15)$$

kde

a ... koeficient sloužící pro zpřesnění aproximace (-)

Hodnota parametru a je charakteristická pro danou rostlinu. Pro nízké rostliny je volena hodnota $a = 2$, tam kde rychlost fotosyntézy výrazně omezují difúzní pochody (například v listech), je vhodné použít větší hodnotu parametru a . Po dosažení $a = 3$ a úpravě výše uvedených vzorců dostáváme vztah pro závislost rychlosti fotosyntézy na ozáření:

$$P = P_{\max} \cdot \frac{\varphi}{\sqrt[3]{1 + \varphi^3}} \quad (16)$$

Jelikož je měření plochy listů u pokojových rostlin značně komplikované a rovněž ozáření jednotlivých listů nebývá konstantní, bylo přistoupeno k aproximaci produkce respektive spotřeby oxidu uhličitého jako funkce objemu obálky rostliny. Z dostupných dat byla volena velikost parametru $P_{\max} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. Jelikož při buněčném dýchání dochází ke spotřebě přibližně 1/5 saturační hodnoty produkce oxidu uhličitého při fotosyntéze, můžeme poslední jmenovaný vzorec upravit tak, aby sloužil též pro hodnoty ozáření, kdy převažuje buněčné dýchání:

$$P = 2,5 \cdot 10^{-5} \frac{\varphi}{\sqrt[3]{1 + \varphi^3}} - 4 \cdot 10^{-6} \quad (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (17)$$

Závislost produkce oxidu uhličitého na koncentraci oxidu uhličitého v okolí rostliny má charakter horní propusti. Pakliže koncentrace oxidu uhličitého klesne pod mez c_{\min} , rostlina omezuje fotosyntetické procesy a výše uvedený vztah neplatí. Hodnota c_{\min} závisí na zkoumané rostlině. Model v MATLAB-Simulink předpokládá, že hodnota c_{\min} je nižší, než koncentrace oxidu uhličitého v okolním vzduchu rostliny c_{in} , popsaná nelinearita je proto zanedbána. Předpokládá se doladění velikosti konstant s užitím empirických dat.

Shrneme-li výše popsané vztahy, můžeme pro vliv rostliny na vnitřní mikroklima psát:

$$Q_{CO_2 \text{rostlina}} = \frac{p \left(2,5 \cdot 10^{-5} \frac{\varphi}{\sqrt[3]{1 + \varphi^3}} - 4 \cdot 10^{-6} \right)}{RT} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{os}^{-1} \quad (18)$$

$$Q_{\text{vzduchrostlina}} = 0 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{os}^{-1} \quad (19)$$

4.4 Místnosti a okolí

4.4.1 Místnost

Místnosti jsou z hlediska dynamiky systému klíčovými prvky. Z hlediska svého chování je lze označit za systémy typu kapacitor. Je v nich prováděna sumace toků látkového množství do místnosti vstupujících a jejich následná integrace.

Ve vzniklém modelu v MATLABU-Simulink je použita již zmíněná znaménková konvence, kdy směr toku do místnosti⁵ je uvažován s kladným znaménkem látkového toku na vstupech místnosti a směr toku směrem z místnosti⁶ je signován záporným znaménkem. Blok místnost lze matematicko-fyzikálně popsat pomocí následujících vztahů.

Pro látkové množství oxidu uhličitého v místnosti můžeme psát:

$$n_{CO_2} = \int_{t_0}^t Q_{CO_2}(\tau) d\tau \quad (\text{mol}; \text{mol} \cdot \text{s}^{-1}, \text{s}) \quad (20)$$

Pro látkové množství vzduchu v místnosti můžeme psát:

$$n_{vzduch} = \int_{t_0}^t Q_{vzduch}(\tau) d\tau \quad (\text{mol}; \text{mol} \cdot \text{s}^{-1}, \text{s}) \quad (21)$$

Koncentrace oxidu uhličitého v místnosti je dána vztahem:

$$c_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{vzduch}} \cdot 10^6 \quad (\text{ppm}; \text{mol}, \text{mol}) \quad (22)$$

Tlak v místnosti je spočten s využitím rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT \quad (\text{Pa}, \text{m}^3; \text{mol}, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (23)$$

4.4.2 Okolí

Lze důvodně předpokládat, že objemy místností konajících látkovou výměnu s okolím jsou zanedbatelně malé vůči rozměrům okolí. Proto lze volit všechny parametry okolí jako konstantní (tj. tlak vzduchu, teplotu a koncentraci CO₂ nezávislou na interakcích s místnostmi).

Jednou z fyzikálních veličin, která charakterizuje okolí obytných budov je koncentrace oxidu uhličitého. Tato hodnota je závislá především na lokalitě umístění domu, obvyklé hodnoty koncentrací oxidu uhličitého v okolním vzduchu udává tabulka 4.1.

⁵ Interagující blok se chová jako zdroj oxidu uhličitého či vzduchu

⁶ Interagující blok se chová jako spotřebič oxidu uhličitého či vzduchu

Místo	CO ₂ (ppm)	Zdroj
U moře	300 – 340	ICAO 1964 EUR 14449 EN
Ve městě (dobrá kvalita vzduchu)	350	EUR 14449 EN Ekberg 1993
Ve městě (špatná kvalita vzduchu)	350 – 400	EUR 14449 EN

Tab 4.1 – Koncentrace CO₂ ve venkovním vzduchu [Jokl, 2002]

4.5 Obálky místností a interakce mezi místnostmi

V předchozích podkapitolách jsme popsali produkci a spotřebu oxidu uhličitého. Popsali jsme rovněž integrační charakter místností. Nyní je nutné zabývat se popisem šíření oxidu uhličitého mezi jednotlivými místnostmi.

Rozlišujeme látkovou výměnu přirozenou a nucenou. K nucené látkové výměně v budovách dochází působením ventilátorů, přirozená výměna je způsobena rozdílem tlaků mezi sousedními zónami, mezi kterými může docházet k proudění vzduchu.

4.5.1 Zdi

V běžných místnostech je majoritní část jejich obálky tvořena zdívmem či materiály, které jsou z hlediska vzdušné výměny svými fyzikálně-chemickými vlastnostmi zdívmem aproximovatelné. U nízkoenergetických domů je kladen zvláštní požadavek na vzduchovou nepropustnost vnější obálky budovy. Z toho důvodu bývá součástí zdi mj. parotěsná folie, jež způsobuje výrazné snížení objemového toku vzduchu skrz vnější zeď.

U nízkoenergetických domů je objemový tok vzduchu skrze zeď $q_{50} < 1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. (měřeno při tlakovém rozdílu vnějšího a vnitřního prostředí $\Delta p = 50 \text{ Pa}$). Vzhledem k objemovému toku vzduchu skrze okna, dveře a vzduchotechnické kanály je možné tok vzduchu skrze zdi u nízkoenergetických a pasivních domů, na které je tato práce zvláště zaměřena, zanedbat. Pro využití vytvořeného modelu při aproximaci běžných domů (v tomto kontextu nikoli nízkoenergetických či pasivních) lze vzdušný tok skrz zdi aproximovat pomocí bloku interakce.

4.5.2 Interakce mezi místnostmi

Známe-li objemový tok vzduchu Q mezi dvěma místnostmi A a B, můžeme s využitím stavové rovnice ideálního plynu pro velikost tohoto toku psát:

$$Q_{CO_2}(A \rightarrow B) = \frac{p_A Q}{RT} \frac{n_{CO_2}}{n_{Vzduch}} \quad (24)$$

(mol·s⁻¹; Pa, m³·s⁻¹, mol, J·mol⁻¹·K⁻¹, K, mol)

$$Q_{vzduch}(A \rightarrow B) = \frac{p_A Q}{RT} \quad (\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Pa}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (25)$$

Je patrné, že objemový, respektive látkový, tok mezi místnostmi A a B ovlivňuje látkové množství jak v místnosti A, tak v místnosti B. S uvážením již zmiňované znaménkové konvence je-li tok vzduchu z místnosti A do místnosti B kladný, do místnosti A vstupuje tento látkový tok se záporným znaménkem, do místnosti B vstupuje látkový tok o stejné velikosti, avšak se znaménkem plus.

Ve vytvořeném modelu je model implementující tento matematický popis pojmenován Interakce. Nalézá použití v místech, kde známe objemový průtok mezi dvěma místnostmi. Častěji však velikost této hodnoty nemáme, proto je blok Interakce základem dalších, specializovaných bloků.

4.5.3 Kanály s přirozenou ventilací

Kanály s přirozenou ventilací využívají ke své činnosti účinku větru a teplotní závislosti hustoty plynu. Mezi kanály s přirozenou ventilací patří zejména světlíky. Vzhledem k tomu, že účinky větru nelze dlouhodobě deterministicky předpovídat a závislost toku plynu kanálem je závislá na teplotě vnějšího i vnitřního vzduchu, tento typ kanálů se stává zařízením minulosti. Většina současných budov, nízkoenergetické a pasivní budovy tento typ ventilace nevyužívají, proto není jejich vliv uvažován.

4.5.4 Kanály s nucenou ventilací

Moderní budovy, zejména budovy nízkoenergetické a pasivní, jsou vybavovány vzduchotechnickými kanály s nucenou vzdušnou ventilací.

Objemový tok vzduchu Q je dán vlastnostmi použitého větráku. Pro správnou funkci vzduchotechnických zařízení je nutné zajistit těž přívod, resp. odvod, vzduchu tak, aby vzduchotechnika nevytvářela v budově nadměrný přetlak či podtlak oproti tlaku v exteriéru.

Pro látkový tok z místnosti A do místnosti B platí tytéž vztahy, jaké byly popsány v podkapitole „Interakce mezi místnostmi“. Vzhledem k odlišné realizaci v modelu však tyto vztahy připomeňme a vysvětleme odlišnosti v realizaci finálních modelových bloků.

Známe-li objemový tok vzduchu Q mezi dvěma místnostmi A a B, můžeme s využitím stavové rovnice ideálního plynu pro látkový tok psát:

$$Q_{CO_2}(A \rightarrow B) = \frac{p_A Q}{RT} \frac{n_{CO_2}}{n_{vzduch}} \quad (26)$$

$$(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Pa}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{mol}, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}, \text{mol})$$

$$Q_{vzduch}(A \rightarrow B) = \frac{p_A Q}{RT} \quad (27)$$

$$(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Pa}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K})$$

Ve vytvořené knihovně musí být v bloku „Ventilace“, který reprezentuje kanál s nucenou výměnou vzduchu vždy zadáván kladný tok Q . Změna směru otáčení ventilátoru se totiž nepředpokládá, v modelu ji lze realizovat pouze vhodným přepojením vstupu a výstupů. Jelikož je předpoklad jednoho směru otáčení ventilátorů v praxi obvykle splněn, jedná se o zanedbatelné omezení. K tomuto řešení bylo přistoupeno z důvodu pozitivního vlivu absence přepínačů na numerickou stabilitu modelu v aplikaci MATLAB-Simulink a rovněž očekávanému zkrácení doby výpočtu.

4.5.5 Okna a dveře

Objemový tok vzduchu skrze štěrby oken a dveří je dominantním mechanismem výměny vzduchu v domech či místnostech nevyužívajících nucenou výměnu vzduchu.

Uvažujme nyní zavřené okno. Vzdušný tok je uskutečňován okenními spárami. Pro charakteristiku spár z hlediska toku proniknuvšího vzduchu slouží součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$), viz ⁷. Pro moderní okna a dveře platí, že součinitel spárové průvzdušnosti oken je menší, než součinitel spárové průvzdušnosti dveří.

Orientační hodnoty spárové průvzdušnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2. Hodnoty uvedené v této tabulce platí pro spáry nových výrobků, s rostoucí mírou opotřebení (zhoršení vlastností těsnění, zkroucení rámu) se tyto hodnoty zvětšují.

Součinitel spárové průvzdušnosti je definován vztahem:

$$i_{LV} = \frac{Q_{LV}}{L \cdot \Delta p^n} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}, \text{Pa}, -) \quad (28)$$

Objemový tok vzduchu za jednotku času skrz zavřené okno spočteme podle vzorce:

$$Q_{LV} = i_{LV} \cdot L \cdot \Delta p^n \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}, \text{m}, \text{Pa}, -) \quad (29)$$

Typ okna a okenní spáry	Součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0,67}$)
Okno jednoduché dřevěné netěsněné	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Okno dřevěné zdvojené, netěsněné spáry	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Okna dřevěná nebo plastová, kovová těsněná	$(0,10 - 0,40) \cdot 10^{-4}$
Dřevěné zdvojené s těsněním KOVOTĚS	$0,7 \cdot 10^{-4}$
Okno těsněné molitanovými pásky	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Okno těsněné neoprenovými profily	$(0,2 - 0,4) \cdot 10^{-4}$

Tab 4.2 – Součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV} dle typu okenních spár [Šafránek, 2005]

⁷ Jednotka vzniká zjednodušením vztahu ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$) = ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$)

Objemový tok vzduchu skrze otevřené okno budeme aproximovat obdobným vztahem:

$$Q_{A \rightarrow B} = Q_0 S (p_A - p_B)^n \quad (30)$$

Tento vztah je obdobný jako pro vnitřní dveře, proto ho zde nebudeme blíže specifikovat a odkážeme čtenáře na následující podkapitolu. Pouze naznačíme, že objemový tok vzduchu vypočtený podle rovnice pro otevřené či zavřené okno převedeme s využitím stavové rovnice ideálního plynu na látkové toky.

