ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra řídicí techniky

Vytápění v inteligentních domech, modelování, analýza a řízení s PLC

Diplomová práce

Praha, 2011 Bc. Radek Pupák

Vedoucí práce: Ing. Martin Hlinovský, Ph. D.

Prohlášení

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

V Praze, dne 10. 5. 2011 podpis Pavel Radek

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Hlinovskému, Ph. D. za vedení diplomové práce a také za zapůjčení sestavy Tecomat Foxtrot.

Společnosti Teco a. s. za dodání PLC a jednotek sběrnice CIB za zvýhodněnou cenu, jejím zaměstnancům - zejména Ing. Ladislavu Šmejkalovi, CSc. za konzultace a rady související s tématem inteligentních domů, Ing. Luboši Urbanovi za technickou podporu při ladění problémů s PLC.

Rovněž bych chtěl poděkovat rodině za podporu po celou dobu mého studia a tvorbu potřebného zázemí. Děkuji také přítelkyni za její velkou trpělivost při psaní diplomové práce a její podporu.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Radek Pupák**

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

Název tématu: **Vytápění v inteligentních domech, modelování, analýza a řízení s PLC**

Pokyny pro vypracování:

1. S využitím PLC Tecomat a prvků sběrnice CIB pro inteligentní instalaci proveďte systematické a dlouhodobé měření průběhu teplot v různých místech vytápěného prostoru, výsledky názorně zobrazte.
2. Navrhněte typové řešení systému pro rutinní měření teplot v inteligentních domech a navrhněte názorné zobrazování výsledků.
3. Analyzujte výsledky měření, navrhněte zjednodušený model vytápěného prostoru a realizujte v systému Matlab/Simulink a porovnejte s realitou.
4. Navrhněte algoritmus pro orientační výpočet energie spotřebované na vytápění a pro stanovení aktuálního tepelného výkonu, realizujte programem PLC a navrhněte názornou prezentaci pro uživatele.
5. Navrhněte jednoduchý algoritmus regulace topidel, který respektuje zjištěné skutečnosti, zejména nesymetrii tepelné soustavy, ověřte na modelu s systému Matlab/Simulink.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Martin Hlinovský, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2011/2012

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 8. 11. 2010

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na sběr a vyhodnocení údajů týkající se vytápění domu. Ke sběru dat byl použit programovatelný automat Tecomat Foxtrot s teplotními senzory připojenými prostřednictvím jednotek Inels na CIB sběrnici firmy Teco a. s. V první části je popisován sběr údajů z monitorovaných místností. Druhá část se zabývá realizací nových měřených lokalit tak, aby lokality bylo možné připojovat uživatelsky jednoduše a naměřená data prezentovat uživateli. Ve třetí části jsou data analyzována a jsou aproximovány modely vytápěných prostor. Čtvrtá kapitola se zabývá měřením předaného tepla do místností. Závěrečná část na získaném modelu demonstruje algoritmus pro řízení topidel.

Abstract

This diploma thesis deals with collecting data from heating the house. The PLC Tecomat Foxtrot with temperature sensors on Inels hardware units was used as a tool to measure the data. The CIB bus designed by Teco a.s. was used as a field bus. The first part describes data capturing from monitored rooms. The second part deals with the realization of new measured locations, so they can be easily attached by the user and the measured data can be presented to them. The third part is about analysing the measured data and approximating the models of the heating areas. The fourth chapter describes the measurements of the heat transferred into rooms. The final section demonstrates algorithm of heat sources controlling on the captured model.

Obsah

1 Úvod **8**
1.1 Důvody pro monitorování a analýzu vytápění v domech 8
1.2 Trendy v oblasti vytápění budov 9
1.3 Jak funguje praxe 11
1.4 V čem by měla práce pomoci 12

2 Měření a sběr dat **13**
2.1 Návrh počtu a rozmístění senzorů 13
2.1.1 Tepelné zdroje a tepelné ztráty 13
2.1.2 Tepelná pohoda člověka 14
2.1.3 Umístění senzorů 16
2.1.4 Použitý hardware 17
2.2 Popis sběru dat 23
2.2.1 Nastavení jednotky ve vývojovém prostředí Mosaic 23
2.2.2 Ukládání dat na SD kartu 26
2.2.3 Odesílání naměřených hodnot na vzdálený server 27
2.3 Ukládání dat 29
2.4 Ukázka naměřených dat 33
2.4.1 Data z rodinného domu 34
2.4.2 Data z místnosti na koleji 34
2.4.3 Data z místnosti přízemního bytu 36

3 Návrh typového řešení pro rutinní měření **38**
3.1 Umístění senzorů v realizovaných instalacích 38
3.1.1 Rozmístění senzorů v rodinném domě 38
3.1.2 Rozmístění senzorů v místnosti na koleji 40
3.1.3 Rozmístění senzorů v jedné místnosti bytu 41
3.2 Program pro prezentaci naměřených dat 41
3.2.1 Schéma relační databáze 42
3.3 Prezentace naměřených dat uživateli 44
3.3.1 Vizualizace měřeného prostoru pomocí programu Google SketchUp 44
3.3.2 Prezentace měřených dat pomocí webového serveru PLC . 44
3.3.3 Prezentace aktuálních dat na centrálním webovém serveru 46
3.3.4 Prezentace historických dat na centrálním webovém serveru 48

4 Analýza naměřených dat **51**
4.1 Přenosová funkce teplotních čidel 51
4.1.1 Chování teplotního čidla TC 51
4.1.2 Chování teplotního čidla TZ 51
4.2 Model vytápěného prostoru 53
4.2.1 Místnost na koleji 54
4.2.2 Místnost v bytě 59
4.2.3 Rodinný dům 64

5 Odhad spotřebované energie a tepelného výkonu **68**
5.1 Fyzikální jednotky teploty a tepla 68
5.1.1 Teplo a kalorimetrická rovnice 68
5.1.2 Přenos tepla 68
5.2 Vztahy pro výpočet dodané tepelné energie 69
5.2.1 Elektrické lokální vytápění 69
5.2.2 Plynové lokální vytápění 70
5.2.3 Lokální vytápění na tuhá či kapalná paliva 70
5.2.4 Centrální vytápění s teplovodním rozvodem 70
5.2.5 Jiný druh vytápění 71
5.3 Algoritmus pro odhad spotřeby místnosti 73
5.4 Prezentace naměřených dat uživateli 73
5.4.1 Výpis údajů ve vestavěném webovém serveru PLC 73
5.4.2 Vykreslení dat na vzdáleném veřejně přístupném serveru . 73

6 Regulace vytápění v měřeném prostoru **76**
6.1 Prvky sloužící k regulaci vytápění 76
6.1.1 Centrální vytápění s vlastním kotlem 76
6.1.2 Regulace teploty v jednotlivých místnostech 77
6.2 Algoritmus pro regulaci topidel 78
6.2.1 Nesymetrie tepelné soustavy 78
6.2.2 Regulace tepelné soustavy 78
6.2.3 Dvoupolohová regulace 79
6.2.4 Simulace regulace tepelné soustavy 79
6.2.5 Přidaná hodnota pro regulaci v inteligentním domě 80
6.3 Datová komunikace serveru s PLC 80

7 Závěr **83**

8 Přílohy **84**
8.1 Zdrojový kód funkčního bloku PLC pro odhad dodaného tepla . 84
8.2 Obsah přiloženého CD 84

9 Seznam literatury **85**

1 Úvod

V dnešní moderní době je sousloví inteligentní dům velmi často používaný pojem, který však není zcela jednoznačně definován. Nejčastěji se o inteligentním domu hovoří ve významu, kdy je dům schopen prostřednictvím senzorů a vstupních čidel zpracovávat informace o své činnosti, využívat je ke svému řízení a dávat uživateli náhled na fungování a provoz objektu. Většina inteligentních systémů v budovách je instalována z ekonomicko-ekologických důvodů, či za účelem zvýšení komfortu osob využívajících objekt.

V práci se zaměřuji právě na oblast vytápění. Hlavním důvodem je, že vytápění společně s ohřevem teplé užitkové vody je v současné době nejvýznamnější položkou provozních nákladů každého objektu. Pokud se podíváme na vydání domácností podle Českého statistického úřadu [2], zjistíme, že za „Bydlení, vodu, energie a paliva" vydá „průměrná osoba" za rok 24 623 Kč. V tabulce 1 je podrobněji uvedena struktura těchto výdajů. S náklady za vytápění souvisí položky „Elektrická energie", „Plynná paliva - plyn ze sítě", „Kapalná paliva", „Tuhá paliva" a „Teplo a teplá voda". Bohužel nejsou tyto položky statisticky blíže určeny. Z tohoto důvodu není možné zjistit jaká část např. elektrické energie je používána k vytápění, ohřevu teplé vody a jaké jsou výdaje na provoz ostatních spotřebičů. Součet všech jmenovaných položek je 13 797 Kč za rok na osobu. Můžeme tedy odhadovat, že více než 1/3 z celkových 24,6 tisíc, které jsou vydány na bydlení, je za vytápění bytů a domů.

Tabulka 1: Výdaje českých domácností za bydlení, vodu, energie a paliva

položka	výdaje na osobu za rok [Kč]
Nájemné z bytu	5660
Běžná údržba a drobné opravy bytu	2692
Vodné a stočné	1578
Sběr pevných odpadů	453
Další služby související s bydlením	395
Elektrická energie	5899
Plynná paliva - plyn ze sítě	4175
Plynná paliva - plyn v bombách	47
Kapalná paliva	5
Tuhá paliva	655
Teplo a teplá voda	3063

Podle mého názoru je ve správné regulaci ukryta možnost velkou část těchto nákladů ušetřit. Tohoto cíle je možné dosáhnout pouze systematickým procesem, kdy je nejprve nutné pozorováním a sběrem dat dospět k modelu chování tepla v jednotlivých místnostech, dále stanovit tepelné požadavky pro jednotlivé prostory a v závěru navrhnout jednotlivá zlepšení. Jádro práce je zaměřeno na sběr dat a jejich analýzu. Regulace je pak náplní poslední kapitoly.

1.1 Důvody pro monitorování a analýzu vytápění v domech

Při projektování a stavbě běžné obytné budovy jsou do projektu zahrnuty technologie, které jsou v dané době na trhu dostupné a zároveň ekonomicky přija-

telné. A to jak stavební - materiál zdí, zateplení objektu, stavební výplně (okna, dveře), tak technologické (větrání, vytápění, klimatizace). V době výstavby tedy budova odpovídá všem normám a standardům a její projekt je kompromisem mezi pořizovací cenou a provozními náklady. Postupem času však dochází ke změnám, které v původním projektu nebyly a ani nemohly být zahrnuty. Tyto změny jsou jednak v rámci stavby - změna účelu jednotlivých místností, úpravy stavebních příček, zastarávání či výměny stavebních výplní, zateplování obvodových zdí, a dále se odehrávají také změny v rámci globálních měřítek - změna životního stylu, jiné požadavky na luxus bydlení nebo úpravy ceny paliv na světových trzích.

Každá tato změna ovlivňuje projektovaný stav budovy a ovlivňuje tak její provozní náklady. Jak již bylo řečeno, náklady na vytápění jsou jednou z nejvyšších výdajových položek na provoz budovy. Změna je navrhována a aplikována z důvodů jejích pozitivních projevů, např. výměna kotle na tuhá paliva za tepelné čerpadlo z důvodů jednodušší obsluhy a nižších nákladů na získání a zpracování paliva. Změna je však často spojena i s negativními jevy např. snížení maximální teploty otopné vody a tím zhoršení předávání tepla z původně správně navržených otopných těles v jednotlivých místnostech.

Práce by měla být návodem, jak v domě zavést kontinuální monitorování stavu jednotlivých prostor a tím pomoci odhalit jednotlivé anomálie, k nimž od doby projektování stavby došlo a zajistit tak optimální využití energie. Další užitnou hodnotou je získání přehledu o fungování budovy a tím navržení dalších vhodných úsporných opatření. Například intenzivní krátké větrání, během kterého se omezí přísun či únik tepla z místnosti, snížení požadované teploty v místnostech v době, kdy nejsou využívány. Získaná data také umožní zpětné vyhodnocení a ověření správnosti některých cílených změn - např. zateplení budovy za účelem snížení nákladů na vytápění. Díky dostupným údajům lze porovnat chování objektu v topných sezónách předcházejících a následujících stavební úpravě, tím tuto změnu správně posoudit a vyhodnotit její případnou aplikaci na další části objektu.

1.2 Trendy v oblasti vytápění budov

V současné době můžeme rozdělit vytápění na 1) lokální, které generuje teplo přímo na místě, kde je použito k ohřevu a na 2) centrální, kde je teplo rozváděno z centrálního kotle, který je umístěn zpravidla v jiném prostoru, než je teplo spotřebováváno. Dalším možným kritériem je spotřebovávané palivo.

Cenu paliv v současné době zachycuje tabulka 2. Přehled byl získán z internetu vyhledáním daného typu paliva. Jedná se o cenu přepočtenou na $1MWh$, podle údajů udávaných v cenících (v některých případech přepočet ceny na 1 kg paliva a poté přepočet na MWh podle udávané výhřevnosti daného paliva). Cenový přehled pouze je orientační, proto zde neuvádím zdroje a uvádím rozpětí cen, tzn. podle nejlevnějšího i nejdražšího dodavatele. Ceny se mohou lišit podle lokálních podmínek dodavatele. Nezahrnují náklady na dovoz a skladování. Přehled dále nijak nezohledňuje roční odběr a s ním související pravidelné poplatky, které se účtují u zemního plynu a elektrické energie.

Tabulka 2: Orientační ceny paliv k dubnu 2011

palivo	cena za energii [Kč/MWh]
zemní plyn	900-1870
elektrická energie - nízký tarif	1790-2080
elektrická energie - vysoký tarif	2800-5410
propan	1390
propan-butan	1630
lehký topný olej	1550
pevná paliva - uhlí hnědé	300-570
pevná paliva - uhlí černé	310-800
pevná paliva - dřevní štěpka	350-850
pevná paliva - pelety	730-1260
pevná paliva - krbové dříví	460-2160
pevná paliva - brikety z biomasy	740-1100
centrální vytápění	1650-2390

Nejčastěji jsou používány tyto způsoby vytápění:

1. Lokální topidla
   (a) elektrická energie
   - přímotop, infra-panel, podlahové či stropní vytápění, rekuperační jednotka
   (b) plyn
   - lokální plynové topidlo (WAV-ky), plynový krb
   (c) tuhá paliva
   - krbová kamna, kamna na tuhá paliva
   (d) kapalná paliva
   - lokální krb na palivo lihového typu
2. Centrální vytápění
   (a) elektrická energie
   - elektrický akumulační kotel, tepelné čerpadlo, centrální rekuperační jednotka
   (b) plyn
   - plynový kotel, kondenzační plynový kotel
   (c) tuhá paliva
   - kotel na tuhá paliva (různé druhy podle typu použitého tuhého paliva)
   (d) kapalná paliva
   - kotel na lehké topné oleje
   (e) vytápění z centrálních výtopen, zbytkovým teplem z elektráren
   (f) solární
   - solární ohřev otopné vody, pasivní solární vytápění

Tabulka 3: Vytápění bytových objektů dle druhu vytápění

druh vytápění	domácností v ČR [%]
dálkové ústřední	42,0
vlastní ústřední/etážové v rod. domě	41,5
etážové, plynové, elektrické v bytě	13,8
kombinované, jiný způsob	2,7

1.3 Jak funguje praxe

V praxi je vytápění objektu navrhováno podle dostupných inženýrských sítí a dispozic samotného objektu.

V České republice uvádím zastoupení jednotlivých typů vytápění podle ČSÚ [2] v tabulce 3. Jak je z tabulky patrné, do největšího počtu domácností je dodávána energie z dálkového ústředního vytápění. S rozdílem 0,5% následuje z hlediska četnosti použití vlastní ústřední vytápění.

Účtování dálkového vytápění je v České republice upraveno legislativou a to vyhláškou č. 372/2001 Sb. V praxi dochází většinou k poměrovému rozúčtování tepla spotřebovaného na patě domu. Legislativně jsou upraveny koeficienty, které mají zvýhodnit energeticky náročnější místnosti, které se nacházejí např. na rohu domu. Poměrové rozúčtování se provádí podle započitatelné podlahové plochy bytu (tzv. základní složka 40% rozúčtovávaných nákladů). Další složkou rozúčtování je tzv. spotřební složka, která se určuje podle náměrů poměrových měřidel se zahrnutím korekcí a výpočtových metod, které zohledňují rozdílnou energetickou náročnost vytápěných místností danou jejich polohou.

VIPA měřiče tepla [3] jsou jednou z používaných variant náměrů pro poměrové vyhodnocení spotřeby. Na zpětnou trubku otopného tělesa je namontováno čidlo, které dlouhodobě snímá teplotu vratné vody otopného tělesa. Funguje na optickém principu, kdy vlivem teploty dochází k postupnému zesvětlování měřícího prvku. U toho je poté elektronicky vyhodnocena změna průhlednosti a tím je dosažen odhad teploty.

Podle mého názoru tato technologie měření přestává být „spravedlivá" v okamžiku, kdy přestanou být všechny byty stejné. Například v situaci, ke které v nedávné minulosti došlo při odprodeji velké části bytů z vlastnictví města soukromým vlastníků - vlastníci se totiž snaží svá obydlí zateplovat a zabraňovat ztrátám tepla. S poměrovým rozúčtováním ale dochází k velmi paradoxní situaci, kdy majitel dobře zatepleného bytu dosahuje vyšších teplot v místnostech a to i při nižších nárocích na odebírané teplo. Tím je majitel bytu vlastně za úsporu tepelné energie „penalizován" vyšší vyúčtovanou částkou a jeho investice do zateplení bytu má kontraproduktivní účinek.

Rozúčtování poměrovým měřením podle platné legislativy je v jistém smyslu velmi sociální, protože náklady na energeticky náročnější části budovy rozúčtovává mezi všechny jednotky. Zda je tato metoda správná je otázkou. Rozhodně mohu říci, že jednotlivé obyvatele bytových jednotek příliš nemotivuje k individuálním změnám v rámci vlastního bytu. Spíše je nutné všechna úsporná opatření provádět jako sdružení vlastníků na celé budově. Tím se také jednotlivá opatření mírně zlevní a zvýší se jejich efektivita, ovšem za cenu déletrvající dohody a akumulace peněžních prostředků.

Poměrové měření se využívá pro své nízké pořizovací náklady a jednoduchý

roční odečet průměrné teploty vratné vody otopného tělesa.

1.4 V čem by měla práce pomoci

Práce by měla sloužit k zamyšlení pro developery a majitele domů, naznačení možností monitorování vytápění v domě a dále představit řešení, které kromě monitorování energetické spotřeby umožňuje také zvýšení komfortu v obývaných objektech. Práce také nastiňuje možnosti webového rozhraní pro monitorování historických dat z prostředí internetu. Výhodou takového řešení je založení aplikace na volně dostupných programech jako je Linux, Apache web server, MySQL databáze a jazyk PHP. Protože je práce zaměřena na vytápění v malých objektech, jednotlivých bytech či rodinných domech, naprosto opomíjí řešení používané v průmyslu založené na SCADA/HMI systémech a OPC serverech. Je to z důvodu jejich nákladnosti pro drobného koncového uživatele a také systémem jejich licencování, kdy se vizualizační programy licencují podle počtu datových bodů. Tento koncept je z hlediska modelu inteligentního domu naprosto nevhodný, jelikož klade nepřiměřené nároky na znalosti koncového uživatele (musí znát předem počet datových bodů, licenční podmínky pro jednotlivé klienty, problémy při výměně domácího počítače ...). Proto je navrženo uchovávání dat na vzdáleném webovém serveru, kterým jednak obchází problematiku docházejících veřejných IPv4 adres a s tím související NATování provozu v sítích, a také nabízí řešení založené na open source technologiích zdarma a s minimálními nároky na hardware, který může být vyřešen i formou webového hostingu.

2 Měření a sběr dat

2.1 Návrh počtu a rozmístění senzorů

2.1.1 Tepelné zdroje a tepelné ztráty

Při měření spotřeby tepla je nejprve třeba se zamyslet nad koloběhem tepla v domě/místnosti. Můžeme předpokládat, že v prostoru platí zákon zachování tepelné energie, která se při běžných teplotách 15-25 °C nepřeměňuje do jiných forem. V běžném obydlí je zdrojem tepla zpravidla etážové vytápění (kotel na tuhá paliva, plyn, elektrický kotel či tepelné čerpadlo), nebo v případě vytápění po místnostech jsou zde lokální elektrická či plynová topidla. Tepelná energie od zdroje tepla Q_V je předávána vzduchu v místnosti, obvodovým zdem, předmětům a osobám v místnosti. Podle druhu vytápění se může měnit forma předávání tepla. U běžných topidel je běžné předávání tepla konvekcí a sáláním, ohřátý vzduch poté prouděním předává teplo do celé místnosti.

Dalšími zdroji tepla jsou tepelné ztráty elektrických a plynových spotřebičů. Zejména v kuchyni je při vaření znatelné oteplení prostoru - ztráty sporáku, rychlovarné konvice ... V běžných místnostech pak teplo generují zejména spotřebiče s nízkou účinností jako jsou počítače, televize, spínané zdroje malých spotřebičů. Tyto přírůstky tepla získané provozem spotřebičů označíme Q_s.

Dalším významným zdrojem tepla je člověk. Každý člověk během své činnosti či odpočinku generuje tepelnou energii. Tato energie je vytvářena chemickými procesy během látkové výměny organismu. Množství generovaného tepla je jednak závislé na vykonávané činnosti a jednak také na povrchu těla osoby. V tabulce 4 podle [1] jsou uvedené množství měřeného tepla na $1m^2$, které je generováno lidským metabolismem. Generované teplo člověkem Q_c je jednou ze složek přispívající k teplu v místnosti Q_m.

Tepelná energie však z místnosti také uniká. Energie se ztrácí prostupem zdmi do chladnějšího exteriéru Q_e. V letních měsících, mimo topnou sezónu, je tok energie opačný. Pro naše účely se zabýváme obdobím, kdy se místnosti vytápí, proto je směr toku energie Q_e z teplejší místnosti do chladnějšího vnějšího prostředí.

Dalším procesem, při kterém dochází ke ztrátám tepelné energie je větrání. Tento proces je v obydlených prostorech nezbytný, jelikož tělo při látkové výměně spotřebovává ze vzduchu kyslík a produkuje oxid uhličitý a zvyšuje absolutní vlhkost v místnosti. Pokud se větrá otevřeným oknem dochází k tomu, že při výměně vzduchu v místnosti, která je cílem procesu větrání, se vymění zahřátý teplý vzduch za vzduch, který má teplotu venkovního prostředí. Tepelnou

Tabulka 4: Měrný metabolismus q_mpři různých činnostech

činnost	generované teplo $[W/m^2]$
spánek	46
klidné sezení	58
uvolněné stání	70
umývání, oblékání	93
vaření	93 až 116
domácí úklid	116 až 209

ztrátu způsobenou větráním označíme jako Q_r. Pokud v objektu nejsou přítomny osoby, tak k cílenému větrání nedochází a ztráta způsobená infiltrací je při srovnání s cíleným větráním zanedbatelná. Potřebu větrání a tepelné ztráty při něm lze významně omezit použitím rekuperační jednotky, která zajišťuje nucenou výměnu vzduchu pomocí ventilátoru a svou speciální konstrukcí umožňuje tepelnou výměnu mezi odcházejícím a přicházejícím vzduchem. Dochází tudíž k předehřátí přicházejícího vzduchu energií odcházejícího a tepelné ztráty se tak významně omezují.

Pro teplo v místnosti Q_m tedy platí:

$Q_m = Q_V + Q_s + Q_c - Q_e - Q_r$

pokud je dosažena ideální teplota v místnosti (je splněna tepelná pohoda přítomných osob) je vhodné zajistit, aby teplo Q_m bylo konstantní, musí tedy platit, že v průběhu času nedochází ke změnám tepla v místnosti

$\frac{dQ_m}{dt} = 0$

rovnici tedy můžeme upravit do podoby

$0 = \frac{d(Q_V+Q_S+Q_c-Q_e-Q_r)}{dt}$

pro ustálený stav tedy platí, že musí být tepelné zisky místnosti rovny jejím tepelným ztrátám.

$Q_V + Q_S + Q_c = Q_e + Q_r$

2.1.2 Tepelná pohoda člověka

Hlavním důvodem vytápění obytných prostor je vytvoření vhodných podmínek pro přítomné osoby, proto se nyní krátce budeme zabývat tepelnou pohodou člověka. Jak již bylo zmíněno výše, metabolismus člověka při své činnosti produkuje teplo, které musí být pro dosažení tepelné pohody odváděné do okolí. Tělo je ale schopno ochlazování povrchu regulovat. Při zhoršeném přenosu tepla dochází nejprve k suchému pocení, kdy dochází k odpařování potu z povrchu těla, které není vizuálně patrné. Při dalším zvyšování okolní teploty a zhoršování přenosu tepla z těla dochází k mokrému pocení, při kterém jsou již na kůži patrné viditelné kapičky potu. Pokud dochází pouze k suchému pocení, pak je splněna i druhá podmínka tepelné pohody. Pro tepelnou rovnováhu člověka podle literatury [1] platí rovnice:

$Q_{met} = Q_{kond} + Q_{konv} + Q_{rad} + Q_{vyp} + Q_{vz}\ [W]$

kde:

$Q_{met}[W]$ ... je produkce tepla celkového tělesného metabolismu

$Q_{kond}[W]$ ... tepelný výkon odváděný vedením tepla (kondukcí)

$Q_{konv}[W]$ ... tepelný výkon odváděný prouděním (konvekcí)

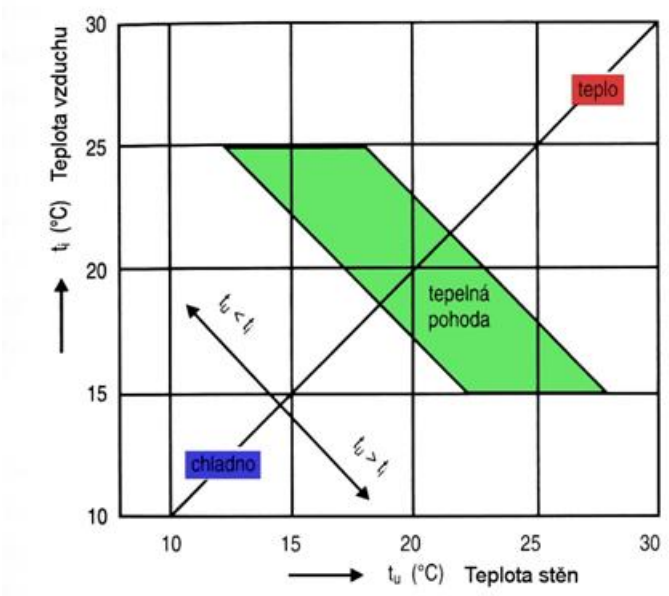
$Q_{rad}[W]$ ... tepelný výkon odváděný sáláním (radiací)

$Q_{vyp}[W]$ ... tepelný výkon odváděný vypařováním - latentní

$Q_{vz}[W]$ ... tepelný výkon odváděný ve vydechovaném vzduchu

Pro zjednodušení se používá pojem výsledná teplota - to je teplota, které dosáhne těleso bez vlastního zdroje tepla v místě, kde se zjišťuje tepelný účinek prostředí na těleso. Tato teplota, kromě teploty vzduchu v místnosti, zahrnuje také teplo, které se do tělesa předává radiací ze stěn a předmětů v místnosti.

Experimentální zjištění tepelné pohody člověka pro výslednou teplotu 18,5 až 21,5 °C provedli Nielsen a Pedersen (viz obrázek č. 1). Je patrný vztah mezi teplotou vzduchu v místnosti a teplotou stěn potřebný pro tepelnou pohodu člověka. Nebudeme zde problém více rozebírat. Důležité je si pouze uvědomit,



Obrázek 1: Tepelná pohoda člověka pro výslednou teplotu 18,5 až 21,5 stupně Celsia

že je třeba pro dosažení tepelné pohody lidí ve vytápěné místnosti uvažovat nejen teplotu vzduchu, ale také teplotu stěn a předmětů v místnosti.

Tzv. výpočtové teploty, tj. teploty, které jsou optimální při provozu místnosti určuje norma ČSN 060210, která také obsahuje doporučenou relativní vlhkost vzduchu v dané místnosti. Výtah je uveden v tabulce č. 5. Tyto teploty jsou pouze doporučené. Tepelná pohoda je velmi individuální záležitostí každého jedince, proto je nutné nechat uživateli možnost si teplotu v místnosti přizpůsobit podle své aktuální potřeby.

Tabulka 5: Výpočtová vnitřní teplota dle ČSN 060210

Druh vytápěné místnosti v trvale užívané obytné budově	Výpočtová vnitřní teplota [stupeň Celsia]	Relativní vlhkost vzduchu [%]
obývací pokoje, ložnice, jídelny, pracovny, dětské pokoje	20	60
kuchyně	20	60
koupelny	24	90
klozety	15	60
vedlejší vytápěné místnosti (předsíň, chodby, ...)	15	60
vytápěná schodiště	10	60

2.1.3 Umístění senzorů

Senzory je vhodné umístit tak, abychom získali přehled o veličinách důležitých jak pro tepelnou pohodu lidí, tak pro stanovení odhadu tepla do místnosti dodaného a z místnosti unikajícího.

Pro určení teplot důležitých pro vnímání člověka se jedná o dvě teplotní čidla v každé místnosti a to čidlo teploty vzduchu poblíž místa, kde se nejvíce očekává přítomnost člověka a dále na stěně, či v instalační krabici u povrchu stěny. Těmito čidly získáme přehled o teplotě vzduchu v místnosti, následně i o povrchové teplotě stěn v místnosti. Čidlo teploty povrchu stěny je vhodné umístit na druh stěny, která v místnosti převažuje. U běžných místností tedy na stěnu, která je vnitřní stěnou sousedící s jinou vytápěnou místností. Z hlediska realizace je v inteligentním domě příležitost pro teplotu stěny použít čidlo teploty, které je vestavěno v jednotkách nástěnných ovladačů řady WSB2, která mohou zároveň sloužit pro ovládání osvětlení v dané místnosti a dalších spotřebičů. Čidlo teploty vzduchu je možné realizovat spínacím aktorem SA2-01B, a nebo podobným dle spotřebiče, který je v místnosti žádoucí ovládat s teplotním čidlem TC-X. Teplotní čidlo pro snímání teploty vzduchu by mělo být umístěné alespoň 5 cm od zdi, aby kolem čidla byl volný průchod vzduchu. Jelikož se jedná o čidlo, které by mělo sloužit také jako referenční při řízení teploty v místnosti, mělo by být ve výšce 0,8 až 1,5 m a umístěné tak, aby co nejvíce vystihovalo teplotu v prostoru, kde se nejvíce zdržují obyvatelé místnosti.

