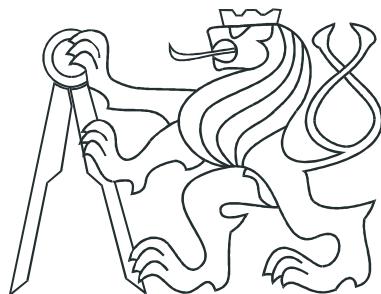


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizační algoritmy řídicích systémů
inteligentních budov



Praha, 2005

Alena Pivoňková

Prohlášení

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. , o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

..... podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala především vedoucímu mé diplomové práce ing. Jaroslavu Honců za čas, který mi věnoval a za cenné připomínky a rady, které přispěly k vylepšení této práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Bedřichu Duškovi CSc bez jehož pomoci, rad a odborných připomínek by tato práce nemohla vzniknout. Můj vděk patří také všem, kteří mě při této práci i studiu podporovali.

Abstrakt

V diplomové práci je popsána koncepce integrovaného řídicího systému inteligenční budovy. Důraz je kladen na komunikativnost formou komunikační brány a standardních protokolů, jako je EIB, LonWorks nebo BACnet.

V práci je analyzován algoritmus omezování spotřeby a přesouvání zátěží podle čtvrtodenního maxima a je ukázáno na jeho význam pro snížení provozních nákladů.

V práci je sestaven simulační model otopného systému pro realizaci nové varianty algoritmu optimálního spouštění a odstavování při zachování teplotního komfortu, který však přesahuje rámec této práce. Je vyhodnocen stávající algoritmus konkrétní budovy. Naměřené hodnoty potvrzují významnou úsporu energie na vytápění objektu dosahující 23 procent v porovnání s běžnou ekvitemní regulací a nočními a víkendovými útlumy.

V práci je navržena grafická prezentace optimalizačních algoritmů na dispečerských pracovištích inteligentních budov pomocí schémat představujících řízenou technologii s různými variantami přehlednosti a detailního zobrazení. Klasická barevná dynamizovaná grafická schémata a trendy byly doplněny přehlednou vizualizací velkého množství aktuálních a historických dat formou "Hvězdného pole", Řeky času a Barevného spektra. Takové pojetí vizualizace umožňuje dispečerům rychlé a efektivní rozhodování v krizových situacích a zároveň jim poskytuje koncentrovanou informaci z celého řízení.

Abstract

The paper describes a concept of the integrated control system for the intelligent building. It accentuates the connectivity using a gateway and standard communication protocols like EIB, LonWorks or BACnet.

The paper analyses the algorithm of the demand limiting and load rolling according to consumption maximum of 15 minutes and shows its importance for the decreasing of operating costs.

Further more, it occupies the optimal start/stop algorithm for the heating/cooling room comfort. It builds a simulation model of the heating system for development of an original algorithm. However it goes over the framework of this work. A current algorithm for real facility has been estimated. The measured data confirms a significant energy savings for the building heating that reaches 23 percent in comparison with a conventional controller with outside temperature reference and night/weekend set point biases.

The work designs a graphic presentation of the optimization algorithms in operating control rooms of intelligent buildings using plant technology diagrams with various detailed views. The classical dynamic colour graphics and trends were enhanced with transparent visualisation of enormous amounts of actual and historical data using Starfield Display, River of Time and Colour Spectrum applications for users, this approach allows to make quicker and better decisions in critical situations and the simultaneously it provides comprehensive information from the complex intelligent building control algorithms.

Obsah

1	Úvod	1
2	Koncepce inteligentní budovy	4
2.1	Inteligentní budova a její řídicí systém	4
2.2	Sběrnicový systém EIB	9
2.3	LonWorks technologie	11
2.4	Komunikační protokol BACnet	14
3	Algoritmus hlídání energetického maxima	16
3.1	Čtvrtodinové energetické maximum	16
3.2	Čtvrtodinové technické maximum	17
3.3	Regulace energetického maxima	17
3.4	Algoritmus omezování spotřeby a přesouvání zátěží a jeho analýza . .	19
4	Algoritmus zachování teplotního komfortu	25
4.1	Automatická regulace tepelných soustav	25
4.2	Způsoby regulace teploty	26
4.2.1	Nespojitá regulace	27
4.2.2	Spojitá regulace	27
4.2.3	Vlečná regulace	28
4.3	Ekvitermní regulace	28
4.4	Analýza hlídání teplotního komfortu	30

4.4.1	Algoritmus optimálního spouštění a odstavování	30
4.4.2	Analýza efektivnosti stávajícího optimalizačního algoritmu	31
4.5	Řízení teplotního komfortu jako optimalizační úloha	33
5	Návrh modelu otopného systému	35
5.1	Tepelné ztráty budovy	35
5.2	Sdílení tepla	38
5.2.1	Sdílení tepla vedením	39
5.2.2	Sdílení tepla prouděním	39
5.2.3	Prostup tepla stěnou	40
5.2.4	Prostup tepla při stálých teplotách prostředí	41
5.2.5	Sdílení tepla sáláním	42
5.3	Otopná tělesa	42
5.4	Náhradní elektrické schéma vytápěného objektu	43
6	Simulační počítačový model vytápěného objektu	47
6.1	Návrh PID regulátoru	49
7	Grafická prezentace	51
7.1	Návrh vizualizace technologických celků	51
7.2	Vizualizace aktuálních a historických dat	60
7.2.1	”Hvězdné pole”	60
7.2.2	Řeka času	62
7.2.3	Barevné spektrum	63
8	Závěr	65
Literatura		66

Seznam obrázků

1.1	Profil inteligentní budovy	2
2.1	Architektura systému pro automatizaci a správu budov	7
2.2	Distribuovaná architektura	9
2.3	Řídicí systém se začleněnou architekturou sběrnice EIB	10
2.4	Sběrnicová a hvězdicová topologie	11
2.5	Kruhová a kombinovaná topologie	12
2.6	Základní komponenty sítě LonWorks	13
2.7	Fyzická topologie sítě LonWorks	14
2.8	Architektura komunikačního protokolu BACnet	15
3.1	Průběhy režimů regulačních procesů	19
3.2	Průběh aktuálního odběru	20
3.3	Průběh aktuálního odepnutí	20
3.4	Průběh maximálního hodinového odběru	21
3.5	Průběh maximálního denního odběru	21
4.1	Základní blokové schéma regulačního obvodu	26
4.2	Hlídání teplotního komfortu [13]	29
4.3	Ekvitemní závislost a PID regulátor v kontroleru DX-9100	29
4.4	Optimální start	30
4.5	Optimální stop	31
4.6	Průběh prostorové teploty ve filmovém objektu Barandov	32

5.1	Náhradní elektrické schéma vytápěného objektu	44
6.1	Simulační model objektu	48
6.2	Přechodová charakteristika	48
6.3	Frekvenční charakteristika modelu otopného systému	49
6.4	Výsledný průběh teploty	49
6.5	Průběh prostorové teploty v závislosti na externí teplotě	50
7.1	Návrh grafické prezentace	52
7.2	Návrh grafické prezentace se zobrazenými detailem	54
7.3	Detail ekvitemrní křivky	56
7.4	Přehled spotřeb a odepnutých zátěží	57
7.5	Zobrazení trendu	59
7.6	”Hvězdné pole”	61
7.7	Řeka času	63
7.8	Barevné spektrum	64

Seznam tabulek

7.1 Vlastnosti hvězd a vizualizovaných veličin	62
--	----

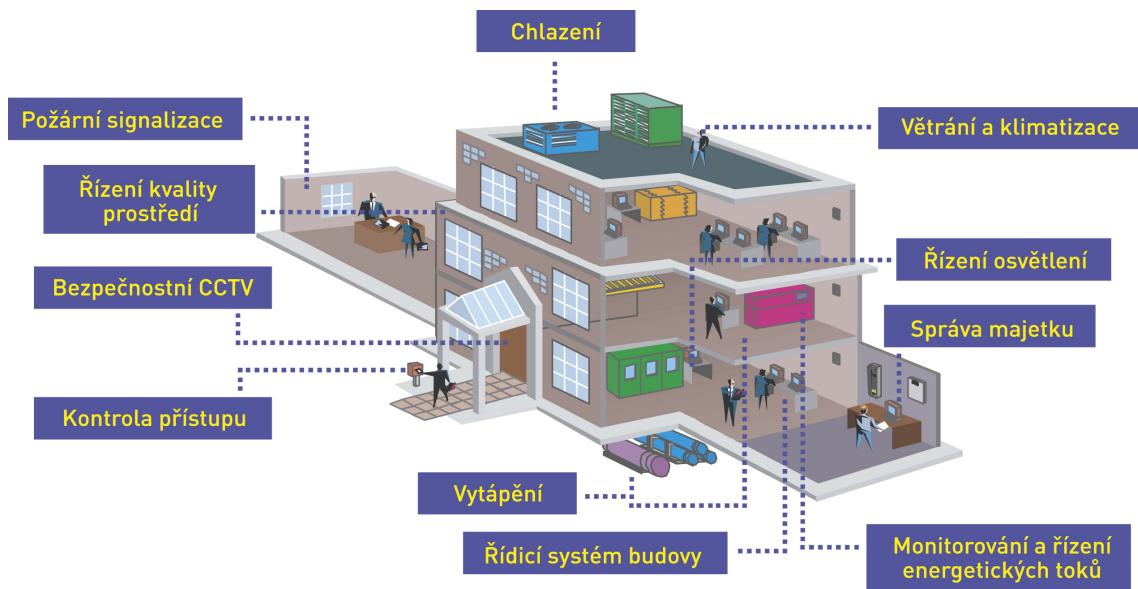
Kapitola 1

Úvod

V současné době jsou na všechny typy budov kladený vysoké nároky provozovatelů či investorů, které jsou zaměřeny:

- a) na úsporu investičních prostředků,
- b) na minimalizaci provozních nákladů a spotřebu energie,
- c) na minimalizaci nákladů na údržbu, opravy a rekonstrukce.

Tyto náklady jsou provázány s požadavky uživatelů - nájemců vyžadujících od budovy kromě hospodárného provozu i komfort, efektivitu a bezpečí. Kvalitní pracovní prostředí přispívá k vysoké produktivitě práce. Flexibilita prostoru umožňuje reagovat na změny potřeb uživatelů v budoucnosti a bezpečnost budovy je klíčovým faktorem při ochraně životů lidí a majetku. V objektu, kde dojde ke splnění těchto požadavků sjednoceným systémem řízení, zabezpečení a správy budovy mluvíme o "Inteligentní budově" (viz. Obrázek 1.1).



Obrázek 1.1: Profil inteligentní budovy

V literatuře lze najít řadu definicí pojmu ”inteligentní budova”, více či méně odlišných podle důrazu na technickou či systémovou stránku problému. Všechny však vyzdvihují multidisciplinární přístup k projektování a realizaci budovy.

Výstižná definice je uvedena v [14].

Inteligentní budovy jsou objekty s integrovaným managementem, tj. se sjednocenými systémy řízení (technika prostředí, komunikace, energetika), zabezpečení (kontrola přístupu, požární ochrana, bezpečnostní systém) a správy budovy (plánování, pronájem, leasing, inventář). Optimalizací těchto složek a vzájemných vazeb mezi nimi je zabezpečeno produktivní a nákladově efektivní prostředí. Inteligentní budova pomáhá vlastníkovi, správci i uživateli realizovat jejich vlastní cíle v oblasti nákladů, komfortu prostředí, bezpečnosti, dlouhodobé flexibility a prodejnosti. Inteligentní budova uspokojuje současné potřeby vlastníka a nájemce budovy a může být jednoduše přizpůsobena jejich rostoucím nárokům v budoucnosti, umožňuje úspory pořizovacích i provozních nákladů.

K vlastnostem řídicího systému inteligentní budovy patří:

- 1) využívání dat získaných z jednoho systému pro činnost ostatních systémů,
- 2) společná správa informací na jednom operátorském pracovišti,
- 3) nezávislost na konkrétním dodavateli,
- 4) energetický management budovy,

5) využívání informací při správě a údržbě budovy.

Diplomová práce podrobněji rozebírá následující otázky:

- * koncepci řídicího systému inteligentní budovy,
- * analýzu programové aplikace omezování spotřeby a přesouvání zátěží podle čtvrtodinového maxima,
- * realizaci algoritmu optimálního spouštění a odstavování topných okruhů a klimatizačních zařízení s cílem dosažení energetických úspor při zachování teplotního komfortu ve zvolené místnosti,
- * návrh grafické prezentace optimalizačních algoritmů na dispečerském pracovišti.

Kapitola 2

Koncepce inteligentní budovy

2.1 Inteligentní budova a její řídicí systém

Provoz moderních administrativních či jiných veřejných budov zajišťuje řada systémů - řízení vytápění, chlazení a vzduchotechniky, řízení osvětlení, řízení energetické soustavy budovy včetně náhradních zdrojů, řízení výtahů a eskalátorů, požární signalizace (EPS), zabezpečovací systém (EZS), přístupový (kartový) systém, uzavřený televizní okruh, okruh odtahů dýmu a kouře, samozhášecí zařízení, ozvučení budovy, systém řízení osvětlení, jednotný čas a řada dalších systémů.

Z hlediska integrovaného řídicího systému je kladen důraz na několik vlastností, které by měl splňovat: [10]

- 1) Využívání dat získaných z jednoho systému pro činnost ostatních systémů

Například při požárním poplachu vyhodnoceném systémem EPS (elektronická požární signalizace) dochází k využití informace o vzniklému požáru tak, že se spustí požární ventilace, vypne se ostatní vzduchotechnika, uvedou se do požárního režimu výtahy, osvětlí se evakuační trasy a odblokují se únikové východy. Dalším příkladem může být ovládání osvětlení nebo klimatizace jednotlivých prostorů podle stavu jejich obsazenosti, který je vyhodnocen přístupovým systémem. Stejně tak lze díky systému EZS (elektronický zabezpečovací systém) při narušení objektu přepnout na kameru systému CCTV snímací danou zónu, ovládat polohovací hlavice kamer nebo sepnout odpovídající režim videorekordéru, případně zapnout osvětlení daného prostoru.