Tlaková diference Δp je dána rozdílem tlaků před a za spárou. V použité struktuře modelu je výpočet tlakové diference způsobující přirozené větrání mezi zónami A a B velmi jednoduchý:

$$\Delta p = p_A - p_B, \quad (31)$$

kde tlak p_A respektive p_B je implicitně počítán s využitím stavové rovnice ideálního plynu.

Model oken v současnosti neuvažuje vliv větru.

4.5.6 Vnitřní dveře

Látkový tok mezi místnostmi skrze vnitřní dveře lze při známém objemovém průtoku vyjádřit přímo pomocí stavové rovnice ideálního plynu⁸. Jelikož však tuto hodnotu zpravidla neznáme, velikost toku je nutné počítat z tlakové diference mezi těmito místnostmi a aerodynamického odporu dveří.

Pro objemový tok vzduchu mezi místnostmi můžeme psát:

$$Q_{VzduchA \rightarrow B} = Q_0 S (p_A - p_B)^n \quad (32)$$

($m^3 \cdot s^{-1}$; $m \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-n}$, m^2 , Pa, Pa, -, ppm, ppm)

kde Q_0 je měrný objemový tok, tj. objem vzduchu, který pronikne plochou $S = 1 \text{ m}^2$ a tlakovým rozdílem na této ploše $\Delta p = 1 \text{ Pa}$ za časový interval $\Delta t = 1 \text{ s}$. Tento ladicí parametr byl volen na základě dostupných dat, předpokládá se jeho doladění s využitím měřených údajů na reálném domě.

Dosadíme-li tok podle vztahu (32) do stavové rovnice ideálního plynu, uijeme Daltonův zákon a zapíšeme vztahy tak, aby byla aplikována vysvětlená znaménková konvence, dostáváme pro CO_2 vzduchu předpis:

$$Q_{CO_2A \rightarrow B} = \frac{p_A Q}{RT} \frac{n_{CO_2}}{n_{Vzduch}} = \frac{p_A (Q_0 (abs(p_A - p_B))^n S) \cdot sign(p_A - p_B) n_{CO_2}}{RT n_{Vzduch}} \quad (33)$$

($mol \cdot s^{-1}$; Pa, $m^3 \cdot s^{-1}$, mol, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, K, mol; Pa, $m \cdot Pa^{-n}$, Pa, Pa, m^2 , Pa, Pa, mol, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, K, mol)

⁸ Tento děj aproximuje v modelu blok Interakce

respektive pro tok vzduchu:

$$Q_{VzduchA \rightarrow B} = \frac{p_A Q}{RT} = \frac{p_A (Q_0 (abs(p_A - p_B))^n S) \cdot sign(p_A - p_B)}{RT} \quad (34)$$

(mol·s⁻¹; Pa, m³·s⁻¹, J·mol⁻¹·K⁻¹, K; Pa, m·Pa⁻ⁿ, Pa, Pa, m², Pa, Pa, J·mol⁻¹·K⁻¹, K)

Aproximace otevřených a zavřených dveří je v modelu realizována volbou plochy S průvzdušné části. U nízkoenergetických a pasivních domů jsou zpravidla vždy vybaveny dveře průduchy, tj. mřížkou ve spodní části dveří, nebo několikacentimetrovou spárou (namísto běžných prahů). Tyto části umožňují vyhovující látkovou výměnu. V případě otevřených dveří je plocha průvzdušné části dveří dána vnitřní plochou zárubně, v případě zavřených dveří je plochou popisovaná plocha mřížky či spáry.

4.5.7 Automatický odtah

Odsávání použitého vzduchu z budov je situováno zpravidla do koupelen a kuchyní. Odsávací systém lze realizovat různým způsobem a různými technickými prostředky. V současnosti je nejběžnějším řešením dvoustavové ovládání ventilátoru poptávkovým způsobem. V modelu lze tento způsob simulovat použitím bloku interakce.

Vzhledem k zaměření práce na návrh regulace ventilace pro pasivní domy budeme modelovat ventilátor řízený proporcionálním regulátorem. Žádanou hodnotou tlaku ve vnitřní místnosti je tlak v okolí. Při praktické realizaci, zejména u domů s rekuperační jednotkou, je nutné zamezit vnikání vnějšího vzduchu do domu tímto ventilačním otvorem. V modelu je tento fakt aproximován funkcí absolutní hodnota.

Princip automatického odtahu, realizovaný v knihovně, lze popsat rovnicemi:

$$Q_v = |k_p \cdot (p_{místnost} - p_{okoli})| \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; -, \text{Pa}, \text{Pa}) \quad (35)$$

$$Q = \frac{|p_{místnost} k_p \cdot (p_{místnost} - p_{okoli})|}{RT_{místnost}} \quad (\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}; \text{Pa}, -, \text{Pa}, \text{Pa}, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (36)$$

4.6 Proudění vzduchu uvnitř místností

V této práci byl vytvořen model, který se nazývá multi-room či multi-zone. Připomeňme, že model předpokládá dokonalé promísení vzduchu a oxidu uhličitého uvnitř místností a předpokládá homogenní isotropní rozložení tlaků, teplot a koncentrací všech plynných složek. Toto zjednodušení je ve většině případů přípustné a dosahuje požadovaných výsledků. Přesto je nutné zamyslet se ve stručnosti nad prouděním vzduchu uvnitř místností, zejména z důvodu budoucího porovnání modelu reálnými daty.

Faktory ovlivňující tyto fyzikální veličiny cituji z [Cihelka, 1985]: „Proudění vzduchu v místnostech při větrání, klimatizaci nebo teplovzdušném vytápění závisí na tvaru a rozměrech prostoru, na umístění, velikosti a druhu (typu) příváděcích otvorů (vyústek), na rozdílu mezi teplotou přiváděného vzduchu a teplotou vzduchu v místnosti a konečně na umístění, velikosti a povrchové teplotě zdrojů tepla nebo chladu v místnosti. Z uvedeného výčtu činitelů vyplývá, že proudění vzduchu v místnosti je velmi složitý jev, který většinou není možno exaktně řešit teoreticky již při návrhu zařízení.“

Detaily z výše uvedeného výčtu by bylo nutné řešit pomocí metody CFD. Proto setrváme u předpokladu homogenních a isotropních zón. V případě měření koncentrace oxidu uhličitého v reálné budově by byly senzory umístěny do výšky $h \in \langle 30;60 \rangle$ cm od podlahy, kde bývá koncentrace nejvyšší, ke zdi do místa, kde jsou vzdušné proudy uvnitř místnosti průměrné, tj. nikoli do blízkosti oken, dveří a vyústek ventilace, ovšem ani do závětrí.

5 UŽIVATELSKÝ POPIS VYTVOŘENÉHO MODELU BLDCDTB3

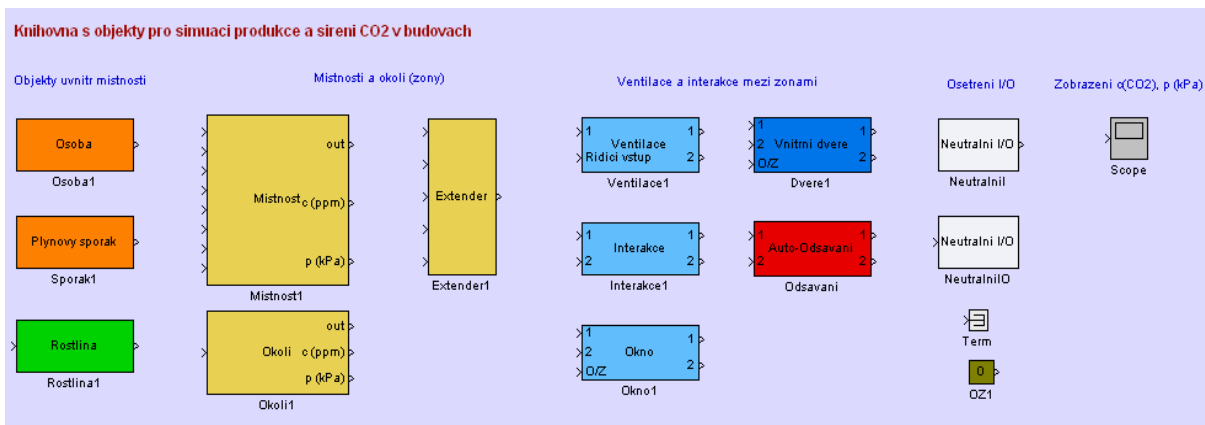
S využitím rovnic a úvah uvedených v předchozí kapitole byla vytvořena knihovna aplikace MATLAB – Simulink, která obsahuje bloky postačující pro simulaci produkce, spotřeby a šíření oxidu uhličitého v budovách. Název knihovny Bldcdtb3 vznikl jako zkratka z anglického „building carbon dioxide toolbox, version 3“. Výchozí vzhled knihovny je ukázán na obrázku 5.1. V této kapitole popíšeme knihovnu z uživatelského pohledu. U každého bloku knihovny ukážeme vnitřní strukturu, požadované parametry a způsob zadávání jména bloku.

Pro úplnost konstatujeme, že z důvodu case-sensitive prostředí MATLAB jsou velikosti písmen parametrů voleny pro dobrý uživatelský komfort, tj. jednotné velikosti, malými písmeny. Velikosti zkratk některých fyzikálních veličin proto striktně nerespektují zažité konvence. Vzhledem k tomu, že záměna za jinou veličinu není v daném kontextu možná, bylo přistoupeno k tomuto uživatelsky zjednodušujícímu řešení.

V knihovně se vyskytují dva typy signálových cest. Prvý z nich, označme jej „**typ tok**“ je multiplexovaný látkový tok oxidu uhličitého a látkový tok vzduchu. Tento typ signálového vodiče vždy tvoří vstup do bloku místnost či okolí (resp. extender) a je výstupem všech dalších, doposud nejmenovaných, bloků a bloku extender. Druhý z typů signálových vodičů označme „**typ místnost**“. Tento druh je pracovním výstupem bloků místnost a okolí a je vstupem všech bloků zajišťujících látkovou výměnu. Výstup typu místnost totiž nese multiplexovanou informaci o látkovém množství oxidu uhličitého v místnosti, látkovém množství vzduchu, termodynamické teplotě a tlaku.

Všechny signálové vodiče, u kterých není uvedeno jinak, nesou informaci v základních jednotkách SI, případně veličinách odvozených. Nikoliv však násobných. Uvedeno jinak je pouze u tzv. měřicích výstupů bloků místnost a okolí, které jsou primárně určeny pro připojení osciloskopu a zobrazení průběhů veličin koncentrace oxidu uhličitého dané v zóně (ppm) a tlaku (kPa). V násobných jednotkách se zadávají též počáteční podmínky bloků místnost a okolí.

Uveďme nyní přehled knihovních bloků. Blok Scope a Constant z přehledu vynecháme, jelikož se jedná o standardní bloky, umístěné do knihovny pro vyšší uživatelský komfort.