Pro monitorování tepla dodaného do místnosti je nutné čidla přizpůsobit konkrétnímu tepelnému zdroji:

- V případě lokálního elektrického topidla (přímotop, infra-panel, podlahové či stropní vytápění) je ideální vstupní veličinou binární vstup sepnutí topidla a znalost jeho tepelného výkonu. Potřebný je tedy jeden teplotní senzor a čidlo binárních vstupů. Pokud budeme topidlo také ovládat, můžeme s výhodou využít tepelné čidlo připojené k jednotce spínacího relé SA2. Čidlo binárních vstupů můžeme použít v místnosti společně i pro ostatní binární vstupy (například magnetické okenní spínače, pohybová čidla).

- Plynové lokální topidlo (WAV) funguje na principu průchodu vzduchu vyhřívaným tělem topidla. Průtok vzduchu je způsoben rozdílnou hustotou chladného a ohřátého vzduchu a vzduch většinou není nijak mechanicky urychlován. V případě, že je topidlo ovládáno termostatem, pak pro určení množství dodaného tepla postačuje znalost výkonu topidla a binárního výstupu termostatu. V případě, že je topidlo ovládané pouze mechanicky - jedná se většinou o analogový diferenciální regulátor, který výkon topidla reguluje na základě rozdílu požadované teploty a teploty vstupního vzduchu, odhad dodaného tepla u topidla tohoto typu je vcelku komplikovaný a velmi nepřesný. Jednou z možných variant umístění čidel pro odhad dodaného tepla je měření teploty vstupního vzduchu do topidla a teploty výstupního vzduchu z topidla. Měření je tedy možné realizovat pomocí dvou teplotních čidel. Pro určení získaného tepla je klíčovou hodnotou také znalost průtoku vzduchu. Tu však není technicky možné měřit a jediná možnost jejího získání je odhad na základě rozdílů vstupní a výstupní teploty vzduchu.

- U dalších typů lokálních topidel je vždy vhodné sledovat alespoň aktivitu tohoto topidla, i když není možné např. u plynového či lihového krbu určit jaký tepelný výkon do místnosti dodává, je vhodné jej alespoň empiricky odhadnout, např. na základě teploty v okolí tohoto tepelného zdroje.

- U centrálního etážového vytápění je potřebná znalost průtoku média topidlem a vstupní a výstupní teploty přenosového média. Jelikož přesné měření průtoku topidlem je často nedosažitelné, je možné průtok topidlem pouze odhadovat a to na základě znalosti sepnutého oběhového čerpadla a experimentálně odhadnutého průtoku daným topidlem. Vstupní a výstupní teplotu média bychom v ideálním případě měřili přímo v potrubí v jímce teplotního čidla. Pokud je však již etážové vytápění funkční, tak není nutné investovat do zabudování jímky teplotních čidel do soustavy, ale je možné měřit povrchovou teplotu přívodního a odchozího potrubí. Přičemž je vhodné čidla nalepit na potrubí v úseku, který můžeme poté tepelně zaizolovat. Do měřené soustavy si tím přidáme dynamiku způsobenou zpožděním přenosu teploty proudící kapaliny na povrch potrubí, ale v případě kovového potrubí není toto zpoždění tak výrazné a vzhledem k dlouhým časovým konstantám v dynamice čidel a otopné soustavy můžeme toto zpoždění zanedbat. S výhodou je možné jedno tepelné čidlo odečítat jednotkou aktoru pro ovládání termohlavice.

Pro odhad tepelné energie, která z místnosti uniká, slouží čidlo teploty v exteriéru. Ztrátové teplo je přímo úměrné ploše vnějších stěn a teplotnímu rozdílu vnitřní a vnější teploty. Pokud předpokládáme, že místnost má vzhledem ke své poloze tepelné zisky získané solárním zářením, je možné měřit dvě externí teploty a to teplotu ve stínu a teplotu osluněného místa. Externí teplotu je možné měřit pouze na jednom místě pro celý objekt.

K těmto základním senzorům je samozřejmě možné doplnit také další čidla, která budou sloužit pro zpřesnění informací o tepelných ztrátách a ziscích. Jako vhodné čidlo mohu doporučit magnetické čidlo otevření okna. V případě, že jsou okolní místnosti výrazně chladnější, lze rovněž doporučit magnetický kontakt k detekci otevření dveří. V případě nízko-energetické či pasivní stavby je významnou položkou určitě také detekce přítomnosti osob pomocí PIR čidla. Infračervené pohybové čidlo je také výhodnou investicí pro pokročilejší automatizaci inteligentního domu, kdy detekce přítomnosti osoby může sloužit jako pokyn pro osvícení místnosti, případně pro změnu topného režimu v místnosti s rychlým lokálním vytápěním. V neposlední řadě lze čidlo využít také na navazující funkce ostrahy domu.

2.1.4 Použitý hardware

Po průzkumu současné nabídky v oblasti automatizace a měřící techniky jsem se rozhodl pro sběr dat využít sběrnici CIB a hardware českých společností Teco a Elko. Konkrétně jsem zvolil malý modulární automat Tecomat Foxtrot CP-1004 a k němu kompatibilní moduly pro sběrnici CIB, které pocházejí ze spolupráce společností Teco a Elko a jsou prodávány pod obchodní značkou Inels.

Důvodem této volby je jednak univerzálnost použitého modulového řešení (v každém objektu je pouze jedna centrální jednotka Foxtrot) a pak jeho koncepce, kdy většina jednotek Inels má teplotní vstup. Toto řešení umožňuje začlenění monitorovacího systému do celkové koncepce inteligentního domu, kdy jeden systém může sloužit jak k ovládání a programování chodu spotřebičů v domě, tak také umožňuje sběr dat, která lze použít k analýze spotřeby tepla v domě. Další velmi podstatnou výhodou je široké spektrum jednotek - přes binární vstupy a výstupy, reléové vstupy, analogové výstupy až po vypínače a stmívače světel.

Tecomat Foxtrot

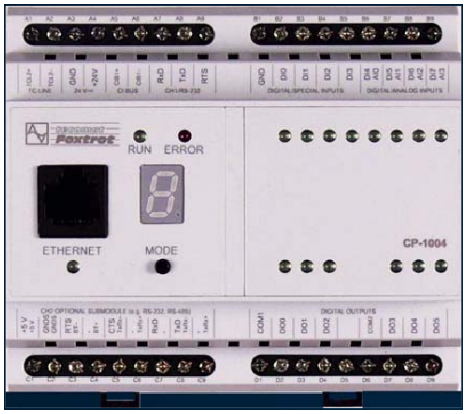
Tento programovatelný automat (dále jen PLC - Programmable Logic Controller) [5] je použitý jako centrální jednotka procesu sběru dat. Firma Teco a. s. nabízí mnoho verzí tohoto automatu, které se liší jak počtem vstupů a výstupů přímo v jednotce, tak také rozhraními, která lze využít pro připojení dalších systémů.

Pro aplikaci jsem vybral jednotku s označením CP-1004, která obsahuje 8 digitálních vstupů a 6 reléových výstupů (neobsahuje LCD displej). Pro aplikaci sběru dat je důležité univerzální komunikační rozhraní, kterým je Ethernet 10/100 Mb. Tím je zajištěna možnost komunikace přes internetovou síť a tedy spojení s datovým serverem uchovávajícím historii dat. Jednotka je založena na 32. bitovém procesoru architektury RISC s dobou cyklu 0,2 ms na tisíc instrukcí, pracujícím na frekvenci 166MHz. K uložení uživatelského programu slouží 256 kB paměti a 0,5 MB pro data programu tzv. DataBox a 64 kB pro programové proměnné. Dále je možné využít vnitřní 2 MB paměť k archivaci projektu programu, či systém rozšířit pomocí SD/MMC/SDHC karty.

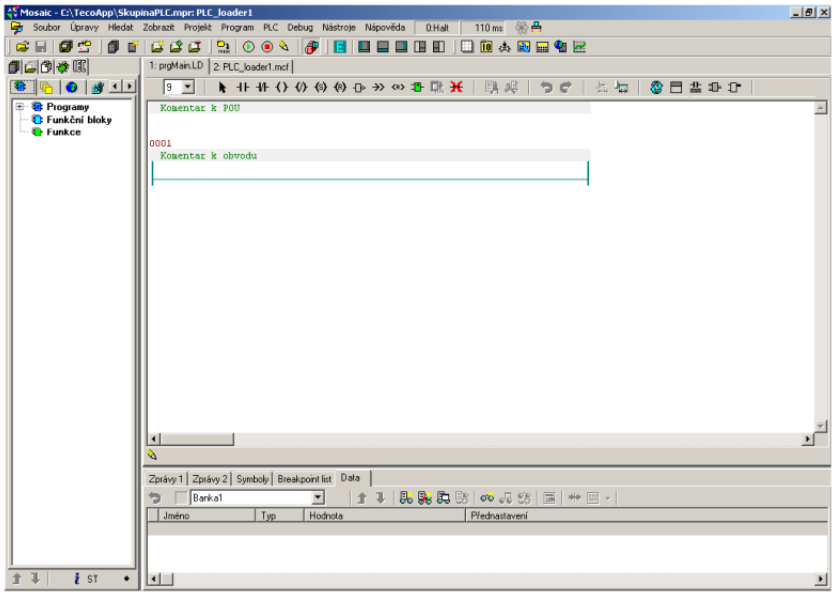
CP-1004 dále obsahuje sériové rozhraní RS-232 a pozici pro další volitelné interface (v současné nabídce jsou moduly dalších 7 číslicových vstupů, modul 4 vstupů a 3 digitálních výstupů nebo další komunikační submoduly - RS-422, RS-485, Profibus DP Slave, CAN, M-Bus či komunikační modul LON sběrnice).

Všechny jednotky Foxtrot jsou vybaveny dvěma firemními rozhraními. Prvním je TCL sběrnice, která umožňuje rozšíření až o 10 modulů s komunikační rychlostí (345 kbit/s). Jedná se tedy o rozhraní při použití PLC k řízení rychlých průmyslových procesů. Tímto způsobem je možné automat rozšířit o další komunikační moduly pro drátovou, optickou či bezdrátovou komunikaci (OpenTerm, MP-Bus, CIB, Fibre optic, RFox, M-Bus, GSM, GPRS), displeje a operátorské panely či rozšiřující vstupně výstupní moduly (digitální i analogové vstupy i výstupy). Druhou sběrnicí je sběrnice CIB, která je určena pro domovní instalace. Její rychlost je 19,2 kbit/s pro domovní instalace, kde je potřebná rychlost komunikace nižší, jelikož lidské vnímání je dostatečně pomalé.

K programování se používá prostředí MOSAIC, které umožňuje programování jednotek podle normy IEC61131-3 a to čtyřmi druhy jazyků. Automat je schopný režimu programování on-line, kdy je možné upravovat program v jednotce bez restartu PLC a tím bez výpadku technologie. Vývojové prostředí lze programovat v reléových schématech, funkčních blokových diagramech, strukturovaném textu a v případě dobré znalosti jednotky i v jejím instrukčním jazyku. Jazyky lze také kombinovat v jednotlivých funkcích výsledného programu. MOSAIC umožňuje tvorbu samotného programu, monitorování a ladění připojené jednotky.



Obrázek 2: Tecomat Foxtrot CP-1004



Obrázek 3: Vývojové prostředí pro programování jednotek Tecomat

Jak již bylo uvedeno, tak řešení s Foxtrotem rozhodně není jednoúčelové a jeho nasazení je prvním krokem proměny objektu v inteligentní budovu. Svou univerzálností je systém předurčen k využití ke komfortnímu a variabilnímu ovládání spotřebičů a to i vzhledem k jednoduché instalaci CIB sběrnice jedním kabelem, který zajišťuje datovou komunikaci i napájení jednotek. V neposlední řadě je v případě budoucího rozšíření technologie tzv. Smart Grids, kdy je plánována silnější vazba mezi výrobcem a spotřebitelem elektrické energie, možné použít již zavedený systém ovládání spotřebičů přes jednotku Foxtrot.

V porovnání s jinými řešeními je dalším argumentem také přijatelná cena centrální jednotky i jednotlivých modulů. V mém případě používám ke sběru dat dvě jednotky - jednu zapůjčenou z katedry řídící techniky, kterou jsem za období měření postupně sbíral data ze 3 lokalit [1] a druhou jednotku, kterou jsem zakoupil a po celou dobu měření je nainstalována v rodinném domě.

Jednotky sběrnice CIB

Při měření jsem používal několik typů jednotek, které obsahují kromě své standardní funkce také teplotní vstup. Jsou popsány níže podle [6], kde je možné najít podrobnější informace. Jsou vyráběny i další jednotky, které jsou specializované na spínání jednotlivých specializovaných spotřebičů (stmívací jednotky, výkonové moduly, roletové aktory, ovladač termohlavic) či další jednotky vstupů a výstupů (převodník analog-digital, digital-analog) nebo ovládací prvky pro komfortnější používání systému (jako jsou multifunkční ovládací jednotka SOPHY, pokojový termoregulátor, zabezpečovací klávesnice či čtečka čipových karet). Dále jsou uvedeny prvky, které byly použity při sběru dat.

Oddělovací modul BPS2-02M

Jedná se o modul, který slouží k připojení napájení 2 oddělených CIB sběrnic a zároveň je vybaven svorkami pro připojení záložních akumulátorů (obrázek č.4). Jednotka s označením BSP2-01 je jednodušší verzí bez možnosti připojení záložních akumulátorů a slouží k napájení jen jedné sběrnice CIB. Pro jednoduchost je uvedeno zapojení této jednotky na obrázku č.5. Jednotka pouze zajišťuje napájení sběrnice a není vybavena modulem pro výměnu dat, proto je pro centrální jednotku naprosto transparentní a v programovém prostředí nemá žádné vstupy ani výstupy.

Spínací aktor SA2-01B

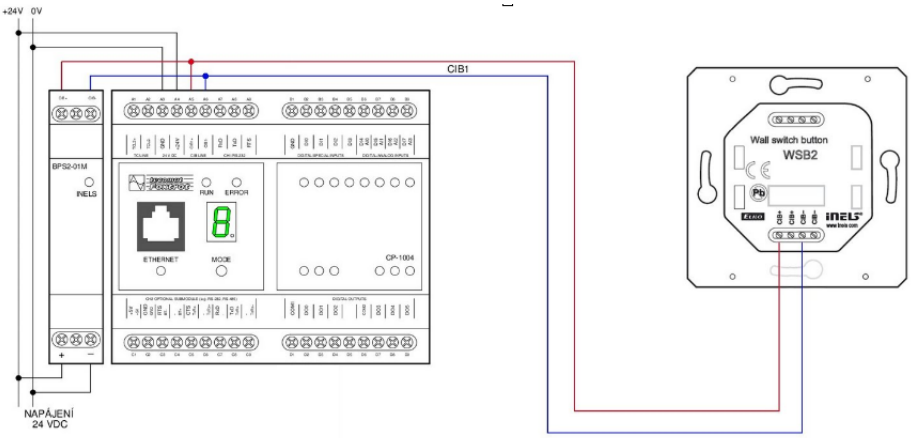
Je jednoduchým a účelným modulem (obrázek č. 6). Slouží totiž jako výstupní relé, kterým je možné ovládat různé spotřebiče. Je tedy vysoce univerzální jednotkou při použití v inteligentní elektroinstalaci. Může sloužit ke spínání osvětlení, elektrických topných těles, ohřívačů TUV, ventilace ... Také umožňuje připojení externího senzoru teploty. Pro základní jednotku je ovládané relé přístupné jako digitální výstup a čidlo teploty jako vstupní proměnná obsahující hodnotu naměřené teploty.

Jednotka binárních vstupů IM2-80B

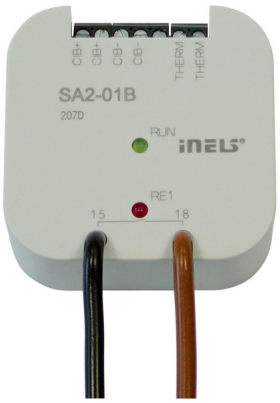
Slouží jako vstupní jednotka (obrázek č. 7) pro digitální signály z jiných systémů. V typickém případě ji lze použít k připojení stavových čidel např. pohybového čidla, detektoru tříštění skla, magnetického dveřního či okenního kontaktu, kouřového detektoru, analogového vypínače a jiných systémů s binárním výstupem. Jednotka má také svorky pro možnost připojená externí čidla

[1] Jedná se o kolej a 2 pronajaté byty, vzhledem k nedostatku kvalitních dat je v dokumentu prezentován pouze druhý byt.

Obrázek 4: Oddělovací modul BPS2-02M



Obrázek 5: Ukázka zapojení napájení sběrnice CIB přes oddělovací modul BPS2-01M



Obrázek 6: Jednokanálový spínací aktor SA2-01B

Obrázek 7: Jednotka osmi binárních vstupů IM2-80B

také z CIB sběrnice napájet a to prostřednictvím výstupního napětí 12 V, které je typickým napětím pro čidla v domovní instalaci. Naprosto kompatibilní je jednotka s drátovými detektory české firmy Jablotron. Je také navržena pro možnost připojení k třístavové - vyvážené smyčce, která se používá v detektorech zabezpečovací techniky k detekci sabotáže smyčky. Opět obsahuje vstup pro externí teplotní čidlo a je možné také získat moduly s označením IM2-40B, IM2-20B, které mají pouze 4 a 2 binární vstupy. Cenově se však jednotky velmi výrazně neliší, a proto kde to instalace umožňuje je vhodnější použít vícevstupovou jednotku pro více detektorů s binárním výstupem.

Systémové ovladače WSB2-40 (WSB2-80)

Jedná se o nástěnné ovladače pro instalaci do instalační krabice. Vzhledem připomínají klasické vypínače. Dokonce je možné je barevně přizpůsobit díky výměnným tlačítkům a rámečků ze dvou řad (Elegant a Logus obrázek č. 8). Ovladač obsahuje pro každou kolébku 2 krátkocestná tlačítka a dvoubarevnou LED diodu (červenou a zelenou). Podle typu tlačítka obsahuje ovladač jednu, dvě či čtyři kolébky (WSB2-20, WSB2-40, WSB2-80). Ve vývojovém prostředí se každé tlačítko chová jako vstupní proměnná a každá LED dioda jako výstupní proměnná. Lze je tedy v programu použít naprosto libovolně - lze rozlišovat krátký stisk, dlouhý stisk, poklikání - vše záleží na fantazii programátora a uživatele. Systémový ovladač obsahuje také čidlo teploty. Pro monitorování spotřeby energie v místnosti je tento ovladač vhodným čidlem pro monitorování teploty zdi v dané místnosti. Při instalaci v inteligentním domě se nabízí umístění ovladače do každé místnosti, např. z důvodu možnosti spínání osvětlení a jiných spotřebičů z dané místnosti.

Teplotní čidla TZ, TC

Externí teplotní čidla jsou dvojího typu s označením TC a TZ (obrázek č. 9). Liší se svým teplotním rozsahem a také provedením pouzdra čidla. Obě varianty snímají teplotu prostředí termistorem NTC 12K 5%. Čidla jsou v obou provedeních vyráběna v délkách 0/3/6/12, jejich označení odpovídá délce přívodního kabelu v metrech. Čidla déky nula (TC-0 a TZ-0) mají délku kabelu 10 cm a jsou určena k měření teploty přímo u svorkovnice jednotky.

Provedení TC je určeno pro měření interiérové teploty. Rozsah měřených teplot je od 0 do 70 °C. Materiálem teplotního pouzdra i přívodního kabelu je

Obrázek 8: Nástěnné ovladače WSB2

Obrázek 9: Teplotní čidla vlevo TC-0, v pravo TZ-3

PVC. NTC čidlo se na 95% teploty okolí ve vzduchu ohřeje za 306 s, na 65% za 92 s.

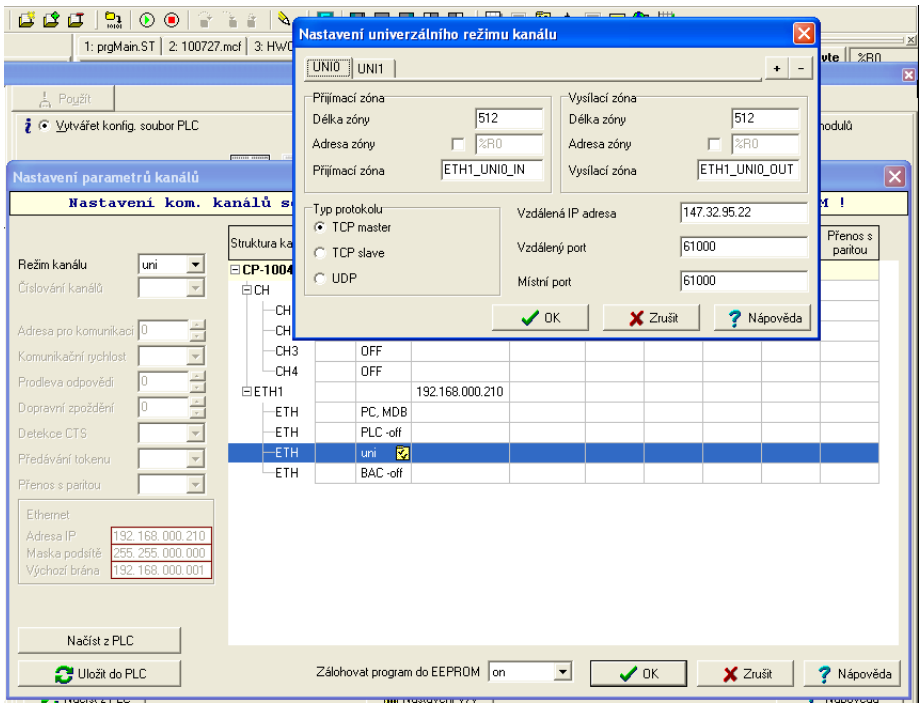
Provedení TZ je určeno svým rozsahem -40 až +125 stupňů Celsia pro měření exteriérových teplot a extrémních teplot např. v průmyslových procesech. Materiálem přívodního kabelu je silikon a konec obsahující termistor je obklopen poniklovanou mědí. Čas přechodu na 95% teploty okolí je 216 s, na 65% již za 62 s.

2.2 Popis sběru dat

2.2.1 Nastavení jednotky ve vývojovém prostředí Mosaic

Po fyzické instalaci hardwaru a jeho propojení CIB sběrnicí je nutné jednotku naprogramovat. K programování PLC od firmy Teco je určeno vývojové prostředí Mosaic. Při programování jsem vycházel z firemních materiálů firmy Teco k vývojovému prostředí Mosaic [7].

Po spuštění vývojového prostředí a založení nového projektu pro modulární automat FOXTROT je vhodné se připojit k automatu pomocí modulu Manažer projektu, který otevřeme z nabídek Zobrazit nebo Projekt. K automatu se můžeme připojit buď přes sériový port, nebo přes pohodlnější ethernetový port. Výchozí IP adresu automatu zjistíme jednoduše podržením tlačítka MODE na těle automatu. Pro úspěšnou komunikaci je důležité nastavit IP adresu počítače do stejného adresného rozsahu (výchozí maska sítě automatu je 255.255.255.0 - musíme tedy nastavit síť, která má první 3 čísla adresy shodná s PLC a poslední

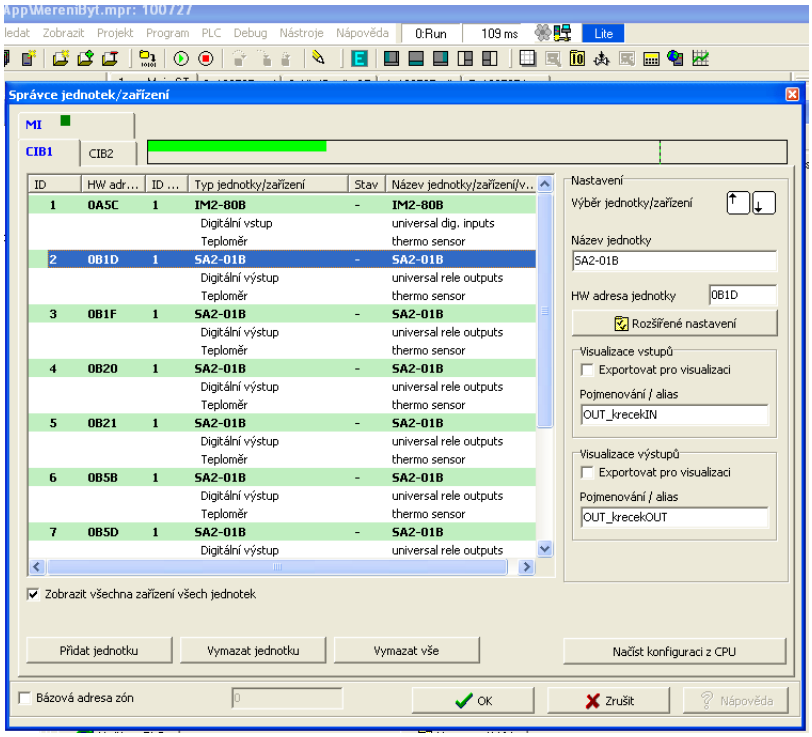


Obrázek 10: Nastavení univerzálního ethernetového rozhraní ve vývojovém prostředí MOSAIC

byte adresy zvolíme jiný). Po správném nastavení IP adresy počítače a propojení síťových rozhraní ethernetovým kabelem nastavíme v manažeru projektu IP adresu PLC a připojíme se k němu. Poté je vhodné na záložce Hw - Konfigurace HW změnit v nastavení CPU IP adresu jednotky tak, aby mohla být provozována v naší domácí síti a nastavit správně defaultní bránu. Ještě je možné si připravit komunikační rozhraní pro spojení se vzdáleným serverem pro ukládání dat. K tomu použijeme v tabulce ETH nastavení u kanálu v režimu „uni", kde nastavíme Typ protokolu jako „TCP master", vzdálenou adresu na IP serveru, na který budeme data ukládat a délku zóny pro přijímací i vysílací zónu shodně na 512. Nastavení je ukázáno na obrázku č 10.

Pokud disponujeme pouze demo verzí vývojového prostředí Mosaic je vhodné nepoužívané kanály vypnout, tím zvýšíme pravděpodobnost, že nám pro jednoduchou konfiguraci domovní instalace bude stačit pouze demo verze aplikace, která je omezená právě počtem použitých rozhraní. Pokud však plánujeme rozsáhlejší instalaci, tak se bez zakoupení hardwarového klíče, či naprogramování od odborníka, který plnou verzi Mosaicu vlastní, neobejdeme.

Po uložení nastavení do PLC a jeho restartování obnovíme nastavení sítě počítače původní nastavení funkční v domácí síti a můžeme se opět připojit k Foxtrotu, který již „naslouchá" na nové adrese. Vrátíme se do Manažera projektu a zde opět v záložce konfigurace HW otevřeme konfiguraci CIB sběrnice. Zde se nám po stisknutí tlačítka „Načíst z PLC" doplní jednotky, které byly při startu PLC připojené ke sběrnici (viz. obrázek č. 11). Pokud by se některá z jednotek nenačetla (zřejmě nějaká z novějších jednotek na Foxtrotu se starším



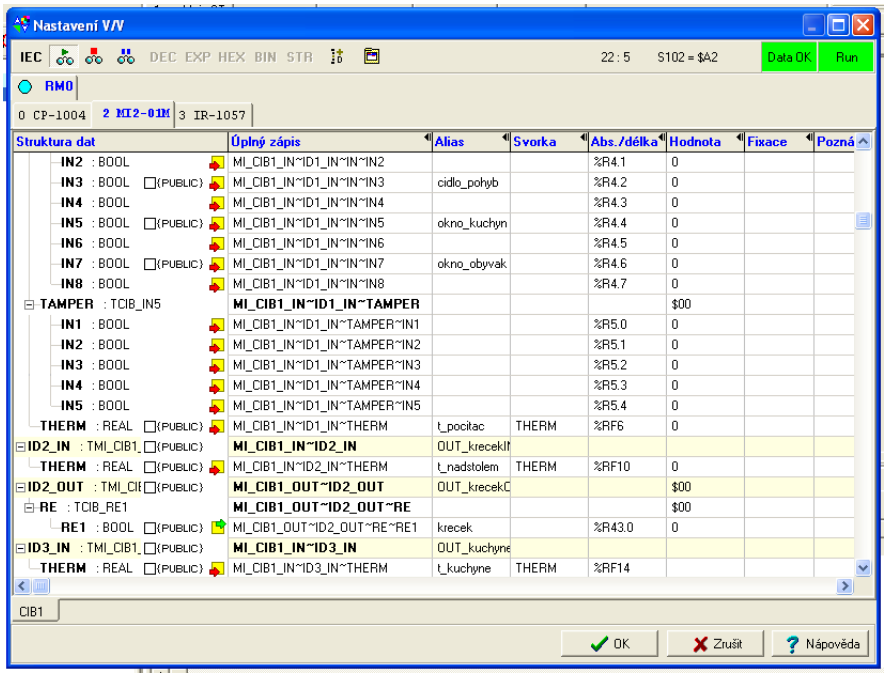
Obrázek 11: Správce jednotek CIB

firmwarem), je vhodné firmware aktualizovat, případně je možné při znalosti její HW adresy přidat jednotu ručně). Jednotky a její vstupy a výstupy je vhodné si „lidsky" pojmenovat. V případě jednotek vybavených externím čidlem teploty nesmíme zapomenout termosenzor aktivovat zatržením checkboxu „Používat zařízení".

Po uložení konfigurace je vhodné překompilovat program (Program - Přeložit vše) a nahrát kód do domovní jednotky (Program - Vyslat kód), aby se projevily dosud vykonané změny.