- 2) Společnou správu informací na jednom operátorském pracovišti

Data z jednotlivých systémů jsou zpřístupněna pro obsluhu v jednotném grafickém prostředí se stejným komfortem zobrazení, s využitím multimediálních technologií spojujících datovou, hlasovou a video komunikaci. Obsluha na celém území budovy nemusí přecházet mezi různými programy instalovanými navíc zpravidla na několik PC, což usnadňuje práci zvláště při řešení nestandardních situací. Způsob prezentace informací může být na vyšší úrovni než zpravidla nabízejí centrální jednotky dílcích systémů. Aplikace moderních způsobů monitorování stavu zařízení zvyšuje efektivitu práce řídícího personálu, informace o aktuálních stavech zařízení je organizována tak, aby obsluha nebyla zbytečně zatěžována množstvím rutinních hlášení, ale přitom byla včas varována při vybočení parametrů z normálního stavu. U rozsáhlejších objektů je možné instalovat více operátorských pracovišť, na kterých bude ovládání a monitorování jednotlivých oblastí rozděleno podle kompetencí příslušných operátorů.

3) Nezávislost na konkrétním dodavateli

Řízení a ovládání velkých budov, která mají více strojoven vzdálených od sebe i stovky metrů, by mělo být realizovatelné z jednoho místa, neboť není možné, aby obsluha pravidelně obcházela rozvaděče a zjišťovala, není-li někde porucha. Další vlastností je snadné vyhodnocení z několika různých systémů na jednom operátorském pracovišti. V budově bývá instalováno více systémů od různých dodavatelů, které je zapotřebí zahrnout pod jednotný ovládací systém, což značně zjednoduší orientaci v jednotlivých technologiích, zvyšuje účinnost práce, snižuje náklady na školení obsluhy a zvyšuje schopnost rychlého zásahu v krizových situacích tak, aby ovládací program nebyl jejich nepřítel, ale efektivní nástroj k ovládání a sledování technologií. Pro lepší pochopení dějů a optimalizaci spotřeby energií je výhodné mít možnost sledovat závislosti veličin, které jsou měřeny různými systémy.

4) Energetický management budovy

Zdánlivě je regulace spotřeby energie problémem ryze ekonomickým a organizačním. Určité úspory lze skutečně dosáhnout vhodnou organizací práce a časovým rozvrhem aktivit pracovišť a doby provozu energeticky náročných spotřebičů. K efektivnímu řešení této problematiky je však nezbytná technická podpora integrovaného řídícího systému budovy.

K důležitým funkcím řídícího systému budovy patří sledování hodnoty technického maxima, smluvně dohodnutého s dodavatelem elektrické energie. Systém zabezpečuje dodržování (nepřekročení) této hodnoty.

Regulační algoritmy umožňují odpínání zátěží nejen podle okamžité hodnoty, ale též podle jejího trendu, tj. podle očekávané spotřeby na konci čtvrt-hodiny.

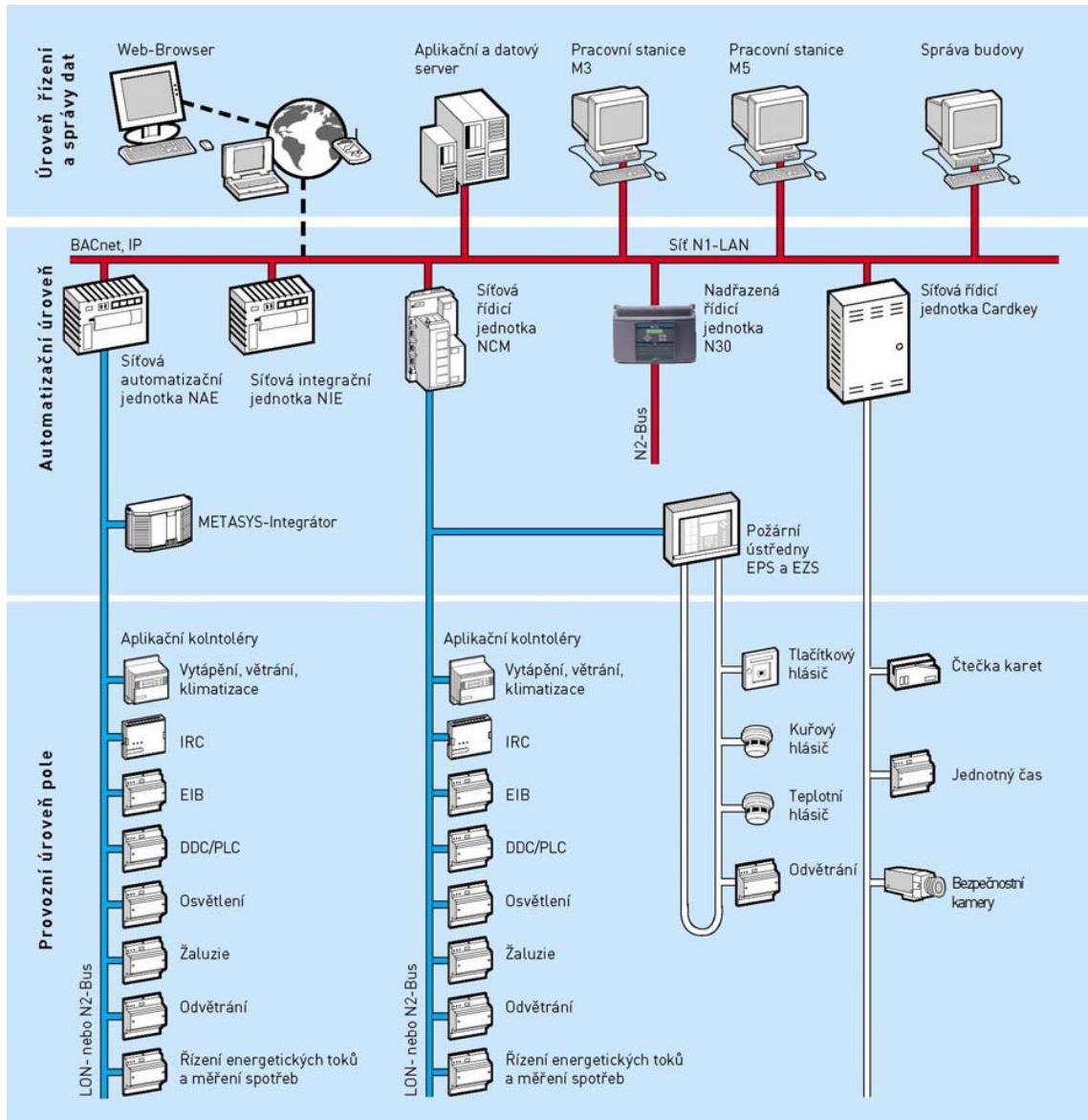
Je nutné si uvědomit, že tato regulace nepřináší absolutní úsporu elektrické energie, krátkodobě odpojené spotřebiče odeberou většinou potřebnou energii později, ale úsporu na platbách při nižším sjednaném technickém maximu odběru.

5) Využívání informací při správě a údržbě budovy

V průběhu své činnosti řídicí systém budovy sleduje a archivuje řadu dat o provozu a funkčních stavech jednotlivých technologických zařízení. To umožnuje provázat tuto databázi se systémem pro plánování a organizaci údržby, tzv. Maintenance Manager.

V systému jsou rozlišeny dva typy servisních činností: preventivní pravidelné prohlídky a vyžádané servisní zásahy (neplánované, zpravidla vyvolané poruchou či cizím zaviněním). Systém sestavuje časové plány preventivní údržby (např. na základě doby chodu jednotlivých zařízení), ve kterých specifikuje pracovní postupy, požadavky na profesi a kvalifikaci pracovníka a seznam náhradních dílů včetně případného speciálního nářadí. V případě vyžádaných servisních zásahů sestaví a vytiskne obdobný požadavek na servisní zásah, doplněný o seznam možných příčin dané závady.

Příklad integrované architektury řídicího systému intelligentní budovy je na Obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Architektura systému pro automatizaci a správu budov

Tato architektura se vyznačuje distribuovanou inteligencí řídicího systému, rozptýlenou po celé budově tak, aby jednotlivé kontroléry byly co nejblíže řízeným technologickým uzlům. Jednotlivé lokální kontroléry jsou v automatizovaném systému řízení propojeny datovou komunikační sběrnicí se zařízením na vyšších úrovních decentralizované struktury. Protokoly pro přenos dat a konkrétní topologie systému řízení se může v detailech lišit podle konkrétního zvoleného řídicího systému.

Nejvíce ve struktuře automatizovaného systému řízení je vždy dispečerská nebo operátorská pracovní stanice. Ta je realizována osobním počítačem, na kterém je implementováno příslušné firemní programové vybavení daného výrobce, chráněné licencí. Uživatelským programovým vybavením, zpracovaným dodavatelem řídicího

systému, je operátorská pracovní stanice přizpůsobena konkrétním požadavkům dané aplikace. Při dodržení decentralizované koncepce řídicího systému, ve které jsou řídicí algoritmy vyšší úrovně zabezpečovány v síťových řídicích jednotkách řešených jako mezistupeň mezi lokálními regulátory (řídicími např. jednotlivá vzduchotechnická zařízení) a dispečerskou úrovní, je operátorská pracovní stanice osvobozena od řídicích a dohlížecích funkcí a slouží pouze jako prostředek pro komunikaci obsluhy s řídicím systémem - k definování nebo zpracování databází, vypracování přehledů a jiné dispečerské funkce. Tato koncepce přispívá ke zrychlení komunikace a zvýšení spolehlivosti systému.

Jednotlivé systémy a zařízení mají své výrobce a dodavatele, kteří často vybavují tyto systémy autonomní automatikou zajišťující optimální provoz zařízení s rozsáhlými možnostmi diagnostiky provozních a poruchových stavů. Automatika systémů je zpravidla založena na mikroprocesorové technice. Prakticky každý takový elektronický výrobek má své vlastní rozhraní pro připojení sériové sběrnice pro komunikaci s osobním počítačem na pracovišti obsluhy, odkud lze efektivně řídit a monitorovat činnost zařízení.

Pro funkci budovy jako celku je však nutný přenos informací mezi jednotlivými systémy. Vazba mezi systémy může být realizována různými způsoby, které se liší rozsahem a kvalitou přenášených informací. Nejjednodušší způsob je přenos diskrétních signálů mezi vstupním a výstupním zařízením jednotlivých systémů. Tyto signály nesou konkrétní informaci, jejíž význam je předem definován již v projektu. Počet takto přenášených informací je fyzicky omezen počtem vstupních a výstupních kanálů, které mají jednotlivé systémy k dispozici, pozdější rozšíření je obtížné, z důvodu zásahu do hardware systémů včetně realizace nových kabelových připojení. Pro komfortní komunikaci s každým ze systémů je pak nutné nasazení vlastního PC na pracovišti obsluhy.

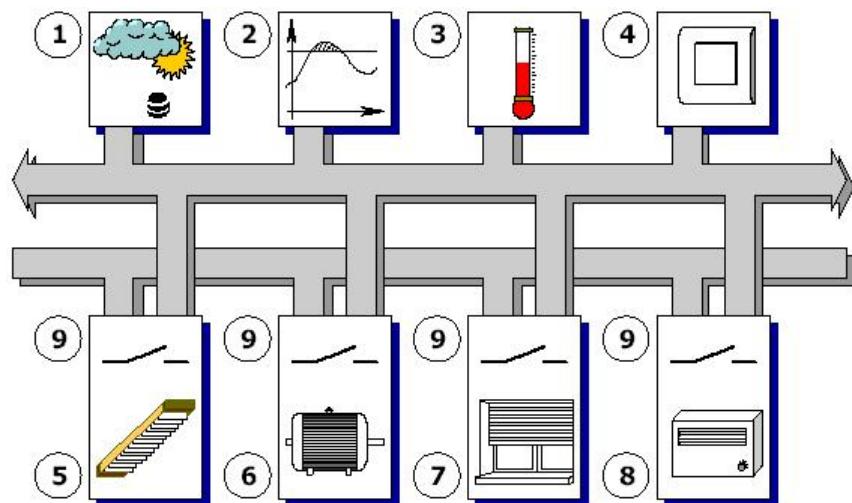
Skutečné propojení činností jednotlivých systémů v rámci "Inteligentní budovy" lze realizovat integrací, tj. propojením systémů prostřednictvím komunikačních kanálů. Tuto propojitelnost lze dosáhnout několika způsoby:

- * využitím brány (gateway), tj. jednotek, které překládají komunikační protokol a data jednoho dodavatele do protokolu a dat jiného dodavatele,
- * sdílenými protokoly, které jsou výsledkem spolupráce dvou nebo více dodavatelů vyvíjejících společný protokol, umožňující obousměrnou komunikaci jejich zařízení,
- * aplikací standardů, universálních protokolů, vyvinutých sdruženími výrobců a

normotvornými organizacemi výrobce, které jsou ve shodě s daným standardem. V současné době je rozpracována řada takových standardů, například BACnet (Building Automation and Control Network), LON (Local Operating Network), EIB (European Installation Bus) a podobně.