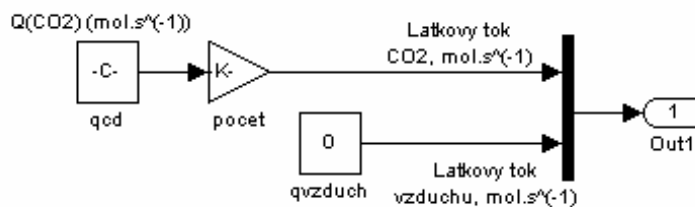


Obr 5.1 – Knihovna Bldcddb3

5.1 Bldcddb3.Osoba

Bldcddb3.Osoba	
Funkcionalita	Blok modelující vliv osob na látkové množství CO ₂ a vzduchu v místnosti
Matematický popis	Rovnice (7), (8), (9)
Vstupy	Žádné
Výstupy	1x výstup typu tok
Implicitní parametry	$Osoba.qcd = 2,1935 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$... Látkové množství CO ₂ vyprodukované jednou osobou za $\Delta t = 1 \text{ s}$
Parametry	<i>pocet</i> ... Multiplikační konstanta umožňující korekci počtu osob
Zadávaní jména bloku	Jako parametr bloku

Model vlivu osob na látkové množství CO₂ a vzduchu v místnosti

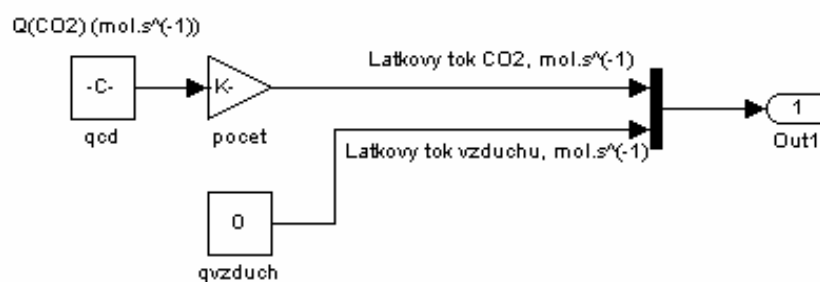


Obr 5.2 – Podsystem Osoba

5.2 Bldcdtb3.Sporak

Bldcdtb3.Sporak	
Funkcionalita	Blok modelující vliv plynového sporáku či trouby na látkové množství CO ₂ a vzduchu v místnosti
Matematický popis	Rovnice (7), (11), (12)
Vstupy	Žádné
Výstupy	1x výstup typu tok
Implicitní parametry	$Sporak.qcd = 3,3826 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$... Látkové množství CO ₂ vyprodukované jednou plynovou plotýnkou za $\Delta t = 1 \text{ s}$
Parametry	<i>pocet</i> ... Multiplikační konstanta umožňující korekci počtu aktivních plotýnek
Zadávání jména bloku	Jako parametr bloku

Model vlivu plynového sporáku na látkové množství vzduchu a CO₂ v místnosti

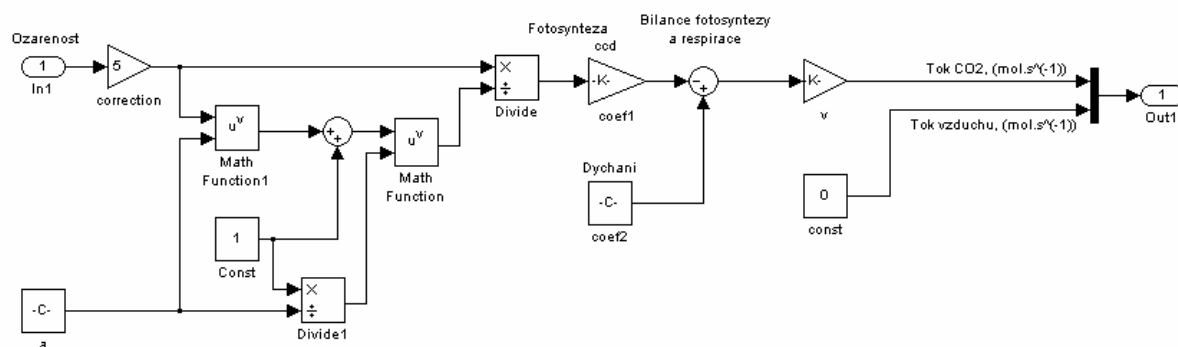


Obr 5.3 – Podsystem Sporak

5.3 Bldcdtb3.Rostlina

Bldcdtb3.Rostlina	
Funkcionalita	Blok modelující vliv rostlin na látkové množství CO ₂ a vzduchu v místnosti
Matematický popis	Rovnice (7), (18), (19)
Vstupy	Normovaná ozáření rostliny (v intervalu <0, 1>)
Výstupy	1x výstup typu tok
Implicitní parametry	$Rostlina.qcd = 4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \dots$ Látkový tok CO ₂ vyprodukovaný rostlinou $Rostlina.ccd = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \dots$ Látkový tok CO ₂ spotřebovaný rostlinou
Parametry	v ... Objem obálky rostliny
Zadávání jména bloku	Jako parametr bloku

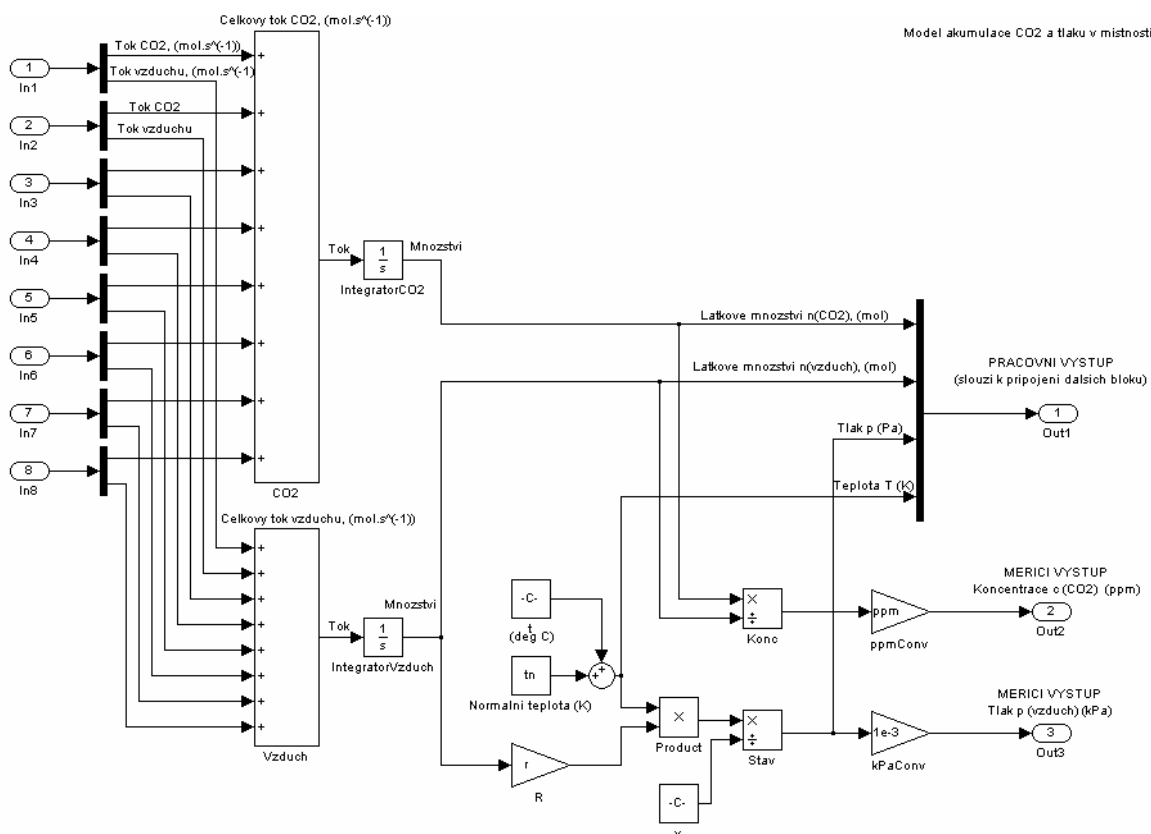
Model vlivu rostlin na látkové množství CO₂ a vzduchu v místnosti



Obr 5.4 – Podstým Rostlina

5.4 Bldcdtb3.Mistnost

Bldcdtb3.Mistnost	
Funkcionalita	Blok modelující místnost, tj. zónu s ideálně promíseným vzduchem
Matematický popis	Rovnice (7), (20), (21), (22)
Vstupy	8 x vstup typu tok
Výstupy	1x Pracovní výstup (výstup typu místnost); 1x Měřicí výstup (koncentrace CO ₂ , ppm); 1x Měřicí výstup (tlak v místnosti, kPa)
Implicitní parametry	$t_n = 273,15 \text{ K} \dots$ Normální teplota; $ppm = 10^6 \dots$ Konverze jednotek; $r = 8,31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \dots$ Mol. plyn. konst.
Parametry	$v \dots$ objem místnosti (m ³); $c_0 \dots$ Počáteční koncentrace CO ₂ (ppm); $p_0 \dots$ Počáteční tlak v místnosti (kPa); $t \dots$ Počáteční teplota v místnosti, (°C); $n_{CO_2} = (\text{Mistnost}.c_0/\text{ppm}) \cdot \text{Mistnost}.p_0 \cdot 1e3 \cdot \text{Mistnost}.v / (r \cdot (t_n + \text{Mistnost}.t)) \dots$ Počáteční látkové množství CO ₂ (mol); $\text{Mistnost}.n_{Vz} = \text{Mistnost}.p_0 \cdot 1e3 \cdot \text{mistnost}.v / (r \cdot (t_n + \text{mistnost}.t)) \dots$ Počáteční látkové množství vzduchu v místnosti, (mol)
Zadávání jména bloku	Jako parametr bloku

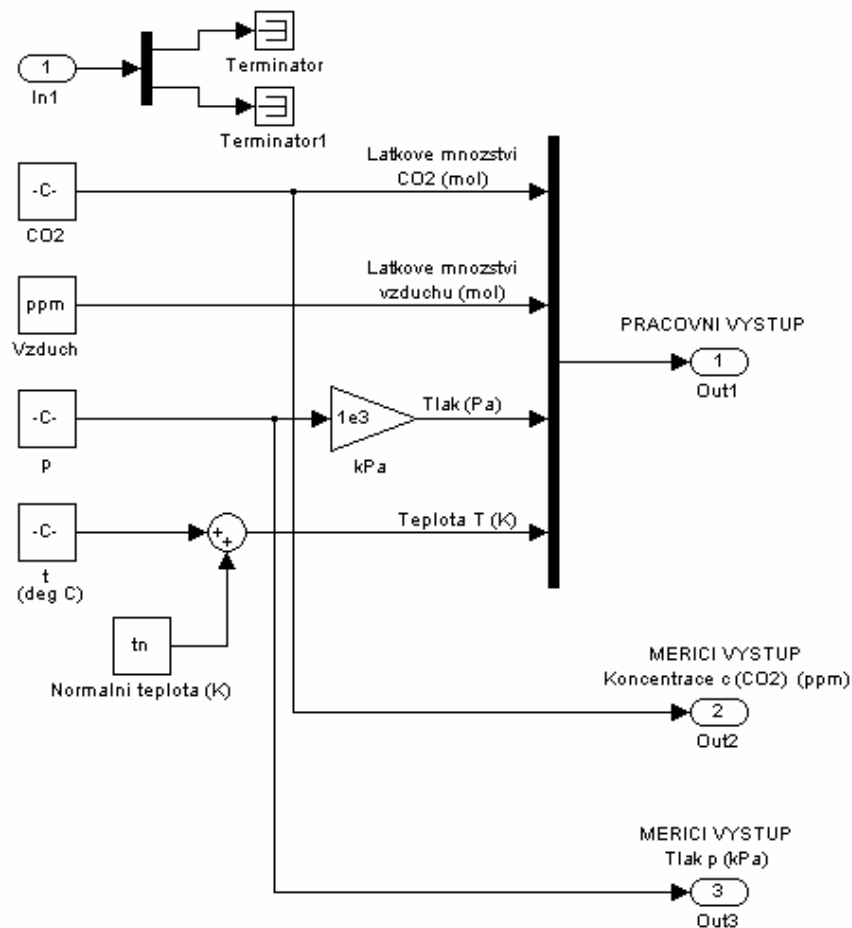


Obr 5.5 – Podstém Místnost

5.5 Bldcdtb3.Okoli

Bldcdtb3.Okoli	
Funkcionalita	Blok modelující okolí budovy tj. zónu s limitně nekonečnými rozměry, homogenním tlakem, teplotou a koncentrací CO ₂
Vstupy	1 x vstup typu tok, vzhledem k rozměrům okolí však nejsou tyto hodnoty uvažovány
Výstupy	1x Pracovní výstup (výstup typu místnost); 1x Měřicí výstup (koncentrace CO ₂ , ppm); 1x Měřicí výstup (tlak v místnosti, kPa)
Implicitní parametry	$t_n = 273,15 \text{ K} \dots$ Normální teplota; $ppm = 10^6 \dots$ Konverze jednotek
Parametry	$c_0 \dots$ Koncentrace oxidu uhličitého (ppm) $t \dots$ Teplota vzduchu v okolí budovy (°C); $p \dots$ Tlak v okolí (kPa)
Zadávání jména bloku	Jako parametr bloku

Model okolního prostředí. Vzhledem k jeho rozmerům jsou parametry nezávislé na výměně vzduchu s prostředím vnitřním