Nyní jsou jednotky pojmenované, ale pro správnou funkci nastavení je ještě třeba pojmenovat jednotlivé vstupní a výstupní proměnné. Za tímto účelem je ve vývojovém prostředí MOSAIC přítomné okno „nastavení Vstupů/Výstupů", které nalezneme na panelu nástrojů. Tento přehled vstupně/výstupních jednotek je velmi užitečný při ladění kódu programu. Je možné zde v reálném čase proměnné sledovat, ale také měnit jejich hodnotu či jejich hodnotu fixovat na hodnotu vhodnou pro odladění programu bez ohledu na skutečný stav fyzického vstupu. Při úvodním nastavení je důležitým sloupcem „Alias", který usnadňuje „lidský" zápis proměnné při programování automatu (obrázek č. 12). Je vhodné si hned při pojmenování vstupních a výstupních proměnných zaznamenat jejich alias do instalačního schématu.

Po přeložení kódu jsou již nově pojmenované proměnné dostupné při programování automatu. Pro odesílání dat na vzdálený server je použito několik knihoven, které nejsou v novém projektu ve výchozím nastavení vložené. Je tedy nutné je do projektu přidat. To je možné udělat v levém okně projektu pod zá-

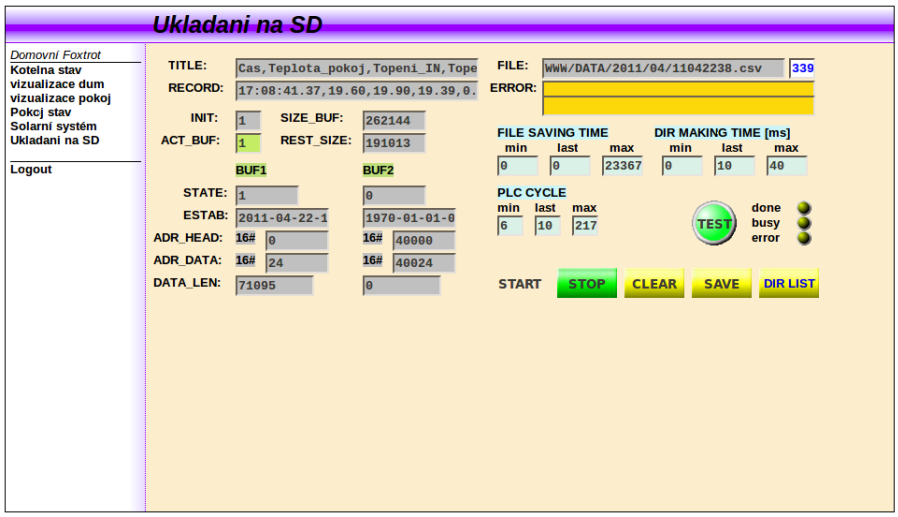


Obrázek 12: Karta nastavení vstupů a výstupů v programovacím prostředí MOSAIC

ložkou s ikonou 3 knih v záložce IEC. Knihovnu přidáme pravým tlačítkem a volbou „Přidat knihovnu" z kontextového menu. Pro správnou funkci komunikace je třeba doplnit knihovny „ComLib", „InternetLib", pro možnost ukládání dat na SD kartu také „FileLib" a pro zpracování dat před odesláním knihovnu „ToStringLib". Všechny tyto knihovny jsou standardně dodávané s vývojovým prostředím Mosaic, stačí je tedy přidat do projektu. Po kompilaci a vyslání kódu do PLC máme připraven hardware i software k programování a ke skutečnému oživení jednotky.

2.2.2 Ukládání dat na SD kartu

Novější jednotka Tecomat Foxtrot má k dispozici slot na SD kartu, proto jsem zde vyžil možnosti velkokapacitní paměti a ukládám historické hodnoty proměnných. Pro ukládání dat na SD kartu je použitý demonstrační program pro tuto funkcionalitu dodávaný ve vývojovém prostředí MOSAIC. Data jsou ukládána do textových souborů, které jsou vytvářeny po 256 KB. Jednotlivé soubory jsou ukládány do automaticky vytvářených adresářů s označením roku a měsíce. Demonstrační program také obsahuje jednoduché webové rozhraní, ve kterém se můžeme přesvědčit o tom, že ukládání funguje správně (obrázek č. 13) . Práce s daty uloženými ve velkých textových souborech je časově velmi náročná a komplikovaná a proto je toto ukládání použito pouze pro demonstraci funkce a jako záloha měřených dat.



Obrázek 13: Stav ukládání na SD kartu ve webovém rozhraní PLC

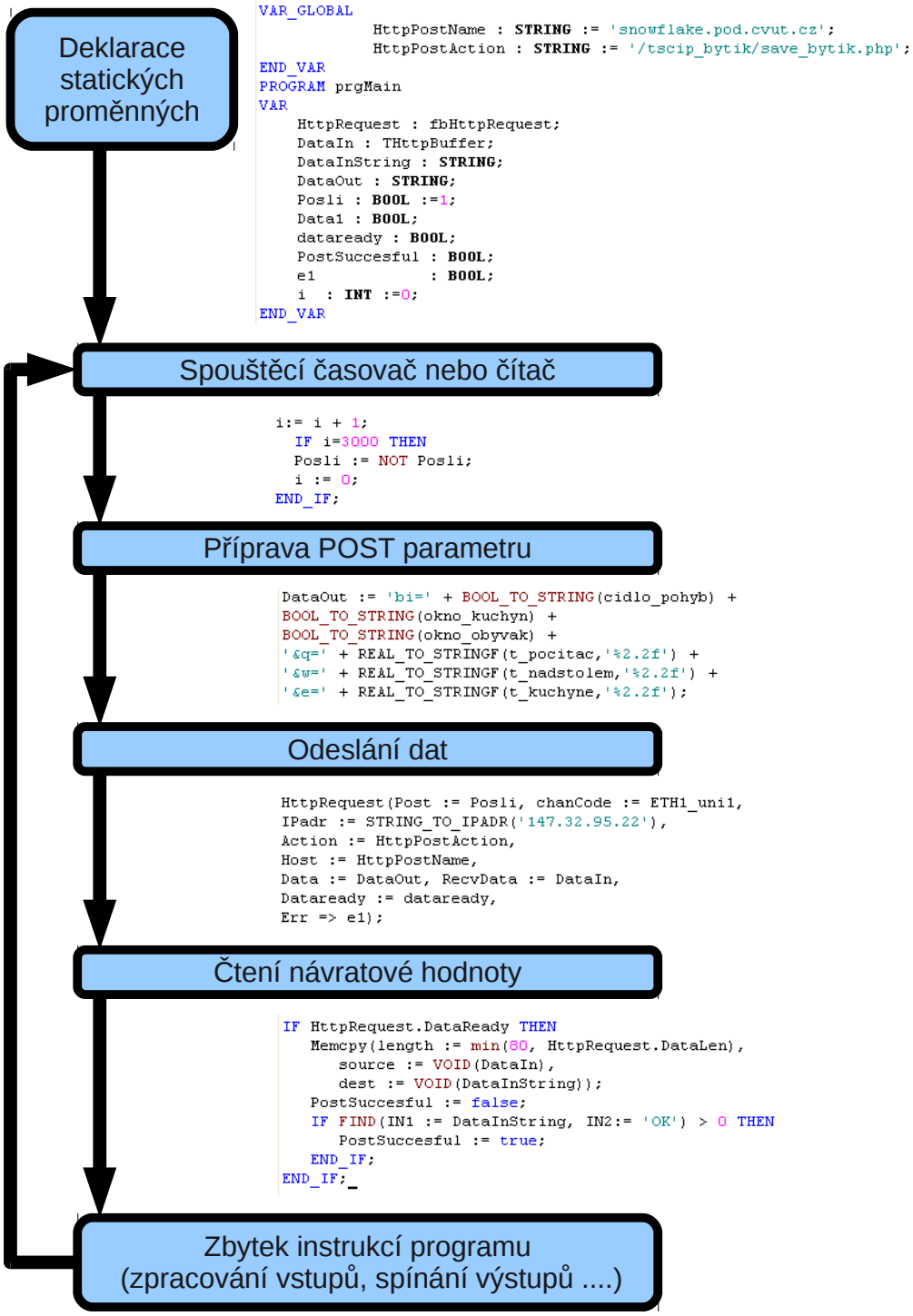
2.2.3 Odesílání naměřených hodnot na vzdálený server

Pro odesílání dat na vzdálený server slouží jednoduchý kód ve strukturovaném textu. Je možné jej vložit buď přímo do hlavního programu PLC („prgMain.ST"), nebo jej uložit do funkce a tu poté z hlavního programu volat. Pro jednoduchost a stručnost kódu je vložen do hlavního programu. Struktura kódu je znázorněna na obrázku č. 14.

Při startu PLC je nutné definovat proměnné. Mezi nimi tvoří většinu proměnné nezbytné pro správný běh funkce „HttpRequest". „HttpPostName" a „HttpPostAction" slouží k definici vzdáleného serveru a skriptu, který se na vzdáleném serveru volá. „HttpRequest" je datová proměnná, která obsahuje objekt potřebný k odeslání Http požadavku. „DataIn" je vstupní buffer, do kterého jsou uložena příchozí data. Ostatní proměnné jsou pouze pomocné a jejich funkce je jasná z kódu programu.

Po startovní deklaraci dochází ke vstupu ukazatele do samotného hlavního programu PLC, ve kterém se pohybuje v nekonečném cyklu až do výpadku napájení, nebo kritické chyby hardware. Na začátku vstupu do cyklu se nejprve program rozhodne zda bude v tomto cyklu odesílat data na server. K tomu je možné použít čítač či časovač. Vzhledem k poměrně pravidelnému rytmu cyklu PLC a ukládání dat i s časem odečtu není rozdíl příliš patrný. V ukázkovém schématu je použitý čítač. 3000 programových cyklů odpovídá zhruba cca 21 sekundám.

Dále je sestaven String, který bude odeslán jako POST parametr. Ten je sestavován skládáním z jednotlivých proměnných. V HTTP paketech jsou hodnoty parametrů tvořeny polem dvojicí „název = hodnota", které jsou v rámci pole odděleny znakem „&". Číselné hodnoty jsou nejprve přetypovány na typ String. K přetypování binárních proměnných je použita funkce BOOL_TO_STRING. Pro teplotní údaje pak funkce REAL_TO_STRINGF, která umožňuje jako parametr zadat požadovaný formát výsledného textového čísla. V případě teplot je dostatečné číslo s přesností na dvě desetinná místa. Označení proměnných



Obrázek 14: Schématické znázornění funkce kódu pro odesílání naměřených hodnot na server

v parametru POST je pro jednotlivé proměnné náhodně vybráno. Za účelem zkrácení názvu je používáno jednopísmenné označení a binární proměnné jsou spojené za sebou v definovaném pořadí do jedné POST proměnné. Specifika „zakódování" proměnných do stringu je nutné dodržet symetricky na straně serveru při následném rozkódování. Pokud výsledná délka hodnot přesahuje délku proměnné String, je nutné rozdělit odesílaná data do dvou dávek posílaných nezávisle na sobě jako dva packety.

Po sestavení POST parametru dochází k volání funkce „HttpRequest". Jejími vstupními parametry jsou:

„Post" - BOOL hodnota zda se má request odeslat

„chanCode" - označení kanálu, který se má pro odeslání requestu použít (nejčastěji ETH_uni0 nebo uni1 podle konfigurace PLC při vytváření projektu)

„IPaddr" - cílová IP adresa požadavku

„Action" - cesta a jméno požadovaného souboru na serveru

„Host" - tzv. hostname serveru je důležité nastavit správně s názvem serveru, aby server byl ochoten packet přijmout a zpracovat

„Data" - data, která budou poslána v parametru POST

„RecvData" - ukazatel na výstupní buffer přijatých dat

„Dataready" - ukazatel na BOOL proměnou, která oznamuje, že jsou příchozí data připravena ke čtení.

Dále je možné využít dva chybové ukazatale, které pomáhají najít chybu při nefunkčním odesílání. Pokud server neregistruje příchozí požadavky, je správně nastavena IP adresa, hostname a přesto pozorujeme změny proměnné „Post", pak je nejčastěji chyba v nastavení univerzálního ethernetového rozhraní a je tedy vhodné otevřít Manažer projektu a nastavení rozhraní překontrolovat, případně znovu uložit do PLC.

Posledním pracovním úkonem programu pro odesílání dat je přečtení odpovědi serveru. Pokud ukládání na serveru je v pořádku, pak vrací text „OK". Jak je vidět ze schématu skriptu, kontrola přítomnosti textu „OK" je prováděna velmi jednoduše pomocí funkce FIND. Není tedy problém rozšířit komunikační protokol se serverem o další hodnoty, které mohou mít různorodé využití v programu.

Po zpracování části programu odesílajícího data následují další části programu, které slouží běžnému provozu inteligentního domu. Z důvodu rozsahu práce nemohu zabíhat do podrobností programování PLC a jeho možností, ale inspirací může být model inteligentního domu určeného pro výuku programu Inteligentní budovy na katedře měření, fakulty elektrotechnické v budově v Dejvicích, na jehož vývoji jsem se společně s firmou Workswell s. r. o. podílel a návody k úlohám mohou být inspirací pro naprogramování PLC v inteligentním domě.

2.3 Ukládání dat

Pro ukládání dat pro pozdější zpracování bylo zvoleno řešení, kdy jsou data uchovávána na centrálním serveru. Schéma „putování dat" a požadavků uživatelů je znázorněno na obrázku č. 15.

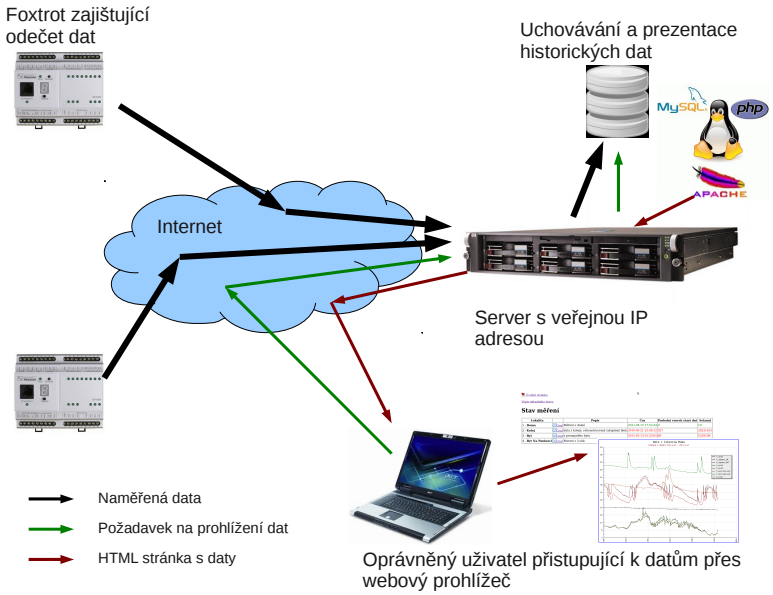
Naměřené údaje jsou na server odesílány prostřednictvím protokolu HTTP v parametru POST hlavičky paketu. Tento způsob odesílání má výhodu ve své univerzálnosti a ve snadném průchodu NATy. NAT, který vznikl jako řešení problému s nedostatkem IPv4 adres, je síťovou jednotkou, která zajišťuje změnu

datového rámce z vnitřní podsítě IP adres na IP adresu, kterou má na svém WAN rozhraní. Tímto způsobem dospěl vývoj internetu do stavu, kdy veřejná IP adresa je směrována pouze na jeden z NATů poskytovatele připojení k internetu a koncový zákazník je skryt za mnoha NATy. Z důvodu schování mnoha zařízení za jednu veřejnou IP adresu není možné navazovat příchozí spojení z internetu. Jediné požadavky, které se dostanou ke koncovým jednotkám, jsou odpovědi na odchozí žádosti těchto jednotek. Není tedy možné najít jednoduché hardwarové řešení, které by umožňovalo připojení se z libovolného místa na centrální jednotku Foxtrotu. HTTP protokol je s výjimkou určitých speciálních aplikací dostupný v každém místě připojeném k internetu. Centrální domovní jednotky Foxtrot mohou tedy být připojeny pomocí libovolného připojení k internetu již existujícího v domácnosti. Připojení k internetu je dnes již velmi dobře rozšířeno a v případě absence internetové přípojky je možné Tecomat Foxtrot rozšířit o GSM modul umožnující přenos dat pomocí GPRS. Jedním z požadavků na moderní monitorovací systém je zcela jistě možnost přistupovat k datům z libovolného místa. Nejen tedy z privátní domácí podsítě, ale například také z mobilního telefonu s webovým prohlížečem či z počítače v práci, ve škole, případně jinde mimo domov. To nabízené řešení s ukládáním dat na veřejně přístupném místě umožňuje.

Další výhodou centrálního řešení je velká výkonová variabilita, kdy je možné centrální server nahradit virtualizovaným serverem s libovolným výkonem, nebo zpracování požadavků rozdělit mezi celou serverovou farmu. Centrální řešení zajišťuje také úsporu nákladů, jelikož může být mnoho koncových zařízení připojeno k jednomu centrálnímu stroji. Odolnost proti výpadkům lze zajistit pomocí duplicitních DNS záznamů a použitím záložního serveru. Případný výpadek internetu domovní jednotky lze ošetřit ukládáním naměřených dat do paměti DataBox a jejich odeslání na server až po obnovení internetové konektivity.

Každá aktivní lokace (měřený objekt) má za účelem zpracování příchozích dat přidělený unikátní jednoduchý ukládací skript. Skript je vytvořen při zřizování měřícího místa a je možné jej vytvořit buď ze šablony, případně je možné jej nechat vygenerovat. Schéma zpracování příchozích dat je na obrázku číslo 16. Data jsou ukládána skriptem v jazyce PHP, který spouští webový server Apache. Jako databáze slouží MySQL server, který se také stará o optimalizaci uložených dat a jejich indexování pro pozdější vyhledávání. Použitá trojice nástrojů, tedy Apache - PHP - MySQL je velmi populární kombinací bezplatných open source aplikací pro operační systém Linux. Jsou dostatečně spolehlivé a zároveň se jedná o neustále vyvíjené aplikace. Tato kombinace je používána mnoha společnostmi nabízejícími hosting pro vlastní internetové stránky. Není tedy problém nasadit centrální serverovou aplikaci v hostovaném prostředí s nízkými energetickými i provozními náklady (odpadají starosti o údržbu hardware, údržbu a aktualizace operačního systému, zabezpečení operačního systému a další problémy spojené s provozem serveru).

Celý proces ukládání je pro možnost jednoduchého ladění chyb při vývoji i provozu, možnost odhalení případného útočníka či špatných dat logován, tzn., že všechny významné události běhu skriptu jsou ukládány do protokolu událostí. K prvnímu uložení aktivity dochází ještě před spuštěním samotného skriptu a to zápisem do logu webového serveru apache (obrázek č. 17). V tomto logu je, IP adresa (odkud požadavek pochází), datum a čas požadavku, a zda se jedná o požadavek typu POST či GET (v našem případě posíláme data metodou GET), výsledek operace (číslo 200 v případě úspěšné odpovědi) a posledním

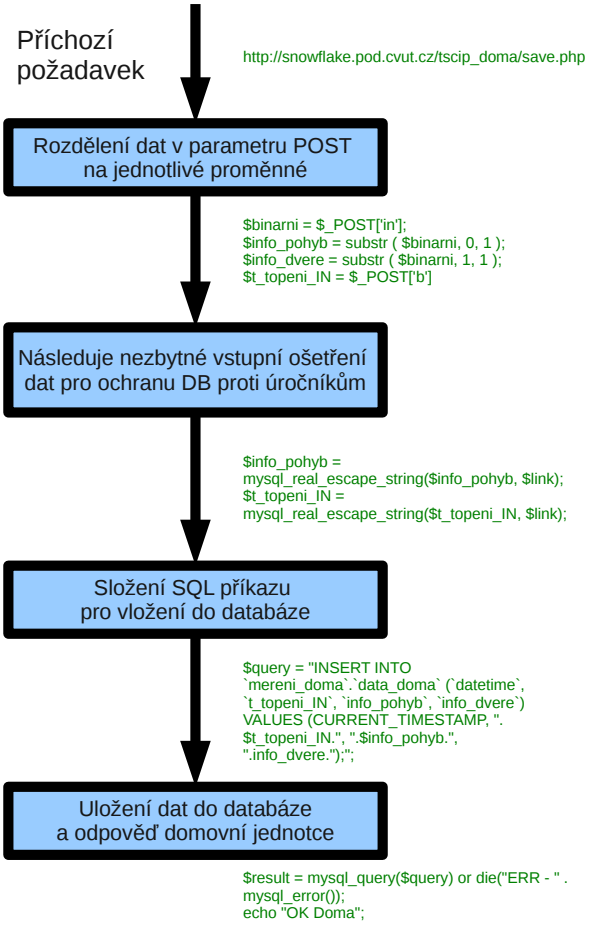


Obrázek 15: Blokové schéma ukládání dat

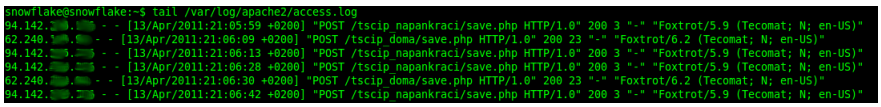
obsaženým údajem je identifikace webového klienta. Případnou chybu volání špatného skriptu, či útočníka, který se připojuje použitím jiného typu prohlížeče html stránek, lze velmi jednoduše identifikovat.

Skript ihned po svém spuštění zkontroluje, zda byl spuštěn se správným parametrem POST a zda tedy má k dispozici data k uložení. V této fázi je možné doplnit přidanou bezpečnost kontrolou, tj. zda zdrojová IP adresa požadavku je shodná s veřejnou IP adresou posledního NATu pro internetové připojení, na kterém se domovní jednotka nachází. Při svém spuštění uloží skript oznámení o svém spuštění do logu skriptu. Poté dochází k rozdělení parametru POST na jednotlivé ukládané proměnné. Z důvodu objemu přenášených dat jsou binární proměnné agregované do jednoho řetězce, tedy např. „in=010110", který obsahuje jednotlivé binární proměnné v definovaném pořadí za sebou. Číselné proměnné mají každá svůj vlastní řetězec, ale jejich označení je opět zkráceno, např. vstupní teplota topného média s úplným označením „t_topeni_IN" je s hodnotou přenášena pouze jako „b=35.87". Jednotlivé klíče jsou určeny náhodně při připojování jednotky a jsou shodně implementovány v programu PLC i v ukládacím skriptu. Toto opatření kromě snížení velikosti přenášeného paketu také zabraňuje záměně jednotek při volání chybného skriptu a znesnadňuje identifikaci paketu při případném zachycení.

Datové hodnoty se poté z důvodu ochrany proti útokům na webový server tzv. escapují, to znamená, že se provede jejich obsahová kontrola a v případě, že by obsahovaly nějaký údaj, jenž by se dal za určitých okolností považovat za spustitelný příkaz databáze, je uložen zakódován do speciálního tvaru, aby nemohl databázi uškodit. Metoda útoku zvaná SQL injection, tedy vkládání spustitelných příkazů do datových hodnot je mezi útočníky velmi populární a velmi dobře rozpracovaná, proto je tomuto ošetření věnováno několik volání



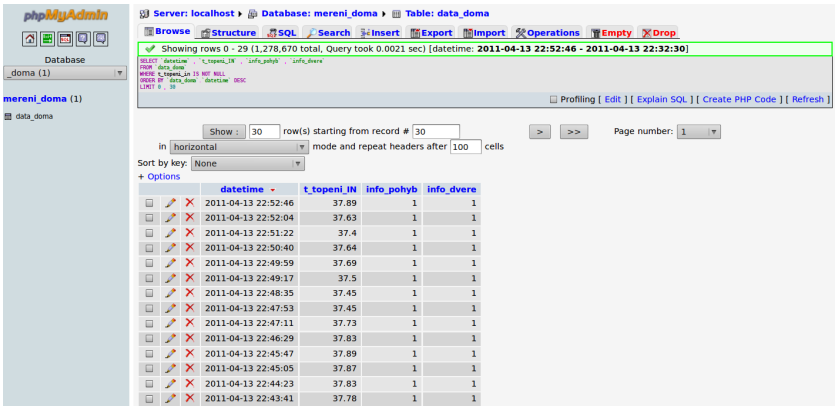
Obrázek 16: Postup zpracování příchozích údajů ukládacím skriptem



Obrázek 17: Ukázka výpisu logu access.log webového serveru apache

```
22:03:30 04/13/11 teco_ukladani [info] Skript zavolán - Ukládací část.
22:03:30 04/13/11 teco_ukladani [info] Rozděluji kotelna.00001110
22:03:30 04/13/11 teco_ukladani [info] Sql:INSERT INTO `mereni_doma`.`data_doma` (`datetime`, `t_topeni_IN`,`info_pohyb`, `info_dvere`)
VALUES (CURRENT_TIMESTAMP, 40.22, 0,1);
22:03:30 04/13/11 teco_ukladani [info] Uložení OK.
```

Obrázek 18: Ukázka z logu vytvářeného za běhu skriptu



Obrázek 19: phpMyAdmin prostředí pro správu dat v databázi MySQL

funkce ve skriptu, který je jinak jednoduchý, aby byl rychlý a nenáročný a jeden počítač tak mohl ukládat data z mnoha domovních jednotek.

Poté se již sestaví SQL dotaz pro vložení dat do databáze. Před vkládáním je opět postup skriptu uložen do logu, aby bylo možné identifikovat chybné chování databáze, případně při úplném výpadku databáze uložit znovu naměřená data. Ukázka záznamu z logu skriptu je na obrázku č. 18.

Data v databázi MySQL jsou uložena velmi úsporně, o optimalizaci tabulek pro rychlé procházení se stará databázový engine. Již v této podobě je možné data procházet a exportovat, například při použití webové aplikace PhpMyAdmin lze data zálohovat, procházet, exportovat do formátu csv, hledat maximální, minimální údaje, ... Ukázku dat v prostřední phpMyAdmin je možné si prohlédnout na obrázku č. 19.

Před ukončením skriptu je domovní jednotce odeslána odpověď a to buď „OK" v případě, že uložení proběhlo v pořádku, nebo „ERR" v případě, že při ukládání došlo k chybě. Zde je v kódu prostor pro případné odesílání dalších informací domovní jednotce. Může se jednat buď o informace zjištěné serverem z jiných zdrojů (např. předpověď venkovní teploty na několik dalších hodin), optimalizační konstanty zjištěné z historických dat (např. změny parametrů modelu vytápěné místnosti), či požadavky uživatele (vypnutí/zapnutí spotřebiče, vzdálená změna požadované teploty). Při programování domovního PLC je však třeba dbát zvýšené obezřetnosti, protože nepřijetí těchto údajů (např. při výpadku spojení) nesmí být pro domovní procesy kritické a musí být definováno jejich uvedení do bezpečného stavu při selhání komunikace.

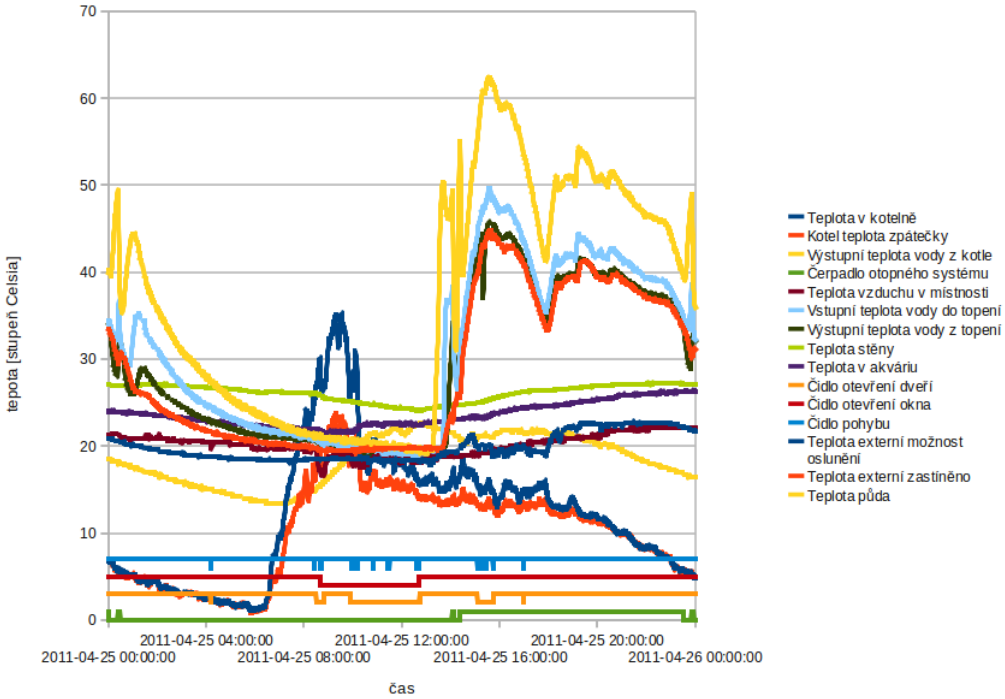
2.4 Ukázka naměřených dat

Všechny grafy vykreslené v této kapitole jsou získaný pomocí programu OpenOffice Calc (http://www.openoffice.org), kde byly vykresleny exporty z databáze

uložených dat.

2.4.1 Data z rodinného domu

První data z měření v rodinném domě jsou dostupná z 22. března 2010, kdy byl zahájen sběr dat z obytné místnosti. Docházelo zde k postupnému umísťování dalších čidel až do stavu, který je podrobněji popsán v následující kapitole. Tato instalace zůstane v domě umístěna a sběr dat bude dále pokračovat. Na obrázku č. 20 je graf dat z jarního dne, na kterém je možné pozorovat vychládání otopné soustavy v průběhu první poloviny dne a opětovné zatopení v době, kdy se snížila venkovní teplota.