2.2 Sběrnicový systém EIB

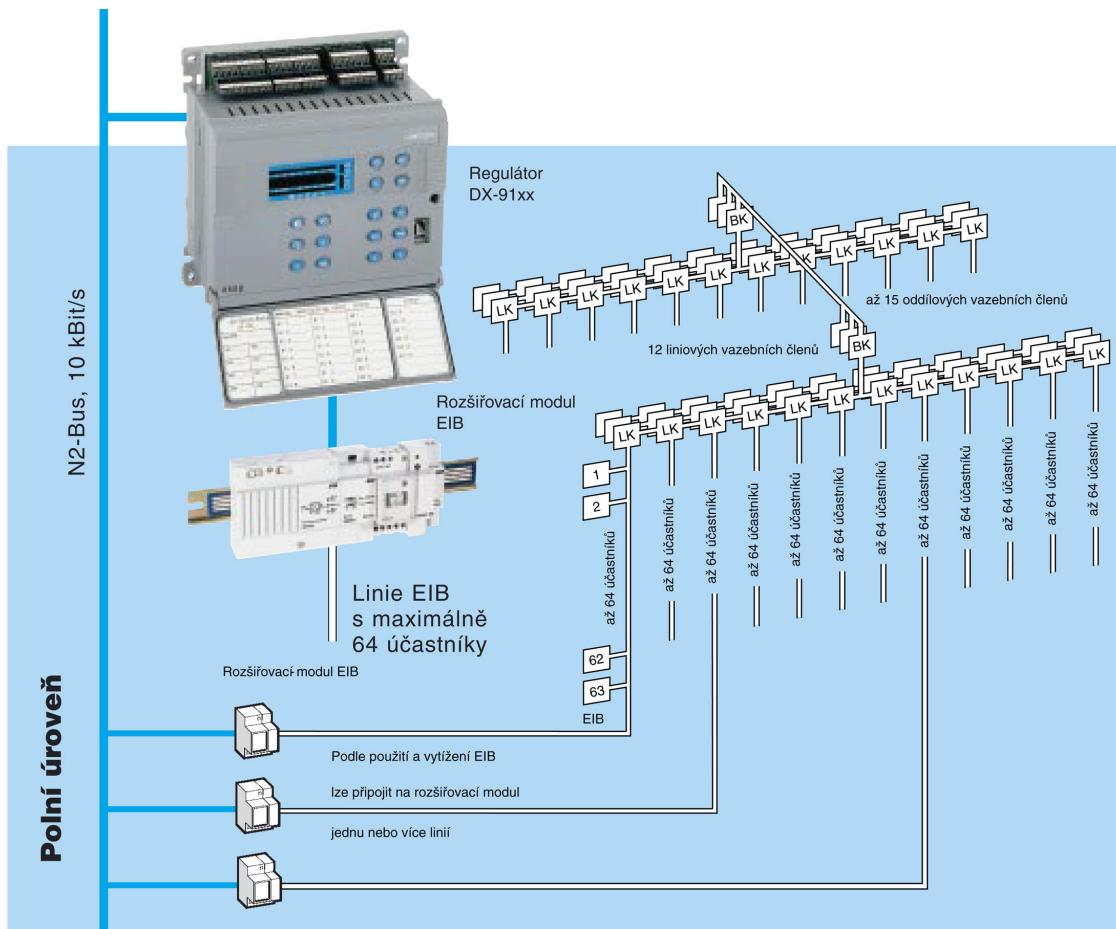
Sběrnicový systém EIB [4], někdy označovaný též jako i-bus nebo instabus, vychází ze společného evropského konceptu, Evropské instalacní sběrnice (standard EN 50 090). Pro projektování a uvádění do provozu se používá software ETS (EIB Tool Software). Sběrnice EIB vytváří jednotnou platformu pro ovládání systémů a zařízení zajišťujících provoz budov (osvětlení, zastiňovací technika, vytápění, klimatizace, zabezpečovací a přístupové systémy, audio/video systémy ...) Obrázek 2.2. Systém založený na sběrnici EIB je programovatelný a rozšířitelný. Jedná se o decentralizovaný automatizační systém s rozprostřenou inteligencí (jednotliví účastníci mají vlastní mikroprocesor a komunikují spolu bez použití centrální jednotky). Páteří zařízení je dvouvodičová datová sběrnice, po níž se přenášejí jednotlivé telegramy.



- | | | |
|--------------------|-------------------|-------------------------|
| 1 Čidlo jasu | 2 Prahová detekce | 3 Teplotní čidlo |
| 4 Monitorování | 5 Osvětlení | 6 Řízení motoru |
| 7 Žaluzie a rolety | 8 Vytápění | 9 Spínací kontakty 230V |

Obrázek 2.2: Distribuovaná architektura

Standard EIB je vytvářen nezávislou organizací EIBA se sídlem v Bruselu. Jednotlivé komponenty systému EIB vyrábí desítky výrobců z celé Evropy. Výhodou standardizovaného systému je možnost kombinování komponentů různých výrobců. Některí „tradiční“ výrobci elektroinstalačního materiálu vyrábějí široký sortiment tlačítek, spínacích prvků a systémových prvků. Menší firmy naopak dodávají speciální prvky jako LCD ovládací panely, řídicí moduly, moduly pro integraci do jiných systémů a podobně. K těmto výrobcům se postupně přidávají výrobci ostatních zařízení pro budovy, kteří doplňují sortiment o zařízení přímo připojitelná na sběrnici EIB, například žaluzie, pohony ventilů topení



Obrázek 2.3: Řídicí systém se začleněnou architekturou sběrnice EIB

Komunikační protokol

Komunikační zásobník EIB je strukturován v souladu se sedmivrstvým komunikačním modulem ISO/OSI. Fyzická a linková vrstva je závislá na typu použitého média. Pro řízení přístupu k médiu je předepsán mechanismus Carrier Sense Multiple Access (CSMA) s optimalizovaným antikolizním přístupem (Collision Avoidance). Příznak cílové adresy (DAF) rozlišuje mezi telegramy orientovanými skupinově a

na zařízení.

Síťová vrstva řídí přenosy pomocí NPCI řídicí informace (Network Protocol Control Information). Transportní vrstva se stará o logické komunikační vazby, které mohou mít několik forem:

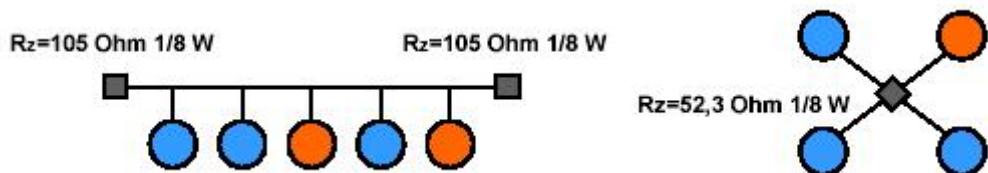
- * jeden pro několik (one-to-many), bez spojení (vysílání pro skupinu),
- * jeden všem (one-to-all), bez spojení (vysílání),
- * jeden jednomu (one-to-one), bez spojení,
- * jeden jednomu (one-to-one), se spojením.

Všechny služby transparentně vedené napříč relační a prezentační vrstvou jsou rezervovány. Aplikační vrstva obsahuje aplikační rozhraní pro klient/server správu EIB sítě.

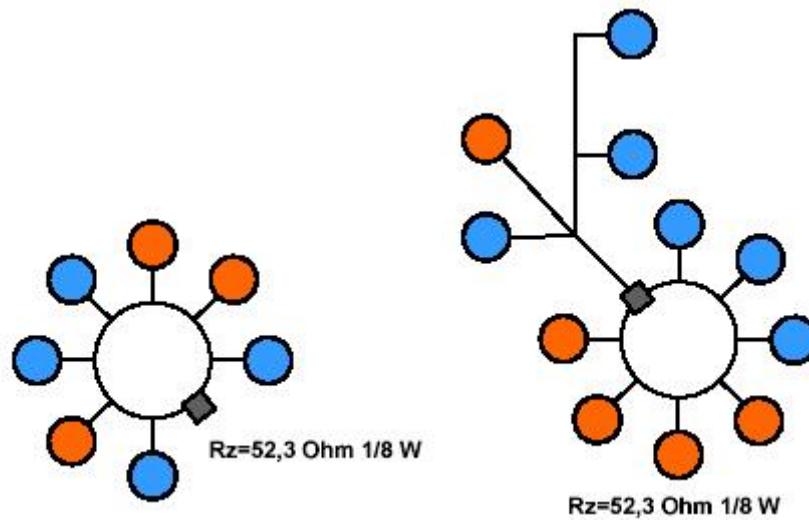
Informace vyměňované mezi dvěma zařízeními jsou formovány do paketů. Každý vyslaný paket je pak následován potvrzením, tvořeným znakem EOF. EIB systém umožňuje přiřadit vysílaným datovým paketům prioritu, což může být výhodné kupříkladu při zasílání urgentních nebo chybových hlášení. Alarmní zpráva má prioritu vyšší než jakákoli jiná zpráva vyslaná v normálním operačním módu.

2.3 LonWorks technologie

LonWorks technologie [5] je kompletní platforma pro implementaci distribuovaných řídicích systémů. Tyto systémy se skládají z inteligentních zařízení nebo nodů, které jsou ovlivňovány okolním prostředím a které mezi sebou navzájem komunikují přes rozličná komunikační media pomocí obecného komunikačního protokolu.



Obrázek 2.4: Sběrnicová a hvězdicová topologie



Obrázek 2.5: Kruhová a kombinovaná topologie

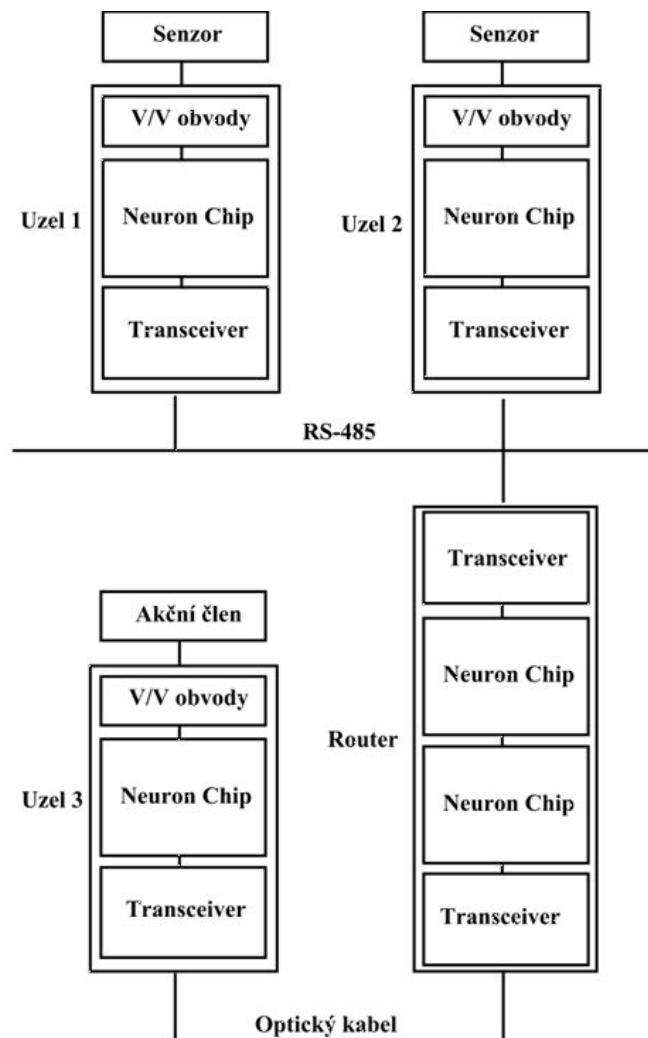
Technologii LonWorks vyvinuly laboratoře firmy Echelon, která je v této oblasti stále vedoucí silou - zajišťuje technickou podporu, vyvíjí a ověřuje nové typy fyzických médií a stará se o propagaci standardu a jeho podporu velkými výrobci a je použitelná pro průmyslovou automatizaci v aplikacích se dvěma až 32 000 propojenými zařízeními (uzly) tam, kde postačuje doba odezvy sítě řádově jednotky až stovky milisekund. Primárně nachází uplatnění v oblasti automatizace budov, dále se používá v domácích a kancelářských strojích, průmyslu a metropolitních sítích. Zde se jedná především o sledování a řízení spotřeby energií, zabezpečovací zařízení, požární ochranu, řízení klimatizace, domácích spotřebičů, výtahů apodobně.

LonWorks network se skládá z inteligentních zařízení, označovaných jako nody. Tyto nody jsou navzájem propojeny. Komunikace probíhá pomocí tzv. protokolu LonTalk.

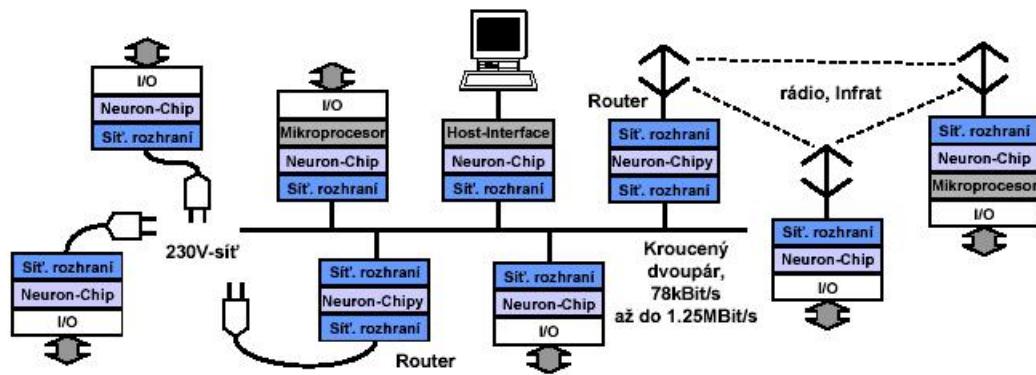
Základní komponenty sítě LonWorks: viz. Obrázek 2.6

- 1 Node - je to inteligentní zařízení na síti, senzor, akční člen nebo kontroller. Všechny nody tvoří společně síť. Nody jsou propojeny příslušným komunikačním mediem, jako např. kroucenou dvojlinkou, IF linkou, silovým vedením apodobně. Po tomto vedení spolu komunikují protokolem LonTalk. Node typicky obsahuje Neuron Chip, tranceiver a I/O obvody.
- 2 Neuron Chip - je srdcem běžných LonWorks nodů. Je to VLSI (Very Large Scale Integration) obvod, který má implementován LonTalk protokol jako část firmware. Může vykonávat uživatelský program a obsluhovat I/O zařízení.

- 3 Transceiver - je to obvod (zařízení), které realizuje elektrické a mechanické spojení Neuron Chipu s fyzickým komunikačním médiem.
- 4 Host Processor - používá se pro komfortní vykonávání uživatelského programu. Neuron Chip potom slouží jen jako komunikační co-procesor realizující síťové připojení. Síťové interfejsy - takto se označují zařízení umožňující připojit PC do sítě LonWorks. Jsou to obvykle ISA nebo PCI zásuvné karty do PC.
- 5 Vývojové prostředky - jsou to nástroje umožňující vývoj nodů, vytváření a údržbu sítě LonWorks.



Obrázek 2.6: Základní komponenty sítě LonWorks



Obrázek 2.7: Fyzická topologie sítě LonWorks

Pro projektování a uvádění do provozu se používá např. software LonBuilder nebo Lon Maker. K zajištění vzájemné kompatibility LON zařízení různých výrobců byla zřízena asociace LonMark Interoperability Association, která vydává pravidla pro standardizaci a přiděluje kompatibilním zařízením značku LonMark.

Protokol LonTalk

Protokol LonTalk má některé specifické vlastnosti, kterými se odlišuje od protokolů ostatních průmyslových sítí. Všechny vrstvy jsou definovány podle standardu ISO/OSI. Síť LonWorks nevyžaduje ke své činnosti řídicí zařízení. Jednotlivá zařízení komunikují navzájem mezi sebou, jedná se tedy o síť typu peer-to-peer.

2.4 Komunikační protokol BACnet

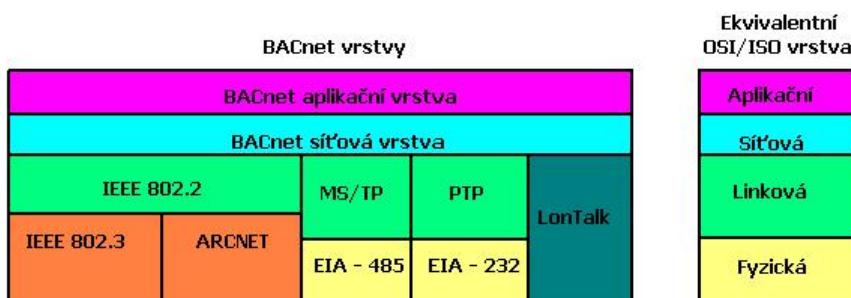
BACnet [3], [6] (Building Automation and Control Network) je standardní komunikační protokol pro síť automatizace a řízení budov vyvinutý americkým sdružením ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers). Hlavním cílem bylo vytvořit protokol, který by umožňoval integraci systémů různých výrobců, primárně určených pro automatizaci budov, do jediného kooperujícího celku.