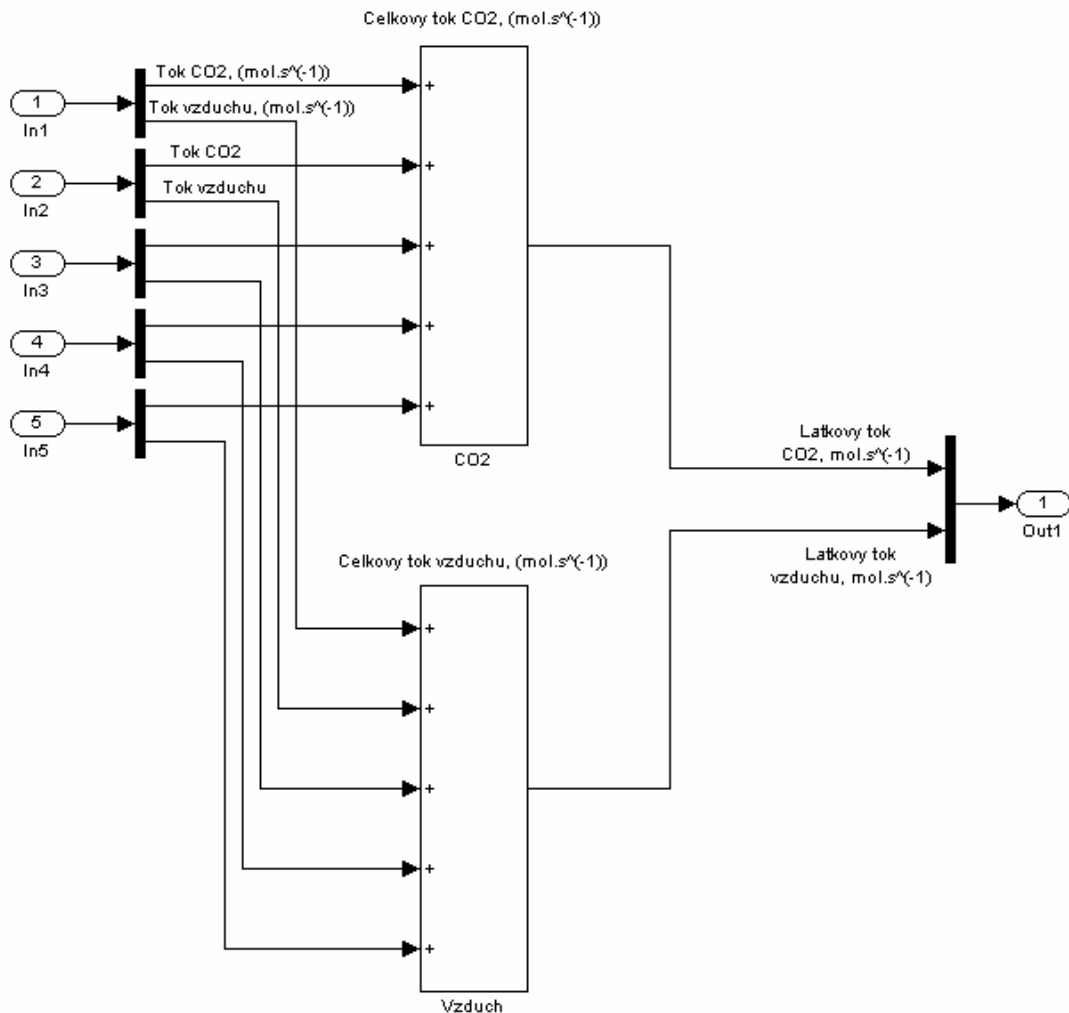


Obr 5.6 – Podsystem Okoli

5.6 Bldcdtb3.Extender

Bldcdtb3.Extender	
Funkcionalita	Blok zajišťuje rozšíření počtu vstupů bloku Místnost nebo Okoli
Matematický popis	$Q_{CO_2} = \sum_{i=1}^5 Q_{i_{CO_2}} \quad (\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}; \text{mol}\cdot\text{s}^{-1})$ $Q_{vzduch} = \sum_{i=1}^5 Q_{i_{vzduch}} \quad (\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}; \text{mol}\cdot\text{s}^{-1})$
Vstupy	5 x vstup typu tok
Výstupy	1x výstup typu tok
Implicitní parametry	Žádné
Parametry	Žádné
Zadávaní jména bloku	Přímé (blok nečte data z workspace)

Rozšíření počtu vstupů bloku Místnosti

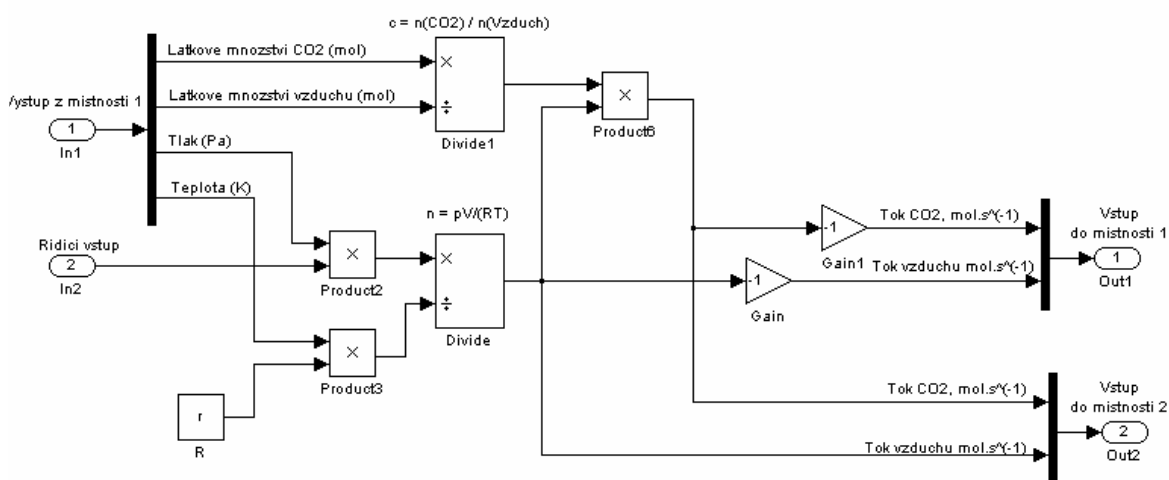


Obr 5.7 – Podstém Extender

5.7 Bldcdb3.Ventilace

Bldcdb3.Ventilace	
Funkcionalita	Blok modelující ventilaci, tj. přívod z jedné zóny (typicky okolí) do jiné zóny se známým objemovým průtokem
Matematický popis	Rovnice (26), (27)
Vstupy	1x vstup typu místnost; 1x objemový průtok ventilátoru, musí být nezáporný
Výstupy	2x výstup typu tok (na vstup a výstup 1 musí být napojena stejná místnost, díky zpětnému působení; na 2. výstupu místnost, do které je vzduch vhaněn)
Implicitní parametry	$r = 8,31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \dots \text{ Mol. plyn. konst.}$
Parametry	Žádné
Zadávání jména bloku	Přímé (blok nečte unikátní data z workspace)

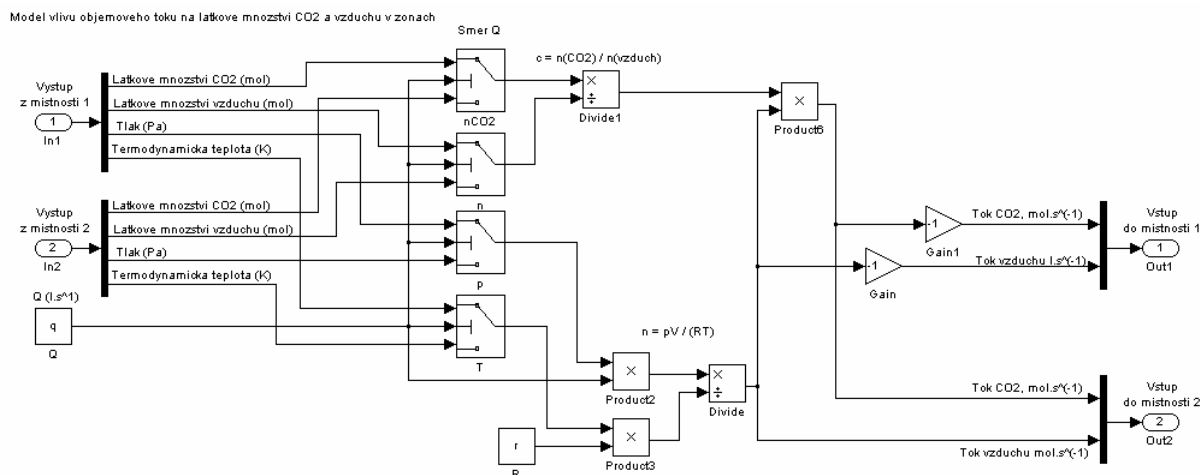
Model vlivu ventilace na látkové množství CO2 a vzduchu v místnosti



Obr 5.8 – Podstém Ventilace

5.8 Bldcdtb3.Interakce

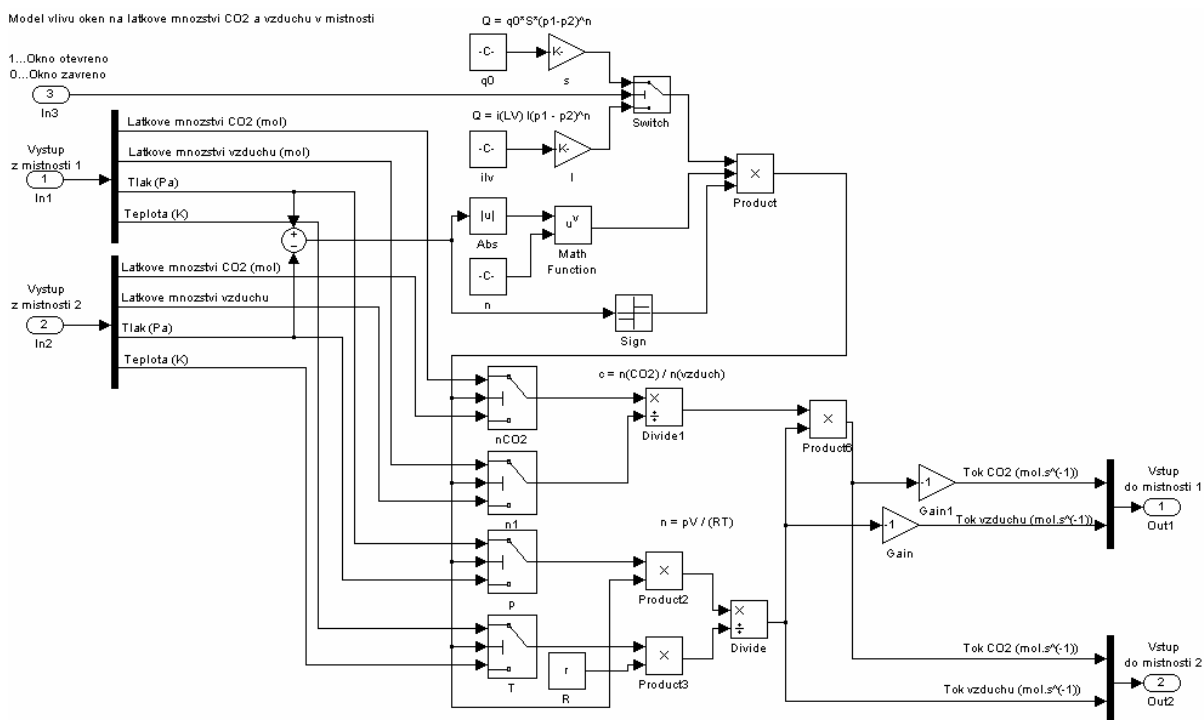
Bldcdtb3.Interakce	
Funkcionalita	Blok modelující vzdušný tok mezi místnostmi se známým objemovým průtokem. Na rozdíl od bloku Ventilace může být směr toku znaménkově signován
Matematický popis	Rovnice (24), (25)
Vstupy	2x vstup typu místnost
Výstupy	2x výstup typu tok, na odpovídající vstupy a výstupy musí být připojena tatáž zóna (výstupy představují zpětný vliv vzdušné výměny na látkové množství CO ₂ a vzduchu interagujících zón)
Implicitní parametry	$r = 8,31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \dots \text{ Mol. plyn. konst.}$
Parametry	$q \dots \text{Objemový tok (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ Kladná hodnota znamená tok vzduchu z místnosti připojené na vstup 1 do místnosti připojené na výstup 2, je-li hodnota záporná, tok je orientován opačným směrem
Zadávaní jména bloku	Jako parametr bloku



Obr 5.9 – Podsystem Interakce

5.9 Bldcdtb3.Okno

Bldcdtb3.Okno	
Funkcionalita	Blok modelující okna, tj. tok vzduchu mezi zónami je závislý na tlakovém rozdílu mezi nimi
Matematický popis	Rovnice (7), (29), (30), (31)
Vstupy	2x vstup typu místnost 1x otevření (1...otevřeno, 0 zavřeno)
Výstupy	2x výstup typu tok (na odpovídající čísla vstupů a výstupů musí být připojena tatáž místnost)
Implicitní parametry	$r = 8,31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$...Mol. plyn. konst.
Parametry	ilv ...Součinitel spárové průvzdušnosti ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-n}$) l ...Délka spáry (m) n ...Exponent (-)
Zadávání jména bloku	Jako parametr bloku