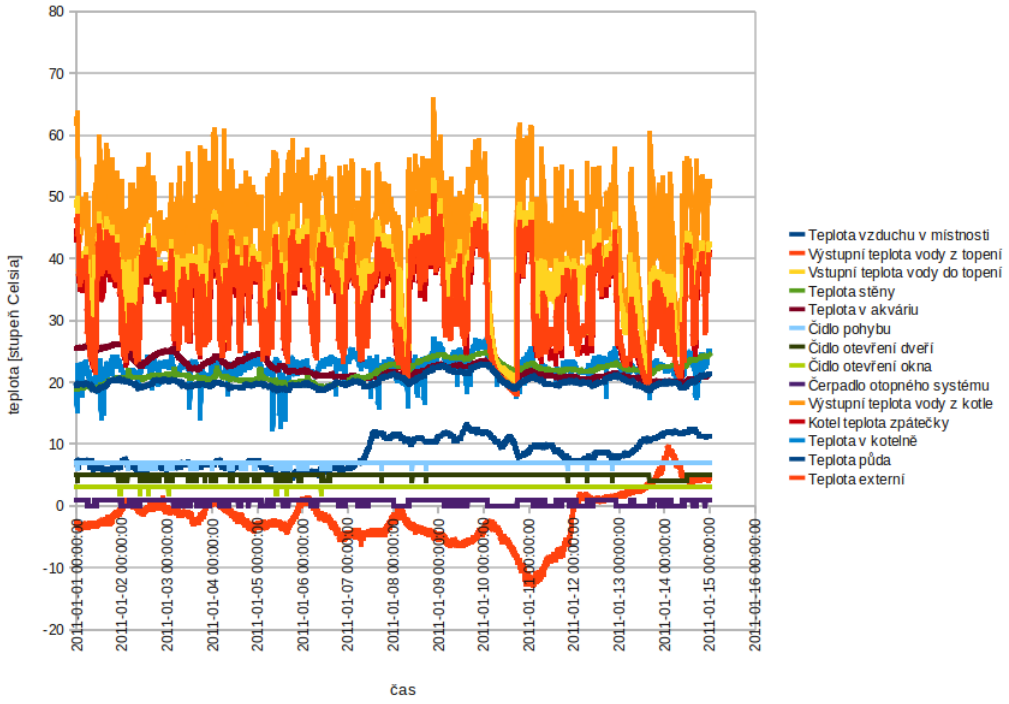


Obrázek 20: Ukázka dat z rodinného domu - vychládání a zatápění

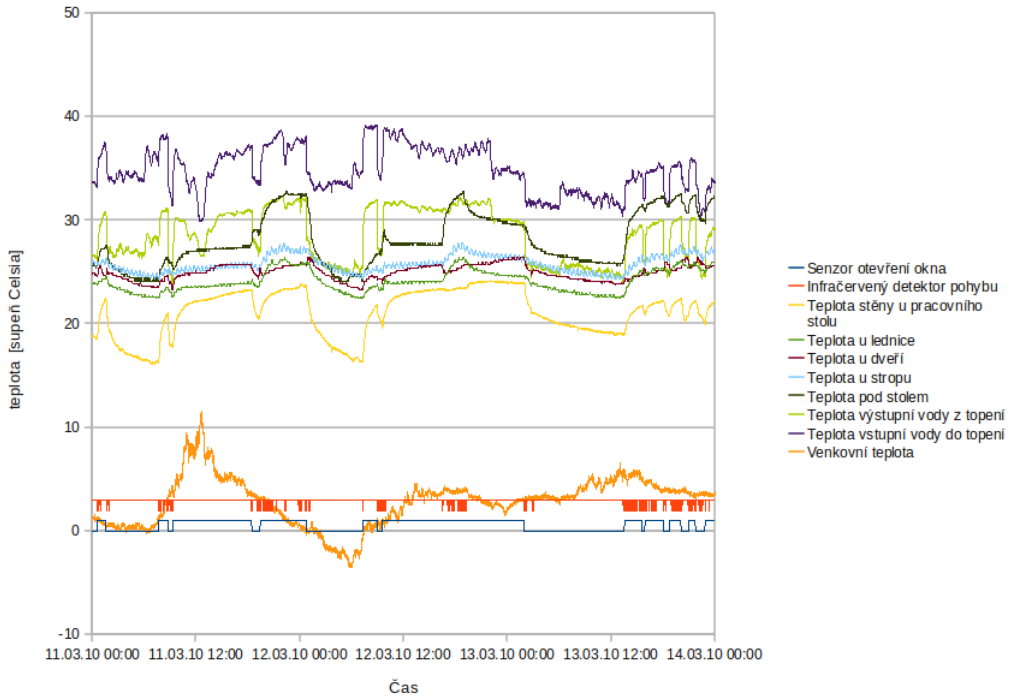
Data z časového období dvou týdnů je možné si prohlédnout na obrázku č. 21. Na grafu jsou patrné jednotlivé denní cykly a změny teplot v závislosti na způsobu vytápění.

2.4.2 Data z místnosti na koleji

Data z koleje jsou dostupná z období od 4.3.2010 do 1.5.2010. Lokalita byla velmi experimentální z hlediska vývoje algoritmu pro sběr dat, proto jsou časté výpadky dat. Z dat je například pozorovatelné (obrázek č. 22), jak otevřené okno (hodnota proměnné „Senzor otevření okna" je nulová) ovlivňuje teplotu na různých senzorech v místnosti. Patrné snížení teploty na topném tělese v čase větrání je zřejmě způsobeno nízkou teplotou vody v otopném systému a také nízkým průtokem vody v otopném systému.

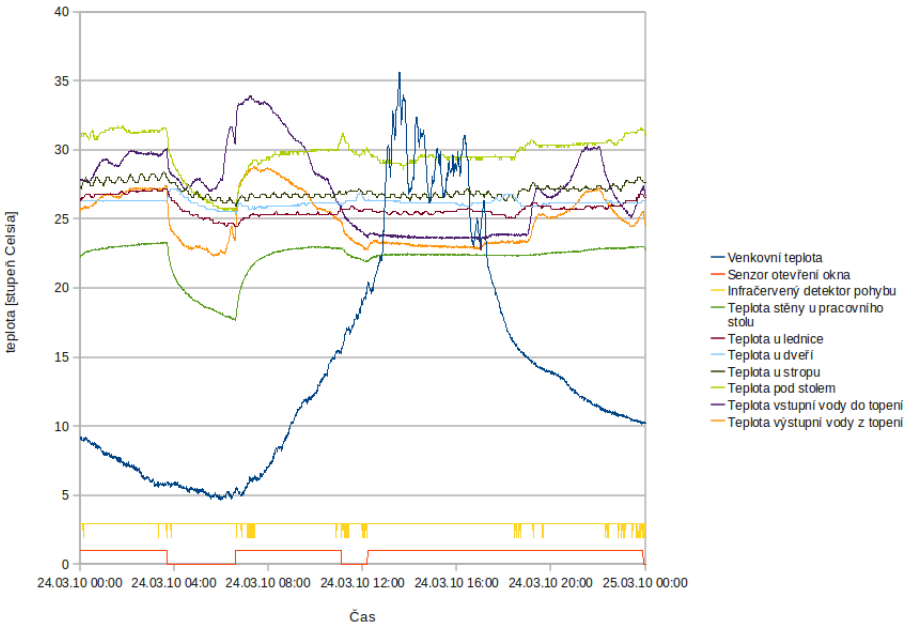


Obrázek 21: Data z rodinného domu za 15 dní



Obrázek 22: Data z lokality kolej - ukázka vytápění místnosti

Na obrázku č. 23 je ukázka chování externího senzoru teploty, který byl umístěn nezastíněný na parapetu. Je zde patrný velký nárůst teploty v době oslunění.

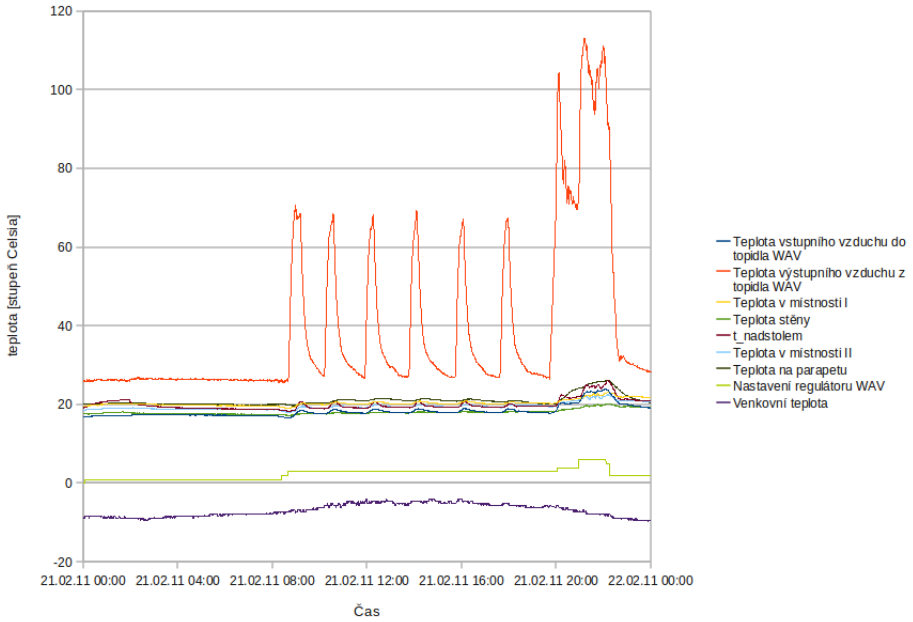


Obrázek 23: Data z lokality kolej - ukázka teplotního zisku venkovního osluněného senzoru

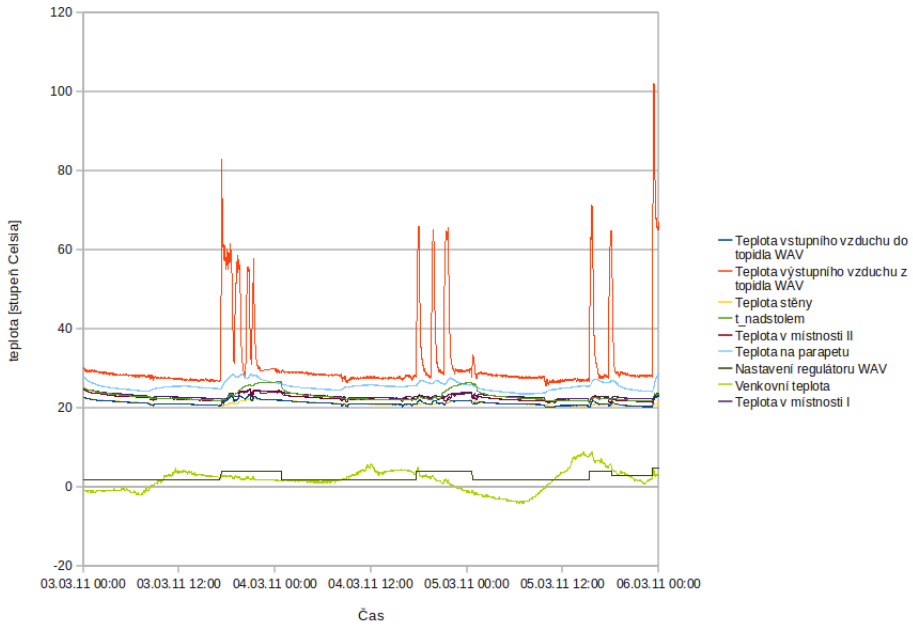
2.4.3 Data z místnosti přízemního bytu

V pronajatém bytě bylo měření instalováno od 17.2.2011 do konce dubna 2011. Vytápění místnosti je zajišťováno lokálním plynovým topidlem WAV, které je ovládáno vlastním mechanickým regulátorem. Běžný způsob vytápění v této lokalitě je nastavení topidla na nízkou požadovanou teplotu v době nepřítomnosti osob - místnost se pouze temperuje. Při příchodu obyvatel se nastaví požadovaná hodnota vyšší a je ji možné dále korigovat podle osobních potřeb. Ukázka dat z běžného zimního dne je na obrázku č. 24. Místnost je v období nočního útlumu vytápěna pouze na první regulační stupeň topidla. Ráno je topidlo nastaveno na třetí stupeň. Ve večerních hodinách je požadována vyšší teplota v místnosti při pasivním sledování televize, proto jsou postupně nastaveny čtvrtý a šestý teplotní stupeň. Z grafu je patrné, že v průběhu dne dochází k regulaci teploty místnosti pomocí regulátoru s hysterezí. Na večerním nastavení vyšší požadované teploty je patrné diferenční chování vestavěného regulátoru, který pro zvýšení teploty v místnosti do topidla pouští více plynu než při vyrovnávání tepelných ztrát v průběhu dne.

Na obrázku č. 25 je graf dat za období několika zimních dnů. Je zde patrné vytápění místnosti topidlem v době denní aktivní fáze a během noční útlumové fáze, kdy lze pozorovat teplotní rozdíl v okolí topidla, tzv. „věčný plamínek" zahřívá výstupní vzduch z topidla na 25 až 30 °C.



Obrázek 24: Ukázka chování místnosti při změně nastavení požadované teploty



Obrázek 25: Ukázka dat z lokality „byt”

3 Návrh typového řešení pro rutinní měření

Cílem tohoto bodu zadání je navrhnout podpůrný systém pro konfiguraci systému a zpracování tak, aby implementace celého procesu popsaného v předchozí kapitole byla jednoduchá a rychlá. Dalším cílem je vytvoření přehledného informačního rozhraní pro uživatele objektu.

Instalace systému se skládá z několika kroků:

1. Návrh rozmístění prvků
2. Fyzické umístění prvků systému
3. Implementace programu, vytvoření databáze pro uchovávání dat, implementace skriptu pro ukládání dat
4. Konfigurace webového rozhraní pro uživatelské zobrazení dat

Při návrhu umístění prvků je vhodné přihlédnout také k hospodárnému využití měřících prvků a zkombinovat zásady uvedené v kapitole 2.1.3 s požadavky na automatizaci v inteligentním rodinném domě. Instalace slaboproudých i silnoproudých rozvodů musí také odpovídat příslušným českým státním normám. V diplomové práci jsou podrobně rozebrány tři instalace, ze kterých byla sbírána data.

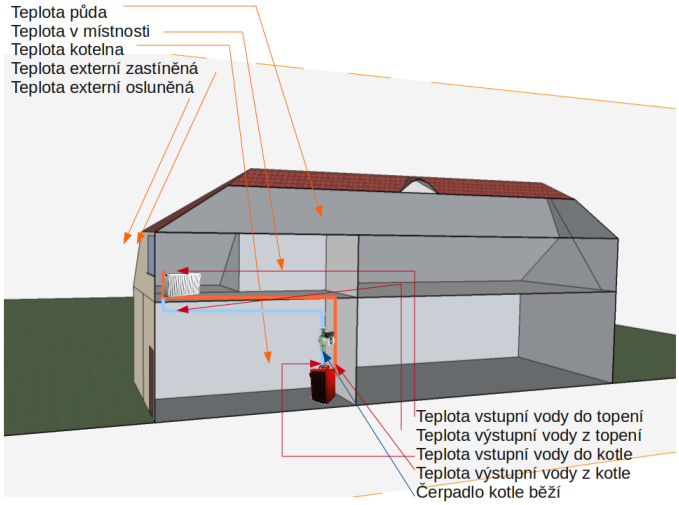
3.1 Umístění senzorů v realizovaných instalacích

3.1.1 Rozmístění senzorů v rodinném domě

V rodinném domě byl systém nainstalován v typické místnosti a v místnosti kotelny, kde se nachází kotel na tuhá paliva, který je zdrojem tepla pro vytápění objektu. Z důvodu finanční náročnosti nebyla CIB sběrnice instalována v celém objektu. Vizualizace objektu s naznačeným umístěním senzorů je na obrázku č. 26. Všechny vizualizace použité v práci jsou vytvořeny pomocí vizualizačního nástroje SketchUp firmy Google .

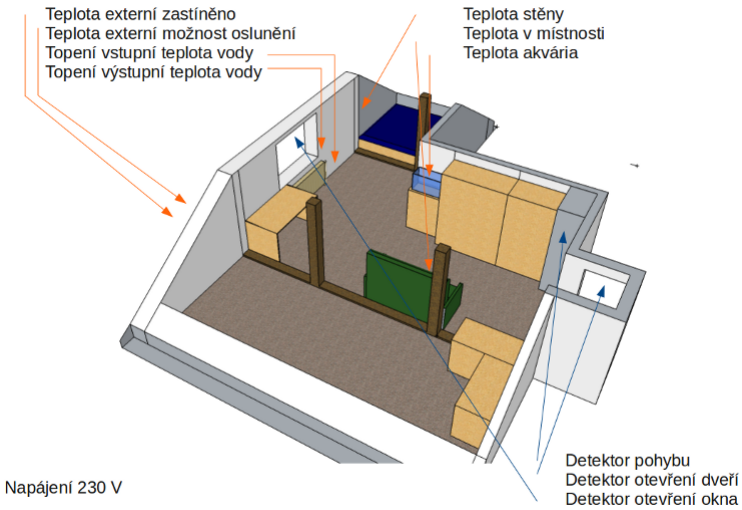
Objekt je vytápěn centrálním kotlem na tuhá paliva. Oběhové čerpadlo je spínáno vlastní termostatickou regulací s hysterezí. Čerpadlo spíná při cca 60 stupních Celsia a vypíná při 40 stupních. Vytápěcí soustava je monitorována čtyřmi čidly teploty a jedním binárním senzorem běhu čerpadla. Čidla jsou umístěna na výstupu z kotle, na zpátečce kotle a na vstupní a výstupní trubce topného tělesa. Všechna čidla jsou umístěna neinvazivně na povrchu železných trubek. Činnost čerpadla je monitorována pomocí jednotky binárních vstupů IM-80B. Protože binární vstupy jednotek jsou bezpotenciálové, je napětím 230 V na čerpadle spínáno pomocné relé, které svým sepnutím propojí binární vstup jednotky se svorkou GND jednotky. Spínané střídavé napětí není možné přivádět přímo na vstup jednotky. V prostoru kotelny je dále umístěno čidlo teploty vzduchu v místnosti. Kotelna je umístěna pod měřenou obytnou místností. Nad měřenou místností je monitorována teplota v neobyvatelném podkroví.

Druhou monitorovanou místností v domě je obytná místnost pracovna spojená s ložnicí. Na vizualizaci (obrázek č. 27) je znázorněno rozmístění senzorů v prostoru. Místnost je vytápěná dvěma otopnými tělesy, výkon těles je regulován termostatickými hlavicemi. Čidla teploty příchozí a odchozí vody do topných těles jsou měřena na „stoupačce", Z hlediska naměřených dat lze uvažovat, že se otopná tělesa chovají jako jedno těleso s topným výkonem obou



Obrázek 26: Rozmístění čidel v rodinném domě

těles. Doplňkovým zdrojem tepla v místnosti je akvárium, které je z důvodu komfortu jeho obyvatel dotápěno topným tělískem o výkonu 40 W, toto těleso je hermeticky uzavřené a nelze tedy monitorovat jeho činnost. Z hlediska tepelných úniků místnosti je 40W topný výkon zanedbatelný. Čidlo teploty akvária je umístěno spíše ze zajímavosti, zda je tělísko dostatečně výkonné pro udržení konstantní teploty v akváriu při výkyvu teplot v obývané místnosti. Teplota vzduchu v místnosti je měřena čidlem TC-3 umístěným za pohovkou ve výšce konce opěradla pohovky.



Obrázek 27: Rozmístění čidel v obytné místnosti

Dále jsou v místnosti umístěny binární senzory. Jedná se o magnetické detektory otevření okna a dveří. Ty jsou určeny pro zjišťování vlivu pronikání chladnějšího vzduchu v okolí na teplotu vytápěné místnosti a dále jeden pohybový PIR detektor. Z hlediska domovní automatizace je monitorováno také napájení celého systému.

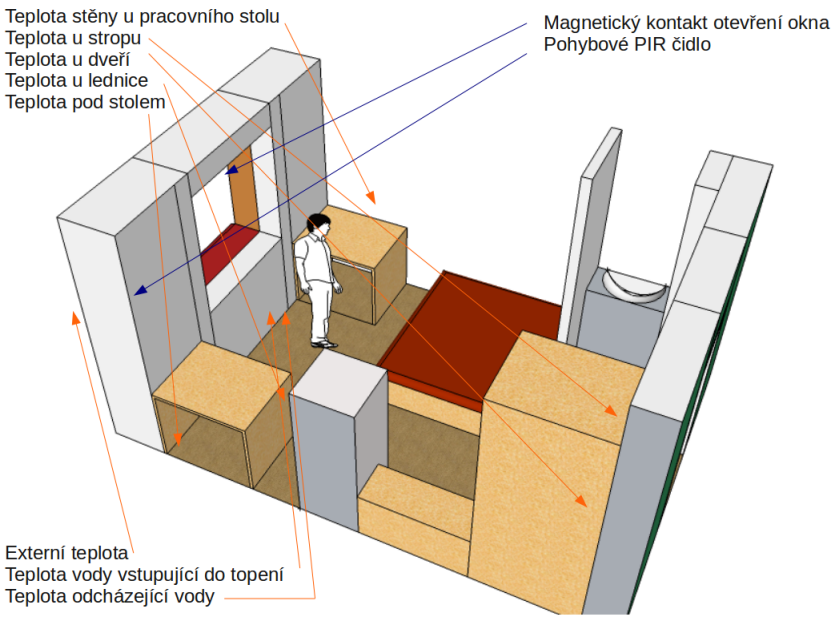
Externí teplota objektu je měřena pomocí dvou čidel teploty TZ-3, které jsou umístěny na okenním parapetu. Jedno z čidel je zastíněno - měří tedy běžně udávanou teplotu ve stínu, druhé čidlo je ponecháno nestíněné a pro zvýraznění účinků solární energie oblepené černou izolační páskou.

Topologie CIB sběrnice je tzv. „volná" lze tedy jednotlivá čidla spojovat ekonomicky nejkratším možným spojením s již instalovanou CIB sběrnicí. Z tohoto důvodu zde není třeba uvádět schéma zapojení čidel, protože z hlediska topologie sběrnice může být bez vlivu na funkčnost systému zapojení zcela libovolné.

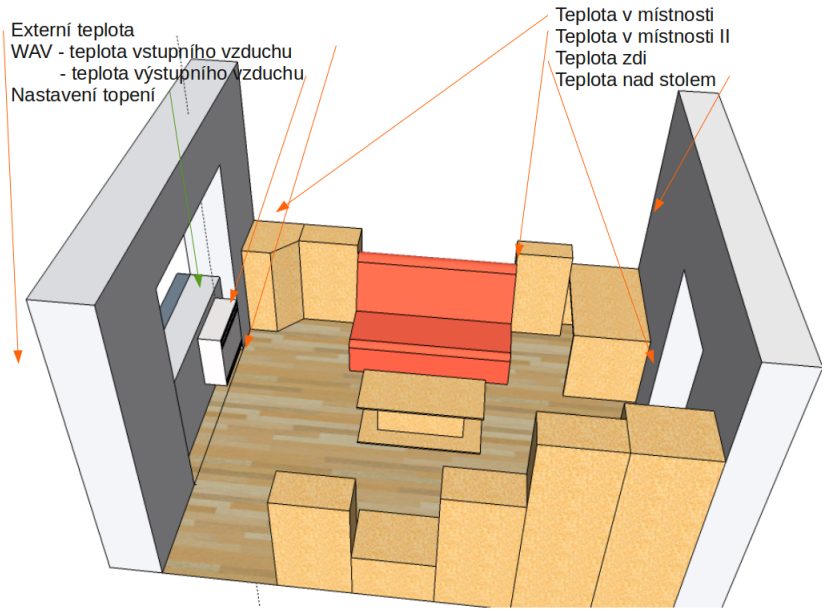
3.1.2 Rozmístění senzorů v místnosti na koleji

Další měření bylo realizováno v místnosti na koleji. Jedná se o rekonstruovaný, tedy dobře zateplený pokoj na koleji ČVUT Podolí. Místnost je vytápěná topným tělesem centrálního vytápění. Otopné těleso je monitorováno dvěma senzory - teplota přicházející a odcházející topné vody. Senzory jsou opět umístěny neinvazivně na povrchu potrubí. Informace o průtoku ani jeho binární stav však nelze nijak zjistit.

V prostoru bylo instalováno jedno čidlo teploty stěny a několik čidel teploty vzduchu na různých místech, jak je patrné z obrázku č. 28. Byly použity i dvě binární čidla a to čidlo otevření okna a čidlo přítomnosti osob v místnosti - pohybové infračervené čidlo.



Obrázek 28: Rozmístění čidel v místnosti koleje



Obrázek 29: Rozmístění čidel v místnosti v bytě

3.1.3 Rozmístění senzorů v jedné místnosti bytu

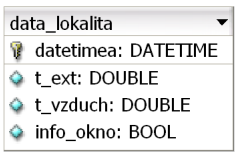
Poslední lokalitou je přízemní pražský byt 2+1, kde měření probíhá v jedné z obytných místností. Vizualizace rozmístění čidel je na obrázku č. 29. Místnost je vytápěna přímotopným plynovým topidlem (WAV) Karma BETA 4 s jmenovitým tepelným příkonem $4,5kW$. Výrobcem udávaná spotřeba zemního plynu je $0,43m^3h^{-1}$. Topidlo má vlastní mechanickou regulaci s regulátorem s možností volby požadované teploty v 7 bodové škále (výrobce udává rozsah možnosti regulace 13-38 °C). Pro získání informace o nastavení tohoto mechanického regulátoru je u topení instalován systémový ovladač WSB2-80 s osmi krátkocestnými tlačítky na kterých uživatel po nastavení topidla potvrdí změnu nastavení mechanického ovladače topidla. Dále je snímána teplota vzduchu, který vstupuje do topidla z místnosti, a teplota ohřátého vzduchu vystupujícího z topidla.

Dále je snímána teplota vzduchu v místnosti na 3 místech, aby bylo možné pozorovat chování ohřátého vzduchu v místnosti.

3.2 Program pro prezentaci naměřených dat

Data, která jsou odeslána na centrální server pro sběr dat jsou uchovávána ve vlastní databázi, která obsahuje pouze jednu tabulku s uloženými daty. Tato tabulka má jako primární klíč uložených dat sloupec „DATETIME", který je časovou známkou uložených dat v příslušném řádku a dále obsahuje sloupce, které svým datovým typem odpovídají ukládané veličině.

Tedy například pokud bychom z lokality ukládali jen hodnoty 3 senzorů - externí teplotu, teplotu v místnosti a binární hodnotu magnetického senzoru otevření okna (t_ext, t_vzduch, info_okno) obsahovala by příslušná databáze sloupce „datetime", „t_ext", „t_vzduch" a „info_okno" (schéma databáze je na



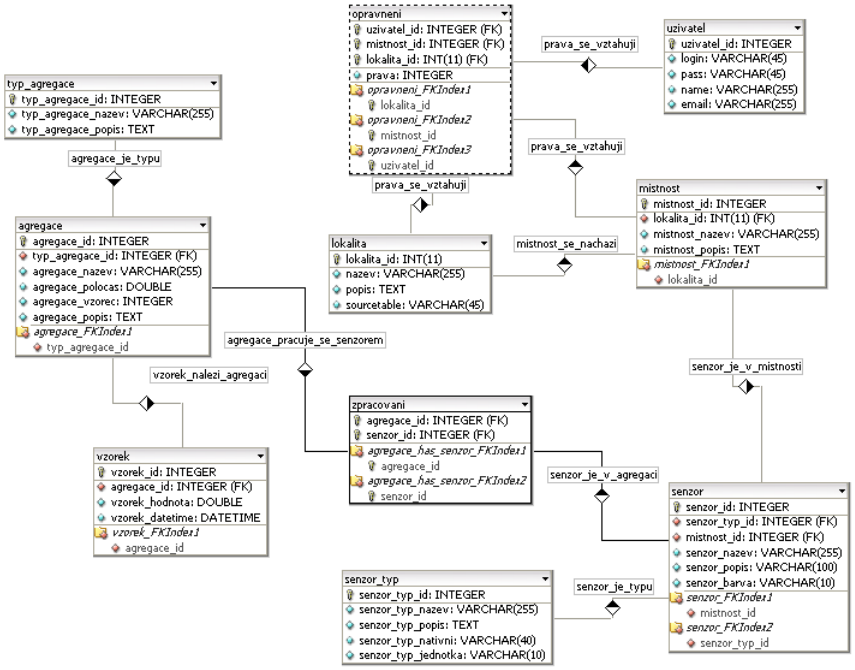
Obrázek 30: Schéma jednoduché databáze pro ukládání dat

obrázku č. 30). Pro každá příchozí data se zde vytvoří nový záznam obsahující příchozí data doplněná o časovou značku. Databáze má takto jednoduchý formát z několika důvodů - při ukládání dat je důležité aby, webový server dokázal zpracovat požadavek v co nejkratším možném čase a zbytečně neplýtval svou výpočetní kapacitou. Vložení jednoho jednoduchého řádku se všemi daty je mnohem jednodušší, než vkládání jednoho řádku pro každý senzor. Druhým důvodem je datová náročnost aplikace. Tím že se pro každá příchozí data ukládají pouze příchozí data bez dalších doplňujících klíčů, jsou kladeny nižší nároky na diskový prostor serveru a ten tak může obsloužit více lokalit, případně zvládá vyšší vzorkovací frekvenci ukládaných dat. Jako příklad datové nenáročnosti databáze mohu uvést velikost databáze pro ukládání dat z rodinného domu, která obsahuje za 13 měsíců údaje z 29 senzorů s vzorkováním každých 42 vteřin a obsazený prostor na disku je něco málo přes 350 MB, což je asi $\frac{1}{13}$ kapacity běžného DVD disku. Což snižuje jak energetické nároky na daný server, tak také usnadňuje možnosti zálohování naměřených dat. Pokud je třeba doplnit další senzory, není to žádný velký problém. Databáze se rozšíří o nový sloupec vhodného datového typu, defaultní hodnota dat doplněná do minulých záznamů bude „null", a proto nám nový senzor nijak neovlivní minulá data. Podobný postup je i v případě odebrání jednoho ze stávajících senzorů, kde naopak bude budoucí hodnota nových dat pro tento senzor „null". Jednotlivé databáze pro jednotlivé lokality mají svůj vlastní databázový uživatelský účet, je tedy zajištěno, že jednotlivá data z různých lokalit jsou navzájem oddělena a chráněna vlastním přístupovým heslem.

3.2.1 Schéma relační databáze

Zjednodušené ukládání dat je ale spojeno s jejich náročnějším zpracováním při vykreslování a analýze dat. Je třeba vytvořit datovou strukturu, která obsahuje údaje nezbytné pro čtení dat z jednotlivých lokalit. Tabulky v navržené databázi (obrázek č. 31) můžeme rozdělit podle účelu do několika skupin. První skupina souvisí s prezentací již změřených dat a přehledu o datové struktuře pro další zpracování, jsou to tabulky „lokalita", „mistnost", „senzor" a „senzor_typ". V tabulce lokality je uložen její název, popis a textové pole určující z jaké zdrojové tabulky se načítají senzory příslušné lokality. Místnost slouží pro lepší čitelnost prezentovaných dat uživateli, protože umožňuje rozdělit senzory do logických skupin. Senzor pak obsahuje informace o konkrétním zdroji dat, jsou to název senzoru v databázi, uživatelsky čitelný popis a barva, kterou bude senzor zobrazen. Typ senzoru doplňuje k senzoru jednotky, ve kterých je veličina měřena a datový typ, ve kterém jsou hodnoty dané jednotky uloženy.