Protokol BACnet stanovuje standardní způsoby jak reprezentovat funkce (data) libovolného zařízení jako např. analogové a binární vstupy a výstupy, časové programy, řídicí smyčky a alarmy. BACnet nedefinuje interní konfiguraci, datové struktury nebo řídicí logiku zařízení. Informace poskytované na síti BACnet jsou definovány jako standardizované abstraktní objekty. Vazba těchto objektů na reálně

naměřené hodnoty je definována výrobcem. Stejně pravidlo platí i pro implementaci řídicích algoritmů zařízení - standardizováno je rozhraní vzhledem k síti BACnet, vnitřní architektura není pro standard BACnet podstatná.

Specifikace BACnetu je složena v zásadě ze tří hlavních částí. První část popisuje metody jak reprezentovat jakékoli zařízení standardním způsobem (tj. objekty). Druhá část definuje zprávy zasílané počítačovou sítí pro monitoring a řízení takového zařízení (tj. služby). Třetí část definuje množinu přístupných lokálních sítí (LAN) použitelných pro přenos zpráv.

Vlastní architektura BACnetu je založena na modelu ISO/OSI, viz. Obrázek 2.8.



Obrázek 2.8: Architektura komunikačního protokolu BACnet

BACnet rovněž umožňuje směrovat zprávy skrze existující IP síť a Novell IPX síť. Oba tyto protokoly jsou schopny zapouzdřit BACnet zprávy a přenést je pomocí tzv. tunelování (BACnet/IP Packet-Assembler-Disassembler: B/IP PAD).

Kapitola 3

Algoritmus hlídání energetického maxima

3.1 Čtvrtodinové energetické maximum

Jedním z nejvýznamnějších základních nákladů při výrobě jakéhokoliv výrobku nebo provozu budov jsou náklady na spotřebu elektrické energie, jejíž cena navíc trvale roste. Proto je nutné věnovat spotřebě elektrické energie co největší pozornost. Pro optimalizaci spotřeby elektrické energie je především nezbytně nutná znalost časového průběhu celkové okamžité spotřeby elektrické energie v daném technologickém procesu a podíl jednotlivých významnějších spotřebičů. Na základě vyhodnocení časových průběhů spotřeby elektrické energie je možné provádět optimalizační zásahy, ať již organizační nebo automatické, s cílem dosažení maximálních úspor energie při zachování velikosti výrobní produkce nebo komfortu při provozu budov.

Vzhledem k tomu, že většina výrobních procesů se trvale mění jednak v krátkém časovém období (den, týden, měsíc) a to z hlediska odbytu výrobků, tak i v dlouhodobějším časovém měřítku z hlediska změn v technologii, je nezbytně nutné trvalé sledování a vyhodnocování spotřeby elektrické energie. Jen tak je možné přizpůsobování řízení spotřeby elektrické energie měnícím se požadavkům výroby. Tyto skutečnosti je nutno svázat s výběrem vhodných odběrových kategorií a diagramů tak, aby při minimálních platbách dodavateli elektrické energie nedocházelo k omezování požadovaných výkonů výroby. Každý větší odběratel elektrické energie si může vybrat jeden ze dvou základních způsobů vyhodnocování spotřeby a tedy i platby podle:

* naměřené maximální hodnoty čtvrtodinového odběru,

* dohodnuté maximální hodnoty čtvrtodinového odběru.

Elektrický výkon (čtvrtodinové maximum) se pro tarifní účely vyhodnocuje ve dnech pondělí až neděle po dobu 24 hodin denně, pokud pro konkrétní sazbu není uvedeno jinak. V případě, že je vyhodnocována spotřeba podle naměřené maximální spotřeby čtvrtodinového odběru je základní sazba za čtvrtodinové maximum vždy vyšší než v druhém případě. V druhém případě je uvedena sazba nižší, ale odběratel musí zajistit nepřekročení dohodnuté hodnoty, jinak platí sankční poplatek. Konkrétní výše jednotlivých cen je závislá jednak na velikosti odběru elektrické energie, technických parametrech odběrného místa a volbě podružných sazob odběratele.

3.2 Čtvrtodinové technické maximum

Čtvrtodinovým technickým maximem se rozumí hodnota průměrného čtvrtodinového elektrického příkonu, kterou smí na základě kupní smlouvy odběratel za sledované období nejvýše odebrat z rozvodného zařízení dodavatele. Za překročení tohoto limitu je účtován dodavatelem poplatek dle platného ceníku.

K minimalizaci nákladů za čerpaný elektrický výkon a snížení průměrné ceny za 1kWh nabízí řada firem optimalizační systémy s možností regulace krátkodobých výkonových souběhů, které způsobují energetickou špičku. S těmito systémy lze na smlouvat s rozvodnými závody nižší hodnoty čtvrtodinového i technického maxima. Veškeré naměřené hodnoty se archivují v PC, které je vybaveno patřičným softwarem.

3.3 Regulace energetického maxima

Smyslem využití optimalizačního systému je tzv. ořezávání výkonových špiček a tím samozřejmě snížení sjednávaného technického, respektive čtvrtodinového maxima s důsledkem nižších měsíčních poplatků za elektrickou energii. Snížení špiček je realizováno automaticky s tím, že práce násilně pozastavená odebíraná spotřebičem v kritické čtvrtodině je nahrazena a využita ve čtvrtodině, která není energeticky náročná. Tím nedochází ke ztrátám ve výrobě a zároveň dochází k nemalým trvalým finančním úsporám v nákladech vynaložených na odběr elektrické energie.

Jeho využití se týká převážně velko a středooodběratelů elektrické energie se sazbou B a to v rozsahu od několika kW do jednotek MW technického maxima. Zařízení je schopno automaticky vypínat a zapínat jednotlivé spotřebiče nebo části odběru dle požadavků uživatele. Stykače nebo jiné výkonové prvky jsou ovládány prostřednictvím výstupních modulů. Variabilnost a modulová koncepce systému umožňuje využití tohoto zařízení pro různé aplikace dle požadavků zákazníka.

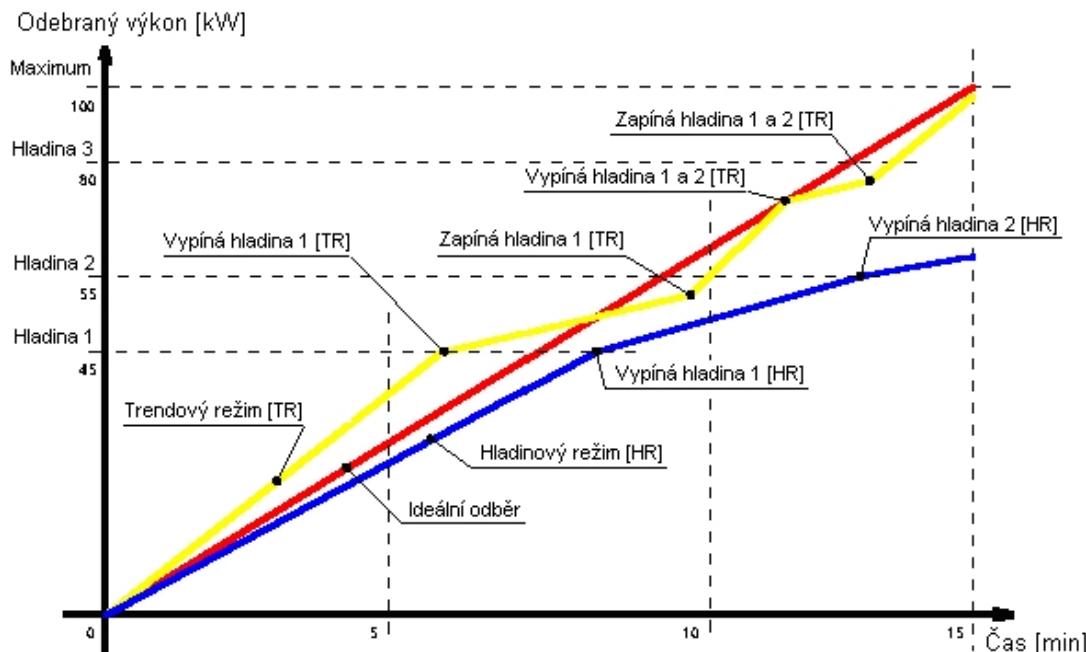
Regulační proces probíhá ve dvou základních volitelných režimech:

* Hladinovém režimu

K aktivaci příslušného stupně dojde tehdy, když množství odebrané energie od začátku měřicího intervalu dosáhne nastavené hodnoty. Ke zpětnému připojení spotřebiče dojde až na začátku dalšího měřeného intervalu.

* Trendovém režimu

K aktivaci příslušného stupně dojde tehdy, když množství odebrané energie od začátku měřicího intervalu dosáhne nastavené hodnoty a současně je výpočtem zjištěno, že dosavadní velikost odběru by měla za následek překročení sjednaného limitu. Ke zpětnému připojení spotřebiče dojde, jestliže odběr poklesne natolik, že nehrozí překročení sjednaného limitu, popřípadě na začátku dalšího měřicího intervalu. K regulaci jsou vytipovány provozy (spotřebiče), které bezprostředně neovlivňují technologii výroby (pomocné provozy, chlazení, topení, sekce pecí, kompresory, ...). K odpínání zátěží dochází pouze při náhodném energetickém souběhu. Způsob odpínání je konzultován s výrobou a technology. Po vzájemné dohodě jsou provedena nezbytná signalizační opatření (majáky, světelná a akustická výstraha).



Obrázek 3.1: Průběhy režimů regulačních procesů

Navíc rozvodné závody postupně přecházejí na nové systémy měření jalového výkonu. Rozdělují zvlášť induktivní a kapacitní složku. Dle smluvy vypočítávají průměrný účiník z induktivní složky, která je při případné odchylce od smluvních limit penalizována.

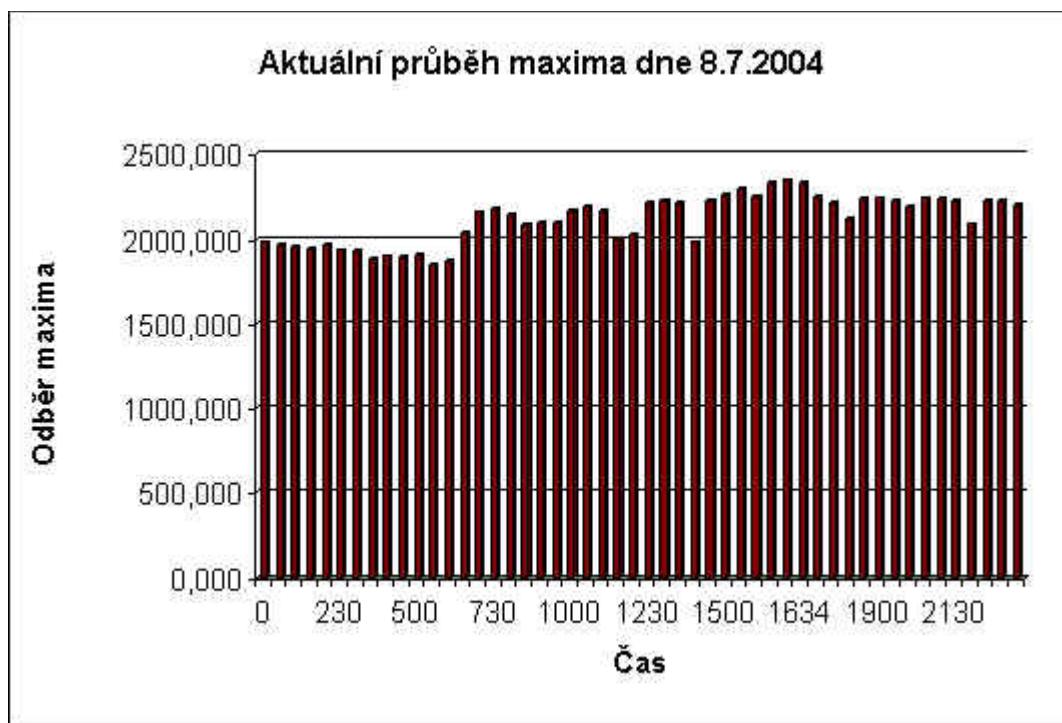
Dnes již zdaleka nestačí jenom regulace čtvrt hodinového maxima. Od kvalitních regulátorů spotřeby elektrické energie je vyžadován ucelený komplex funkcí, informačních a dokumentačních služeb, schopnost předvídat bezprostřední vývoj spotřeby, optimální rozhodování a přizpůsobování regulačního procesu různorodým vlastnostem regulovaných spotřebičů.

3.4 Algoritmus omezování spotřeby a přesouvání zátěží a jeho analýza

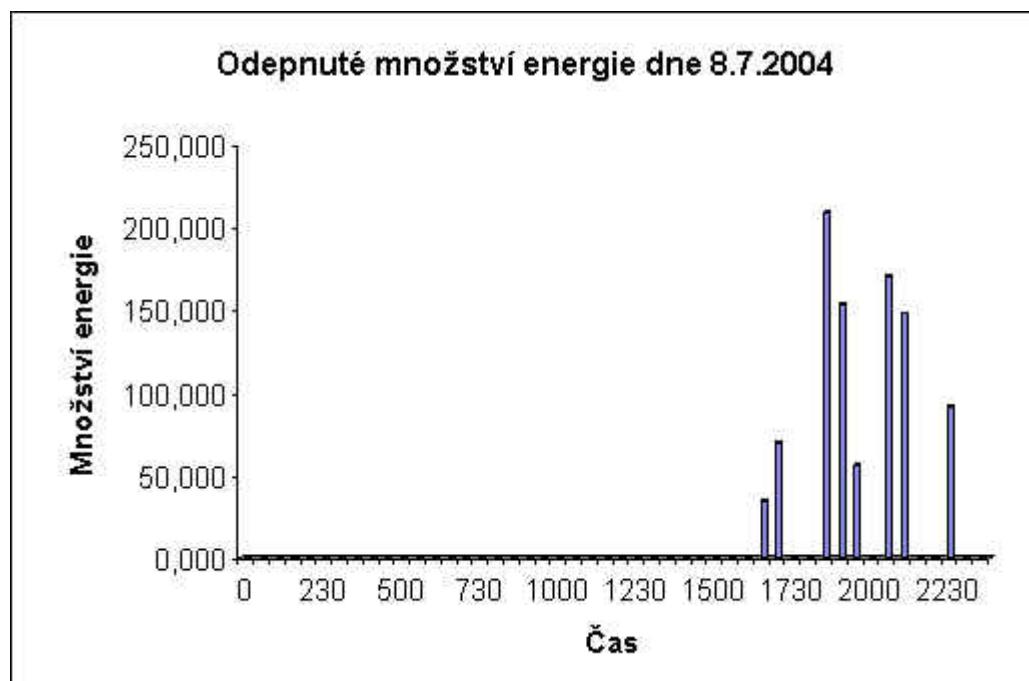
Analýza hlídání energetického maxima

Na reálném systému Gamex České Budějovice, byla naměřena data, z nichž bylo mým úkolem analyzovat funkci algoritmu implementovaného do síťové řídicí jednotky NCN-361 od firmy Johnson Controls.