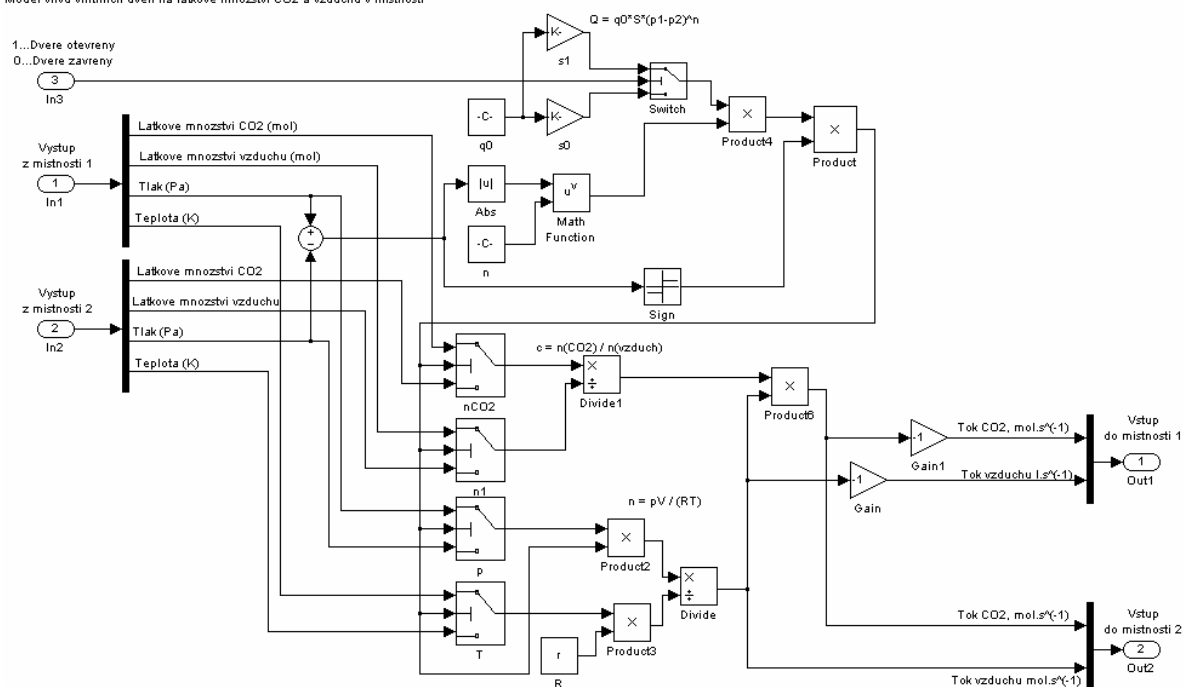


Obr 5.10 – Podstém Okno

5.10 Bldcdtb3.Dvere

Bldcdtb3.Dvere	
Funkcionalita	Blok modelující vnitřní dveře mezi místnostmi (velikost a směr toku je počítána z tlakového rozdílu vzduchu v daných místnostech)
Matematický popis	Rovnice (33), (34)
Vstupy	2x vstup typu místnost 1x otevření (1...otevřeno, 0 zavřeno)
Výstupy	2x výstup typu tok
Implicitní parametry	$r = 8,31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$...Mol. plyn. konst. $q_0 = 0,1 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-n}$...Tok vzduchu skrz jednotkovou plochu při $\Delta p = 1 \text{ Pa}$
Parametry	s ...plocha (m^2) n ...exponent (-)
Zadávání jména bloku	Jako parametr bloku

Model vlivu vnitřních dveří na látkové množství CO₂ a vzduchu v místnosti

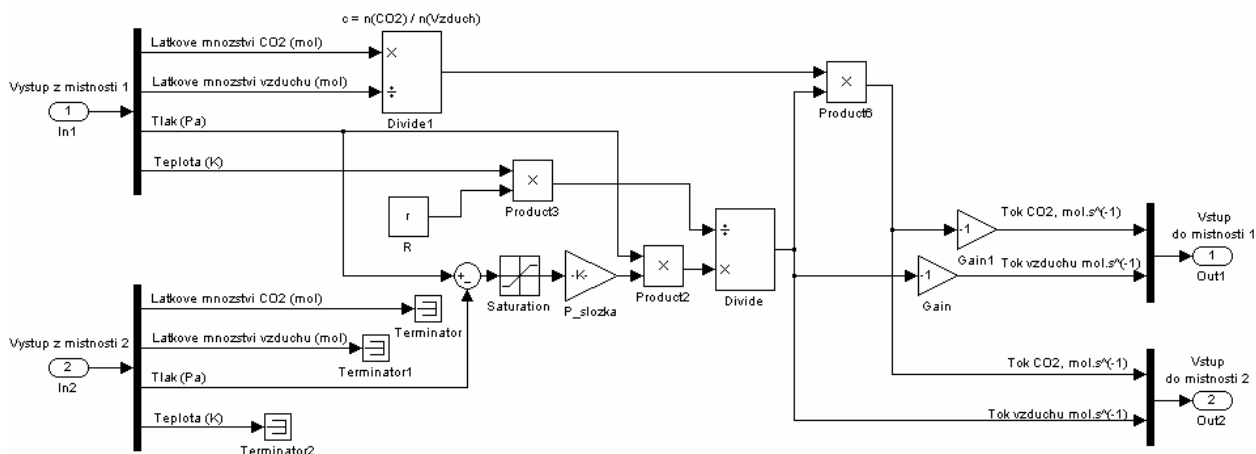


Obr 5.11 – Podsystem Dvere

5.11 Bldcdb3.Auto-Odsavani

Bldcdb3.Odsavani	
Funkcionalita	Blok modelující automatické odsávání. Žádanou hodnotou tlaku v místnosti připojené na vstup 1 je tlak v místnosti na vstupu 2. V činnosti pouze při přetlaku místnosti 1 oproti okolí
Matematický popis	Rovnice (35), (36)
Vstupy	2x vstup typu místnost
Výstupy	2x výstup typu tok (Na vstup a výstup 1 musí být napojena tatáž místnost, na vstupu a výstupu 2 místnost, do které je vzduch vháněn – typicky okolí)
Implicitní parametry	$r = 8,31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \dots \text{ Mol. plyn. konst.}$
Parametry	Žádné
Zadávání jména bloku	Přímé (blok nečte unikátní data z workspace)

Model vlivu automatického odsávání na látkové množství CO2 a vzduchu v místnosti

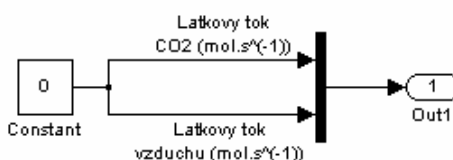


Obr 5.11 – Podsystem Odsavani

5.12 Bldcdb3.NeutralniI

Bldcdb3.NeutralniI	
Funkcionalita	Pomocný blok zajišťující ošetření nevyužitých vstupů místnosti či okolí
Matematický popis	$Q_{CO_2} = 0 \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}$, $Q_{\text{vzduch}} = 0 \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Vstupy	Žádné
Výstupy	1x výstup typu tok, nulová hodnota na obou vodičích znamená neutrální hodnotu pro stav místnosti
Implicitní parametry	Žádné
Parametry	Žádné
Zadávání jména bloku	Přímé (blok nečte data z workspace)

Neutralni vstup do Místnosti

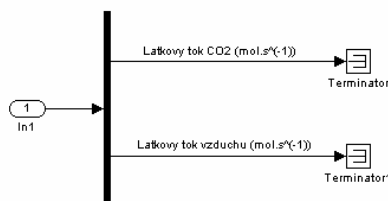


Obr 5.12 – Podstým NeutralniI

5.13 Bldcdb3.NeutralniO

Bldcdb3.NeutralniO	
Funkcionalita	Pomocný blok zajišťující terminaci nevyužitých pracovních výstupů z místností či okolí
Vstupy	1x vstup typu místnost
Výstupy	Žádné
Implicitní parametry	Žádné
Parametry	Žádné
Zadávání jména bloku	Přímé (blok nečte data z workspace)

Terminace signaloveho vodice typu tok



Obr 5.13 – Podstým NeutralniO

6 NÁVRH ŘÍZENÍ KONCENTRACE CO₂ V BUDOVÁCH

6.1 Požadavky na větrací systém

Úkolem větracích systémů budov je zajištění dobré kvality vnitřního vzduchu. V úvodu bylo popsáno, že kvalitu vnitřního vzduchu lze kvantifikovat koncentrací oxidu uhličitého. Cílem větracích systémů je proto zabezpečení takového toku čerstvého vzduchu do budovy a odvodu použitého, aby byla koncentrace škodlivých látek nižší než mezní hodnota, tedy koncentrace oxidu uhličitého nižší než mezní hodnota $c_{\text{CO}_2\text{max}}$.

Snadno nahlédneme, že nadměrná látková výměna mezi vnějším a vnitřním prostředím vede k vysokým energetickým nárokům na systémy HVAC⁹. Samotný systém aktivního větrání, tj. systém využívající motorem hnaného ventilátoru, způsobuje spotřebu energie, rovněž chlazení čerstvého vzduchu v teplých měsících, respektive jeho ohřev v měsících chladných, způsobuje energetickou, ekologickou a finanční zátěž. Volba vhodného kompromisu je proto klíčovým úkolem návrhářů těchto systémů.

6.1.1 Mezní koncentrace oxidu uhličitého v budovách

Hodnota maximální zdravotně nezávadné koncentrace oxidu uhličitého ve vnitřním prostředí budov $c_{\text{CO}_2\text{max}}$ je v normách různých států definována různě. Jedním z nejstarších doporučení pro maximální koncentraci CO₂ je Pettenkoferovo hygienické pravidlo, respektive Pettenkoferův normativ. Pettenkoferovo hygienické pravidlo stanovuje maximální zdravotně nezávadnou hodnotu koncentrace CO₂ při trvalém pobytu člověka v místnosti $c_{\text{CO}_2\text{max}} = 1000$ ppm. Aplikací této hodnoty a objemového toku oxidu uhličitého vyprodukovaného dospělým člověkem dostáváme tzv. Pettenkoferův normativ, stanovující přívod vzduchu do místnosti na osobu $Q_{\text{vzduch}} = 25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$ [Cihelka, 1985].

Přestože mezních hodnot se vyskytuje v normách a doporučení států celá řada, Pettenkoferova hodnota je základem těchto norem. Podle doporučeného předpisu Evropské unie EUR 14449EN (Report No. 11, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings, Brussel Luxemburg 1992) je nutný tok čerstvého vzduchu $Q_{\text{EUR}} = 25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu při maximálním počtu 20 % nespokojených lidí. [Jokl, 2002]

Významnou normou v oblasti vzduchotechniky, topných a chladicích zařízení, je US ASHRAE Standard 62-1989R Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Hodnoty uvedené v tomto standardu opět vycházejí z Pettenkoferova hygienického pravidla, respektive Pettenkoferova normativu. Pro neadaptované osoby činí základní hodnota přiváděného vzduchu do vnitřního prostředí $Q_{\text{ASHRAE_Neadaptovane}} = 7,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ na osobu (tj. $Q_{\text{ASHRAE_Neadaptovane}} = 27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu), pro adaptované pouze $Q_{\text{ASHRAE_Adaptovane}} = 2,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ na osobu (tj. $Q_{\text{ASHRAE_Adaptovane}} = 9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu). [Jokl, 2002]

⁹ HVAC je zkratka heating, ventilating and air conditioning

V České republice podle přílohy č. 4 k nařízení vlády 178/2001 Sb. je předepsané minimální množství přiváděného venkovního vzduchu na pracoviště pro lehce pracujícího nekuřáka $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu (práce převážně v sedě), pro práci převážně vstoje a v chůzi $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu, pro těžce pracujícího $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu (je-li povoleno kouření, zvyšuje se ještě o $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na osobu). [Jokl, 2002].

6.2 Struktura větracího systému

6.2.1 Koncepce struktury větracího systému

V předchozí podkapitole byly uvedeny mezní koncentrace oxidu uhličitého v rezidenčním mikroprostředí, které je za účelem zajištění dobré fyzické a psychické kondice obyvatel nutné dodržet. Snadno nahlédneme, že vychází-li koncepce větracího systému z výše uvedených tabulkových hodnot přívodu vzduchu vztažené na jednu osobu (např. dle Pettenkoferova normativu), daný systém je vhodný pouze pro objekty, u kterých apriorně známe počet obyvatel. Pakliže však apriorní znalost nemáme, což platí v reálném případě prakticky vždy, přímovazební řídicí systém je nevhodný.