Druhou skupinu tabulek tvoří agregační tabulky „agregace", „typ_agregace", „zpracovani" a „vzorek". Jedná se o tabulky, které jsou určeny pro pokročilejší



Obrázek 31: Databáze pro dodatečné zpracovávání naměřených dat

zpracování naměřených dat. Je například třeba vytvářet různé operace s naměřenými daty třeba aritmetické průměry, maximální a minimální hodnoty za různé období, je možné také vytvářet mezisenzorová data například součty, násobky či jiné operace. Výsledky zpracování jsou ukládány do tabulky vzorek, kde se ukládá čas, kterému vzorek odpovídá, hodnota výsledku a agregace, o kterou se jedná. Agregace mohou být různých typů (součty, průměry, ...) a každá agregace může být počítána z různě dlouhého období. Hodnota agregace_poločas v tabulce agregace určuje jak jsou jednotlivé vypočtené hodnoty od sebe časově vzdáleny. Tato hodnota se ukládá v tabulce agregace i vzorek. V tabulce agregace však hodnota slouží při běhu výpočtů a výsledná data i s časovými rozestupy jsou ukládána do tabulky vzorek. Tabulka zpracování určuje, kterých senzorů se daná agregace týká.

Poslední skupinu tabulek tvoří tabulky uchovávající přístupová práva uživatelů jsou to tabulky „uzivatel" a „opravneni". V tabulce uživatelů jsou základní údaje uživatele jako je uživatelské jméno a heslo, jméno uživatele a kontaktní e-mail. Samotná práva konkrétního uživatele jsou uložená v tabulce oprávnění. Uživatel může mít právo čtení nebo zápisu pro jednotlivé místnosti, či celou lokalitu. Oprávnění číst data dovoluje uživateli prohlížet základní historická data. Právo zápisu pak umožňuje spouštět nad historickými daty agregační funkce.

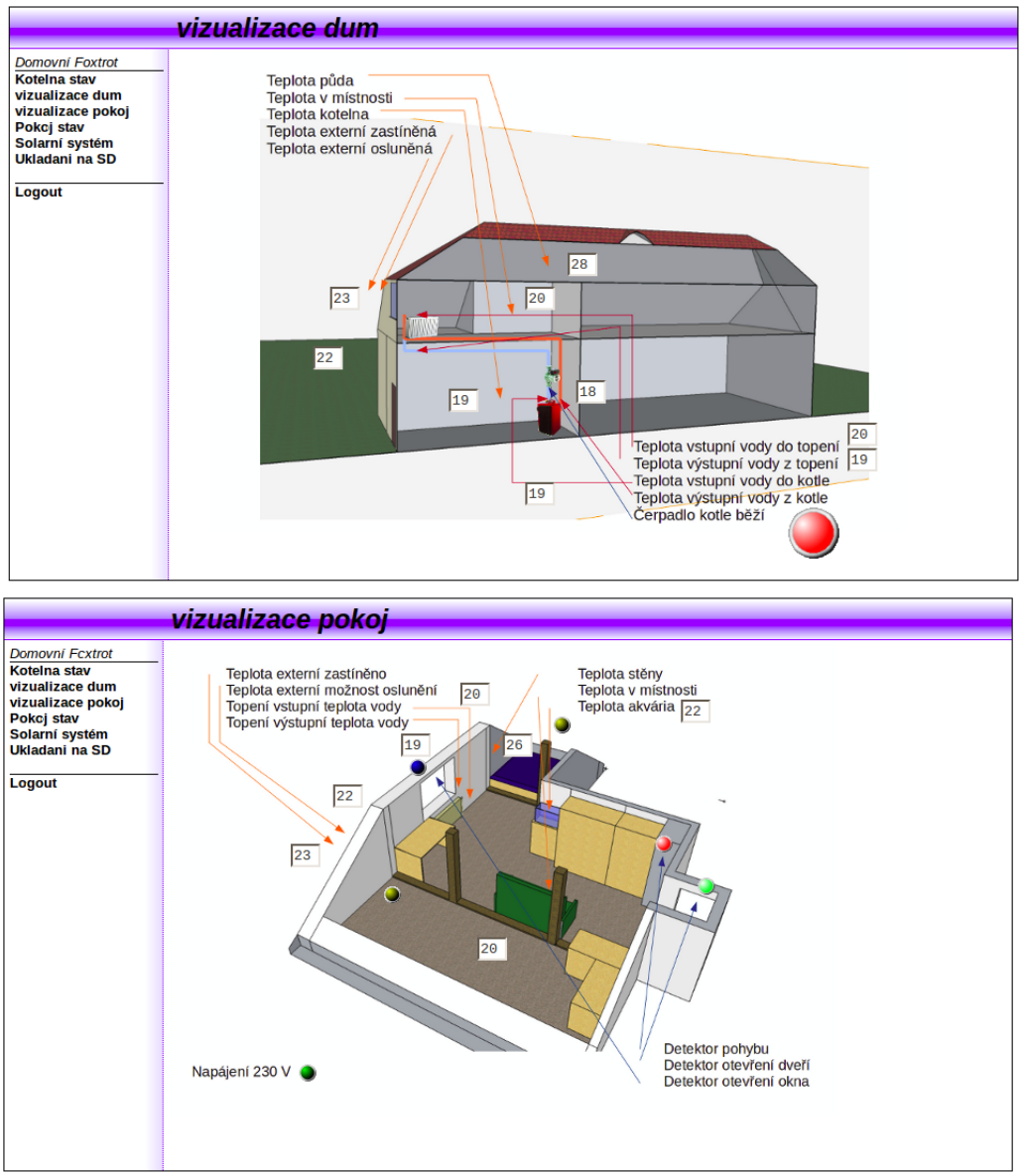
3.3 Prezentace naměřených dat uživateli

3.3.1 Vizualizace měřeného prostoru pomocí programu Google SketchUp

Všechny vizualizace použité v DP jsou vytvářeny pomocí programu Google SketchUp [8]. Její intuitivní rozhraní dovoluje velmi jednoduše překreslit půdorys místnosti jako plochý rys složený ze základních geometrických obrazců - úseček, obdélníků a kruhových výsečí. Po načrtnutí půdorysů je možné změnit úhel pohledu a z plochých útvarů vytvořit vytažením do prostoru 3D objekty. Program má velmi intuitivní ovládání a i přesto umožňuje vytvářet vizualizace geometricky velmi přesně. Pro seznámení s programem zájemce odkazuji na tutoriál dostupný na stránkách programu [8] a také na velmi dobře zpracované video ukázky dostupné tamtéž. Pro export vizualizace pro další použití ve webové aplikaci doporučuji natočit modelovaný objekt do žádoucího úhlu a poté exportovat do formátu png. Textové elementy a ukazatele je možné poté dokreslit v programu OpenOffice Kreslení (kancelářský balík je volně ke stažení na adrese www.openoffice.org). Po uložení ve formátu png je možné vizualizace použít jak pro webovou aplikaci, tak také v nástroji WebMaker vývojového prostředí MOSAIC.

3.3.2 Prezentace měřených dat pomocí webového serveru PLC

Všechny PLC z řady Tecomat Foxtrot, které mají vloženou paměťovou kartu, disponují vestavěným web serverem pro možnost vytvoření jednoduchého webového rozhraní. Jelikož je HTTP protokol a HTML jazyk součástí běžných webových stránek, je možné se na webové rozhraní PLC připojit z celé podsítě, ze které je domovní automat dosažitelný. Pokud by bylo možné na domovní automat namapovat veřejně přístupný port přidělený poskytovatelem internetu (bohužel v ČR není tato praxe moc obvyklá), byl by domovní automat přístupný z celého internetu. Na rozdíl od řešení prezentace dat na centrálním vzdáleném serveru má vestavěný webový server automatu v lokální síti výhodu rychlé aktualizace dat a také možnosti doplnění řízení objektu v reálném čase. Je tedy možné hodnoty nejen zobrazovat, ale také měnit vnitřní konstanty, ovládat připojené spotřebiče a vše ostatní co jen dokáže uživatel navrhnout a programátor implementovat. Stránky webového serveru jsou chráněné přístupovým heslem, prostřednictvím vývojového prostředí MOSAIC je možné nastavit celkem 10 uživatelských účtů s úrovní oprávnění v rozsahu 0 až 9. Každá webová stránka, výpis proměnné či možnost ovládání mohou být chráněna jinou úrovní oprávnění. Oprávnění mají hiearchickou strukturu, to znamená, že uživatel s oprávněním 2 je oprávněn obsluhovat prvky s oprávněním 0 a 1. Počítačům v místní síti je také možné dovolit na základě jejich MAC možnost automatického přihlášení do webového serveru PLC na předvolené úrovni oprávnění. Toho lze s výhodou využít při instalaci dotykových ovládacích panelů v rámci domu. Obrovskou nevýhodou webového serveru automatu je jeho nedostupnost ze sítě internet. Vzhledem k nedostatku IPv4 adres je možné veřejnou IP adresu získat jen za relativně vysoký měsíční poplatek. Tato situace se bohužel časem bude ještě více zhoršovat, a proto jsou data pro přístup mimo lokální síť ukládána na vzdálený centrální server.



Obrázek 32: Vizualizace aktuálních dat prostřednictvím webového serveru PLC

Postup tvorby vizualizace je následující:

1. Ve vývojovém prostředí spustíme nástroj WebMaker
2. Upravíme „Nastavení přístupu", kde vytvoříme jednotlivé uživatele s příslušnými oprávněními
3. Vložíme novou stránku, která bude odpovídat určité vizualizaci a nastavíme jí požadované oprávnění (MOSAIC sám vygeneruje příslušnou na-

bídku stránek podle oprávnění přihlášeného uživatele)

4. Pomocí ikonky „Statický obrázek" v nabídce WebMakeru vložíme obrázek pozadí (vytvořenou vizualizaci)

5. Nyní můžeme do obrázku vkládat jednotlivé zobrazovací a ovládací prvky (na výběr jsou zadávací pole, zadávací pole s tlačítkem pro okamžité odeslání, grafický sloupec ovládaný proměnou a dvoustavové obrázky) u všech prvků je možné nastavit úroveň potřebného oprávnění, případně skrýt viditelnost prvku v závislosti na hodnotě proměnné v programu PLC

3.3.3 Prezentace aktuálních dat na centrálním webovém serveru

Po přihlášení do webové aplikace je úvodní stránkou „Stav měření". Jedná se o tabulku, která vypisuje všechny lokality, pro která má daný uživatel právo přístupu pro čtení (obrázek č. 33). Úvodní stránka slouží jako rozcestník pro další akce a také nabízí základní přehled o stavu systému. Pro každou lokalitu vypisuje čas posledního uložení dat z domovního PLC. Pokud domovní PLC posílá data rozdělená ve více dávkách, jedná se o čas přijetí poslední dávky. Pro rychlou orientaci je zobrazeno také stáří posledního vzorku v celých uplynulých dnech a také čas od posledního uložení dat v sekundách. Časy, které jsou starší než jeden den jsou považovány za lokality s dlouhodobým výpadkem, proto jsou zobrazeny červenou barvou. Aktuální časy - pro data uložená v posledních dvou minutách jsou zobrazena zelenou barvou. Mezi zeleným výpisem a červeným výpisem je však ještě několik mezistupňů - modrá (data starší než 2 minuty, ne však starší než deset minut), černá (data ne starší než 45 minut), oranžová (v rozmezí stáří 45 minut až 3 hodin) a červeno-oranžovou barvou pro data starší 3 hodin, poté údaj již zčervená a dále se jeho barva již nemění. Toto rozlišení umožňuje zběžným pohledem zkontrolovat stav domovních jednotek a jejich správného ukládání.

Obrázek 33: Ukázka úvodní stránky zobrazené po přihlášení do webové aplikace

„Výpis aktuálního stavu" je další možností jak vypsat stav aktuálního stavu senzorů. Na obrázku č. 34 je možné si prohlédnout údaje, které se vypisují. Tuto stránku využijeme především při hledání chyb v procesu ukládání dat. Na rozdíl od prvního úvodního přehledu jsou zde rozepsané všechny senzory, které jsou přiřazeny k dané lokalitě, a proto lze odhalit i chybu, kdy se data z jednoho či několika senzorů neukládají.

Pro běžné uživatelské zobrazení je však určen poutavější výpis naměřených hodnot. Po jeho otevření - kliknutím na název lokality na úvodní stránce se zobrazí vizualizace lokality s vepsanými aktuálními hodnotami (obrázek č. 35).

Místnost - Půda

Senzor	Typ	Hodnota	Datum aktualizace	Staré dní	Staré sekund
t_puda	senzor teploty (double)	15.88	2011-04-21 02:06:51	0 dní	3 sekund

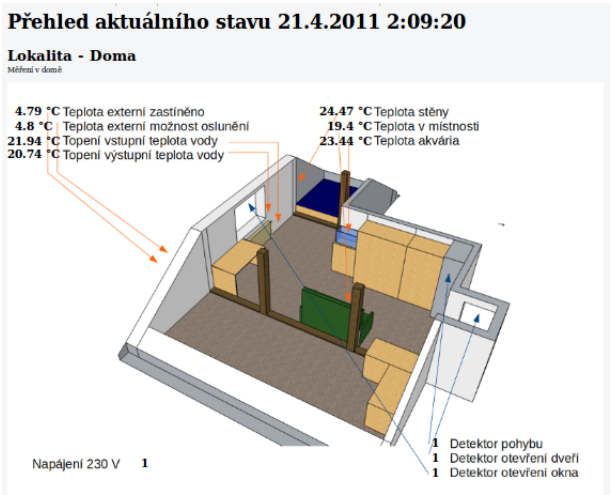
Místnost - Externí

Senzor	Typ	Hodnota	Datum aktualizace	Staré dní	Staré sekund
t_ext1	senzor teploty (double)	4.73	2011-04-21 02:06:30	0 dní	24 sekund
t_ext2	senzor teploty (double)	4.66	2011-04-21 02:06:30	0 dní	24 sekund

Místnost - Solární systém

Senzor	Typ	Hodnota	Datum aktualizace	Staré dní	Staré sekund
t_sol_kol_out	senzor teploty (double)	33.88	2011-04-21 02:06:51	0 dní	3 sekund
t_sol_zas_out	senzor teploty (double)	48.32	2011-04-21 02:06:30	0 dní	24 sekund

Obrázek 34: Ukázka „Výpisu aktuálního stavu" měřených dat



Obrázek 35: Ukázka grafického výpisu aktuálního stavu lokality

```
/*
 nastaveni ramu ve kterem se zobrazuji vizualizace (neni treba jej upravovat)
*/
#obr1 {
  font-size: 15px;
  margin: 10px 0 3px 0;
  font-weight: bold;
  color: #000;
  position:relative;
}

/*
 rozkopirujeme pro kazdy zobrazovany senzor, umisteni upravujeme zmenou atributu top a left
 pokud piseme nazev senzoru uvadime pred jeho nazev #, nazvy souboru musi byt stejne jako nazvy senzoru v db

 pokud chceme nejaky senzor vypsat dvakrat (nastaveni v lokality/nastaveniLokalit.php), druhou instanci umistujeme jako
 nazev_senzoru_2, treti jako nazev_senzoru_3 ...
*/

#nazev_senzoru {
  position:absolute;
  text-align: right;
  width: 80px;
  top:50px;
  left:410px;
}

/*
 zde vypiseme nazvy senzoru, ktere se v dane vizualizaci nemaji zobrazovat, senzory oddelujeme carkou
*/

#neviditelny_senzor, #smazany_senzor {
  display:none;
}
```

Obrázek 36: Konfigurace pozic zobrazení senzorů - soubor vzor.css

S ohledem na zjednodušení přidávání nové lokality byl navržen výpis tak, aby jej bylo možné jednoduše konfigurovat a to pouze editací několika souborů webové aplikace. Postup pro přidání vizualizace k existující lokalitě je následující:

1. Ve zdrojových kódech aplikace v adresáři „/lokality" vytvoříme složku s názvem vizualizované lokality.

2. Do složky lokality nakopírujeme vytvořené png obrázky a soubor vzor.css (obrázek č. 36) z adresáře lokality, který vhodně doplníme o všechny zobrazované senzory. Nastavujeme vzdálenost od levého horního rohu prvního obrázku v pixelech - vzdálenost od vrchní hrany elementem top, od levé hrany elementem left.

3. V souboru „lokality/nastaveniLokalit.php" (obrázek č. 37) zkopírujeme vzorové komentované nastavení a do řetezců doplníme vlastní hodnoty, nastavujeme pouze cestu k souborům obrázků vizualizace, doplněného css souboru a hodnoty, z kterých senzorů se mají ve vizualizaci opakovat.

4. Ve webové aplikaci si otevřeme danou vizualizaci, pokud s ní nejsme spokojeni upravujeme pozici jednotlivých senzorů.

Nastavení vizualizace je navrženo tak, aby bylo pro uživatele co nejméně technicky náročné a zároveň byla konfigurace uložena tak, aby bylo možné ji bez časové prodlevy při zobrazování webové stránky načíst a vykreslit.

3.3.4 Prezentace historických dat na centrálním webovém serveru

Pro zobrazení historických naměřených údajů je ve webové aplikaci k dispozici část „Vykreslování grafů". Vykreslování grafů pro příslušnou lokalitu zobrazíme kliknutím na nápis graf v tabulce lokalit na úvodní stránce. Na horní části

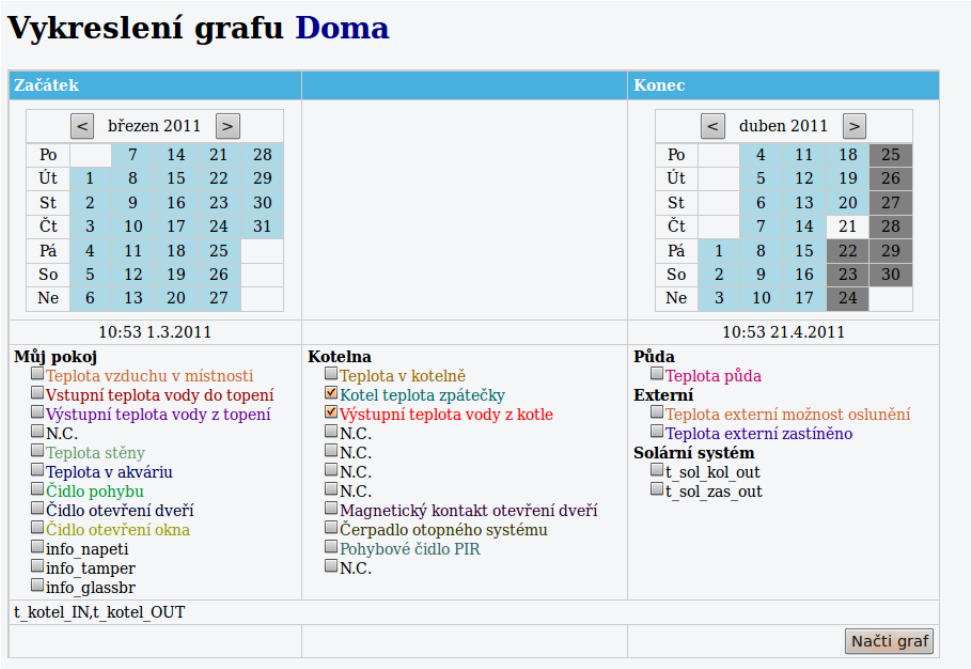
```
/* pro pridani lokality zkopirujeme nasledujici kod a upravime na spravne nastaveni
   tento komentovany priklad zde nechte, neupravujte jej pro moznost pozdejsiho pouziti */
if($this->lokalitaid==/*zde*/10000/*zadame spravne cislo konfigurovane lokality*/) {

        /* doplnime cesty k obrazkum zaciname adresarem lokality, pokud je obrazku vice zkopirujeme radek a jen upravime retezec */
        $this->podklad[] = "lokality/nazev/jmeno_obrazku.png";
        $this->podklad[] = "lokality/nazev/jmeno_obrazku2.jpg";

        /* zadame cestu k souboru css s doplnenymi pozicemi jednotlivych senzoru */
        $this->css = "lokality/nazev/nazev.css";

        /* senzory, jejichz hodnoty se ve vizualizaci maji zobrazit nekolikrat vypiseme pokud je jich vice
           zkopirujeme radek a ten upravime podle potreby
           zadavame ve formatu
                $this->opakovat["nazev_senzoru"] = pocet_opakovani;
           umisteni opakovanych senzoru pak v css nastavujeme pro prvek nazev_senzoru_2, nazev_senzoru_3 ...
        */
        $this->opakovat["nazev_senzoru"] = 2;
        $this->opakovat["jiny_senzor"] = 2;
}

// misto pro vkladani vlastni konfigurace

if($this->lokalitaid==1) {
        $this->podklad[] = "lokality/doma/pokoj_s_nazvy.png";
        $this->podklad[] = "lokality/doma/dum_s_popisky.png";

        $this->css = "lokality/doma/doma.css";

        $this->opakovat["t_sele"] = 2;
        $this->opakovat["t_ext1"] = 2;
        $this->opakovat["t_ext2"] = 2;
        $this->opakovat["t_topeni_IN"] = 2;
        $this->opakovat["t_topeni_OUT"] = 2;
}

// konec vlastni kongiurace
```

Obrázek 37: Konfigurace nastavení lokality - soubor nastaveniLokalit.php

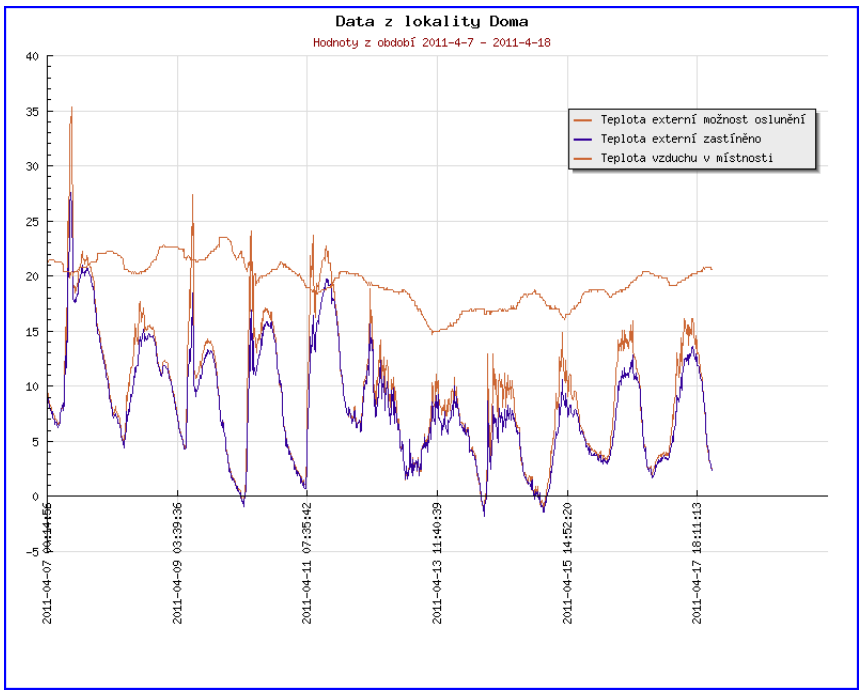
stránky jsou volby pro konfiguraci vypisovaného grafu (obrázek č. 38). Jsou zobrazeny dva kalendáře, pomocí kterých je možné zvolit začátek a konec vykreslovaného období. Tlačítky „<” a „>” posuneme zobrazení kalendáře o měsíc zpět nebo měsíc dopředu. Aktuální den je zobrazen bílou barvou, dny budoucí pak šedou barvou. Data je možné vykreslit pouze pro dny minulé a dnešní (pokud je sběr dat z lokality aktivní). Klepnutím na den v kalendáři zvolíme příslušné datum začátku či konce období. Volba je potvrzena změnou datumu v řádku pod kalendářem.

Senzory příslušné pro danou lokalitu jsou vypsány pod kalendáři. Jsou vypsány v blocích uvozených jednotlivými názvy místností. Senzor, který má v databázi uložen popisek a barvu vykreslování je vypsán danou barvou a s uživatelsky čitelným popiskem, senzory bez popisku jsou vypsány s názvem v databázi. Senzor je vybrán kliknutím na „checkbox” před jeho názvem, volba senzoru se potvrdí přidáním do zobrazovaného seznamu názvů pod volbou senzorů.

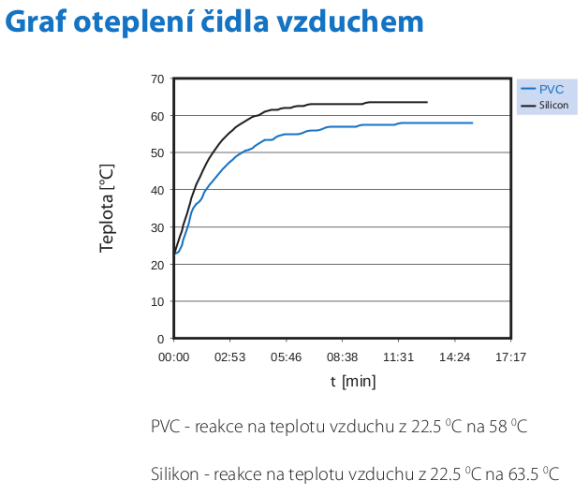
Po kliknutí na tlačítko „Načti graf” server začíná zpracovávat uložená historická data a vykreslovat graf. Pro dlouhé časové období či větší množství senzorů je úkol výpočetně náročnější a trvá delší dobu, při zvolení několika senzorů a časové období deseti dní trvá zobrazení grafu mezi 30 až 60 sekundami. Ukázka vykresleného grafu je na obrázku č. 39)



Obrázek 38: Parametry pro zobrazení grafu



Obrázek 39: Ukázka grafu hodnot vykresleného webovou aplikací



Obrázek 40: Dynamika teplotních čidel dle dodavatele Elko EP

4 Analýza naměřených dat

4.1 Přenosová funkce teplotních čidel

Teplotní čidla, která jsou použita pro měření jsou obalena materiálem, jenž chrání vlastní TNC prvek čidla. Výrobce udává charakteristiku čidel, která je převzata na obrázku č. 40 (dle literatury [6]). Při analýze naměřených dat je proto nutné počítat s kapacitním prvkem těchto čidel.

4.1.1 Chování teplotního čidla TC

Pro čidlo typu TC, které má koncovku z materiálu PVC dodavatel udává doby t65, t95 což je cituji „doba, za kterou se čidlo ohřeje na 65 (95) % teploty prostředí, v němž je čidlo umístěno". Pro účely analýzy chování vytápěných místností je vhodné chování čidla aproximovat přenosovou funkcí prvního řádu. Při proložení dostupných údajů od dodavatele čidla simulací přechodu na skok z 0 na 60 °C nejlépe udané body prokládá přenosová funkce:

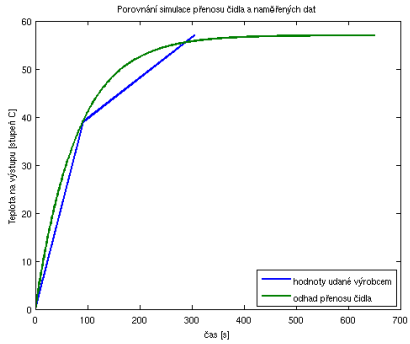
$G_{TC}(s) = \frac{1}{78{,}70s+1}$

4.1.2 Chování teplotního čidla TZ

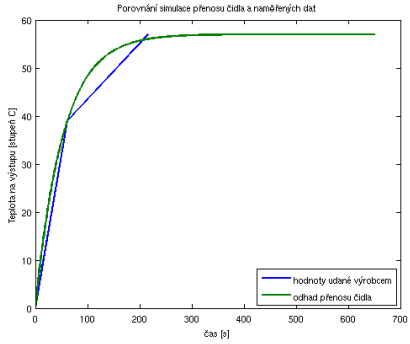
Při měření teploty vzduchu proudícího v okolí čidla výrobce uvádí doby ohřátí čidla v prostředí vzduchu t65 = 62s a t95=216s. Čidlo chráněné silikonovým materiálem v kovovém pouzdře má tedy nižší tepelnou kapacitu. Čidlo bylo aproximováno přenosovou funkcí prvního řádu:

$G_{TZ}(s) = \frac{1}{53.29s+1}$

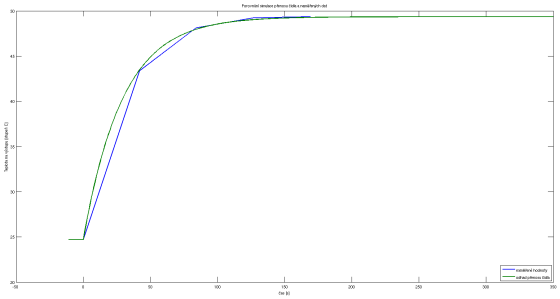
Porovnání údajů udaných dodavatelem s aproximovaným přenosem pro skok z 0 na 60 °C je uvedené na obrázku č. 42 .



Obrázek 41: Přenosová funkce čidla TC ve vzduchu

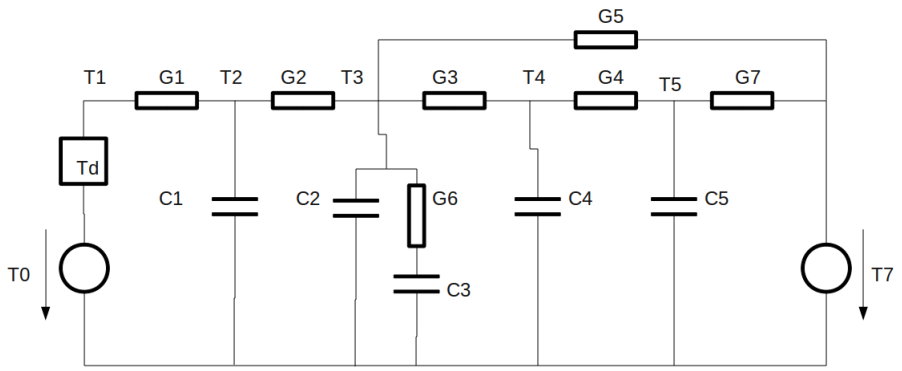


Obrázek 42: Přenosová funkce čidla typu TZ v prostředí vzduchu



Obrázek 43: Simulace chování čidla TZ při přiložení ke kovovému potrubí

Při sběru dat jsou čidla TZ používaná k měření teploty kapaliny v otopné soustavě. Čidlo je v tomto případě přiloženo ke kovové trubce, kterou prochází kapalina. Protože dodavatel neuvádí chování čidla v případě kontaktu s kovem, bylo nutné jej experimentálně odměřit. Čidlo bylo z vnějšího chladnějšího prostředí přiloženo k trubce otopného systému, kterým proudila teplonosná kapalina. Naměřená data přechodu jsou uvedena v tabulce č. 6. Při identifikaci čidla byla teplota 24,7 °C za počáteční teplotu skoku a teplota 49,35 °C za



Obrázek 44: Blokové schéma modelu vytápěného prostoru

teplotu ustálení. K identifikaci byl napsán skript pro prostředí matlab. Který identifikoval systém prvního řádu. Jako váhová funkce identifikovaného systému byl použit součet druhých mocnin rozdílu naměřených hodnot a simulace ve změřených bodech.