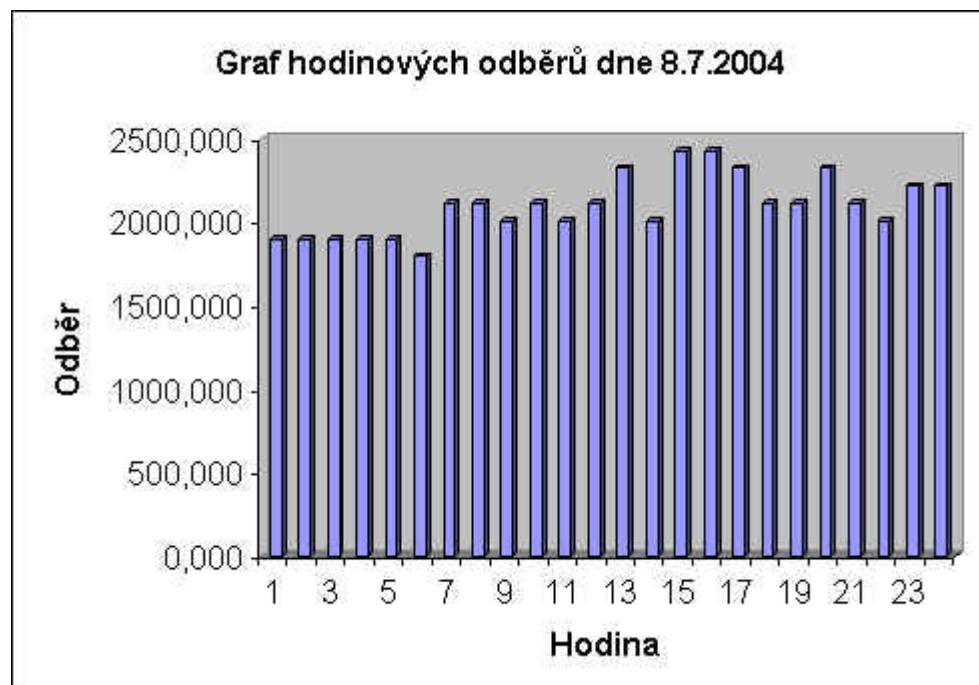
Naměřená data jsou uvedena v tabulkách a následně vynesena do grafů.



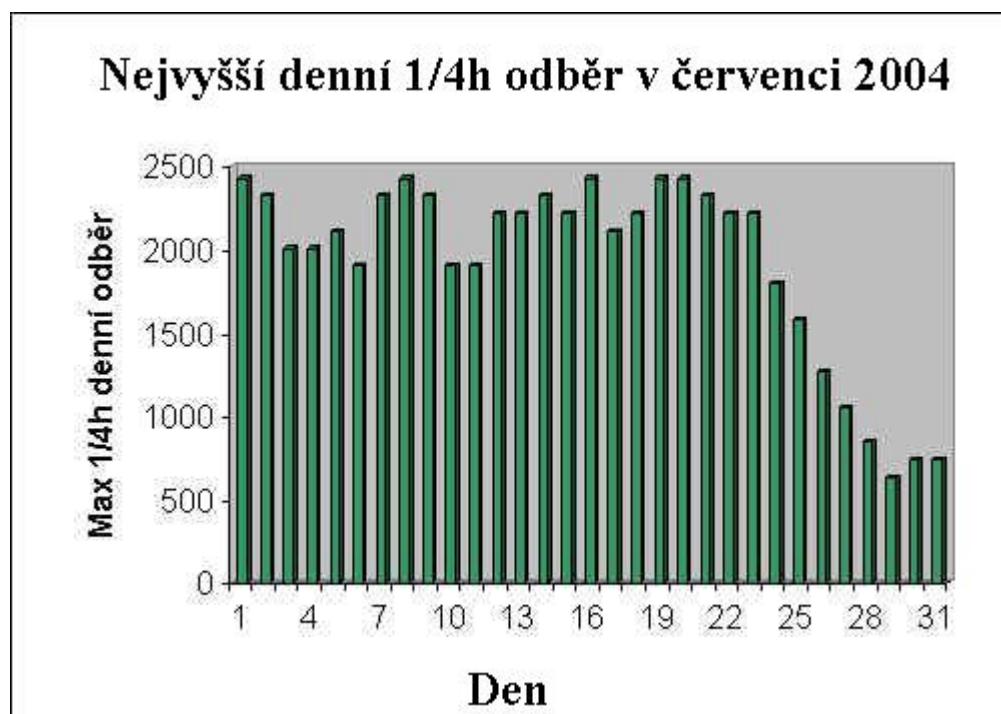
Obrázek 3.2: Průběh aktuálního odběru



Obrázek 3.3: Průběh aktuálního odepnutí



Obrázek 3.4: Průběh maximálního hodinového odběru



Obrázek 3.5: Průběh maximálního denního odběru

Omezování spotřeby

Algoritmus Omezování spotřeby každou minutu opakuje následující proces:

1. Čte údaj vstupního měřidla.
2. Odhadne neregulovanou spotřebu pro čtvrt hodinový interval. Jestliže nejsou k dispozici žádné zátěže pro odpojení a jestliže průměrná spotřeba překračuje limit odpovídající právě aktivnímu tarifnímu pásmu, vytvoří varovnou zprávu.
3. Navrhne spotřebu pro čtvrt hodinový interval. Jestliže tato spotřeba překračuje právě aktivní limit, vypočte potřebné opravy. Tyto opravy jsou mezníkem pro odpojení zátěže.
4. Jestliže návrh plánované spotřeby je vyšší než právě aktivní cíl, pak algoritmus postupně vybírá dosažitelné zátěže priority 4 pro odpojení, dokud není dosažen mezník. Algoritmus odpojované zátěže strídá a neodpojí zátěž v těchto případech:
 - * Zátěž je uzamčena.
 - * Odpovídající objekt je zakázán, offline nebo má alarm.
 - * Odpovídající objekt je ve stavu odpojení nebo nižším.
 - * Odpovídající objekt je právě řízen příkazem s vyšší prioritou.
 - * Odpovídající objekt byl připojen kratší dobu, než je pro něj stanovená Minimální doba připojení.
 - * Zátěž byla právě algoritmem uvolněna z odpojení a je dosud v hranicích stanovených Minimální dobou uvolnění.
5. Jestliže ani odpojení všech dosažitelných zátěží priority 4 nestačí pro mezník odpojení zátěží, algoritmus vybírá a odpojuje dosažitelné zátěže priority 3, dokud není mezník dosažen.
6. Jestliže ani odpojení všech dosažitelných zátěží priority 3 nestačí pro mezník odpojení zátěží, pokračuje proces se zátěžemi priority 2 a poté se zátěžemi priority 1.
7. Jestliže ani odpojením všech dosažitelných zátěží nebyl dosažen mezník úspor, vytvoří se zpráva s prioritou Alarm, například : ”50 kWh nemůže být odpojeno Omezováním spotřeby.”
8. Když jsou zátěže opět dosažitelné a odpojeny, vytvoří se následující zpráva priority Normální: ” Omezování spotřeby skupiny zátěží je normální.”
9. Porovnává dobu, po kterou byla každá zátěž odpojena, s Minimální odpojovací dobou příslušné zátěže. Tehdy a jen tehdy, když je Minimální odpojovací doba

dosažena, ověřuje algoritmus stav případného objektu (Comfort, Override), je-li specifikován. Je-li objekt ve stavu online, Povolen a Varování nebo Alarm, zátěž se uvolní.

10. Algoritmus poté srovnává dobu, po kterou byla každá zátěž odpojena, s Maximální odpojovací dobou. Je-li tato doba dosažena, zátěž se odpojí.
11. Algoritmus je navržen tak, aby udržel okamžitou spotřebu energie během čtvrtodenního intervalu pod 95 procenty uživatelem stanoveného cíle skutečné spotřeby.

Přesouvání zátěží

Algoritmus Přesouvání zátěží opakuje každou minutu následující proces:

1. Sečeťte příkony zátěží pro všechny zátěže priority 3, které jsou právě odpojeny.
2. Jestliže součet je pod plánovaným cílem, vybírá a odpojuje dostupné zátěže priority 3, dokud není dosažen právě aktivní cíl pro přesouvání zátěží.
3. Zátěže se v odpojování střídají. Algoritmus neodpojí zátěž, jestliže:
 - * Odpovídající objekt je zamčen.
 - * Odpovídající objekt je offline, nepovolen nebo má alarm.
 - * Odpovídající objekt je ve stavu odpojení nebo níže.
 - * Odpovídající objekt je právě řízen příkazem s vyšší prioritou.
 - * Odpovídající objekt byl připojen kratší dobu, než je pro něj stanovena Minimální doba připojení.
 - * Zátěž byla právě uvolněna z odpojení a je dosud v hranicích stanovených Minimální dobou uvolnění.
4. Jestliže ani odpojením všech zátěží priority 3 není dosažena cílová úspora, vytvoří se zpráva priority Alarm. Například : ”50 kWh nemůže být odpojeno Přesouváním zátěží.” Jsou-li zátěže opět dosažitelné a odpojeny, vytvoří se zpráva priority Normální: ”Přesouvání zátěží je normální.”
4. Porovnává se doba, po jakou byla každá zátěž odpojena, s Minimální odpojovací dobou této zátěže. Tehdy a jen tehdy, je-li dosažena Minimální odpojovací doba, zjistí algoritmus stav případného objektu (Comfort, Override), je-li specifikováno. Je-li hlášený stav online, povolen a varování nebo alarm, zátěž se uvolní.

5. Poté se porovná doba, po jakou byla zátěž odpojena, s Maximální odpojovací dobou zátěže. Je-li tato doba dosažena, zátěž se uvolní.

Kapitola 4

Algoritmus zachování teplotního komfortu

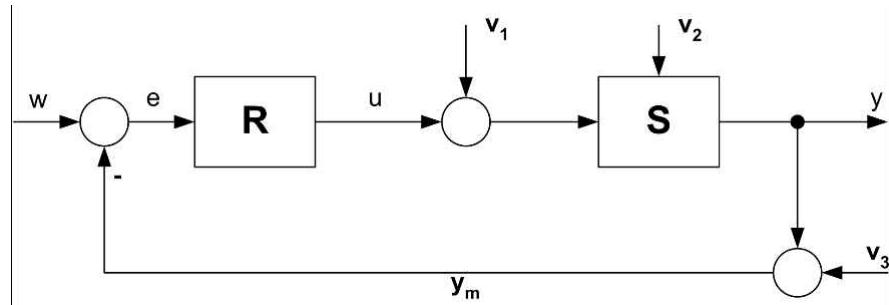
4.1 Automatická regulace tepelných soustav

V inteligentních budovách má smysl uvažovat pouze automatickou regulaci teplotního komfortu, která přináší tyto výhody:

- udržuje požadovanou teplotu v řízených místnostech, tím zajišťuje příznivé podmínky pro tepelnou pohodu člověka,
- zabraňuje přetápění (přechlazování) místnosti,
- komfortnější obsluha zajišťuje bezpečnost provozu vytápění (chlazení),
- umožňuje programování a dálkové spouštění.

Blokové schéma regulačního obvodu

Na obrázku 4.1 je znázorněno základní blokové schéma regulačního obvodu, které použijí k vysvětlení základních pojmu. [7]



Obrázek 4.1: Základní blokové schéma regulačního obvodu

S	regulovaná soustava
R	regulátor
w	žádaná hodnota
y	regulovaná veličina (skutečná hodnota)
y_m	výstup čidla regulované veličiny
u	akční veličina
e	regulační odchylka
v_1	porucha na vstupu regulované soustavy
v_2	porucha vstupující do regulované soustavy v libovolném místě
v_3	chyba měření

4.2 Způsoby regulace teploty

Regulátory můžeme rozdělit:

- **přímé regulátory** - nepotřebují pro svou funkci žádnou vnější energii, ale odebírají všechnu potřebnou energii pro svůj provoz přímo ze soustavy. Přímý regulátor teploty je například termostatický ventil,
- **nepřímé regulátory** - pracují vždy s pomocnou energií. Používají se hlavně při vyšších náročích na přesnost regulace. Podle druhu pomocné energie se regulátory dělí na elektrické, pneumatické, hydraulické a kombinované.

Rozlišujeme tyto základní druhy regulace:

- **spojitá regulace** - je regulace, při níž všechny členy regulačního obvodu pracují spojitě, tj. výstupní signály jsou spojitými funkcemi vstupních signálů,
- **nespojitá regulace** - je regulace, při níž alespoň jeden člen regulačního obvodu pracuje nespojitě (např. přenáší signál jen v určitých časových okamžicích

nebo po dosažení určité hodnoty),

- **regulace na konstantní hodnotu** - je druhem automatické regulace, při níž je žádaná hodnota regulované veličiny konstantní,
- **programová regulace** - je druhem automatické regulace, při němž je žádaná hodnota regulované veličiny funkcí času podle předem známého programu,
- **vlečná regulace** - je druhem automatické regulace, při němž se žádaná hodnota regulované veličiny mění v závislosti na jiné důležité veličině.

4.2.1 Nespojitá regulace

Pro regulaci vytápěcích soustav jsou velmi rozšířené nespojité regulátory, z nichž nejčastějšími jsou dvoupolohové regulátory s hysterezí.

Tento regulátor se používá většinou tak, že dolní mezní hodnota akční veličiny nabývá hodnoty 0 (rozepnuto - tepelný zdroj je od otopné soustavy odpojen) a horní mezní hodnota akční veličiny nabývá hodnotu 1 (sepnuto - tepelný zdroj dodává do otopné soustavy plný výkon).