Za účelem zvýšení účinnosti HVAC systémů dochází k použití tzv. demand controlled ventilation. Tyto systémy měří kvalitu¹⁰ vnitřního vzduchu v budovách, reprezentovanou koncentrací oxidu uhličitého, případně zejména v kuchyňských prostorách též tzv. volatile organic compounds, VOC. Údaje ze senzorů jsou zejména u starších systémů zpracovány bang-bang regulátorem, spojitě regulátory či jejich diskretní aproximace nalézají uplatnění až u nejnovějších systémů.

6.2.2 Přímovazební řízení množství přiváděného vzduchu

Existuje několik metodologií pro návrh větracích přímovazebních systémů. Již jsme se zmínili o návrhu dle množství osob v interiéru. Poměrně dobrých výsledků dosahují větrací systémy, které zajišťují intenzitu větrání 1 h^{-1} , viz ¹¹, odsávání WC $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a koupelny $75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Takto dimenzovaný větrací systém není sice z hlediska kvality vnitřního vzduchu a energetické náročnosti optimální, avšak hodnoty poslouží jako dobrý údaj pro dimenzování maximálního výkonu (objemového toku) ventilace při realizaci větracího systému pracujícího v uzavřené smyčce. Vypočtenou hodnotu je vhodné pro dimenzování zpětnovazební ventilace násobit korekčním činitelem větším než jedna, umožňujícím překlenutí doby zvýšených požadavků na objemový tok přiváděného vzduchu.

Stojí za zmínku, že kromě minimálního množství přiváděného vzduchu se stavební normy též zabývají maximální rychlostí proudění přiváděného a odváděného vzduchu w ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Pro obytné budovy činí střední hodnota přiváděného vzduchu nejvýše $w = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

¹⁰ Tento pojem je v literatuře často uváděn zkráceně IAQ, od sousloví indoor air quality

¹¹ Jednotka intenzity větrání $\text{h}^{-1} \sim \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$

maximální pak $w = 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Střední rychlost odváděného vzduchu je stanovena $w = 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, maximální $w = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [Cihelka, 1985]. Uvedené hodnoty slouží pro správnou realizaci výustek, vzhledem k zaměření a stupni abstrakce této práce nebudou dále diskutovány.

6.2.3 Zpětnovazební řízení množství přiváděného vzduchu

Vzhledem ke svému širokému nasazení v praxi i v této práci je volena maximální hodnota koncentrace oxidu uhličitého v trvale obývaných místnostech podle Pettenkoferova hygienického pravidla, respektive podle standardu ASHRAE 62, které definují mezní koncentraci oxidu uhličitého $c_{\text{max}} = 1000 \text{ ppm}$ v trvale obývaných místnostech.

Trvale obývanými místnostmi se rozumí zejména obývací pokoje, pracovny a ložnice. Jedná se o místnosti, kde obyvatelé tráví nejvíce času. Jelikož zavřené vnitřní dveře a zejména vnější obálka budovy neposkytují dostatečnou výměnu vzduchu, pro kvalitní regulaci je nutné, aby byly senzory oxidu uhličitého umístěny ve všech místnostech, spadajících do této kategorie.

Ostatními místnostmi se rozumí WC, koupelna a chodba. V těchto místnostech není nutné sledování koncentrace oxidu uhličitého, neboť v nich obyvatelé netráví dostatečně dlouhou dobu, aby koncentrace oxidu uhličitého výrazně narostla, respektive pobyt v případné vyšší koncentraci oxidu uhličitého se předpokládá natolik krátký, že nepůsobí obyvatelům potíže.

6.2.4 Shrnutí požadavků na zpětnovazební řídicí systém

Řízeným systémem je obytná budova. Vstupem do systému je objemový tok vnějšího vzduchu přiváděný do budovy. Vstupy do jednotlivých místností mohou být váhovány¹². Výstupy systému jsou koncentrace oxidu uhličitého v místnostech. Jedná se tedy o systém s jedním vstupem a zpravidla více výstupy.

Požadavky na regulaci jsou:

- Trvale obývané místnosti (obývací pokoje, pracovny a ložnice)
Maximální koncentrace CO_2 : $c_{\text{CO}_2\text{max}} = 1000 \text{ ppm}$
- Ostatní místnosti (kuchyně, chodby, koupelny, WC a neobývané místnosti)
Koncentrace CO_2 nebude měřena, tudíž ani regulována maximální hodnota, při návrhu řízení je nutné zaručit maximální koncentraci $c_{\text{CO}_2\text{max}} = 15\,000 \text{ ppm}$

Aby nedocházelo při zavedení poruchy do systému k překročení mezní zdravotně nezávadné koncentrace, žádanou hodnotou bude $c_{\text{CO}_2} = 900 \text{ ppm}$. Při praktické realizaci by bylo vhodné umožnit majiteli domu změnu této hodnoty v přiměřeném rozsahu.

¹² Praktická realizace váhování vstupů je tvořena fixně umístěnou klapkou či různým průměrem potrubí

6.3 Návrh regulátoru

6.3.1 Identifikace systému

Snadno nahlédneme, že analytické vyjádření závislosti výstupních veličin na veličině vstupní by bylo velmi složité a v této formě pro praktické použití nevhodné. Proto provedeme identifikaci systémů z přechodových charakteristik a aproximaci přenosy systému prvního či druhého řádu. Pro identifikaci lze využít obvyklých metod, jejichž popis lze nalézt např.

v [http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/sam/identifikace_skripta.pdf].

Z důvodu rozsahu práce nebudeme způsobu odečítání hodnot z přechodových charakteristik věnovat další pozornost, popíšeme však postup vedoucí k návrhu regulátoru.

6.3.2 Postup návrhu regulátoru

1. Po vyhotovení simulačního schématu budovy umístíme na řídicí¹³ vstup ventilace takovou hodnotu objemového toku vzduchu, aby nebyla překročena mezní koncentrace oxidu uhličitého v budově (výstupní hodnoty musí ležet v okolí pracovního bodu).
2. Nastavíme počáteční podmínky modelu pro další simulaci, tj. odečteme koncentrace a tlaky ve všech místnostech domu a nastavíme tyto hodnoty jako výchozí.
3. Nyní se budova nachází v blízkosti pracovního bodu v ustáleném stavu, provedeme záporný skok vstupního signálu takový, aby se soustava stále nacházela v blízkosti pracovního bodu, ovšem mezní koncentrace byla překročena.
4. Provedeme identifikaci systému z přechodových charakteristik, možno využít m-files v příloze.
5. Navrhne regulátor standardními metodami. V návrhu větracího systému typového domu byl použit toolbox MATLAB-SISOtool.
6. Uzavřeme zpětnovazební řídicí smyčku a zadáme konstanty regulátoru.
7. Uvedeme systém do ustáleného stavu a s užitím hodnot tlaků a koncentrací CO₂ v ustáleném stavu nastavíme počáteční podmínky pro další simulaci.
8. Zavedením poruchového signálu analyzujeme chování řízeného systému a případně provedeme manuální doladění parametrů regulátoru s využitím pravidel pro chování obvodu v uzavřené smyčce.

¹³ tj. ovládáme systém v otevřené smyčce

7 MODEL TYPOVÉHO DOMU

S využitím navrženého modelu, jehož bloky jsou seskupeny v knihovně bldcddb3, byl vytvořen model typového domu. Následně byl proveden návrh regulátoru tohoto systému a provedena simulace reakce zpětnovazebního systému na poruchu. Náhled viz obr 7.6.

7.1 Typový dům

Typovým domem je rodinný dům, který se skládá z šesti místností v přízemí a šesti v podkroví. Z důvodu ochrany osobních údajů není výkres domu součástí bakalářské práce. Charakter základní struktury domu naznačíme z důvodu ilustrace použití modelu.

V přízemí typového domu se nachází obývací pokoj nedílně spojený s kuchyní, v modelu označován m101. Kromě této místnosti je trvale obývanou místností v přízemí též pokoj m102. V podkroví se nachází trojice trvale obývaných místností, jmenovitě m201, m203 a m206. Z hlediska vzdušných proudů uvnitř budovy jsou podstatné koupelny, jež jsou umístěny v obou podlažích. V koupelnách je modelován automatický odtah vzduchu. Koupelna m103 je spojena prostřednictvím dveří s místností m101, koupelna m204 je spojena prostřednictvím dveří s místností m202. Další údaje nejsou pro vysvětlení výsledků simulace podstatné.

7.2 Regulace CO₂ v typovém domě

V nízkoenergetických a pasivních domech je rozvod vzduchotechniky řešen různým způsobem. Tento fakt je respektován i v modelu a dále se budeme zabývat dvěma alternativami rozvodu ventilace.

Varianta č. 1 disponuje vývody ventilace v přízemí v obývacím pokoji (m101) a v podkroví¹⁴ v místnosti m201. Toto rozmístění je výhodné pro svou prostorovou nenáročnost a jednoduchost.

Varianta č. 2 disponuje vyústkami ve všech trvale obývaných místnostech. V modelu typového domu to znamená umístění vyústek do místností m101, m102, m201, m203 a m206. Z důvodu apriorního předpokladu nestejněměrné obsazenosti uvedených místností osobami bylo voleno váhování přítoku čerstvého vzduchu. Do místnosti m101 proudí 3/7 celkového objemového toku čerstvého vzduchu dodávaného ventilačním systémem do budovy, do ostatních výše uvedených místností proudí po 1/7 celkového objemového toku systému.

Provedení obou variant je patrné ze simulačních schémat uvedených v příloze. Postup pro inicializaci modelu je popsán v příloženém souboru help.m.

¹⁴ tzn. vyústky jsou umístěny v každém patře právě jedenkrát

7.2.1 Návrh regulátoru pro typový dům

V souladu s předchozí kapitolou byl navržen maximální průtok hlavního ventilátoru větracího systému domu. Saturační hodnotou je $Q_{\max} = 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. S využitím identifikace systémů z přechodové charakteristiky byly určeny přenosy objemového toku ventilačním systémem na koncentraci oxidu uhličitého v budově. Pomocí toolboxu MATLAB-SISOtool byly navrženy regulátory pro obě varianty umístění vyústek ventilace a vybrán nejvhodnější regulátor. Takto navržené konstanty regulátoru byly s využitím modelu empiricky doladěny.

Vzhledem k charakteru soustavy byl shledán jako vhodná volba P regulátor. D složka byla zavržena z důvodu nízké saturační hodnoty akčního členu vzhledem k hodnotám akční veličiny. I složka byla zavržena z důvodu integračního charakteru soustavy a nízkých požadavků na přesnost udržení maximální koncentrace CO_2 na hodnotě rovné žádané hodnotě.

Pro variantu č. 1 je přenos regulátoru:

$$C_1 = -0,01 \quad (37)$$

Pro variantu č. 2 je přenos regulátoru:

$$C_2 = -0,02 \quad (38)$$

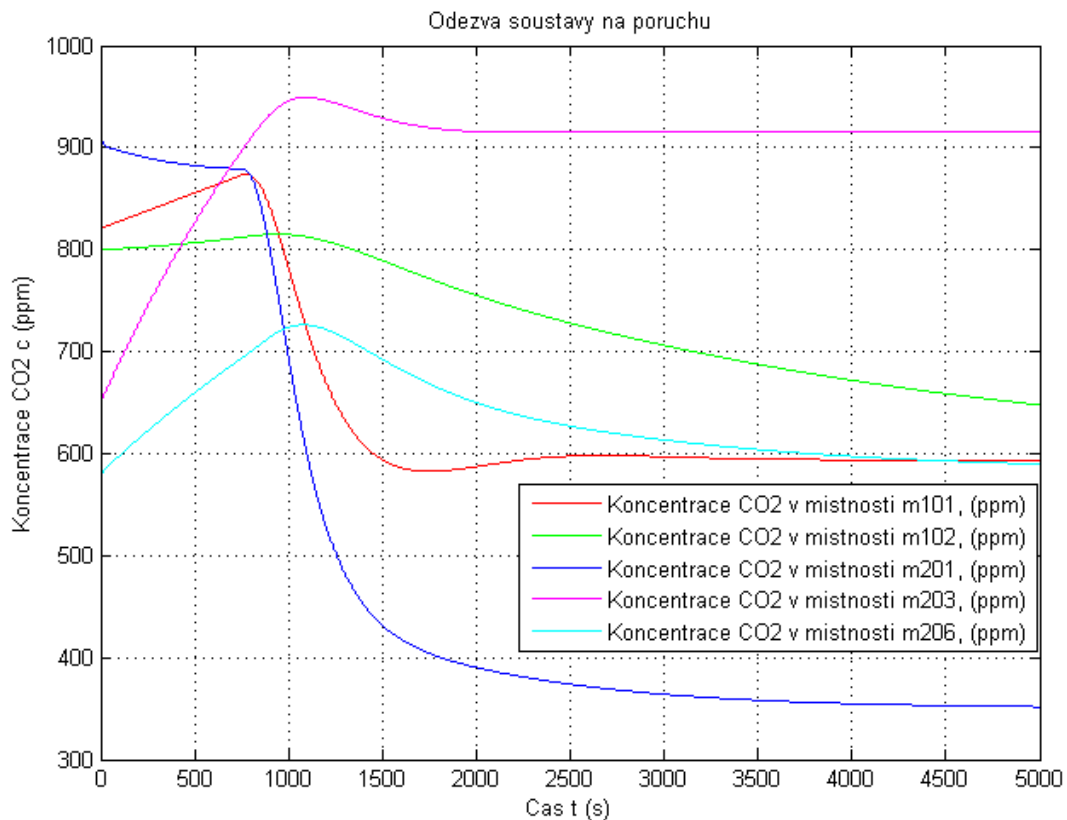
7.2.2 Vliv poruchové veličiny

Pro ukázkou chování zpětnovazebního systému ventilace na modelu typového domu zvolme poruchovou veličinu přesun dvou osob.