Přenosová funkce čidla typu TZ při styku s kovovým potrubím byla identifikována jako:

$G_{TZ_K}(s) = \frac{1}{29{,}26s+1}$

Porovnání výsledné přenosové funkce a naměřených údajů je na obrázku č. 43.

Čas měření [s]	Teplota čidla [°C]
0	24,70
42	43,37
84	48,11
127	49,23
169	49,35

Tabulka 6: Chování čidla teploty typu TZ při přiložení ke kovové trubce

4.2 Model vytápěného prostoru

Při modelování vytápěného prostoru vycházíme z článku „Vytápěcí systémy budov" [10] vydaného v časopisu Automatizace v únoru 2004. Použitý model je na obrázku č. 44. Použité veličiny jsou uvedeny v tabulce č. 7.

V měřených lokalitách je snímána teplota vzduchu v místnosti, která odpovídá teplotě T3 v uvedeném modelu. Další známou veličinou je teplota vnitřního zdiva T6 a pokud je místnost vytápěna tělesem centrálního vytápění, známe také teplotu povrchu otopných těles T2 a venkovní teplota T7. Při regulaci vytápění jsou teploty T1 a T7 vstupními veličinami. Vycházíme ze stavového popisu pro tento náhradní model vytápěného prostoru:

T1	teplota vody vystupující z kotle
T2	teplota povrchu radiátorů
T3	teplota interiéru vytápěného objektu
T4	teplota vnitřní části venkovního zdiva
T5	teplota vnější části venkovního zdiva
T6	teplota vnitřního zdiva
T7	venkovní teplota
Td	dopravní zpoždění mezi výstupem otopné vody z kotle a vstupem radiátorů
C1	tepelná kapacita vody v otopném systému
C2	tepelná kapacita vzduchu v interiéru
C3	tepelná kapacita vnitřního zdiva
C4	tepelná kapacita vnitřní části venkovního zdiva
C5	tepelná kapacita vnější části venkovního zdiva
G1	tepelná vodivost zdroje a radiátorů
G2	tepelná vodivost rozhraní topného tělesa a interiéru
G3	tepelná vodivost rozhraní interiéru a venkovního zdiva
G4	tepelná vodivost venkovního zdiva
G5	tepelná vodivost oken
G6	tepelná vodivost rozhraní interiéru a vnitřního zdiva
G7	tepelná vodivost rozhraní venkovního zdiva a exteriéru

Tabulka 7: Přehled použitých veličin v modelu

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{G_1+G_2}{C_1} & \frac{G_2}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{G_2}{C_2} & -\frac{G_2+G_3+G_5+G_6}{C_2} & \frac{G_3}{C_2} & 0 & \frac{G_6}{C_2} \\ 0 & \frac{G_3}{C_4} & -\frac{G_3+G_4}{C_4} & \frac{G_4}{C_4} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_4}{C_5} & -\frac{G_4+G_7}{C_5} & 0 \\ 0 & \frac{G_6}{C_3} & 0 & 0 & -\frac{G_6}{C_3} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{G_1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{G_5}{C_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_7}{C_5} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_7 \end{bmatrix}$$

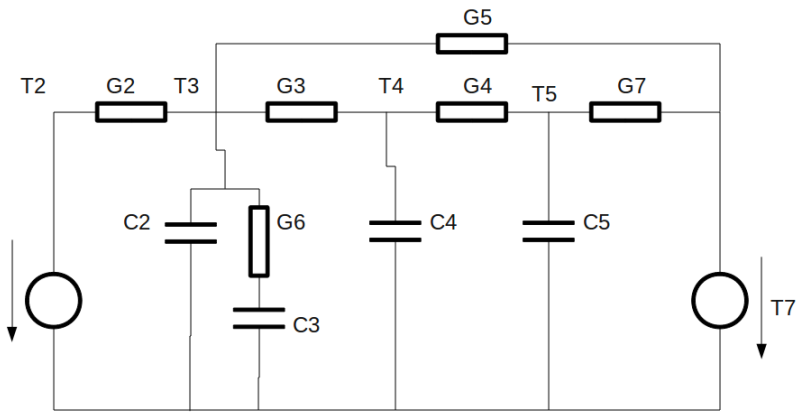
$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 \end{bmatrix}^T$$

Z výše uvedeného modelu vycházíme při odvozování modelů v konkrétních lokalitách.

4.2.1 Místnost na koleji

Model, ze kterého vycházíme při analýze dat je možné zjednodušit o část, která popisuje kotel jako zdroj tepla a zachycuje dynamiku otopné soustavy. Za zdroj tepla můžeme považovat v měřené místnosti přímo otopné těleso. Obrázek č. 45 ukazuje schéma zjednodušeného modelu soustavy.

Můžeme zjednodušit i stavový popis soustavy:



Obrázek 45: Zjednodušený model vytápěné místnosti

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{G_2+G_3+G_5+G_6}{C_2} & \frac{G_3}{C_2} & 0 & \frac{G_6}{C_2} \\ \frac{G_3}{C_4} & -\frac{G_3+G_4}{C_4} & \frac{G_4}{C_4} & 0 \\ 0 & \frac{G_4}{C_5} & -\frac{G_4+G_7}{C_5} & 0 \\ \frac{G_6}{C_3} & 0 & 0 & -\frac{G_6}{C_3} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{G_2}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{G_5}{C_2} \\ 0 & \frac{G_7}{C_5} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_7 \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_3 & T_4 & T_5 & T_6 \end{bmatrix}^T$$

Pro indentifikaci modelu budeme vycházet z dat naměřených v období od 11.3.2010 do 14.3.2010. Průběh vstupních veličin je zachycen na obrázku č. 46.

Při identifikaci je třeba zohlednit také možnost otevření okna. Okno se chová jako vypínač S1 (obrázek č. 47), který nahradí tepelnou vodivost okna tepelnou vodivostí otevřeného okna. Z tohoto důvodu je identifikace prováděná při zavřeném okně.

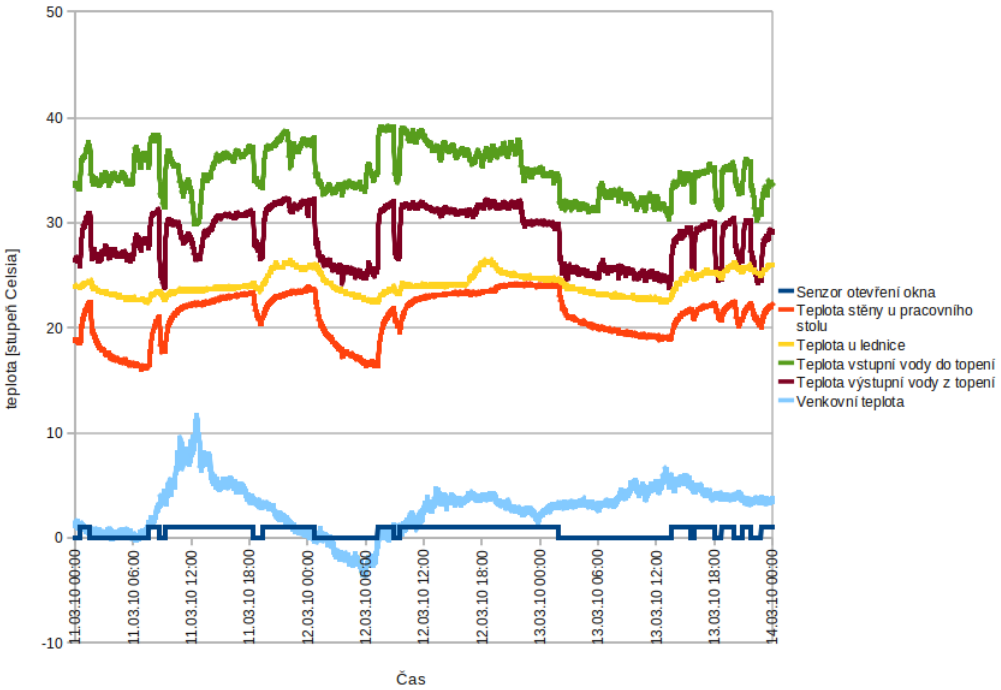
Identifikace byla prováděna metodou Gray-Box identification, která umožňuje specifikovat strukturu stavového popisu modelu a identifikovat neznámé parametry. Identifikace byla prováděna pomocí System Identification toolboxu v programu MATLAB. Vstupní model pro identifikaci je popsán v algoritmu č. 1. Jako vstupní data byla zvolena teplota vstupní vody do topení T_2 a venkovní teplota T_7. Výstupní teplotou systému je teplota v místnosti T_3.

Model identifikovaný pomocí System Identification toolboxu:

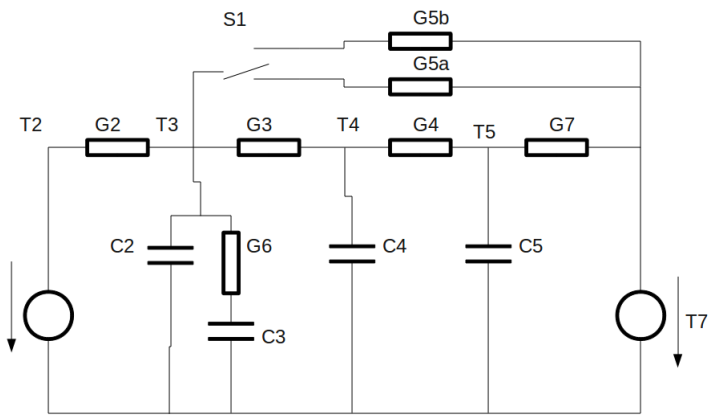
$$\begin{bmatrix} \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -0.016741 & 6.7096e-06 & 0 & 0.090099 \\ 0.1609 & 61.665 & 62.27 & 0 \\ 0 & -61.047 & -61.662 & 0 \\ 0.090101 & 0 & 0 & -0.95447 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} 0.62288 & 0 \\ 0 & 12.339 \\ 0 & 20.158 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_7 \end{bmatrix}$$

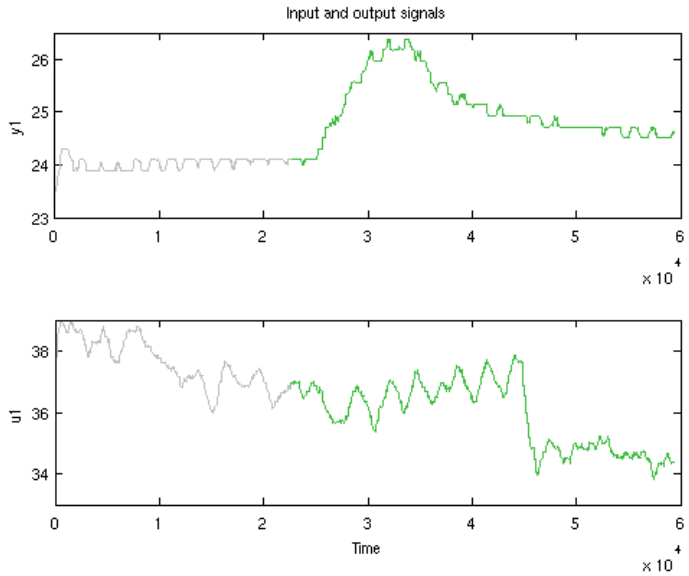
$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_3 & T_4 & T_5 & T_6 \end{bmatrix}^T$$



Obrázek 46: Data z lokality koleje z období 11.3.2010-14.3.2010



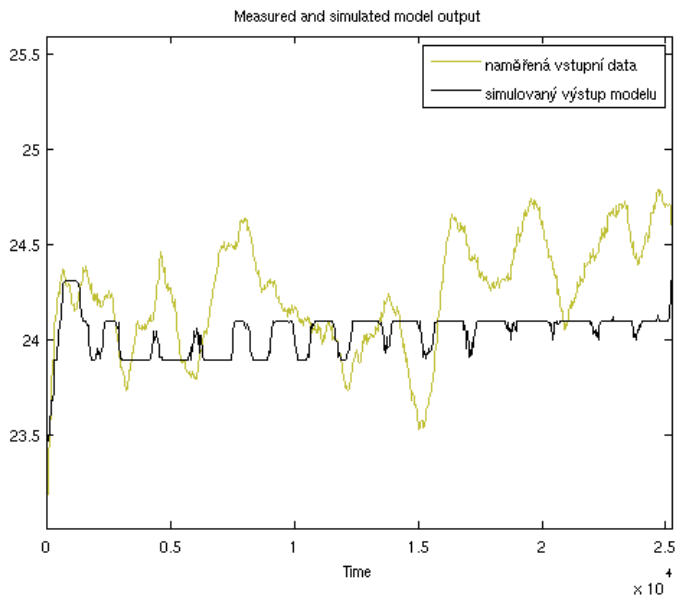
Obrázek 47: Zjednodušený model doplněný o možnost otevření okna



Obrázek 48: Vstupní a výstupní data pro identifikaci systému (šedě). Data pro validaci modelu (zeleně)

Algorithm 1 Definice struktury stavového popisu modelu

```
A = [ -(G2+G3+G5+G6)/C2 G3/C2 0 G6/C2; G3/C4 -(G3+G4)/C4 G4/C4
0 0 G4/C5 -(G4+G7)/C5 0 G6/C3 0 0 -G6/C3];
B = [ G2/C2 0; 0 G5/C2; 0 G7/C5; 0 0];
C = [1 0 0 0]; D = [0 0];
sys = ss(A,B,C,0);
x0 = [20 15 5 20];
m = idss(A,B,C,D);
m.As = [ NaN NaN 0 NaN; NaN NaN NaN 0 0 NaN NaN 0 NaN 0 0 NaN];
m.Bs = [ NaN 0; 0 NaN; 0 NaN; 0 0];
m.Cs = [ 1 0 0 0];
m.Ds = [0 0];
m.x0s = [0;0;0;0];
```

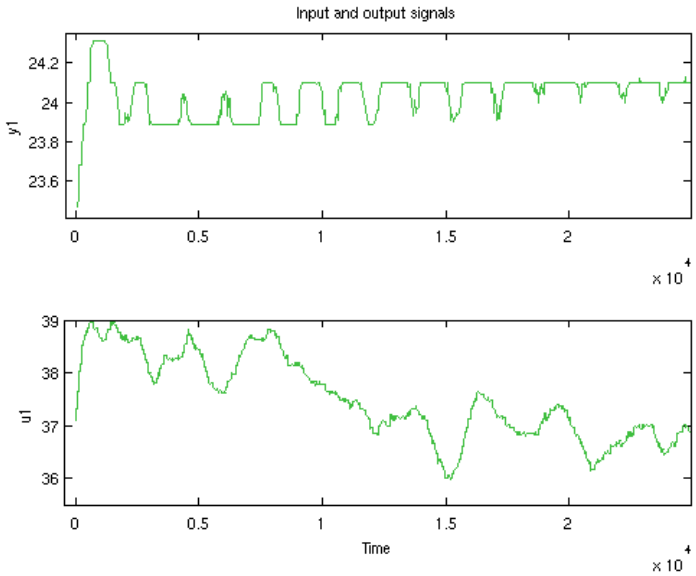


Obrázek 49: Porovnání simulace modelu prostoru koleje a změřených dat

Porovnání simulace s výsledným modelem je k dispozici na obrázku č. 54

Jak je ze simulace patrné výstup identifikovaného modelu příliš neodpovídá modelu zadané místnosti. Pokud porovnáme znaménka parametrů identifikovaného modelu, zjistíme, že neodpovídá fyzikálnímu modelu převzatému z lit. [10]. To je dáno jednak tím, že systém čtvrtého řádu, který je identifikován není vybuzen dostatečně frekvenčně širokým signálem (v dokumentaci System Identification toolboxu se uvádí jako vhodný vstupní signál série náhodných obdélníků). Druhým, ale o to významějším problémem je termostatická hlavice, která reguluje teplotu v místnosti a která znemožňuje identifikaci systému. Důkladnějším rozborem naměřených dat získaných při oteplování místnosti po uzavření okna (obr. č. 48) zjistíme, že po počátečním překmitu na 24,3 °C termostatická hlavice reguluje teplotu v místnosti na 24,1 °C (obr. č. 50). Z grafu teploty místnosti je patrné, že termostatická hlavice reguluje teplotu v místnosti s průběhem tlumených kmitů, kdy perioda kmitů je cca 26 minut. Na měřeném vstupním signálu - teplotě vstupní vody do topného tělesa, však tyto kmity patrné nejsou. Je to dáno tím, že hlavice nereguluje pomocí pulsně šířkové modulace (PWM), kdy by průtok zcela uzavírala a otevírala. Pracuje na mechanickém principu, kdy s růstem teploty dochází k postupnému škrcení průtoku otopným tělesem. Teplota otopné vody, tedy vypovídá o předaném teplu velmi málo informací, protože předané teplo je závislé kromě teploty kapaliny také na průtoku topidlem a při zastaveném průtoku je předané zbytkové teplo velmi malé (viz. kapitola 5.2.4).

Z identifikace vytápění na koleji tedy plyne, že model systému není z naměřených dat možné získat díky tomu, že není možné měřením zjistit aktuální průtok termostatickou hlavicí. Chyba zanesená do systému termostatickou hlavicí je přímo úměrná vstupnímu teplu do systému. Není bohužel proto možné systém bez znalosti aktuálního průtoku topidlem identifikovat.



Obrázek 50: Detail oteplování místnosti po uzavření okna (Teplota místnosti - y1, vstupní teplota do topení - u1, čas v sekundách)

4.2.2 Místnost v bytě

Měřená místnost v pronajatém bytě je vytápěna lokálním přímotopým topidlem (WAV), proto lze model systému přenosu tepla opět zjednodušit obr. č. 47. Při identifikaci modelu místnosti s topidlem vycházím z dat z období 1.3.2011 - 15.3.2011 (obr. č. 51).

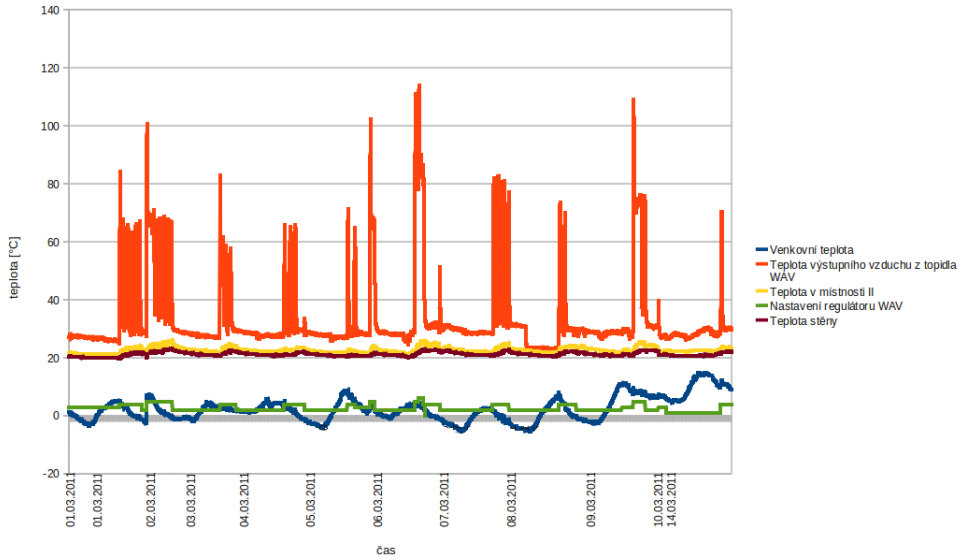
Pokud k identifikaci použijeme System identification toolbox, při známé struktuře stavového modelu, přičemž vycházíme ze zjednodušeného modelu (obrázek č. 45), pak je výsledný model získaný identifikací:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \\ \dot{T}_6 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -0.29633 & 0.027751 & 0 & 0.023186 \\ 0.80489 & 1.264 & 0.8874 & 0 \\ 0 & -1.0941 & -1.4303 & 0 \\ 0.023186 & 0 & 0 & 0.99927 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} +$$

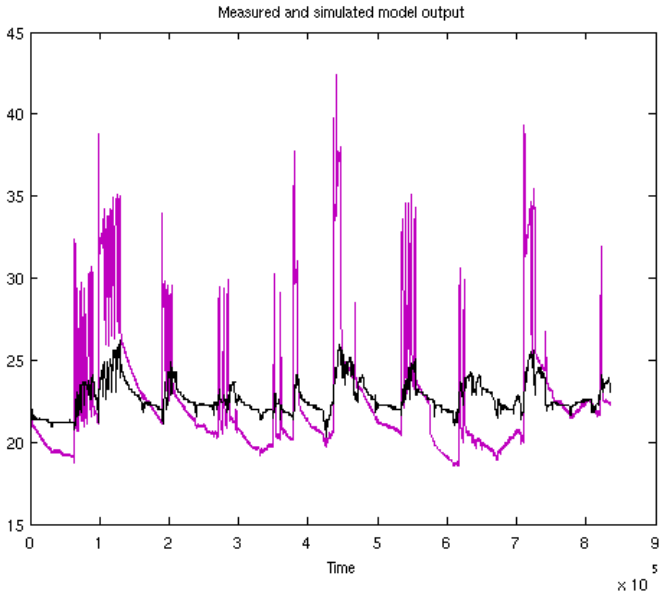
$$+ \begin{pmatrix} 0.26281 & 0 \\ 0 & 0.31783 \\ 0 & 0.19293 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_7 \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_3 & T_4 & T_5 & T_6 \end{bmatrix}^T$$

U modelu je opět patrná chybná identifikace s ohledem na fyzikální chování. Zejména matice A, kde je patrné, že přenosy $T_4 \rightarrow \dot{T}_4$, $T_4 \rightarrow \dot{T}_5$ a $T_6 \rightarrow \dot{T}_6$ mají naprosto opačné znaménko, než ve fyzikálním modelu. Také simulace modelu v porovnání ze změřenými daty ukazuje na chybné parametry modelu (obrázek č. 52).



Obrázek 51: Data z období sloužícího pro identifikaci modelu místnosti



Obrázek 52: Simulace systému identifikovaného pomocí System Identification Toolboxu matlabu (fialově) v porovnání s naměřenými daty (černě)

Špatná identifikace systému je dána třemi důvody:

1. Identifikovaný systém není dostatečně vybuzen - v manuálu k System identification toolbox je uvedena podmínka vybuzení systému v celé šířce frekvenčního pásma, nejlépe sérií náhodných obdélníkových přechodů.

Algorithm 2 Funkce reprezentující IDNLGREY model

```
function [dx, y] = model_m(t, x, u, C2, C3, C4, C5, G2, G3, G4, G5, G6, G7,
varargin)
y = x(1);
dx = [-((G2+G3+G5+G6)/C2)*x(1)+(G3/C2)*x(2)+(G6/C2)*x(4)+(G2/C2)*u(1);
(G3/C4)*x(1)-((G3+G4)/C4)*x(2)+(G4/C4)*x(3)+(G5/C2)*u(2);
(G4/C5)*x(2)-((G4+G7)/C5)*x(3)+(G7/C5)*u(2);
(G6/C3)*x(1)-(G6/C3)*x(4) ];
```

2. Ve výchozím modelu pro identifikaci idss() není možné zohlednit vnitřní vazby mezi parametry systému. Identifikační toolbox optimalizuje jednotlivé parametry v matici A, a není tak zohledněno, že parametry jsou výsledkem matematických operací nad jednotlivými fyzikálními parametry (tepelné vodivosti a kapacity).

3. Systém obsahuje nelineární chování, které není do modelu zahrnuto.

S ohledem na komplikace způsobené použitím parametrického stavového modelu IDSS byl model předělán do struktury IDNLGREY, který umožňuje nelineární vyjádření modelu i vnitřních závislostí jednotlivých parametrů jako jsou tepelné vodivosti a kapacity. Fyzikální chování modelu je zachyceno ve funkci model_m (algoritmus 2), jenž reprezentuje modelovaný systém s jeho parametry a vnitřními stavy. Samotná inicializace modelu a identifiace parametrů je pak volána v samostatném skriptu (algoritmus 3).

Pro tento přístup identifikace není bohužel možné využít žádné rozhraní, které by zjednodušovalo použití identification toolboxu, proto byla nutné prostudovat dokumentaci toolboxu, ani tak se bohužel nepovedlo systém identifikovat - identifikace selhává na nestabilitě vstupního modelu.

Z dokumentace toolboxu a demonstrovaných typů použití nepřímo vyplývá, že hlavní navržený postup při použití modelu typu IDNLGREY je dostatečně propracovaný odvozený model systému se známými parametry a identifikace je v příkladech použitá pouze k jemnému doladění jednotlivých konstant - parametrů modelu podle aktuálně identifikovaného mechanického systému.

Model byl dále zjednodušený (obrázek č. 53) a s respektováním nesymetrie tepelné soustavy byl identifikován ve dvou různých situacích - zahřívání - tedy aktivní topidlo a ochlazování. Toto zjednodušení je možné zejména s přihlédnutím k typu topidla, které spalováním plynu předává teplo přímo proudícímu vzduchu. Tepelný odpor při předávání tepla z topidla do místnosti je tedy minimální a nejvýznamnější tepelnou kapacitou, která se podílí na přenosové funkci při zatápění je tepelná kapacita vzduchu v místnosti. Vytápění lokálním topidlem je tedy velice efektivním a rychlým způsobem zahřátí vzduchu v místnosti a můžeme tedy ohřev aproximovat přenosem prvního řádu.

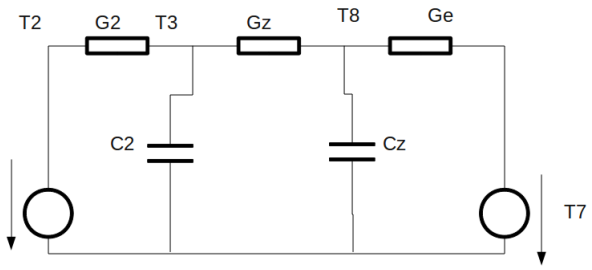
Výsledkem identifikace jsou dva systémy, které jsou ve fyzické místnosti paralelně spojené.

1. Přenos teploty výstupního vzduchu na teplotu v místnosti
   $G_1(s) = \frac{0.1042}{12077s+1}$

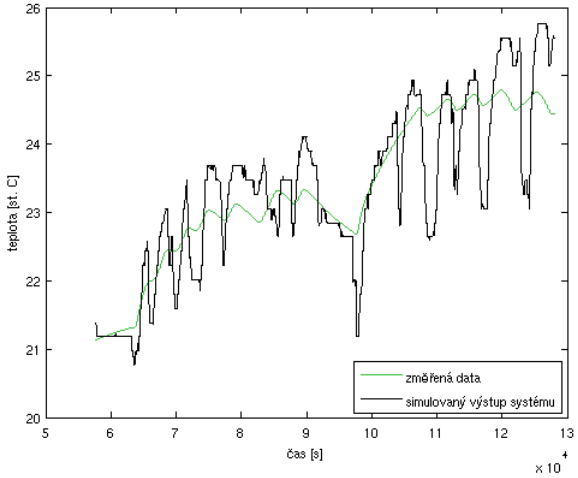
2. A přenos venkovní teploty na teplotu místnosti
   $G_2(s) = \frac{-58.07}{1.215 \cdot 10^8 s+1}$

Algorithm 3 Inicializace IDNLGREY modelu

```
FileName = 'model_m';
Order = [1 2 4];
Parameters = [ 575504 250000 250000 250000 1 0.8 0.17 0.7]'; % C2, C3, C4,
C5, G2, G3, G4, G5, G6, G7
InitialStates = [21.6;18;10;2];
Ts = 0;
nlgr = idnlgrey(FileName, Order, Parameters, InitialStates, Ts, ...
'Name', 'Byt mistnost', ...
'InputName', 'Vstupni teplota', ...
'InputUnit', 'stupen C', ...
'OutputName', 'teplota mistnosti', ...
'OutputUnit', 'stupen C', ...
'TimeUnit', 's');
set(nlgr, 'InputName', {'teplota topeni', 'teplota venku'}, 'InputUnit', 'st C', ...
'OutputName', 'Teplota v mistnosti', ...
'OutputUnit', 'st C', ... 'TimeUnit', 's');
nlgr.Algorithm.SimulationOptions.AbsTol = 1e-6;
nlgr.Algorithm.SimulationOptions.RelTol = 1e-5;
z = iddata(vystup, vstup, 14.5, 'Name', 'Data byt');
set(z, 'InputName', {'teplota topeni','teplota venku'});
set(z, 'OutputName', 'Teplota v mistnosti'); set(z, 'Tstart', 0, 'TimeUnit', 's');
figure;
compare(z, nlgr);
nlgr = pem(z, nlgr, 'Display', 'Full');
present(nlgr);
```

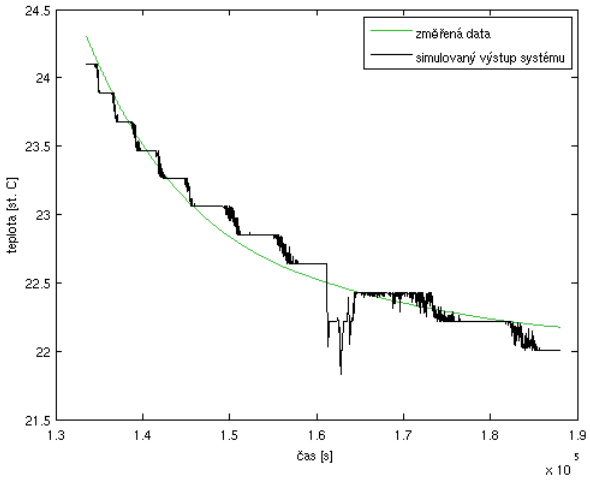


Obrázek 53: Zjednodušený model vytápěné soustavy

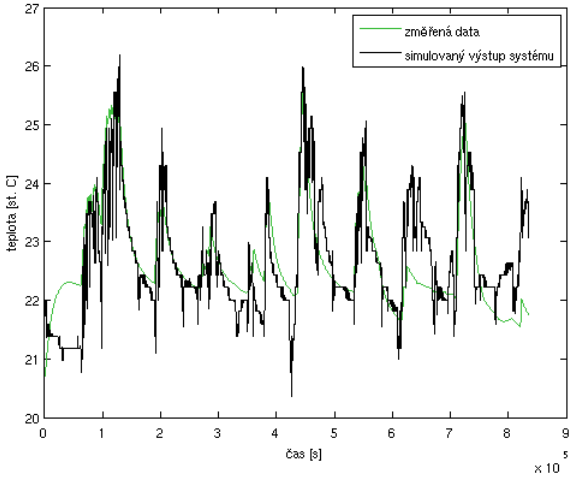


Obrázek 54: Porovnání simulace modelu a změřených dat při zatápění

Spolu tyto dva přenosy velmi dobře aproximují jak zahřívání místnosti (obrázek č. 54), tak její ochlazování (obrázek č. 55), tak i celkové chování systému v daném pracovním bodě (obrázek č. 56). Tuto identifikaci je tedy běžné použít pro modelování systému v pracovním bodě s teplotami vnitřního prostoru $20 \pm 10\,^{\circ}C$ a při venkovních teplotách v rozsahu od -5°C do 5°C.