Jelikož vytápené objekty jsou soustavami kapacitními, někdy navíc s nezanedbatelným dopravním zpožděním, překračuje regulovaná veličina T mezní hodnoty T_1 a T_2 a v soustavě dochází k oscilacím kolem žádané hodnoty. Amplituda těchto oscilací je tím větší, čím větší je setrvačnost a dopravní zpoždění soustavy.

4.2.2 Spojitá regulace

Při vyšších požadavcích na kvalitu regulace tepelných soustav se používají spojité regulátory, u kterých akční veličina u je spojitou funkcí regulační odchylky e .

Při měření tepelných jevů se obvykle používají regulátory typů:

- **P - proporcionální regulátor** - je charakterizován konstantním poměrem výstupní a vstupní veličiny v každém okamžiku činnosti regulátoru. Nevýhodou regulátoru typu P je, že regulační odchylka v ustáleném stavu je nenulová,
- **PI - proporcionálně integrační regulátor** zajišťuje, aby regulační odchylka v ustáleném stavu byla nulová,

- **PID - proporcionální integračně derivační regulátor** má navíc oproti předchozímu typu regulátoru blok, který umožňuje reagovat na intenzitu změny regulační odchylky.

4.2.3 Vlečná regulace

Ve vytápěcí technice je velmi rozšířena regulace podle určité vztažné teploty. Regulovanou veličinou zde však není teplota prostředí, ale teplota otopné vody vstupující do otopné soustavy. Podle toho, jakou vztažnou teplotu uvažujeme, můžeme rozdělit vlečnou regulaci na dva typy:

- regulace podle teploty referenční místonosti - teplota náběhové vody je úměrná rozdílu mezi požadovanou a skutečnou teplotou referenční místonosti,
- regulace podle teploty venkovního vzduchu (ekvitermní regulace) - teplota náběhové vody je nastavována v závislosti na teplotě venkovního vzduchu.

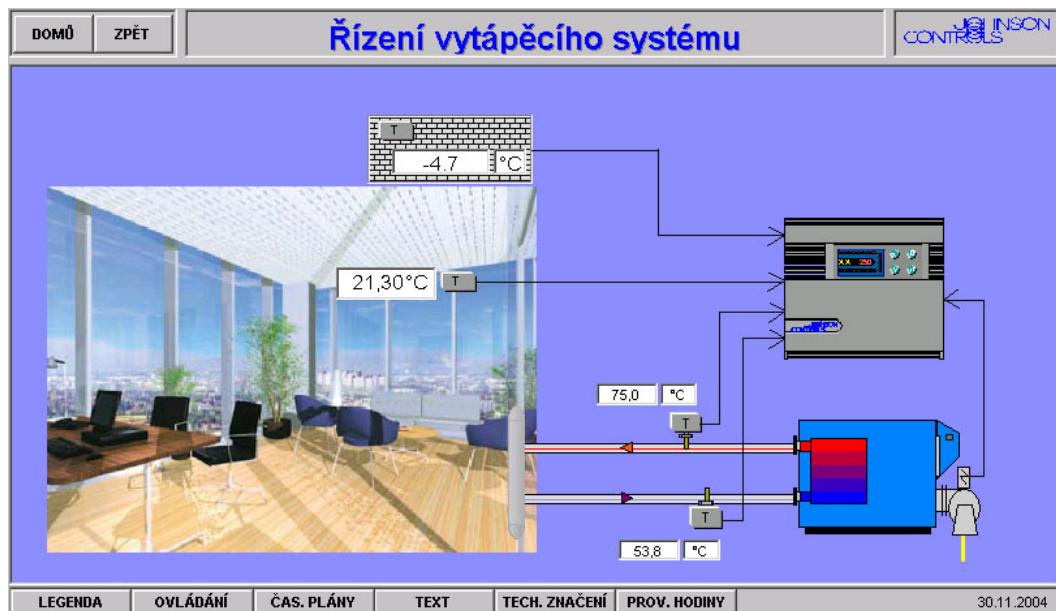
4.3 Ekvitermní regulace

Zde je potřeba tepla regulována proporcionálně k venkovní teplotě, je možné na tomto základě regulovat teplotu přívodní vody přímo v závislosti na teplotě venkovní [12], [9]. Závislost obou veličin je dána tzv. otopnou křivkou, která může být buď spočítána s ohledem na parametry soustavy, budovy a lokality, nebo může být změřena experimentálně nebo může být zadána normativně. Křivka a její prohnutí odpovídá použitým otopným tělesům, respektive použité otopné ploše. Křivku lze přesně upravit nakláněním či posunem pro danou soustavu a její vlastnosti. Pro vyšší venkovní teploty se doporučuje přednostně posun otopné křivky do jiné úrovně a u nižších venkovních teplot je vhodné upřednostnit změnu sklonu otopné křivky.

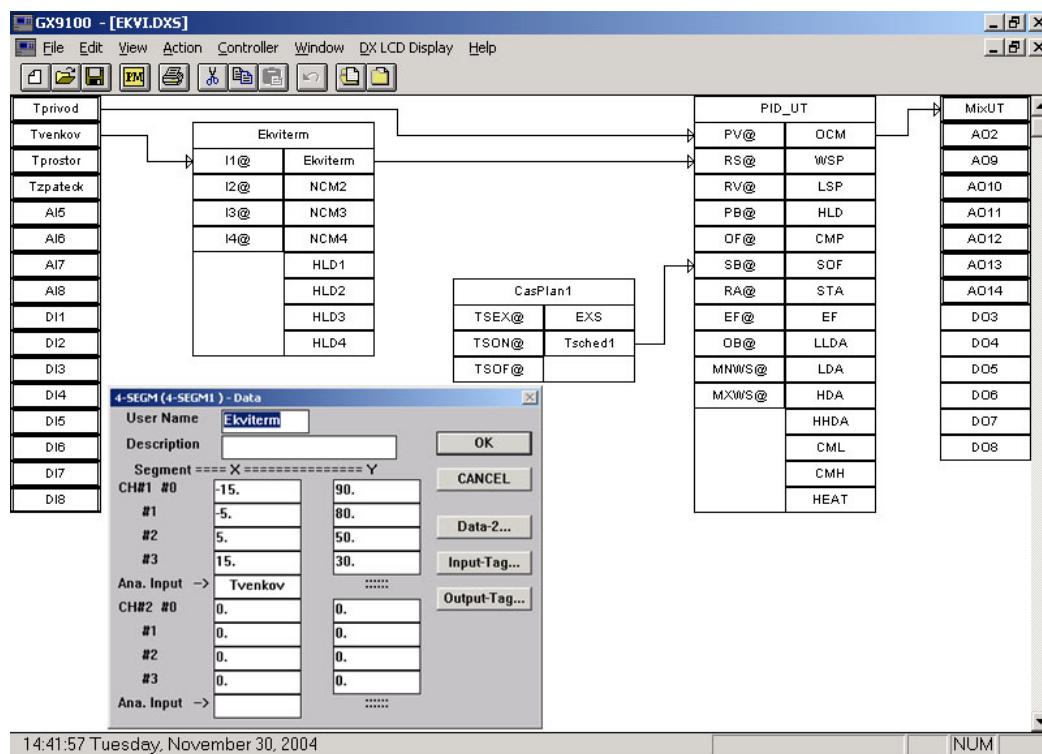
Regulace teploty je rychlá s malým dopravním zpožděním. Tato regulace se dnes používá u většiny soustav s eventuelními přídavnými funkcemi. Teplota přívodní vody se reguluje dvoupolohově (řízení hořáku), nebo třípolohově (spolu s řízením třícestné či čtyřcestné armatury).

Protože při rychlém poklesu venkovní teploty regulátor ihned reaguje a zvyšuje teplotu přívodní vody, ačkoliv se vliv poklesu venkovní teploty uvnitř budovy projeví až později, bývá odezva venkovního teploměru tlumena kapacitními nebo programovými filtry, které se umisťují do tzv. referenční místonosti. Měla by to být

taková místnost, kde se neprojevují vnitřní ani venkovní tepelné zisky a která má nejmenší tepelnou kapacitu a nejnižší požadovanou teplotu.



Obrázek 4.2: Hlídání teplotního komfortu [13]

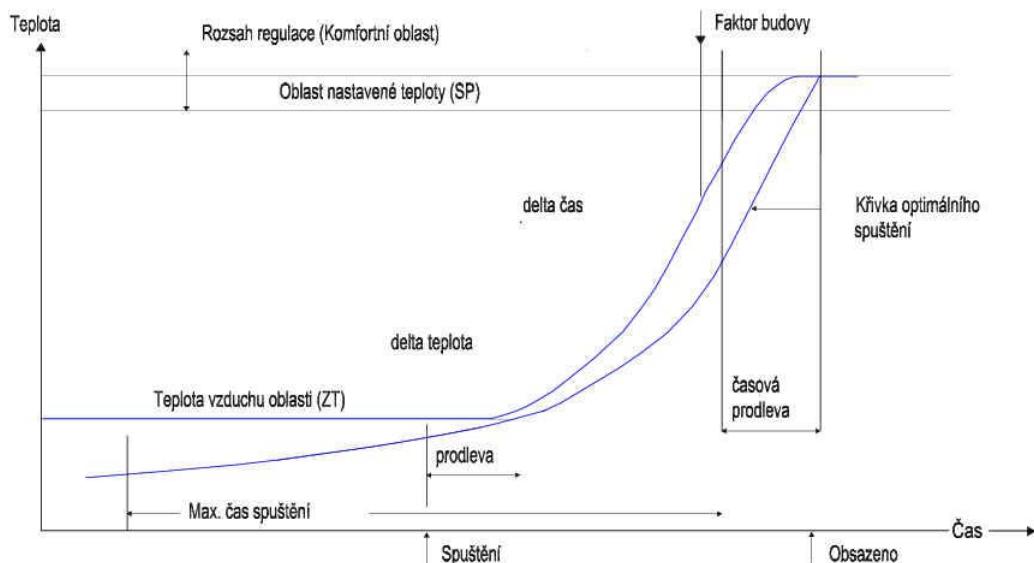


Obrázek 4.3: Ekvitermní závislost a PID regulátor v kontroloru DX-9100

4.4 Analýza hlídání teplotního komfortu

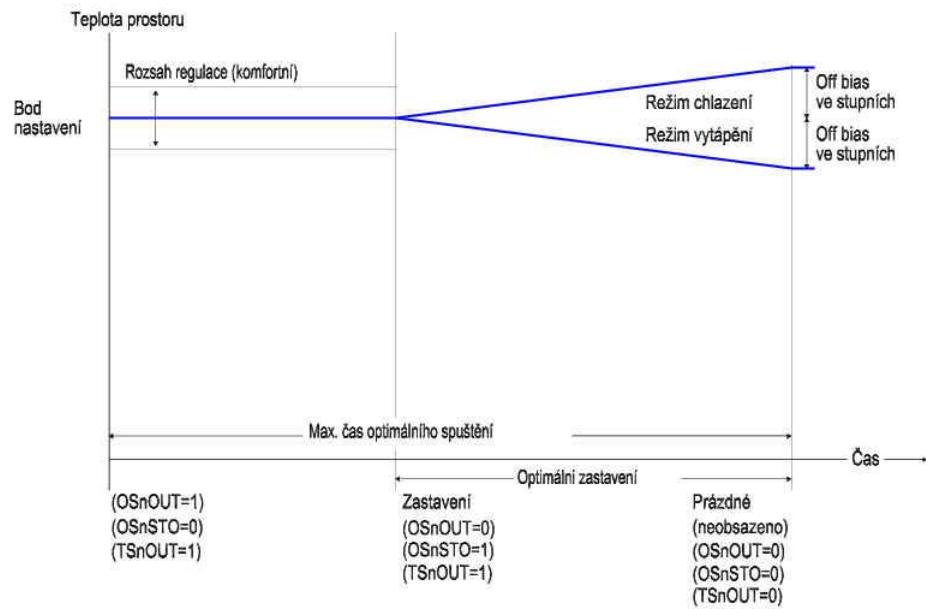
4.4.1 Algoritmus optimálního spouštění a odstavování

Funkce optimální start zabudovaná do systému Metasys firmy Johnson Controls [2] předehřívá prostor v nejkratším možném čase tak, aby byla požadovaná změna teploty dosažena v požadované době (viz. Obrázek 4.4). Za tím účelem odhaduje podle stávající teploty prostoru, jeho cílové teploty a podle dosavadní zkušenosti, jak dlouho toto předehřívání bude trvat. Jakmile zbývá do změny teploty doba menší nebo rovná odhadované době předehřívání, optimální start spustí předehřívání a trvá až do dosažení cílové teploty. Během optimálního startu je sledována rychlosť stoupání teploty prostoru, které se využívá ke zlepšení budoucích odhadů optimálního startu.



Obrázek 4.4: Optimální start

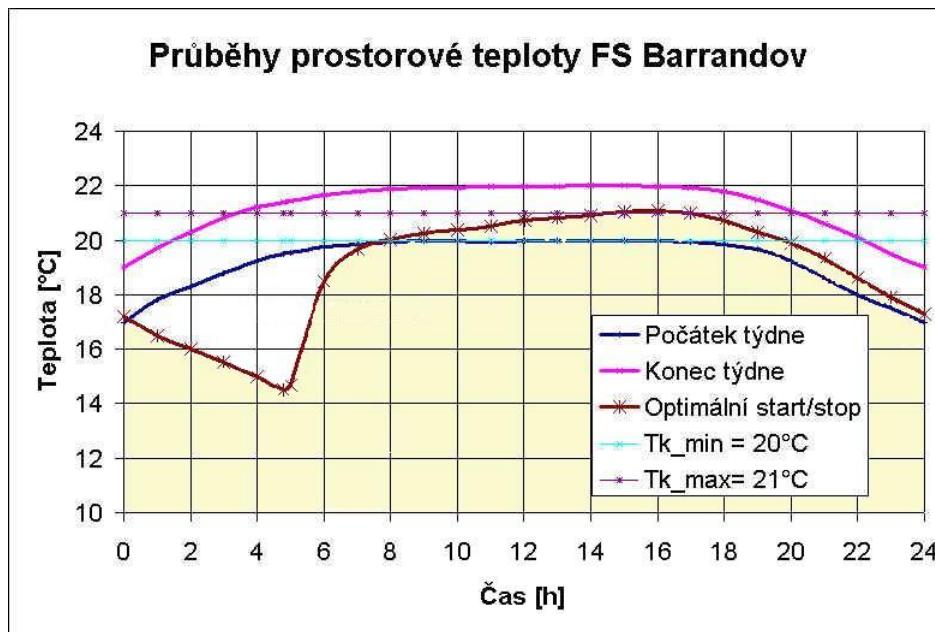
Funkce optimálního stopu (viz. Obrázek 4.5) vede regulátor k tomu, aby při rozhodování, zda topení může být zapnuto dříve, přihlédl k aktuální teplotě prostoru a k příštímu bodu pro pokles a při tom zjistil, že teplota prostoru v době přepnutí neklesne pod stávající určený bod prostoru o více než 0,5K. Za tím účelem odhaduje podle stávajícího určeného bodu a dosavadní zkušenosti, jak dlouho bude toto ochlazení trvat. Jakmile zbývá do změny teploty doba menší nebo rovná odhadované době ochlazování, topení se vypne do dosažení určeného bodu poklesu.