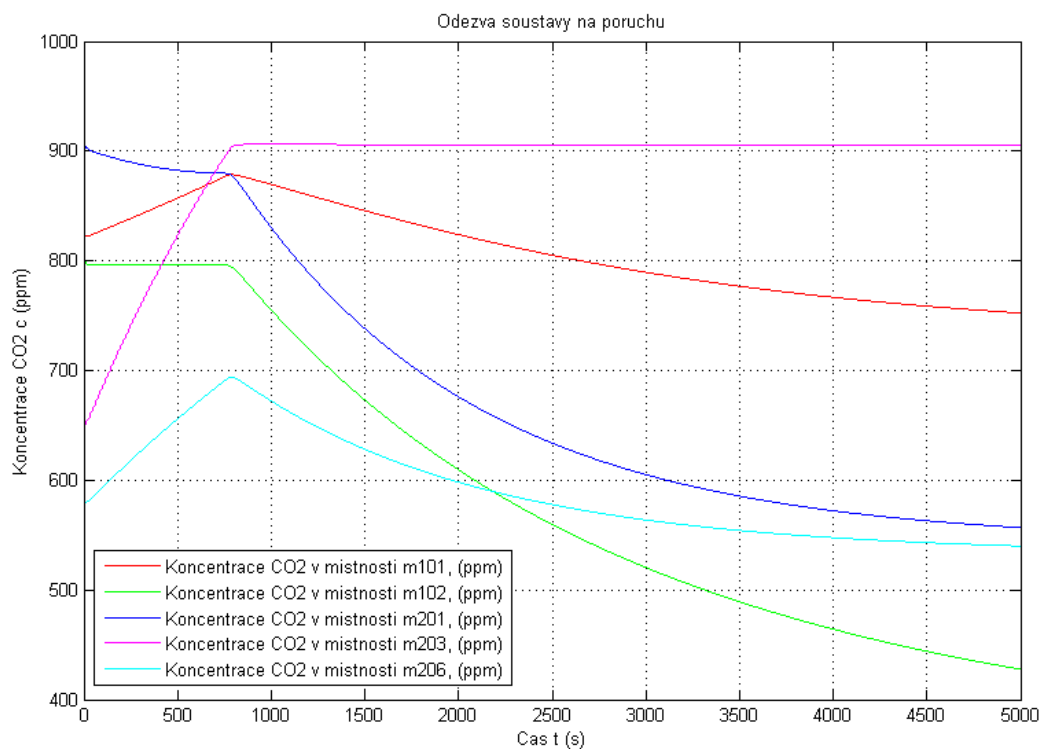
Popišme nejprve počáteční strukturu modelu typového domu. V místnosti m101 se nachází 5 osob a rostlina o objemu $V = 0,7 \text{ m}^3$ a relativní ozáření $\varphi = 0,7$. Místnost m201 je obývána dvěma osobami. V místnosti m206 stojí rostlina o objemu $V = 0,6 \text{ m}^3$ a relativní ozáření $\varphi = 0,7$. Ostatní místnosti jsou pro názornost prázdné.

Poruchou je přesun dvojice osob z místnosti m201 do místnosti m203. Ostatní zůstává neměnné. Výstupní veličiny systému, tj. koncentrace oxidu uhličitého v trvale obývaných místnostech, a příčné akční zásahy jsou vyneseny v obrázcích 7.1 až 7.5. Cílem těchto simulací bylo mj. porovnat obě varianty vyústek ventilace.

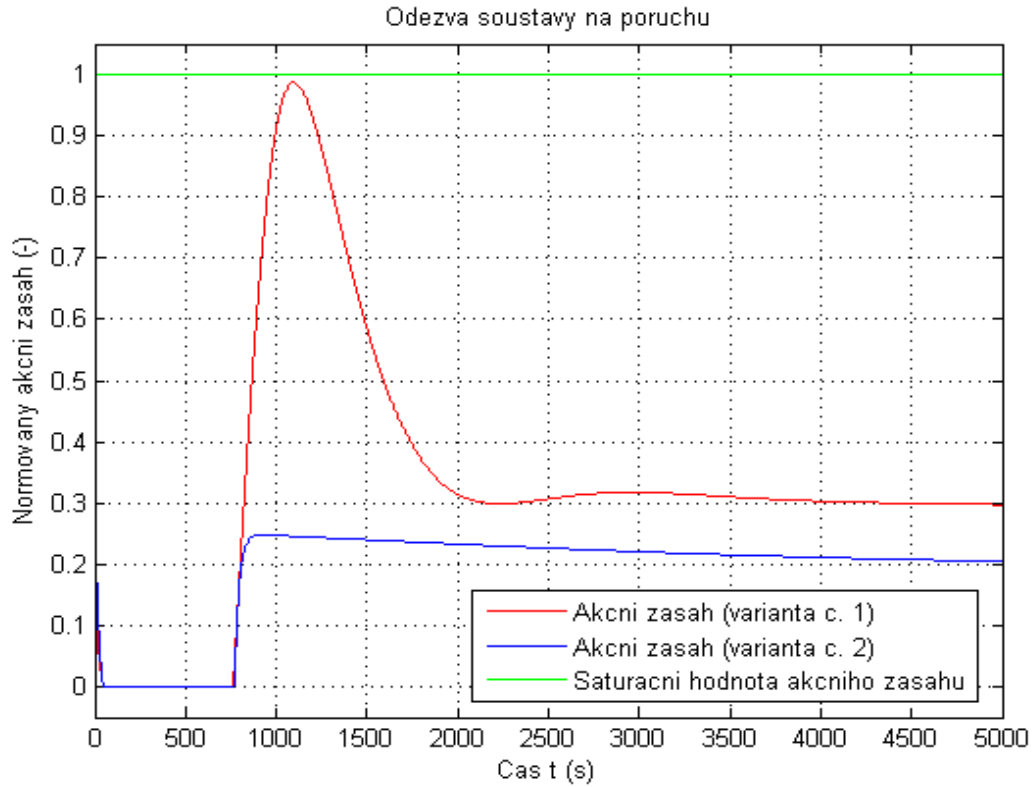
Snadno nahlédneme, že zmíněné varianty mají před zásahem poruchové veličiny odlišné počáteční podmínky, tj. koncentrace oxidu uhličitého a tlaků v místnostech. Z toho důvodu byl simulován vliv poruchové veličiny na budovu dle varianty č. 1 s počátečními podmínkami rovnými ustáleným hodnotám varianty č. 1, dále vliv poruchové veličiny na budovu dle varianty č. 2 s počátečními podmínkami rovnými ustáleným hodnotám varianty č. 2. Pro srovnání byla též provedena simulace varianty č. 2 s nastavenými počátečními podmínkami rovnými ustáleným hodnotám koncentrací a tlaků varianty č. 1. Tento krok je přípustný, jelikož uvedené počáteční podmínky jsou fyzikálně realizovatelné. Je však nutné upozornit na to, že v tomto posledním případě se k popsání poruchové veličiny implicitně přičítá obtížně vyjádřitelná porucha způsobená nenativními počátečními podmínkami.



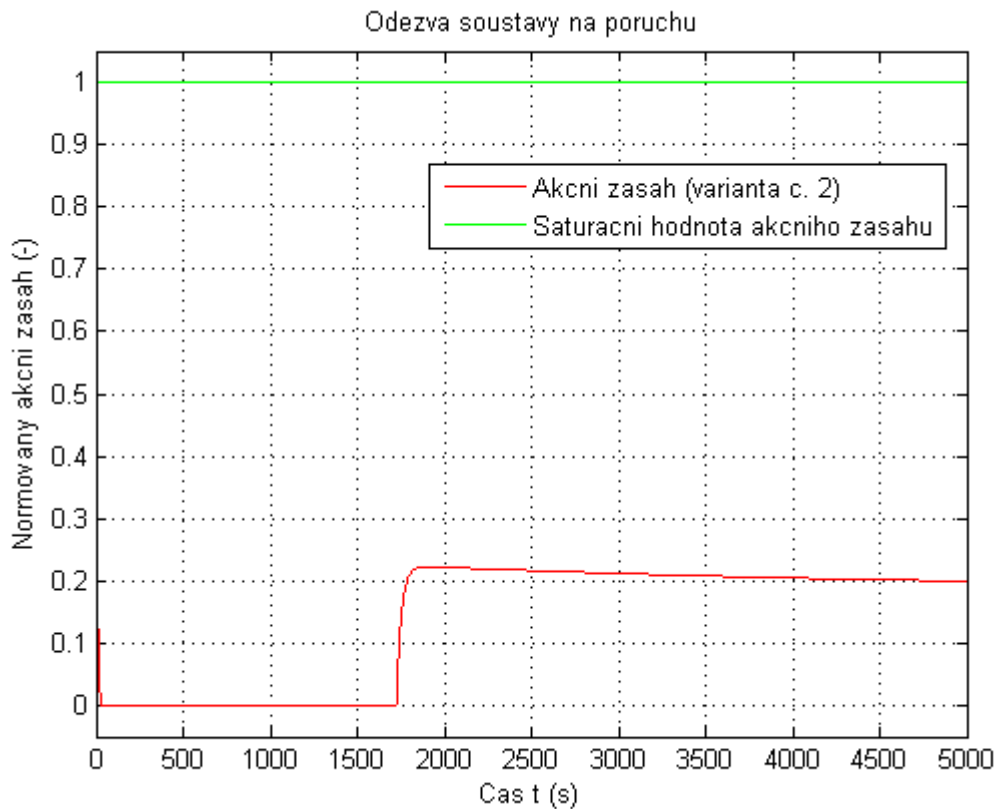
Obr. 7.1 – Vliv poruchové veličiny, varianta č. 1, počáteční podmínky 1 (nativní)



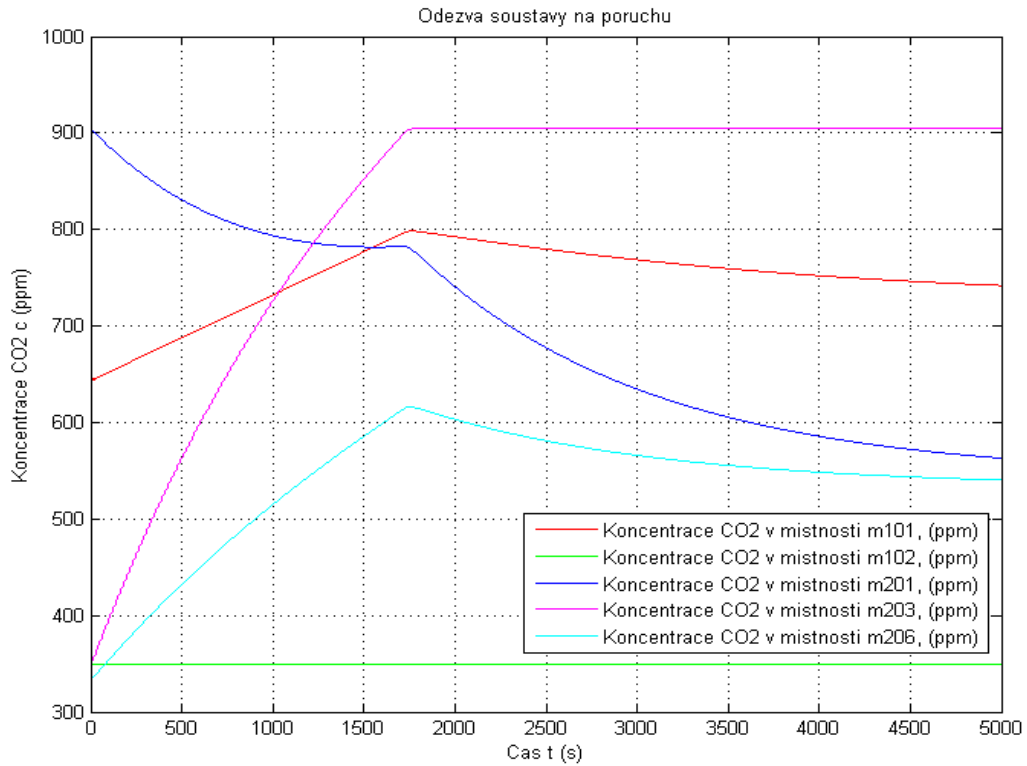
Obr. 7.2 – Varianta č. 2, počáteční podmínky varianty č.1 (tj. nenativní počáteční podmínky)