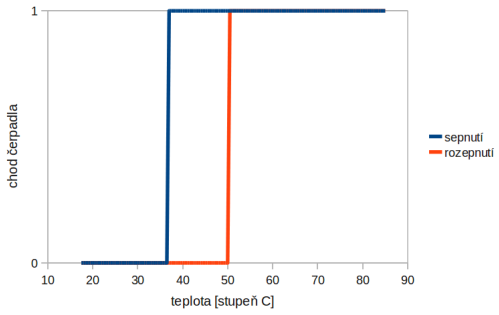
Obrázek 55: Porovnání simulace modelu a změřených dat při ochlazování místnosti



Obrázek 56: Porovnání simulace modelu a změřených dat v delším časovém horizontu

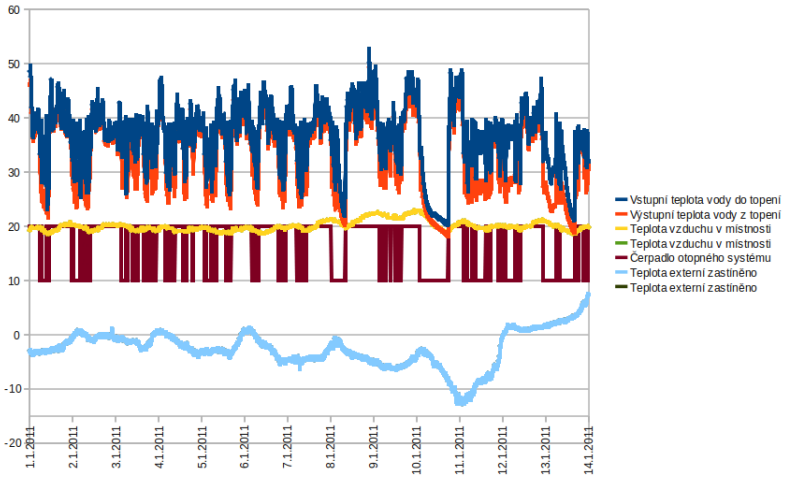
4.2.3 Rodinný dům

Všechna čidla jsou umístěna neinvazivně na povrchu železných trubek, proto lze předpokládat kapacitní chování hodnoty měřené teploty. Na obrázku č. 57 je změřená hystereze regulátoru pomocí umístěných čidel. Je patrné, že kapacita tepelně izolovaných železných trubek při rychlých procesech jako je zatápění výrazně ovlivní chování naměřených údajů. V době, kdy regulátor kotle s čidlem umístěným přímo v odchozí vodě spíná čerpadlo je teplota odchozí trubky pouze 37 °C, naopak při ochlazování otopné soustavy teplota vody poměrně skokově klesne a teplota na povrchu trubky klesá postupně. Změřená hystereze tedy naprosto neodpovídá skutečnému chování otopné soustavy.



Obrázek 57: Změřená hystereze čerpadla

Jak je patrné ze změřených údajů při instalacích teplotních senzorů pro monitorování otopné soustavy je vhodné při rychlých procesech instalovat čidla přímo do teplotních jímek vestavěných do trubek, zvláště je vhodné o teplotních jímkách uvažovat v případě, že systém bude ovládat otopnou soustavu. Také je zde možnost využít teplotních čidel Pt-1000, připojených přímo k do-



Obrázek 58: Data použitá pro identifikaci modelu místnosti v rodinném domě

movní jednotce FOXTROT. Použitím čidla s rychlejší odezvou získáme přesnější informaci o aktuální teplotě.

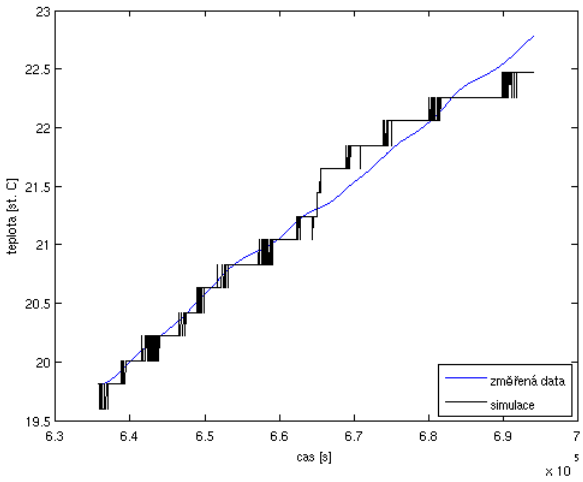
Data pro identifikaci systému byla zvolena z období od 1. ledna 2011 do 14. ledna 2011 (obrázek č. 58). Aby naměřená teplota vstupní vody do otopného tělesa vypovídala o teple dodaném do místnosti, je teplota teplonosného média vyšší než teplota vytápěné místnosti uvažována pouze, pokud je čerpadlo otopného systému v provozu. V opačném případě je za účelem identifikace systému tato teplota nastavena na teplotu místnosti. Pro identifikaci systému byla opět použita aproximace přenosem prvního řádu:

1. Přenos z výstupní teploty topení na teplotu vzduchu v místnosti
   $G_1(s) = \frac{0{,}40318}{1+93347s}$

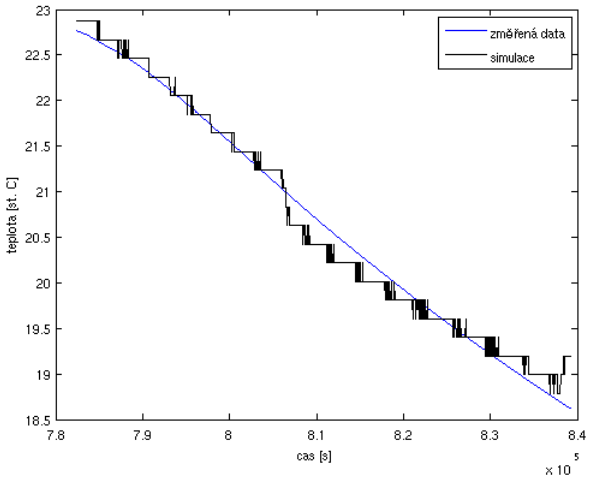
2. Přenos venkovní teploty na teplotu vzduchu v místnosti
   $G_2(s) = \frac{-6{,}7542}{1+66{,}603\cdot 10^5 s}$

Tyto přenosy v paralelním zapojení velmi dobře aproximují chování místnosti. Pro porovnání je uvedena simulace zahřívání místnosti a naměřená data (obrázek č. 59), ochlazování místnosti (obrázek č. 60) a data z delšího časového období (obrázek č.61).

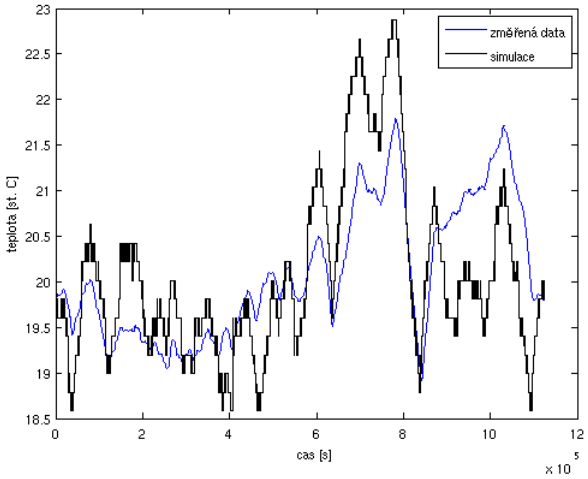
Přestože nebyl úspěšný proces identifikace fyzikálního modelu 4. řádu, povedlo se identifikovat pro místnost v bytě a v rodinném domě dvojici přenosů z vstupních veličin, teploty topidla v době jeho provozu a exteriérové teploty, na výstupní veličinu, která je zajímavá z hlediska obyvatel - teplotu vzduchu v místnosti. Dvojice přenosů působí na systém paralelně, přičemž vyjadřuje „nesymetričnost" soustavy, kdy v době vytápění je oteplování místnosti poměrně rychlým procesem, naopak vychládání ke kterému však dochází s vytápěním zároveň je procesem s mnohem větší časovou konstantou.



Obrázek 59: Simulace vytápění místnosti - porovnání modelu s naměřenými daty



Obrázek 60: Simulace vychládání místnosti - porovnání modelu s naměřenými daty



Obrázek 61: Simulace delšího časového období - porovnání modelu s naměřenými daty

5 Odhad spotřebované energie a tepelného výkonu

5.1 Fyzikální jednotky teploty a tepla

5.1.1 Teplo a kalorimetrická rovnice

Každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K má vnitřní tepelnou energii, kterou je možné měřit jako veličinu teploty. Pokud jsou v prostoru dvě tělesa, mohou si za určitých podmínek předávat teplo, čímž se mění jejich vnitřní teplota. Děj odevzdávání tepelné energie (ochlazování) či přijímání tepelné energie (ohřívání), ke kterému dochází lze popsat kalorimetrickou rovnicí:

$Q_1 = Q_2$

$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t - t_2)$

kde

Q_1, Q_2 je teplo odevzdané prvním tělesem a teplo přijaté druhým tělesem

c_1, c_2 jsou měrné tepelné kapacity prvního a druhého tělesa

t je výsledná teplota těles na konci procesu výměny tepla

t_1, t_2 jsou počáteční teploty prvního a druhého tělesa

Kalorimetrická rovnice vychází ze zákona zachování energie, kdy celková tepelná energie i po výměně tepla musí zůstat v uzavřené soustavě konstantní.

5.1.2 Přenos tepla

Tepelná energie mezi tělesy může být předávána několika způsoby:

1. vedením (kondukcí)
2. prouděním (konvencí)
3. sáláním (zářením, radiací)

Při vytápění obytných místností se uplatňují všechny tyto metody vedení tepla. Ke kondukci dochází převážně v pevných látkách, mezi nejlepší vodiče tepla patří kovy s elektrony ve formě elektronového plynu, tedy kovy, které jsou také dobrými vodiči elektrického proudu. Při vytápění dochází k předávání tepla vedením například při předávání tepla z vnitřní stěny kovu otopného tělesa na jeho povrch. V látkách s dobrou teplotní vodivostí je předávání tepla vedením velmi rychlé. Proto jej můžeme z hlediska analýzy vytápění zanedbat.

Prouděním označujeme šíření tepla v rámci látky s možností volného pohybu molekul. V kapalinách se jedná o nejvýraznější formu přenosu tepla. Například při vytápění se předává prouděním teplonosné kapaliny teplo z kotle do otopných těles. Zde může docházet k proudění samovolnému či nucenému (při použití oběhového čerpadla). Podruhé se teplo prouděním předává ve vytápěné místnosti, kde se je ohřátý vzduch prouděním rozšiřován po vytápěné místnosti. I zde může být proudění samovolné či nucené. V obytných prostorech je však proudění většinou samovolné, založené na přirozeném stoupání teplého vzduchu, který má nižší hustotu než vzduch chladný. Při proudění vždy dochází k přirozenému šíření tepla i procesem vedení, kdy si jednotlivé molekuly kapaliny při vzájemných srážkách předávají energii. Proto je při proudění vzduch postupně ochlazován výměnou tepla s okolním vzduchem a při dosažení ustáleného stavu by měl vzduch v celém prostoru stejnou teplotu.

Při sálání dochází k emisi elektromagnetických vln z povrchu tělesa, čímž dochází k přenosu energie „na dálku" prostřednictvím elektromagnetických vln. Nejznámějším příkladem sálavého přenosu je přenos energie ze slunce na zem. Přenos tepla zářením je možné rozdělit na sálání světlé a tmavé, kdy je sálavé těleso vnímáno podle své povrchové teploty. Pokud nedochází k emisi elektromagnetických vln na frekvencích světelného spektra, jedná se o sálání tmavé. K přenosu tepla sáláním dochází při vytápění elektrickými infrapanely. Pokud je instalováno stěnové či stropní vytápění jedná se také o přenos tepla sáláním.

5.2 Vztahy pro výpočet dodané tepelné energie

Při odhadu dodaného tepla se zaměříme na zdroj tepla v místnosti. Teplo dodané do místnosti slouží uživateli k odhadu nákladu na vytápění v dané místnosti, případně k určení a porovnání nákladů na vytápění pro jednotlivé místnosti. V závislosti na topidle se liší výpočet/odhad dodaného tepla.

5.2.1 Elektrické lokální vytápění

Lokální topidlo, které dodává teplo do místnosti má výrobcem definovaný elektrický příkon a tepelný výkon. Předpokládáme, že topidlo, jehož spotřebu monitorujeme, není vybavené vlastním regulátorem, ale po svém svém zapnutí v ustáleném stavu produkuje teplo úměrné jeho tepelnému výkonu.

Výpočet dodané energie získáme jednoduchým vztahem:

$Q_e = P_v \cdot t$

kde Q_e je teplo dodané spotřebičem do vytápěného prostoru v jednotkách energie [J], P_V je tepelný výkon spotřebiče udávaný v jednotkách Js^{-1} či W a t je doba provozu spotřebiče.

Tepelný výkon spotřebiče je konstantou, která je pro daný typ zařízení dána výrobcem spotřebiče. Doba provozu je veličinou, již je možné měřit prostřednictvím jednotky binárních vstupů (přes elektromagnetické relé měříme dobu po kterou je spotřebič napájen). Druhou možností měření doby provozu je implementace regulátoru místnosti v domovní jednotce Foxtrot, pokud spotřebič ovládáme, tak lze dobu jeho provozu uchovávat pouze přidáním proměnné do programu PLC.

Pro určitý časový úsek vypočteme dodané teplo jako integrál přes požadované časové období:

$Q_e = \int P_v \cdot b(t)\, dt$

kde funkce $b(t)$ je funkce běhu spotřebiče, která v čase nabývá dvou hodnot - 0 pokud spotřebič neběží, 1 pokud je spotřebič v provozu a dodává do soustavy teplo. Protože měřící systém nepracuje ve spojitém čase je třeba vztah ještě upravit pro výpočet v diskrétním čase.

$Q_e = \sum_{t=t_1}^{t_2} \left(P_v \cdot b_{(t)} \cdot T_{s(t)}\right)$

kde T_s je vzorkovací perioda, která nemusí být nutně v čase konstantní, ale může se lišit dle vzorkovací frekvence v daném období

Z důvodu výpočetní náročnosti algoritmu ještě můžeme násobení sumy výkonem spotřebiče vytknout. Tím získáme vzorec použitelný pro realizaci v domovním automatu.

$Q_e = P_v \cdot \sum_{t=t_1}^{t_2} \left(b_{(t)} \cdot T_{s(t)}\right)$

5.2.2 Plynové lokální vytápění

Pokud je plynové vytápění ovládané elektrickým regulátorem, pak je možné využít stejný postup jako v případě elektrického lokálního vytápění, který je popsaný v kapitole 5.2.1.

Pokud se jedná o topidlo regulované pouze mechanickým regulátorem, pak je odhadování předaného tepla pouze velmi orientační. Vhodným kompromisem mezi přesností a náročností měření je měření teploty vzduchu vstupujícího do topidla a teploty vzduchu z topidla odcházejícího.

Aktuálně dodávané teplo určíme podle vztahu:

$Q_p = c \cdot k \cdot \tau \cdot (t_{výstupní} - t_{vstupní})$

kde Q_p je teplo dodané do vytápěné soustavy v J či Ws,

c je měrná tepelná kapacita vzduchu podle lit. [11] se měrná tepelná kapacita suchého vzduchu při normálním tlaku pohybuje v závislosti na teplotě vzduchu mezi $c = 1020\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$pro teplotu 80 °C a $c = 1010\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ pro teplotu 20 °C.

$t_{výstupní}$,$t_{vstupní}$ jsou teploty výstupního a vstupního vzduchu do topidla

k je empirická konstanta jenž odpovídá hmotnostnímu průtoku vzduchu topidlem za čas 1 s. Tuto konstantu je možné dopočítat podle odebíraného výkonu při plné zátěži topidla, nebo zpětným výpočtem za určité období dle tepla skutečně spotřebovaného - dle údaje na plynoměru. Do vztahu dosadíme konstantu v jednotkách $kg \cdot s^{-1}$.

τ čas v jednotkách s.

Pro výpočet tepla dodaného za období použijeme opět výpočet integrálu přes toto období.

$Q_p = \int c \cdot k \cdot (t_{výstupní}(\tau) - t_{vstupní}(\tau)) \cdot d\tau$

Opět vztah transformujeme pro výpočet v diskrétním čase

$Q_e = c \cdot k \cdot \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \left(\left(t_{výstupní(\tau)} - t_{vstupní(\tau)} \right) \cdot T_s \right)$

kde T_s je vzorkovací perioda.

5.2.3 Lokální vytápění na tuhá či kapalná paliva

Teplo spotřebované při vytápění místnosti tuhými či kapalnými palivy je možné pouze odhadovat dle spotřebovaného paliva. V případě vytápění tímto způsobem je nutné si vést jednoduchý přehled množství spotřebovaného dřeva a jeho kvality a spotřebované teplo pak následně uživatelsky odhadnout.

5.2.4 Centrální vytápění s teplovodním rozvodem

Při centrálním vytápění s teplovodním rozvodem jsou v jednotlivých místnostech umístěny topná tělesa. Na tělesech je snímána teplota příchozí a odchozí vody, a pokud se jedná o centrální vytápění s vlastním kotlem, pak máme ještě k dispozici údaj o běhu čerpadla.

Při výpočtu předaného tepla vycházíme ze vztahu:

$Q_c = c_v \cdot m \cdot (t_{výstupní} - t_{vstupní})$

kde Q_c je teplo dodané do soustavy v J či Ws, c_v je měrná tepelná kapacita vody v $J(kgK)^{-1}$, m je hmotnost vody v kg a $t_{výstupní}$,$t_{vstupní}$ jsou teploty vody vstupující a odcházející z otopného tělesa ve °C či K

Protože známe objemový průtok za jednotku času a nikoliv hmotnost kapaliny, je třeba do vztahu dosadit vzorec pro výpočet hmotnosti.

$Q_c = c_v \cdot \rho_v \cdot V_p \cdot \tau \cdot (t_{výstupní} - t_{vstupní})$

Z literatury [12] jsou převzaty výpočtové vztahy pro vlastnosti vody citované v tabulce č. 8. Grafy pro jednotlivé vztahy jsou v rozsahu 10 až 100 °C vykresleny v programu Matlab[9] na obrázcích č. 62 a č. 63. Pro odhad dodaného tepla budou použity zaokrouhlené střední hodnoty v rozsahu 20 až 90 °C.

$c_v = 4180\, J(kg \cdot K)^{-1}$

$\rho_v = 990\, kg \cdot m^{-3}$

V_p je objemový průtok otopným tělesem v m^3 za dobu $1\, s$. Jeho velikost určíme dle hodnoty udávané výrobcem čerpadla.

τ je čas po který k předávání tepla docházelo

Pro odvození vztahu výpočtu tepla předaného za určité časové období, který lze použít ve výpočetním algoritmu v diskrétních výpočetních časech, vypočítáme teplo opět jako integrál za určité časové období. Z důvodu implementace v diskrétním algoritmu výpočet integrálu nahrazujeme výpočtem sumy.

$Q_c = c_v \cdot \rho_v \cdot V_p \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \cdot (t_{výstupní(\tau)} - t_{vstupní(\tau)}) \cdot b_\tau \cdot T_{S(\tau)}$

kde:

b je posloupnost v rozsahu 0,1 uchovávající informaci o běhu čerpadla (0 - čerpadlo neběží, 1 - čerpadlo je v provozu), b_τ je hodnota posloupnosti v čase τ.

T_s je vzorkovací perioda. Pokud se vzorkovací periody v čase liší pak $T_{s(\tau)}$je vzorkovací perioda pro čas τ.

$t_{výstupní(\tau)}, t_{vstupní(\tau)}$ jsou teplota vody vstupnující do otopného tělesa a vody z něj odcházející v čase τ.

V_p je objemový průtok otopným tělesem. V rodinném domě je osazené čerpadlo Grundfos UPS-25-40 180 mm s volitelným počtem otáček ve 3 stupních. Nastavený je první výkonový stupeň. Ten dle dokumentace výrobce [13] při výtlačné výšce 2 m odpovídá průtoku $V_p = 0,5\, m^3 h^{-1} = 13,9 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 0,139 \frac{l}{s}$. Otopný vystém v dvoutrubkovém provedení je rozdělený na 5 větví. Pokud předpokládáme, že větve byly navrženy s rovnoměrnou tlakovou ztrátou, pak v každé větvi je průtok otopným tělesem $V_p = 2,78 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$. Po dosazení odvozených konstant do vztahu získáme pro výpočet v algorimu vztah:

$Q_c = 115 \cdot \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \cdot (t_{výstupní(\tau)} - t_{vstupní(\tau)}) \cdot b_\tau \cdot T_{S(\tau)}\, [J]$

Pokud je čerpadlo otopného systému vypnuté, pak dochází pouze k vychládání vody obsažené v topení. V tomto případě je možné určit předané teplo pomocí vztahu:

$Q_{zbytkove} = c_v \cdot \rho_v \cdot V_{topeni} \cdot (t_{1výstupní} - t_{2výstupní})$,

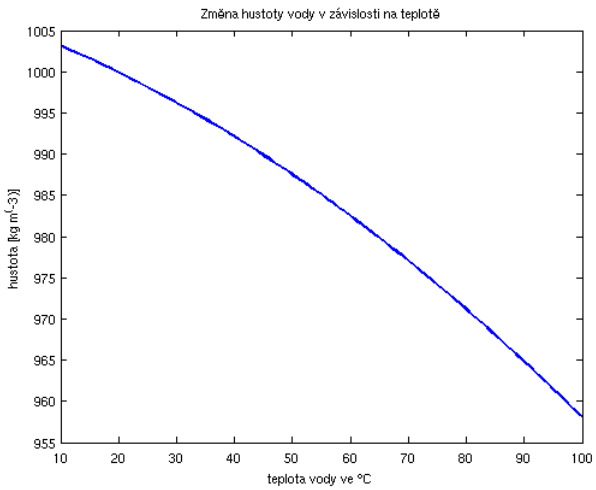
kde V_{topeni} je objem vody v topení v m^3, u typického deskového topení o rozměrech $120x80\, cm$ je objem vody v tělese cca $5\, l$, tedy $0,005\, m^3$při jeho úplném ochlazení ze 60 °C na 20 °C. Vypnuté topné těleso tedy může do místnosti dodat teplo $827,64\, kJ$. Při empiricky zjištěné době ochlazování 12 hodin je to průměrný tepelný příkon $19\, J \cdot s^{-1}$. Při srovnání s průměrným tepelným příkonem v době běhu čerpadla, který je při rozdílu teploty vstupní a výstupní vody 20°C $2,3\, [kJ \cdot s^{-1}]$. Můžeme tento tepelný zisk zanedbat, pokud by v objektu byl elektrický kotel, jednalo by se o zanedbání cca $0,23\, kWh$, tedy při nízkém energetickém tarifu o zanedbání cca 0,5 Kč.

5.2.5 Jiný druh vytápění

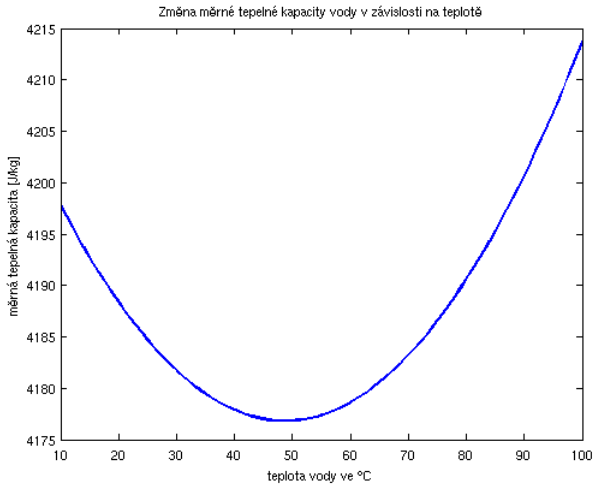
Topidla, která nejsou výše zmíněná je nutné vždy posuzovat individuálně podle typu topidla, informací dodaných od výrobce zařízení a bezpečných možností jeho monitorování.

Vztah pro výpočet fyzikální vlastnosti	Jednotky	Rozsah teplot °C
Měrná hmotnost		
$\rho = 1006 - 0,26 \cdot t - +0.0022 \cdot t^2$	$kg \cdot m^{-3}$	10 až 200
Měrná tepelná kapacita		
$c = (4210 - 1,363t + 0,014t^2)$	$J(kgK)^{-1}$	0 až 200

Tabulka 8: Vybrané výpočtové vztahy pro vlastnosti vody



Obrázek 62: Měrná hmotnost vody v závislosti na teplotě



Obrázek 63: Měrná tepelná kapacita vody v závislosti na teplotě

5.3 Algoritmus pro odhad spotřeby místnosti

Algoritmus měření vytápění byl implementován jako funkční blok programu PLC. Výhoda funkčního bloku je, že každá instance funkčního bloku má přidělen vlastní paměťový prostor a je tedy možné vytvořit pro funkční blok tolik instancí, kolik otopných těles chceme monitorovat. Algoritmus je navržen tak, aby počítal aktuální tepelný výkon, ale také celkový výkon topidla za poslední hodinu, den a měsíc.

Pro možnost práce s časovými daty je do programu třeba přidat knihovnu SySLib (postup přidání knihovny do programu v prostředí MOSAIC je popsán v závěru kapitoly 2.2.1).

Zdrojový kód funkčního bloku pro odhad uveden v příloze č. 8.1 na obr. č. 73. Vstupními parametry funkčního bloku jsou teplota vstupní a výstupní vody, otopného tělesa, binární hodnota určující běh čerpadla a konstanta průtoku otopným tělesem při běhu čerpadla.

Funkční blok může být volán v libovolných intervalech s ohledem na celkové vytížení procesorového cyklu PLC, k jeho volání může být podmíněno pomocí časovače, kdy je funkční blok volán v pravidelných časových intervalech, či čítačem, kdy se výpočet tepla spouští každý n-tý procesorový cyklus PLC. Vzhledem k dynamice monitorovaných procesů je zbytečné volat funkční blok častěji, než v intervalu několika vteřin.

5.4 Prezentace naměřených dat uživateli

5.4.1 Výpis údajů ve vestavěném webovém serveru PLC

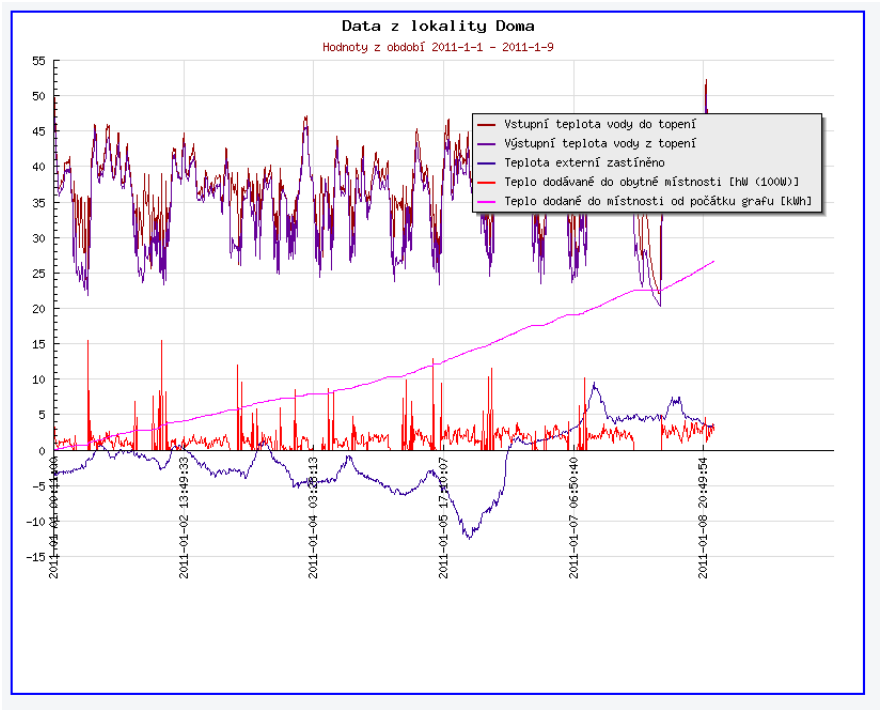
Pro zpřístupnění vypočtených údajů z aktuální doby a z domu, kde je domovní automat instalován, je nejlepší volbou použití vestavěného webového serveru Foxtrotu. Pro zobrazení údajů byla vytvořena nová stránka prostřednictvím nástroje WebMaker, která zobrazuje všechny údaje dostupné z výpočtu spotřeby tepla ve funkčním bloku. Ukázka webové stránky s údaji o dodaném teplu do monitorované místnosti je na obrázku č. 64.