Obrázek 4.5: Optimální stop

4.4.2 Analýza efektivnosti stávajícího optimalizačního algoritmu

Byla analyzována data naměřená v průmyslovém objektu filmového studia Baran-dov. Porovnávaly se průběhy prostorové teploty objektu při použití ekvitermní regula-cíce s nočním a víkendovým útlumem s průběhem teploty v témže prostoru při řízení vytápění pomocí algoritmu optimálního spuštění a odstavení.



Obrázek 4.6: Průběh prostorové teploty ve filmovém objektu Barandov

Z průběhu prostorové teploty při ekvitermní regulaci na začátku pracovního týdne je patrné, že po dvou víkendových dnech teplota prakticky nedosáhne pásma komfortnosti. Průběh prostorové s ekvitermní regulací na konci týdne naopak ukazuje přetápění prostoru, protože stavební konstrukce objektu se prohřála a jednoduchý ekvitermní regulátor nebyl vybaven korekcí podle prostorové teploty. Naopak průběh teplot s využitím algoritmu optimálního spuštění a odstavení ukazuje, že prostorová teplota se po celou dobu času obsazení pohybuje v pásmu komfortnosti. Zároveň je z průběhu teplot v budově před časem obsazení zřejmé, že:

1. V době odstavení vytápení v pozdních odpoledních hodinách až do okamžiku optimálního spuštění je spotřeba energie menší než při ekvitermní regulaci s nočními útlumy.
2. V době od okamžiku optimálního spuštění až do začátku doby obsazení v raných hodinách je nárůst teploty strmější. Také v tomto časovém úseku je nehledě na rychlý zátop spotřeba energie nižší než v případě ekvitermní regulace.

4.5 Řízení teplotního komfortu jako optimalizační úloha

Definice optimalizačního problému je následující: je zapotřebí určit takové řízení systému, které v čase t_k zajistí teplotní komfort charakterizovaný prostorovou teplotou T_k s minimálními náklady na energetické zdroje (topení a chlazení) a za minimální čas.

Jinými slovy, spouští se s určitým předstihem energetický zdroj (kotelna, chladicí agregáty), tak aby v požadovaném čase byl dokončen přechod z útlumové teploty na teplotu komfortní s minimálními náklady a za nejkratší možný čas.

Vzhledem k tomu, že proměnné ovlivňující teplotní komfort jsou závislé na čase, jedná se o problém optimalizace dynamického systému [8]. Zároveň jde o problém s pevným koncem trajektorie a omezeními na výkon zdroje tepla a chladu.

Z jedné strany jde o **energeticky optimální řízení**.

Pro lineární stacionární systém popsaný stavovou rovnicí

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (4.1)$$

s omezeními řídicího a stavového vektoru $u(t) \in U \subset R^r$, $x(t) \in X \subset R^n$ hledáme takové řízení, aby celková energie dodávaná do systému byla minimální [1]:

$$J(u(t)) = \frac{1}{2} \int_{t_k}^{t_0} u' \cdot R \cdot u dt \quad (4.2)$$

Z druhé strany jde o **časově optimální řízení**, kdy systému popsanému stavovou rovnicí hledáme takové řízení $u(t) \in U$, aby doba přechodu z daného počátečního stavu $x(t_0) = x_0$ do daného koncového stavu $x(t_k) = x_k$ byla minimální.

Kritériem je tedy doba přechodu

$$J(u(t)) = \int_{t_k}^{t_0} 1(t) dt = t_k - t_0 \quad (4.3)$$

Řízení $u(t)$ je omezeno v každé složce a platí $(U_i)_{min} \leq u_i(t) \leq (U_i)_{max}$.

Nutnou podmínkou řešení problémů dynamické optimalizace je Pontrjaginův princip maxima. Z něj plyne optimální řízení v rozsahu

$$u_*^i(t) = \frac{(U_i)_{max}}{(U_i)_{min}}. \quad (4.4)$$

V aplikaci na námi řešený problém to znamená, že při optimálním spouštění energetického zdroje pro dosažení teplotního komfortu bude zdroj tepla (chladu) řízen na plný 100 procentní výkon a budeme řídit pouze čas spuštění (odstavení).

Chceme-li optimalizovat dynamický systém, je třeba znát:

1. Popis dynamického systému, modelujícího reálný objekt, který chceme optimálně řídit. Toto omezení je vyjádřeno obvykle diferenciálními rovnicemi.
2. Z podstaty problému vyplývají omezení některých proměnných, proto součástí formulce problému jsou často soustavy rovnic a nerovnic.
3. Nezbytnou součástí problému je výběr cíle, který chceme dosáhnout. Tento cíl se obvykle formuluje ve tvaru kritéria optimality a naším cílem je optimalizovat (minimalizovat či maximalizovat) toto kritérium.

Abychom mohli optimalizační problém matematicky formulovat, je třeba vytvořit matematický model situace - vytvořit systém. Dále je třeba mít možnost porovnat různé varianty řešení a vybrat nejlepší variantu. Je jasné, že porovnávat různé varianty řešení můžeme pouze při simulaci na modelu situace, to v reálné rozhodovací situaci není možné. Optimálním řešením jsou pak ta možná řešení, pro která neexistují řešení lepší.

Kapitola 5

Návrh modelu otopného systému

5.1 Tepelné ztráty budovy

V této kapitole jsou použity materiály: [15], [16], [17]. Základní funkcí vytápěcího zařízení je zajištění tepelné pohody v objektu. Pro stanovení požadovaných parametrů navrhovaného zařízení se budova transformuje do zjednodušeného modelu, kde jednotlivé vlastnosti jsou vyjádřeny fyzikálními veličinami. Pro běžnou praxi se používá kvazistacionárního modelu, který naznačuje výsledný tepelný stav prostředí za výpočtových podmínek bez uvažování časových změn těchto podmínek. Výsledky tohoto způsobu výpočtu, který je zakotven v normách, zajišťují bezpečný návrh vytápěcího zařízení pro běžné objekty.

Z hlediska stanovení potřebného příkonu zařízení je základní charakteristikou budovy její **tepelná ztráta**, která dohodnutým způsobem vyjadřuje potřebu tepla zohledňující tepelně - technické řešení ohraničujících konstrukcí objektu ve vazbě na umístění stavby a předpokládaný provoz.

Podle tepelných ztrát budov se navrhuje vlastní otopná soustava. Je nutné, aby se tepelné ztráty počítaly pro nejnepříznivější povětrnostní poměry, které mohou za normálních okolností nastat v daném místě.

Postup výpočtu tepelných ztrát je u nás předepsán normou ČSN 06 0210.

Tepelná ztráta budovy vyjadřuje tepelný tok mezi vnitřním prostředím budovy (místnosti) a venkovním prostředím při stanovených výpočtových podmínkách. Tepelné ztráty se stanovují pro jednotlivé místnosti a pro celou budovu.

Celková tepelná ztráta Q_c (W) se rovná součtu tepelné ztráty prostupem a tepelné

ztráty větráním. V případech, kdy je v místnosti trvalý zdroj tepla, je možné o něj snížit celkovou tepelnou ztrátu.

$$Q_c = Q_p + Q_v (-Q_z), \quad (5.1)$$

Q_p - tepelná ztráta prostupem [W],

Q_v - tepelná ztráta větráním [W],

Q_z - trvalý tepelný zisk [W].

Tepelná ztráta prostupem vzniká v důsledku rozdílu teplot v místnosti a vně a vychází z přenosu tepla prostupem jednotlivými ohraničujícími konstrukcemi.

Tepelná ztráta prostupem se stanoví podle vztahu:

$$Q_p = Q_0 \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3), \quad (5.2)$$

Q_0 - základní tepelná ztráta [W],

p_1 - přirážka na vyrovnání vlivu chladných stěn (-),

p_2 - přirážka na urychlení zátopu (-),

p_3 - přirážka na světovou stranu (-).

Základní tepelná ztráta je aritmetický součet tepelných toků prostupem jednotlivými ohraničujícími konstrukcemi vytápené místnosti.

$$Q_0 = \sum_{j=1}^{j=n} k_j \cdot S_j \cdot (t_i - t_{e,j}), \quad (5.3)$$

S_j - plocha stěny [m^2],

k_j - součinitel prostupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

t_i - výpočtová vnitřní teplota [$^\circ\text{C}$],

$t_{e,j}$ - výpočtová teplota na vnější straně stěny [$^\circ\text{C}$].

Přirážka na vyrovnání vlivu chladných stěn p_1 zohledňuje nepříznivé teplotní poměry v místnostech s nízkou povrchovou teplotou stěn. Tato přirážka se určuje podle průměrného součinitele prostupu tepla všech stěn místnosti k_c , který se stanoví ze vztahu:

$$k_c = \frac{Q_0}{\sum S \cdot (t_i - t_e)}, \quad (5.4)$$

$$p_1 = 0, 15 \cdot k_c, \quad (5.5)$$

k_c - průměrný součinitel prostupu tepla všech konstrukcí místnosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

$\sum S$ - součet ploch všech stěn ohraničujících vytápenou místnost [m^2],

t_i - výpočtová vnitřní teplota [$^\circ\text{C}$],

t_e - výpočtová venkovní teplota [$^\circ\text{C}$],

p_1 - přirážka na vyrovnání vlivu chladných stěn [-].

Přirážka na urychlení zátopu p_2 se uvažuje pouze v případech, kdy nelze ani při nejnižších venkovních teplotách zajistit nepřerušované vytápení objektu. Využívá se především u objektů se samostatnou kotelnou o jmenovitém výkonu menším než 150 000 W, kde se předpokládá, že nelze nepřerušovaný provoz zajistit.

Přirážka na světovou stranu p_3 zohledňuje orientaci místnosti ke světovým stranám. Pro její volbu je rozhodující poloha nejvíce ochlazované stavební konstrukce, při více konstrukcích poloha jejich společného rohu. Pokud jsou v místnosti tři a více ochlazovaných stěn, uvažuje nejpříznivěji položená stěna.

Tepelná ztráta větráním Q_v je tepelný tok, potřebný k ohřátí venkovního vzduchu vnikajícího do místnosti buď neřízeně spárami oken a dveří při přirozeném větrání infiltrací nebo při podtlakovém nuceném větrání bez samostatně ohřívaného řízeného přívodu vzduchu. Obecný vztah pro stanovení její hodnoty je:

$$Q_v = V \cdot c \cdot \rho \cdot (t_i - t_e), \quad (5.6)$$

V - objemový průtok větracího vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

c - měrné teplo vzduchu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ - měrná hmotnost vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

t_i, t_e - vnitřní a vnější výpočtová teplota [$^\circ\text{C}$].

Podle toho, čím je dán objemový průtok větracího vzduchu V , rozlišujeme:

- **tepelnou ztrátu infiltrací** - působením větru vzniká na návětrné straně budovy přetlak. Tím vniká chladný venkovní vzduch spárami ve dveřích a oknech do budovy. Na protilehlé, závětrné straně je podtlak, který spárami v oknech a dveřích odsává teplý vzduch. Pro udržení požadované vnitřní teploty je nutné chladný venkovní vzduch ohřát, což vyžaduje množství tepla označované jako tepelná ztráta infiltrací,
- **tepelnou ztrátu při nuceném podtlakovém větrání** - je zřejmé, že provozem vzduchotechnických zařízení jsou ovlivněny tlakové poměry v budově a tím i základní předpokládaná intenzita výměny vzduchu. Při podtlakovém větrání s nepřetržitým provozem bez řízeného přívodu vzduchu se předpokládá, že odváděné množství vzduchu ventilátorem bude nahrazeno vzduchem, který vniká do budovy netěsnostmi, okny a dveřmi. Pokud je toto množství vzduchu větší než množství vzduchu infiltrací, je nutno ve výpočtu uvažovat objemový tok větracího vzduchu V stejný s objemovým tokem vzduchu ventilátorem.

5.2 Sdílení tepla

Sdílení tepla je ve vytápění a větrání budov velice důležitý fyzikální jev. Sdílením tepla z povrchu lidského těla do okolí je zajišťována tepelná rovnováha člověka. Stejné je to i u vytápěných místností, kde z vytápěných místností prostupuje teplo stěnami do okolního prostředí a naopak v letních měsících se chlazením odvádí teplo přivedené z venkovního prostředí do místnosti. V některých případech je naším cílem zvětšit co nejvíce intenzitu sdílení tepla, a tak co nejlépe využít příslušné vytápěcí zařízení. Jindy se naopak snažíme sdílení tepla co nejvíce zabránit, a tím snížit tepelné ztráty na minimum.

Dle termodynamického zákona teplo přechází z místa vyššího teplotního potenciálu k místu nižšího teplotního potenciálu.

Sdílení tepla je nauka o zákonech šíření tepla. Teplo se šíří:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- tepelným sáláním (radiaci).

5.2.1 Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla vedením je způsob šíření tepla v nestejnoměrně ohřátém tělese předáváním tepelné energie mezi přímo se stýkajícími částmi tělesa.

Pro technickou praxi má největší význam vedení tepla v tuhých tělesech. Teplo se ve hmotě šíří ve směru teplotního gradientu a intenzita vedení tepla je tomuto gradientu přímo úměrná. Schopnost látky vést teplo vyjadřuje tepelná vodivost (λ), jejíž velikost se liší podle druhu látky.

$$\lambda = -\frac{q}{grad(t)} = -\frac{q}{\frac{\Delta t}{s}}, \quad (5.7)$$

λ - měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

q - měrný tepelný tok [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],

t - čas [s],

s - délka [m].

Vedení tepla rovinou stěnou

Tepelný tok procházející rovinou homogenní stěny tloušťky s při stálém rozdílu povrchových teplot t_{p1} a t_{p2} je

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot S \cdot (t_{p1} - t_{p2}), \quad (5.8)$$

λ - měrná tepelná vodivost materiálu stěny [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

s - tloušťka stěny [m],

S - plocha, kterou teplo prochází [m^2],

t_{p1} - povrchová teplota na jedné straně stěny [$^\circ\text{C}$],

t_{p2} - povrchová teplota na druhé straně stěny [$^\circ\text{C}$].