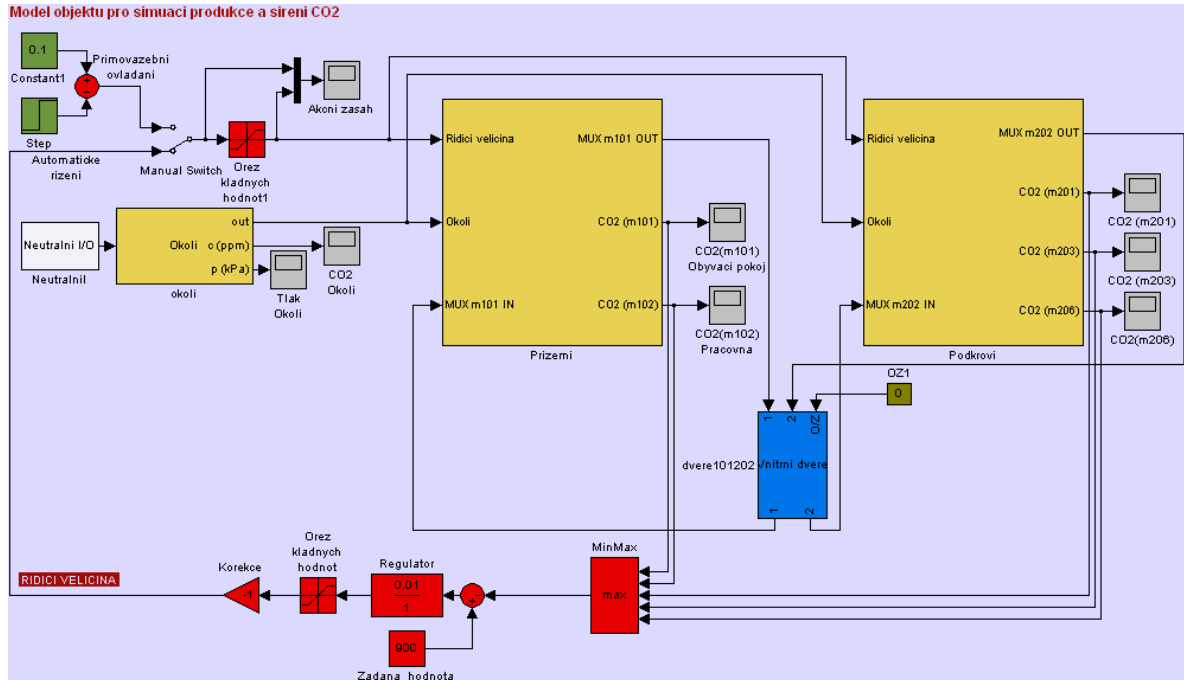
Obr. 7.3 – Vliv poruchové veličiny, srovnání akčních zásahů dle variant č. 1 a č. 2, počáteční podmínky obou systémů dle varianty č. 1



Obr. 7.4 – Akční zásah, varianta č. 2, počáteční podmínky č. 2 (nativní)



Obr. 7.5 – Vliv poruchové veličiny, varianta č. 2, počáteční podmínky č. 2 (tj. nativní počáteční podmínky varianty č. 2)



Obr. 7.6 – Náhled na nejvyšší vrstvu modelu objektu

8 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla provedena matematicko-fyzikální analýza produkce, spotřeby a šíření oxidu uhličitého v obytných budovách. Byly kvantifikovány jednotlivé ovlivňující činitele a s užitím jejich popisu byla vytvořena knihovna v aplikaci MATLAB-Simulink pro modelování produkce a šíření tohoto kontaminantu v libovolné obytné budově.

Použitý popis šíření plynu v budově je označován jako multi-room. Díky jeho vlastnostem je knihovna vhodná pro běžné obytné budovy, tj. budovy s velkým počtem místností. Modularita knihovnických bloků a fakt, že je model absolutní, zaručuje snadnou rekonfigurovatelnost a případné doplnění specializovaných bloků modelujících nestandardní jevy.

S využitím vzniklé knihovny bylo vytvořeno simulační schéma dvoupodlažního typového domu. Byly navrženy dva způsoby řešení ventilace v budově. První varianta obsahovala vyústky větracího systému v obývacím pokoji a ložnici, druhá varianta ve všech trvale obývaných místnostech. Pro obě varianty byl navržen regulátor a provedeny simulace chování zpětnovazebního systému. Zavedením poruchových veličin byly analyzovány odezvy systémů, v obou variantách nebyla překročena maximální zdravotně nezávadná koncentrace oxidu uhličitého $c_{CO_2max} = 1000$ ppm. S uvážením velikostí akčních zásahů a dob ustálení byla shledána jako vhodnější řešení druhá varianta větracího systému, tj. varianta rozmístění vyústek do všech trvale obývaných místností.

Původním záměrem práce bylo též porovnání simulovaných dat s daty naměřenými v reálné budově. Spolupodílel jsem se na výběru senzorů oxidu uhličitého, které byly dostupné na trhu. Díky přehodnocení požadavků realizátora hardwarové části však bylo během projektu rozhodnuto o zahájení vývoje zakázkových čidel CO_2 . Jelikož tyto senzory nebyly dodány externí firmou včas, porovnání simulovaných a empirických dat nemohlo být provedeno.

Simulační schéma typového domu dokazuje poměrně vysokou výpočetní náročnost modelu pro běžné domy. Při snaze urychlit řešení volbou vyššího kroku simulace jsme limitováni možnostmi numerických metod použitých pro řešení rovnic.

Při validaci modelu reálnými hodnotami by v případě rozdílných výsledů bylo nutné modelovat též vliv vzdušných proudů mezi místnostmi nezávislými na tlakové diferenci. Rovněž by bylo nutné modelovat vliv větru. Pro zjednodušení modelu nebyl uvažován vliv komínů a krbů, proto by pro zlepšení přesnosti bylo nutné jejich vliv namodelovat.

Použitá literatura

1. Cihelka J., et al: *Vytápění, větrání a klimatizace*. SNTL, Praha, 1985.
2. Doležilková H.: *Rezidenční mikroprostředí*, disertační práce. Praha, 2006.
3. Doležilková H.: *Bytové větrání ve vztahu k produkci CO₂, vlhkosti a škodlivin (II)*, Praha, 2006, <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3042>.
4. Doležilková H., Papež K.: *Problematika bytového větrání*. Praha, 2008, <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4613>.
5. Drkal F.: <http://www.fsid.cvut.cz/~drkal/index.htm>.
6. Finlayson E. U., Gadgil A. J., Thatcher T. L., Sextro R. G.: *Pollutant dispersion in a large indoor space*. <http://eetd.lbl.gov/ie/pdf/LBNL-50105.pdf>.
7. Heppner D., B., Dahlhausen M., J., Klimas R.: *Advanced CO₂ removal process control and monitor instrumentation development*. Life systems, Cleveland, 1982.
8. Jayaraman B., Lorenzetti D. M., Gadgil A. J.: *Coupled Model for Simulation of Indoor Airflow and Pollutant Transport*. 2004, <http://eetd.lbl.gov/ie/pdf/LBNL-56667.pdf>.
9. Jokl M.: *Zdravé obytné a pracovní prostředí*. Academia, 2002, ISBN 80-200-0928-0.
10. Kubeš P., Kyncl Z.: *Fyzika I*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1991, ISBN 80-01-02671-X
11. Lorenzetti D. M.: *Assessing multizone airflow simulation software*, 2002, <http://eetd.lbl.gov/ie/pdf/LBNL-49578.pdf>.
12. Lorenzetti D. M.: *Predicting Indoor Pollutant Concentrations, and Applications to Air Quality Management*. <http://eetd.lbl.gov/ie/pdf/LBNL-51582.pdf>.
13. Mathausarová Z.: *Přirozené větrání, infiltrace a exfiltrace*. 2006, <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3608&h=254&pl=47>.
14. Megri, A. Ch.: *Building Load and Energy Simulation Programs and the Design Process*. Chicago, 2007, <http://www.ijvent.org.uk/IJV%20Vol%206/IJV%20V6%20No%202/IJV%20Abstracts%20Vol%206%20No%202%20Paper%207.htm>.
15. Mikulčák J. et al: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Prometheus 2004
16. Mora L., Gadgil A. J., Wurtz E.: *Comparing zonal and CFD model predictions of isothermal indoor airflows to experimental data*. In: *Indoor Air 2003*, 13: 77 - 85 <http://eetd.lbl.gov/ie/pdf/LBNL-47027.pdf>.
17. Novák J., Tywoniak J.: *Budova jako součást větracího systému / větrací systém jako součást budovy*, In: *Vytápění, větrání, instalace*, 1/2006.
18. Persily A. K.: *Modeling study of ventilation, IAQ and energy impacts of residential mechanical ventilation*. National Inst. of Standards and Technology, Building Environment Div., 1998.
19. Počinková M.: *Umístění plynových spotřebičů s ohledem na větrání bytových domů*. 2005, <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2805&h=256&pl=47>.

20. Rubinovi O. a A.: *Vnitřní prostředí budov a tepelná pohoda člověka*. In: Klimatizace a větrání, 2005, <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2650&h=254&pl=47>.
21. Stavova P., Melikov A. K., Sundell J., Naydenov K.G.: *A New Approach For Ventilation Measurement In Homes Based On CO2 Produced By People – Laboratory Study*, In: 17th Air-Conditioning And Ventilation Conference, Prague, 2006.
22. Svoboda E., et al: *Přehled středoškolské fyziky*. Prometheus 1996, ISBN 80-7196-116-7.
23. Šafránek J.: *Okna a vnější dveře s ohledem na možnost výměny vzduchu*. 2005, <http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2816&h=254&pl=47>.
24. Šetlík I., Seidlová F., Šantrůček J.: *Fyziologie rostlin*. Biologická fakulta Jihočeské univerzity, <http://www.natur.cuni.cz/biochem/kucera/rostliny/is/fyzros.html>.
25. Vaverka J., Chybík J., Mrlík F.: *Stavební fyzika 2 – stavební tepelná technika*. Vutium Brno, 2000, ISBN 80-214-1649-1.
26. CONTAM 2.4b manual
27. <http://cs.wikipedia.org>
28. <http://en.wikipedia.org>
29. <http://www.eere.energy.gov>
30. http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/sam/identifikace_skripta.pdf
31. <http://www.protronix.cz/cs/clanky/251-odstavec-proc-pouzivat-cidla-co2/>
32. <http://www.tzb-info.cz>
33. <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=74&h=38&obor=1>

Příloha A

Obsah příloženého CD

1) Textová část

- Bakalářská práce ve formátu PDF `bp_novakp23.pdf`
- Prohlášení `prohlaseni.jpg`

2) Knihovna pro všeobecné užití

- Knihovna `Bldcdb3` `bldcdb3.mdl`
- Inicializační skript knihovny `bldinit.m`

3) Model typového objektu

- Model objektu (varianta ventilace č. 1) `objekt1.mdl`
- Inicializační skript modelu objektu (varianta č. 1) `obj1initreg.m`
- Inicializační skript modelu objektu (varianta č. 1) `obj1initstep.m`
- Model objektu (varianta ventilace č. 2) `objekt2.mdl`
- Inicializační skript modelu objektu (varianta č. 2) `obj2initreg.m`
- Inicializační skript modelu objektu (varianta č. 2) `obj2initstep.m`

4) Pomocné MATLAB skripty

- Skript s nápovědou `help.m`
- Skript pro identifikaci systému `bldident.m`
- Skript pro zjištění aproximačního přenosu `bldstep.m`
- Skript pro normalizaci naměřených dat `bldnorm.m`
- Skript pro uložení naměřených charakteristik `bldsave.m`
- Skript pro načtení naměřených charakteristik `bldload.m`
- Skript pro vykreslení charakteristik do grafů `bldexport.m`
- Skript pro vizuální porovnání charakteristik `bldcmp.m`