5.4.2 Vykreslení dat na vzdáleném veřejně přístupném serveru

Pro zobrazování dlouhodobějších trendů, pro které PLC již nemá data (např. z důvodu studeného restartu domovní jednotky), je určeno zobrazení spotřeby tepelné energie na centrálním serveru. Zde je implementovaný stejný vzorec výpočtu dodaného tepla jako v případě domovního PLC. Je možné si nechat do grafu společně s jinými údaji ze senzorů vykreslit aktuální přenos tepla pro daný časový okamžik, či nechat vypočítat celkový přenos tepla za dané období (obrázek č. 65).

Výpočet na domovním automatu PLC je vzhledem k aktuálnosti a přesnosti dat velmi dobrým odhadem skutečné spotřeby. Největším zdrojem nejistoty je konstanta průtoku, kterou však lze ale zkalibrovat po vyhodnocení otopné sezóny. Porovnáním skutečně dodaného tepla od dodavatele a tepla odhadnutého jako spotřebovaného upravit koeficient průtoku tak, aby více odpovídal skutečnosti. V optimálním případě je vhodné tepelné senzory doplnit instalovat v jímkách pro teplotní čidla tak, aby senzory byly umístěny v proudu kapaliny s minimálním časovým zpožděním daným tepelnou kapacitou stěny trubky.

Obrázek 64: Zobrazení údajů o spotřebě tepla ve vestavěném web serveru PLC



Obrázek 65: Vykreslení odběru tepelné energie ve webové aplikaci

Další zpřesnění může být dosaženo instalací průtokoměru, díky němuž již v kombinaci s dvěma teplotními čidly úplný kalorimetr.

Odhad spotřeby dopočítávaný centrálním webovým serverem je zatížen značnou chybou způsobenou, nepravidelným vzorkováním. Z tohoto důvodu je vhodné, aby uživatel určil časové konstanty, za které si přeje historii odhadu spotřeby ukládat a tyto výpočty provádět na PLC a data pak odesílat na centrální webový server jako další z procesních dat. Kombinací výpočetní přesnosti PLC s krátkou periodou přepočtu dat a centrálního webového serveru uchovávajícího data je tak možné zkombinovat přesnost odhadu spotřebovaného tepla a možnost jeho jednoduchého a přehledného vykreslení v grafech dostupných přes internet.

6 Regulace vytápění v měřeném prostoru

V předchozích kapitolách bylo hlavním cílem získat přehled o prostoru, který vytápíme a o procesech, které v tomto prostoru probíhají. V této závěrečné kapitole se seznámíme s nejčastěji používanými regulátory, porovnáme jejich chování na modelech získaných analýzou naměřených dat a pokusíme se na základě dosažených znalostí simulovat regulaci vytápění pomocí dalších algoritmů používaných v řídicí technice.

6.1 Prvky sloužící k regulaci vytápění

Při regulaci je třeba, aby v soustavě existovaly akční členy, jejichž prostřednictvím je možné ovlivňovat chování otopného systému. Stejně jako v předchozích kapitolách zde dochází k rozdělení možností regulace podle jednotlivých zdrojů tepla.

6.1.1 Centrální vytápění s vlastním kotlem

Regulace se provádí na úrovni výstupní teploty vody z centrálního zdroje tepla a je velmi závislá na mnoha provozních okolnostech. Nejvýznamnější z nich je samotný zdroj tepla - kotel, který by měl pracovat v režimu, který zajišťuje nejvyšší účinnost provozu z hlediska spotřebovaného paliva, dodaného tepla, nízkou emisi látek znečišťující životní prostředí a také provoz optimální z hlediska životnosti kotle (například litinové kotle na tuhá paliva by z důvodu kondenzace vody neměly trvale pracovat s médiem o teplotě nižší než 80 °C). Tento optimální pracovní bod je třeba navrhnout podle informací od výrobce spotřebiče. Při regulaci je možné využít vnitřní mechanismy regulace kotle, mezi které patří dávkování spalovaného paliva (dřevo, uhlí, plyn), řízení výkonu zdroje tepla (elektrická energie). Při regulaci pomocí vnitřních mechanismů je optimální využít regulátor kotle dodaný spolu s kotlem výrobcem, tím je možné využít odladěného nastavení pracovních bodů kotle od jeho výrobce. S vnitřním regulátorem kotle lze komunikovat buď prostřednictvím protokolu regulátoru (např. OpenTerm), pro který doplníme příslušné rozhraní k domovní jednotce Foxtrot, či v případě jednodušších regulátorů pomocí binárních vstupů a výstupů. Pokud kotel nedisponuje možností regulace spalování, pak je nutné navrhnout regulaci v otopné soustavě. Z hlediska ekonomičnosti provozu je však vhodné vždy preferovat variantu škálování výkonu kotle v kontinuálním provozu před cyklickou dvoustavovou regulací (kotel běží na plný výkon / kotel neběží). Spotřeba paliv je často v těchto režimech velmi různá (např. u plynového kondenzačního kotle může být dosaženo úspory 10-15% při použití regulace na principu škálování výkonu kotle).

Při nemožnosti regulovat činnost zdroje tepla je nutné regulovat teplotu dodávanou do systému pomocí armatur v hydraulickém systému - typicky používanými možnostmi regulace prostřednictvím směšovacích ventilů - obtoky a škrcení. V současné době je velmi moderní a ekonomická možnost regulace prostřednictvím ovlivňování výkonu otopného čerpadla s využitím frekvenčního měniče. Poslední jmenovaná varianta je oproti škrcení a obtoku úspornější z hlediska nákladů na energii dodávanou čerpadlu. Teplota vody v otopném systému se reguluje nejčastěji prostřednictvím ekvitermního regulátoru, který při vytápění zohledňuje teplotu v exteriéru objektu a podle předdefinovaných ekvitermních

křivek odhaduje tepelné ztráty objektu při dané venkovní teplotě. V případě, že je individuálně monitorována teplota v jednotlivých místnostech objektu, pak lze tepelný výkon přizpůsobit aktuálním požadavkům na teplo potřebné pro jednotlivé místnosti, či lze výkon kotle regulovat prostřednictvím tepelné ztráty v otopné soustavě (odečtem rozdílu teploty výstupního média a média vstupujícího do kotle, ale opět v případě, že jednotlivé místnosti jsou osazené vlastním regulátorem). Regulace na úrovni otopné soustavy je rozebrána detailně v literatuře [1, 10, 14] a v našem případě není možné identifikovat model otopné soustavy, proto se regulací výkonu centrálního zdroje dále zabývat nebudeme a zájemci mohou informace získat v citované literatuře.

6.1.2 Regulace teploty v jednotlivých místnostech

Na úrovni jednotlivých místností je velký prostor pro zefektivnění procesu vytápění. V současné době se regulace v místnosti vyskytuje pouze v případě, že se jedná o místnost vybavenou lokálním topidlem, nebo v případě centrálního vytápění pomocí termostatické hlavice ventilu otopného tělesa. Většina rodinných domů vytápěných prostřednictvím centrálního kotle však regulací v jednotlivých místnostech vybavena není.

Výhodami lokální regulace teploty v místnosti jsou:

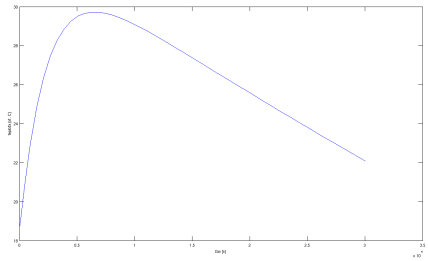
1. Zamezení přetápění místnosti
2. Vyvážené rozdělení vyrobeného tepla mezi jednotlivé prostory [2]
3. Snížení výkonu či možnost dřívějšího vypnutí centrálního kotle po vytopení všech místností na požadované teploty
4. Nastavení individuálních požadovaných teplot v každé místnosti podle aktuálního využití [3]
5. Možnost snížení teploty v aktuálně nevyužívané místnosti

Pro možnost regulace otopných těles v jednotlivých místnostech prostřednictvím centrální jednotky FOXTROT je třeba doplnit pro každé topidlo jednotku pro ovládání termohlavic HC-01B/AC či HC2-01B/DC a k elektricky ovládanou hlavici podle typu ovládaného ventilu.[4] V případě regulace jednotlivých místností prostřednictvím domovního PLC získáváme proti mechanickým termostatickým hlavicím výhodu nastavit pro místnost časový program požadované teploty podle využití dané místnosti (např. snížení požadované teploty v noci, či v pracovních dnech v době nepřítomnosti). Snížení teploty v době nepřítomnosti umožňuje u staveb s velkou tepelnou ztrátou omezit úniky tepla způsobené zbytečným vytápěním nepoužívané místnosti.

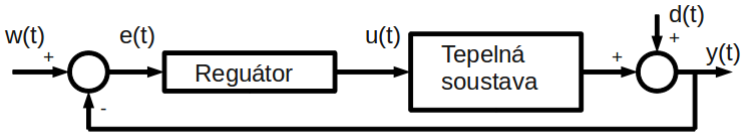
[2] Tím, že nedochází k přetápění místností se teplo spotřebuje v místnostech, které mají vyšší energetické ztráty či poddimenzované otopné těleso.

[3] Teploty mohou být nastaveny uživatelsky kdykoli v případě potřeby. Nastavení teploty místnosti při návrhu otopné soustavy prostřednictvím zvoleného otopného tělesa nemusí být vždy aktuální. Při lokální regulaci je možné si pro konkrétní příležitost nastavit vyšší požadovanou teplotu i v místnostech s nižší výpočtovou teplotou.

[4] V případě, že je elektricky ovládaná hlavice pouze dvoustavová je možné využít také reléový výstup centrální jednotky FOXTROT, či některou z jednotek reléových výstupů na sběrnici CIB (např. SA2-01B).



Obrázek 66: Nesymetrie tepelné soustavy



w(t) ... požadovaná teplota
e(t) ... regulační odchylka
u(t) ... akční veličina
d(t) ... poruchová veličina
y(t) ... regulovaná veličina (teplota v místnosti)

Obrázek 67: Blokové schéma zpětnovazebního regulátoru

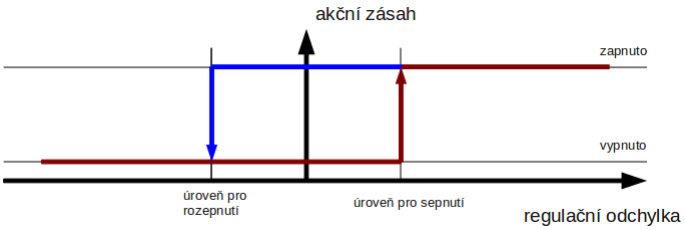
6.2 Algoritmus pro regulaci topidel

6.2.1 Nesymetrie tepelné soustavy

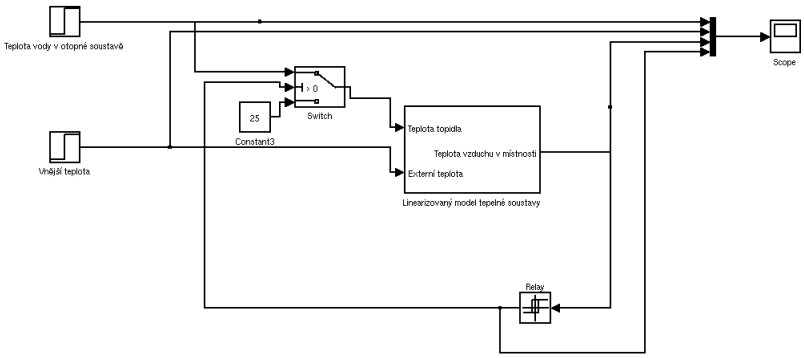
Při regulaci vytápění je třeba dbát na nesymetrii tepelné soustavy, která je dána tím, že zdroj tepla pouze teplo do místnosti předává. Vychládání soustavy je ovlivňováno pouze tepelnými ztrátami místnosti. Proto se při regulaci tepelné soustavy snažíme omezit překmit nad žádanou hodnotu, protože pokud by byla dosažená teplota nekomfortní pro obyvatele, bylo by nutné manuální vyvětrání, které vede k energetickým ztrátám a jistě není cílem kvalitní regulace. Ukázka nesymetrie soustavy simulovaná prostřednictvím modelu získaného z dat v rodinném domě je na obrázku č. 66.

6.2.2 Regulace tepelné soustavy

Pro regulaci tepelné soustavy byl zvolen zpětnovazební regulátor (obrázek č. 67). Důvodů pro zpětnovazební regulaci je více, nejvýznamnějším je nepřesnost linearizovaného modelu, tepelná soustava obsahuje mnoho nelinearit, které není možné do modelu zahrnout, dalším důvodem je pak poruchová veličina, která ovlivňuje výslednou teplotu v místnosti, zde se jedná o všechny veličiny ovlivňující tepelnou soustavu, které nemáme možnost měřit - přítomnost lidí v místnosti, pootevřené okno, přítomnost dalších tepelných zdrojů.



Obrázek 68: Charakteristika regulátoru s hysterezí



Obrázek 69: Schéma regulace teploty v místnosti

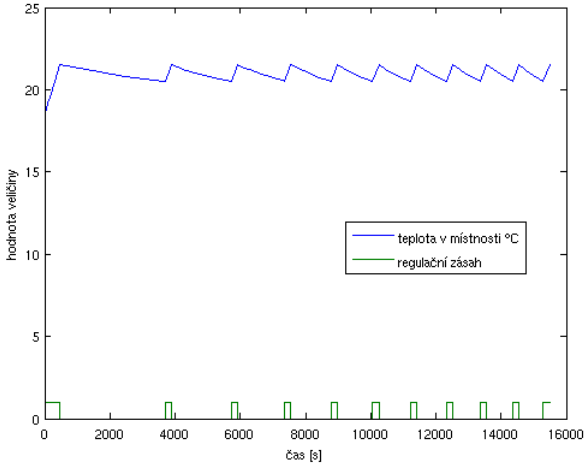
6.2.3 Dvoupolohová regulace

Při regulaci otopných těles vycházíme z možností, které nabízejí regulační ventily. Nejdostupnější elektromagnetické hlavice jsou dvoustavové, proto musíme při regulaci uvažovat, že akční zásah $u(t)$ může nabývat pouze dvou hodnot - otevřeno (1) a zavřeno (0). Výhodou této regulace jsou nižší pořizovací náklady na jednotek výstupů i elektromagnetických hlavic. Při regulaci doustavové soustavy je do regulačního obvodu nutné zahrnout hysterezi (obrázek č. 68). Při regulaci dvoustavové soustavy dochází při dosažení žádaného stavu k periodickým kmitům v okolí požadované hodnoty. Hystereze slouží k prodloužení periody těchto kmitů a tím prodlužuje životnost použitých akčních členů.

6.2.4 Simulace regulace tepelné soustavy

Při zvolení požadované teploty v místnosti 21 °C a regulaci pomocí reléového regulátoru s hysterezí, kdy je nastavená teplota pro uzavření ventilu topení 21,5 °C a teplota pro otevření ventilu topení 20,5 °C. Uvažovaná teplota vody v otopné soustavě je 60 °C a externí teplota -5 °C. Schéma regulačního obvodu je na obrázku č. 69. Průběh regulace je pak znázorněný na obrázku č. 70.

Získaný zjednodušený model soustavy se chová ve svém pracovním bodě podle očekávání. Nedochází k žádným překmitům nad nastavenou hodnotu pro uzavření ventilu a teplota v místnosti se pohybuje ve vymezeném okolí pracovního bodu. Toto chování je značně idealizované a je dáno zjednodušeným modelem soustavy, kde je omezená tepelná setrvačnost otopného tělesa. To je



Obrázek 70: Průběh regulované veličiny

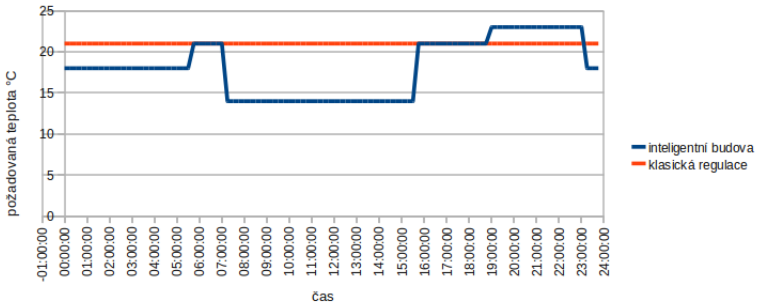
dáno nízkým řádem identifikovaného systému. Při podrobnějším modelu chování vytápěné místnosti by bylo nutné snížit prahovou hodnotu pro uzavření ventilu o velikost překmitu hodnoty pro vypnutí, která by byla dána časovou prodlevou mezi pokynem pro uzavření ventilu a přerušení přenosu tepla do vytápěné místnosti.

6.2.5 Přidaná hodnota pro regulaci v inteligentním domě

Kromě správně nastaveného regulátoru pro lokální ovládání teploty v místnosti je možné přidat další vrstvu řízení, která bude definovat časový plán vytápění jednotlivých prostor. Právě zde se nachází prostor pro dosažení úspor nákladů na vytápění. Zejména v budovách s vyššími tepelnými ztrátami lze vhodným nastavením časového rozvrhu v místnosti dosáhnout znatelných úspor. Na obrázku č. 71 je naznačený možný časový rozvrh místnosti v běžný pracovní den. Průměrná požadovaná teplota místnosti je 18 °C. To je v porovnání s běžnou regulací, kdy celý den požadujeme teplotu v místnosti 21 °C o 14% nižší průměrná teplota a to i v případě, kdy od 19. hodiny zvyšujeme požadovanou teplotu na 23 °C z důvodu dosažení tepelné pohody při pasivním sledování televize. V dobře zatepleném objektu budou úspory dosažené inteligentní regulací nižší vlivem nižších tepelných ztrát, ale přesto je vhodné časový rozvrh místnosti nastavit, protože ceny energií se neustále zvyšují a tak i malá úspora energie může být pozitivním přínosem do rodinného rozpočtu.

6.3 Datová komunikace serveru s PLC

Další prostor pro zlepšení komfortu regulace vytápění spočívá v možnosti vzdáleného ovládání vytápění. Vzdálené ovládání prostřednictvím centrálního serveru není v práci podrobněji rozebíráno z důvodů velké variability možného nastavení. Požadavky na vzdálené ovládání lze velmi individuálně implementovat a je možné podle požadavků uživatele ovládat prostřednictvím nastavení proměnné v PLC jakýkoli aktor připojený k domovnímu systému. Datová komunikace ve



Obrázek 71: Porovnání žádané teploty v místnosti pro klasickou a inteligentní regulaci

směru server -> domovní PLC je zasílána jako odpověď na příchozí požadavek při ukládání provozních dat. Frekvence ovládacích příkazů je omezena frekvencí příchozích dat, ale doručení zprávy s parametry není závislé na struktuře sítě a neklade požadavky na veřejnou IP adresu pro PLC. Na obrázku č. 72 je uveden příklad odeslání proměnné pro PLC.

Z důvodu bezpečnosti je nutné v programu PLC očekávat přijetí konkrétní proměnné s konkrétní hodnotou - není možné podvrhnout jinou proměnnou kritickou pro běh procesů v domě. A také je vhodné, aby program byl schopen bezpečné funkce i v případě výpadku komunikace se vzdáleným serverem. Uvádím zde několik možností, které vzdálené ovládání pro regulaci v inteligentním domě může nabídnout:

1. Možnost zapnutí či vypnutí vytápění (např. v případě ovládání vytápění v rekreačním objektu)

2. Úprava časového rozvrhu požadovaných teplot v jednotlivých místnostech

3. Úprava aktuální požadované teploty ve vytápěné místnosti

4. Zapnutí vytápění v případě nepříznivé predikce venkovní teploty (získané například z meteorologických předpovědí)

5. Ovládání prostřednictvím SMS či prozvonění z autorizovaného telefonního čísla v případě vybavení serveru GSM bránou

Odeslání proměnné ze serveru

```
$topeni_zapnout = true;
if($historie_ulozena) echo "OK";        // stav uložení dat pro archivaci
 else echo "ERR - " . mysql_error();

if($topeni_zapnout) echo "TOPENIAKTIVNI";  // požadavek zapnutí aktivace vytápění
```

Příjem proměnné v domovní PLC jednotce

```
IF HttpRequest.DataReady THEN
   Memcpy(length := min(80, HttpRequest.DataLen),
   source := VOID(DataIn),
   dest := VOID(DataInString));
   aktivacetopeni := false;
   IF FIND(IN1 := DataInString, IN2 := 'OK') > 0 THEN
      PostSuccesful := true;
   END_IF;
   IF FIND(IN1 := DataInString, IN2 := 'TOPENIAKTIVNI') > 0 THEN
      aktivacetopeni := true;
   END_IF;
END_IF;
```

Obrázek 72: Ukázka způsobu přenosu hodnoty proměnné z centrálního serveru do domovního PLC

7 Závěr

Předpokládaný diplomové práce, kterým bylo vybrat hardware a vytvořit software pro monitorování spotřeby tepla v inteligentním domě, byl naplněn. Část práce zabývající se monitorováním vytápěného objektu je možné využít jako návod k implementaci v reálném objektu. Sběr dat byl úspěšně otestován v několika lokalitách (rodinný dům, kolej, místnost v bytě).

Ukládání dat na centrálním veřejně přístupném serveru splňuje cíl dosažitelnosti dat z internetu a jejich uživatelsky přívětivé grafické prezentace a tvoří tak nástroj pro možnost podrobnější analýzy dostupných dat.

Při identifikaci bylo zjištěno, že pro vytvoření přesného modelu je třeba vycházet ze stavebních informací o dané budově. Parametry získané ze stavební dokumentace a od výrobců použitých materiálů lze poté zpřesnit pomocí System identification toolboxu v Matlabu. Tyto údaje o měřených budovách však nebyly pro měřené lokality k dispozici, proto jsou získané modely tvořené pouze přenosy prvního řádu. Pro lokalitu kolej nebylo možné simulační model odvodit, jelikož bylo měření ovlivněno chybou způsobenou neměřitelným termoregulačním ventilem, který vytvářel rušivou veličinu o velikosti tepla dodávaného do místnosti. Pokud je lokalita vybavena mechanickou termostatickou hlavicí je nutné do soustavy osadit průtokoměr, či termostatickou hlavici nahradit elektromagnetickou hlavicí a implementovat tedy vlastní ovládání.

Odhad tepla poskytuje uživateli orientační představu o teplu dodaném do vytápěného prostoru. Jelikož je v současné době měření průtoku pro běžné otopné systémy příliš nákladnou záležitostí, je nutné vypočtený odhad korigovat po zjištění skutečně spotřebovaného tepla od dodavatele energie.

V Simulinku byl simulován získaný model vytápěného prostoru a realizován dvoustavový regulátor. Dále byly navrženy možnosti dalšího vylepšení tohoto regulátoru s využitím schopností, které nabízí kombinace domovního PLC Foxtrot v kombinaci s veřejně přístupným webovým serverem.

Práce prokázala možnost realizace monitorování spotřeby tepla a regulace teploty v místnosti v inteligentním domě s použitím teplotních čidel v jednotkách, které lze použít pro ovládání spotřebičů při běžném provozu inteligentní budovy.

Téma diplomové práce jsem si vybral z důvodu získání vyšších znalostí o inteligentních budovách a zejména o jejich vytápění. Při vypracování diplomové práce jsem se seznámil s programováním PLC Tecomat Foxtrot a získal mnoho dalších vědomostí, které jak doufám, dále zužitkuji ve svém dalším profesním rozvoji.

8 Přílohy

8.1 Zdrojový kód funkčního bloku PLC pro odhad dodaného tepla

```
FUNCTION_BLOCK fbVypocetTepla
(*funkcni blok, ktery pocita teplo dodane otopnym telesem
 *)
  VAR_INPUT
   teplota_vstupni : REAL;
   teplota_vystupni : REAL;
   beh_cerpadla: BOOL;
   konstanta_prutoku : REAL := 0.0000277;
  END_VAR
  VAR
   cv : REAL := 4180;
   ro : REAL := 990;

   posledni_vzorek_time  : TIME;
   inicializovano : BOOL := false;
  END_VAR
  VAR_OUTPUT
   teplo_aktualni_vykon : REAL;
   teplo_hodina : REAL;
   teplo_den : REAL;
   teplo_mesic : REAL;

   posledni_aktualizace_hodina : TIME;
   posledni_aktualizace_den : DATE_AND_TIME;
   posledni_aktualizace_mesic : DATE_AND_TIME;
   perioda_vzorku : TIME;
   perioda_ciselne : REAL;
   teplo_aktualni_vzorek : REAL;
  END_VAR
  VAR_TEMP
   cas_prave_ted : TIME;

   datum_prave_ted : DATE_AND_TIME;
   todatum_prave_ted : TTecoDateTime;
   todatum_minule : TTecoDateTime;
  END_VAR

  cas_prave_ted := GetTime();
  datum_prave_ted := GetDateTime();
  //inicializovano := false;
  if inicializovano = false then
     posledni_aktualizace_hodina := cas_prave_ted;
     posledni_aktualizace_den := datum_prave_ted;
     posledni_aktualizace_mesic := datum_prave_ted;

     teplo_hodina := 0.0;
     teplo_den := 0.0;
     teplo_mesic := 0.0;

     inicializovano := true;
  end_if;


  perioda_vzorku := cas_prave_ted - posledni_vzorek_time;
  perioda_ciselne := (TIME_TO_REAL(perioda_vzorku)/1000.0);
  if beh_cerpadla = true then
     teplo_aktualni_vykon := konstanta_prutoku*cv*ro* (teplota_vstupni - teplota_vystupni);
  else
     teplo_aktualni_vykon := 0.0;
  end_if;
  teplo_aktualni_vzorek := (teplo_aktualni_vykon*perioda_ciselne)/3600.0;
  teplo_hodina := teplo_hodina + teplo_aktualni_vzorek;
  teplo_den := teplo_den + (teplo_aktualni_vzorek/1000.0);
  teplo_mesic := teplo_mesic + (teplo_aktualni_vzorek/1000.0);
  //posledni_aktualizace_hodina := (cas_prave_ted - posledni_aktualizace_hodina);
  IF (cas_prave_ted - posledni_aktualizace_hodina) > T#01:00:00 then
     teplo_hodina := 0.0;
     posledni_aktualizace_hodina := GetTime();
  END_IF;
  todatum_prave_ted := DT_TO_TecoDT(IEC_DT := (datum_prave_ted));
  todatum_minule := DT_TO_TecoDT(IEC_DT := (posledni_aktualizace_den));
  IF (todatum_prave_ted.day > todatum_minule.day) OR ((todatum_prave_ted.day < todatum_minule.day) and ...
     teplo_den := 0.0;
    // posledni_aktualizace_den := GetDateTime();
  END_IF;
  todatum_prave_ted := DT_TO_TecoDT(IEC_DT := (datum_prave_ted));
  todatum_minule := DT_TO_TecoDT(IEC_DT := (posledni_aktualizace_mesic));
  IF (todatum_prave_ted.month > todatum_minule.month) or ((todatum_prave_ted.month < todatum_minule.month) and ...
     teplo_mesic := 0.0;
     posledni_aktualizace_mesic := GetDateTime();
  END_IF;

END_FUNCTION_BLOCK
```

Obrázek 73: Zdrojový kód funkčního bloku PLC pro odhad tepla dodaného radiátorem centrálního vytápění do místnosti

8.2 Obsah přiloženého CD

- Elektronická verze diplomové práce ve formátu PDF
- Adresář „zdrojove_kody_PLC”se zdrojovými soubory kódu PLC pro sběr dat z lokality
- Adresář „ukladani_server” se zdrojovými kódy PHP pro ukládání dat na centrálním webovém serveru
- Adresář „matlab” se zdrojovými daty a kódy použitými při identifikaci modelů a simulaci regulace vytápění
- Adresář „web_rozhrani” se zdrojovými kódy webové prezentace naměřených dat uživateli

9 Seznam literatury

Reference

[1] Brož, Karel Doc. CSc.: Vytápění, Dotisk prvního vydání, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998, ISBN 80-01-01313-8, 205 stran

[2] Český statistický úřad: Vydání a spotřeba domácností statistiky rodinných účtů za rok 2009, Kód publikace: 3001-10, ISBN – 978-80-250-2028-9, zveřejněno dne 21.6.2010, dostupné on-line [http://www.czso.cz/csu/2010edicniplan.nsf/p/3001-10]

[3] VIPA cz s.r.o.: Popis indikátorů VIPA C a VIPA CT, poslení aktualizace 24.8.2010, citace 6.5.2011, dostupné on-line [http://www.vipa.cz/popis.php]

[4] 372/2001 Sb. pravidla pro rozúčtování nákladů na tepelnou energii, 2001

[5] Teco a.s.: Základní modul foxtrot CP-1004, dostupné on-line [http://www.tecomat.com/index.php?ID=292]

[6] ELKO EP: Jednotky systému Inels, 2011, dostupné on-line [http://inels.cz/index.php?sekce=produkty&akce=show&id=56]

[7] Teco a.s.: Vývojové prostředí pro PLC TECOMAT - MOSAIC, dostupné on-line [http://www.tecomat.com/index.php?a=cat.311]

[8] Google: Aplikace Google SketchUP je 3D pro každého, aktualizováno 2011, citováno 20.4.2011, dostupné on-line [http://sketchup.google.com/]

[9] MathWorks Inc.: Matlab - The Language Of Technical Computing, 1994 - 2011, dostupné on-line [http://www.mathworks.com/products/matlab/]

[10] Kirchman B. CSc.; Bayer J. CSc.: Vytápěncí systémy budov, Automatizace, ročník 47, číslo 2, únor 2004, ISSN 0005-125X

[11] TZB-info.cz: Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa, citováno 15.4.2010, dostupné on-line [http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa]

[12] TZB-info.cz: Vybrané výpočetní vztahy pro vlastnosti vody, on-line [http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/41-vybrane-vypocetni-vztahy-pro-vlastnosti-vody]

[13] Grundfos: Otopné a horkovodní systémy, citováno 20.4.2010, on-line [http://www.grundfos.cz/web/homecz.nsf/Webopslag/MTRA-763JXD]

[14] Bašta Jiří: REGULACE VYTÁPĚNÍ, září 2002, Vydavatelství ČVUT, vydání první, ISBN 80-01-02582-9, 99 stran

[15] Doubrava J. a kol.: Regulace ve vytápění, Sešit projektanta - pracovní podklady 6, Společnost pro techniku a prostředí - Odborná sekce 02 vytápění, druhé přepracované vydání, STP 2007, ISBN 978-80-02-01951-0