5.2.2 Sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním je způsob přenášení tepla proudící tekutinou (kapalinou nebo plynem) z místa o vyšší teplotě do místa o teplotě nižší, tj. též z povrchu tuhého

tělesa do tekutiny nebo naopak, vždy proti směru teplotního gradientu. Sdílení tepla konvekcí mezi povrchem tuhého tělesa a tekutinou a naopak se nazývá též *přestup tepla*.

Rozlišujeme přestup tepla:

- při nuceném proudění kapaliny nebo plynu (nucená konvekce),
- při přirozeném proudění kapaliny nebo plynu (přirozená konvekce).

Nucené proudění je takové, které je způsobováno vnějšími silami (např. silami vznikajícími spuštěním čerpadla nebo ventilátoru) a přirozené, takové které je způsobováno nerovnoměrným rozdělením hustoty tekutiny v poli zemské tíže.

Přestup tepla konvekcí je tím větší, čím větší je rychlosť proudění tekutiny při nucené konvekci, nebo čím větší je rozdíl teplot při přirozené konvekci. Tepelný tok konvekcí mezi plochou S o teplotě t_p a tekutinou o teplotě t_m je dán vztahem:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (t_p - t_m), \quad (5.9)$$

α - součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Hodnota součinitele přestupu tepla se vyšetřuje převážně experimentálně.

5.2.3 Prostup tepla stěnou

Prostupem tepla nazýváme výměnu tepla mezi dvěma tekutinami, plyny nebo kapalinami oddělenými tuhou stěnou. Prostup tepla se tedy skládá z prostupu tepla, vedení tepla a opět prostupu tepla. Z hlediska lokálního rozložení teploty prostředí (tekutiny) podél stěny se rozlišuje:

- prostup tepla stěnou při stálých teplotách prostředí (např. prostup tepla stěnou z vytápěné místnosti do venkovního prostředí),
- prostup tepla stěnou při proměnlivých teplotách prostředí (např. prostup u ohříváků).

5.2.4 Prostup tepla při stálých teplotách prostředí

Prostup tepla rovinnou stěnou

Za stálých teplotních podmínek prostředí lze pro prostup tepla rovinnou stěnou z prostředí o teplotě t_1 do prostředí o teplotě t_2 psát rovnici:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S \cdot (t_1 - t_2), \quad (5.10)$$

S - plocha stěny [m^2],

s - tloušťka stěny [m],

λ - měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

α_1 - činitel přestupu na jedné straně stěny [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

α_2 - činitel přestupu na druhé straně stěny [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

t_1 - teplota prostředí na jedné straně stěny [$^\circ\text{C}$],

t_2 - teplota prostředí na druhé straně stěny [$^\circ\text{C}$].

Dále můžeme psát rovnici:

$$Q = k \cdot S \cdot (t_1 - t_2), \quad (5.11)$$

ve které

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5.12)$$

k - součinitel prostupu tepla stěnou [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$].

Hodnoty součinitele prostupu tepla najdeme pro obvyklé stavební materiály a obvyklé tloušťky zdiva v literatuře. Tyto hodnoty jsou zjištěny experimentálně.

Převrácena hodnota $1/k$ se nazývá **tepelný odpor** materiálu.

Pro vícevrstvou stěnu je tepelný odpor při prostupu:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (5.13)$$

tepelný tok je:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S \cdot (t_1 - t_2). \quad (5.14)$$

5.2.5 Sdílení tepla sáláním

Tepelné sálání (tepelné záření, termální radiace) je přeměna tepelné energie tělesa v zářivou a předávání (emise) zářivé energie do prostoru, obklopujícího těleso. Opětnou přeměnu zářivé energie, dopadající na těleso, v energii tepelnou nazýváme pohlcování (termální absorbce). Vzájemné vyzařování (emise) a pohlcování (absorbce) zářivé energie mezi dvěma nebo více tělesy s různými povrchovými teplotami nazýváme sdílení tepla sáláním (radiací).

5.3 Otopná tělesa

Pro výpočet tepelného výkonu otopních těles platí vztah:

$$Q = k \cdot S \cdot (t_m - t_i), \quad (5.15)$$

k - součinitel prostupu tepla stěnou [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],

S - povrch otopního tělesa [m^2],

t_m - střední teplota otopního média [$^\circ\text{C}$],

t_i - teplota v místnosti [$^\circ\text{C}$].

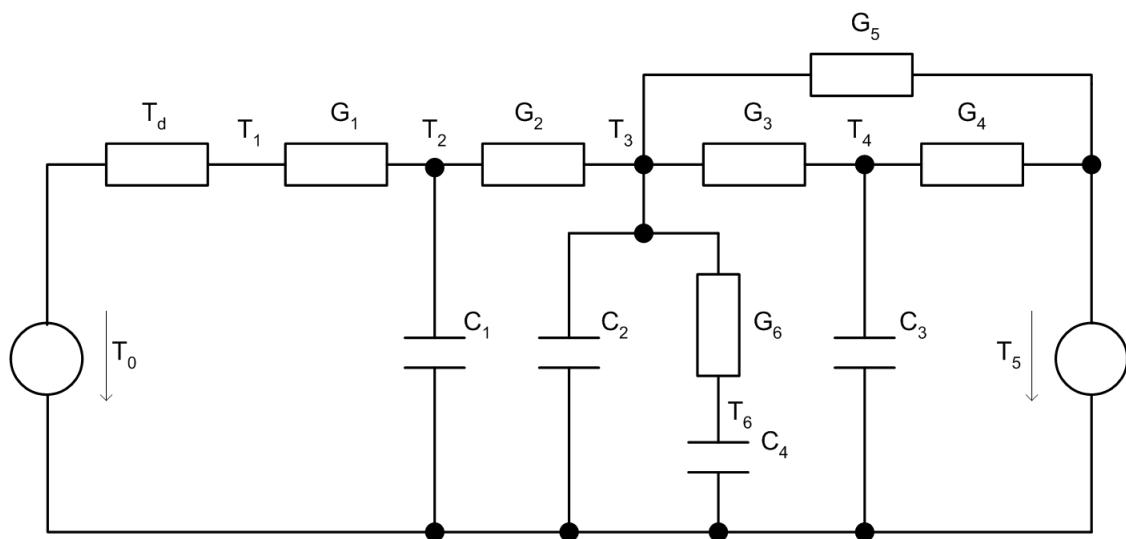
Součinitel prostupu tepla k u otopních těles bez zákrytu závisí především na tváru a charakteristických rozměrech (výšce a hloubce) tělesa a na rozdílu teplot $\Delta t = t_m - t_i$. V menší míře pak závisí součinitel k také na délce tělesa a na umístění tělesa v místnosti.

Součinitel prostupu tepla k se u kovových otopních těles přibližně rovná součinu přestupu tepla $\alpha = \alpha_s + \alpha_k$ na vnější straně, neboť tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně (na straně otopního média) a tepelný odpor při vedení tepla stěnou, jsou velmi malé, a lze je proto zanedbat.

5.4 Náhradní elektrické schéma vytápěného objektu

Pro zvolenou místo v objektu Senovážné náměstí č. p. 366 na základě analogie mezi elektrickými a tepelnými systémy lze sestavit následující ekvivalentní náhradní elektrické schéma tepelného systému (obrázek 5.1). Zdroje tepelného výkonu (kotel, venkovní prostředí) jsou zde reprezentovány zdroji napětí, tepelné kapacity soustavy kapacitami elektrickými a tepelné odpory (vodivosti) tepelnými odpory elektrickými. Tepelnou vodivost označíme na základě elektrotepelné analogie podobně jako u elektrických obvodů písmenem **G**.

Z náhradního elektrického schématu vytápěné budovy dostaneme metodou uzlových napětí soustavu diferenciálních rovnic, která popisuje chování vytápěného objektu. Tato soustava nám reprezentuje matematický model vytápěného objektu.



T_0 - teplota vody na výstupu zdroje

T_1 - teplota vody na vstupu do radiátorů

T_2 - povrchová teplota radiátorů

T_3 - prostorová teplota interiéru vytápěného objektu

T_4 - teplota obvodového zdiva

T_5 - teplota exteriéru

T_6 - teplota vnitřního zdiva

G_1 - tepelná vodivost rozhraní vody a radiátorů

G_2 - tepelná vodivost rozhraní radiátorů a interiéru

G_3 - tepelná vodivost rozhraní interiéru a obvodového zdiva

G_4 - tepelná vodivost rozhraní obvodového zdiva a exteriéru

G_5 - tepelná vodivost rozhraní oken, dveří a exteriéru

G_6 - tepelná vodivost rozhraní interiéru a vnitřního zdiva

C_1 - tepelná kapacita otopné vody

C_2 - tepelná kapacita vzduchu uvnitř vytápěného objektu

C_3 - tepelná kapacita obvodového zdiva

C_4 - tepelná kapacita vnitřního zdiva

T_d - dopravní zpoždění otopné vody od zdroje k radiátorům

Obrázek 5.1: Náhradní elektrické schéma vytápěného objektu

Při zanedbání dopravního zpoždění T_d , můžeme náhradní elektrické schéma pop-

sat soustavou rovnic:

$$(T_2 - T_1) \cdot G_1 + (T_2 - T_3) \cdot G_2 + C_1 \cdot \frac{dT_2}{dt} = 0, \quad (5.16)$$

$$(T_3 - T_2) \cdot G_2 + (T_3 - T_4) \cdot G_3 + (T_3 - T_5) \cdot G_5 + (T_3 - T_6) \cdot G_6 + C_2 \cdot \frac{dT_3}{dt} = 0, \quad (5.17)$$

$$(T_4 - T_3) \cdot G_3 + (T_4 - T_5) \cdot G_4 + C_3 \cdot \frac{dT_4}{dt} = 0, \quad (5.18)$$

$$(T_6 - T_3) \cdot G_6 + C_4 \cdot \frac{dT_6}{dt} = 0. \quad (5.19)$$

Po úpravě rovnic dostaneme:

$$-T_1 \cdot G_1 + T_2 \cdot (G_1 + G_2) - T_3 \cdot G_2 = -C_1 \cdot \frac{dT_2}{dt}, \quad (5.20)$$

$$-T_2 \cdot G_2 + T_3 \cdot (G_2 + G_3 + G_5 + G_6) - T_4 \cdot G_3 - T_5 \cdot G_5 - T_6 \cdot G_6 = -C_2 \cdot \frac{dT_3}{dt}, \quad (5.21)$$

$$-T_3 \cdot G_3 + T_4 \cdot (G_3 + G_4) - T_5 \cdot G_4 = -C_3 \cdot \frac{dT_4}{dt}, \quad (5.22)$$

$$T_6 \cdot G_6 - T_3 \cdot G_6 = -C_4 \cdot \frac{dT_6}{dt}. \quad (5.23)$$

Soustavu rovnic vynásobíme jednotlivými kapacitami C_i a dostaneme:

$$T_1 \cdot \frac{G_1}{C_1} - T_2 \cdot \frac{G_1 + G_2}{C_1} + T_3 \cdot \frac{G_2}{C_1} = \frac{dT_2}{dt}, \quad (5.24)$$

$$T_2 \cdot \frac{G_2}{C_2} - T_3 \cdot \frac{G_2 + G_3 + G_5 + G_6}{C_2} + T_4 \cdot \frac{G_3}{C_2} + T_5 \cdot \frac{G_5}{C_2} + T_6 \cdot \frac{G_6}{C_2} = \frac{dT_3}{dt}, \quad (5.25)$$

$$T_3 \cdot \frac{G_3}{C_3} - T_4 \cdot \frac{G_3 + G_4}{C_3} + T_5 \cdot \frac{G_4}{C_3} = \frac{dT_4}{dt}, \quad (5.26)$$

$$T_3 \cdot \frac{G_6}{C_4} - T_6 \cdot \frac{G_6}{C_4} = \frac{dT_6}{dt}. \quad (5.27)$$

Integrací soustavy rovnic dostaneme:

$$\int \left(T_1 \cdot \frac{G_1}{C_1} - T_2 \cdot \frac{G_1 + G_2}{C_1} + T_3 \cdot \frac{G_2}{C_1} \right) dt = \int \frac{dT_2}{dt} dt = T_2 + T_{20}, \quad (5.28)$$

$$\begin{aligned} \int \left(T_2 \cdot \frac{G_2}{C_2} - T_3 \cdot \frac{G_2 + G_3 + G_5 + G_6}{C_2} + T_4 \cdot \frac{G_3}{C_2} + T_5 \cdot \frac{G_5}{C_2} + T_6 \cdot \frac{G_6}{C_2} \right) dt = \\ (5.29) \end{aligned}$$

$$= \int \frac{dT_3}{dt} dt = T_3 + T_{30},$$

$$\int \left(T_3 \cdot \frac{G_6}{C_4} - T_6 \cdot \frac{G_6}{C_4} \right) dt = \int \frac{dT_6}{dt} dt = T_6 + T_{60}, \quad (5.30)$$

kde T_{20} , T_{30} , T_{40} , T_{60} jsou počáteční podmínky pro jednotlivé kondenzátory.

Pro přehlednost zavedu následující substituce:

$$a_{11} = \frac{G_1}{C_1}, a_{12} = -\frac{G_1 + G_2}{C_1}, a_{13} = \frac{G_2}{C_1}, \quad (5.31)$$

$$a_{14} = \frac{G_2}{C_2}, a_{15} = -\frac{G_2 + G_3 + G_5 + G_6}{C_2}, a_{16} = \frac{G_3}{C_2}, \quad (5.32)$$

$$a_{17} = \frac{G_5}{C_2}, a_{18} = \frac{G_6}{C_2}, a_{19} = \frac{G_3}{C_3}, \quad (5.33)$$

$$a_{20} = -\frac{G_3 + G_4}{C_3}, a_{21} = -\frac{G_4}{C_3}, a_{22} = \frac{G_6}{C_4}, a_{23} = -\frac{G_6}{C_4}. \quad (5.34)$$

Po zavedení substitucí dostaneme tuto soustavu rovnic:

$$\int (T_1 \cdot a_{11} + T_2 \cdot a_{12} + T_3 \cdot a_{13}) dt = T_2 + T_{20}, \quad (5.35)$$

$$\int (T_2 \cdot a_{14} + T_3 \cdot a_{15} + T_4 \cdot a_{16} + T_5 \cdot a_{17} + T_6 \cdot a_{18}) dt = T_3 + T_{30}, \quad (5.36)$$

$$\int (T_3 \cdot a_{19} + T_4 \cdot a_{20} + T_5 \cdot a_{21}) dt = T_4 + T_{40}, \quad (5.37)$$

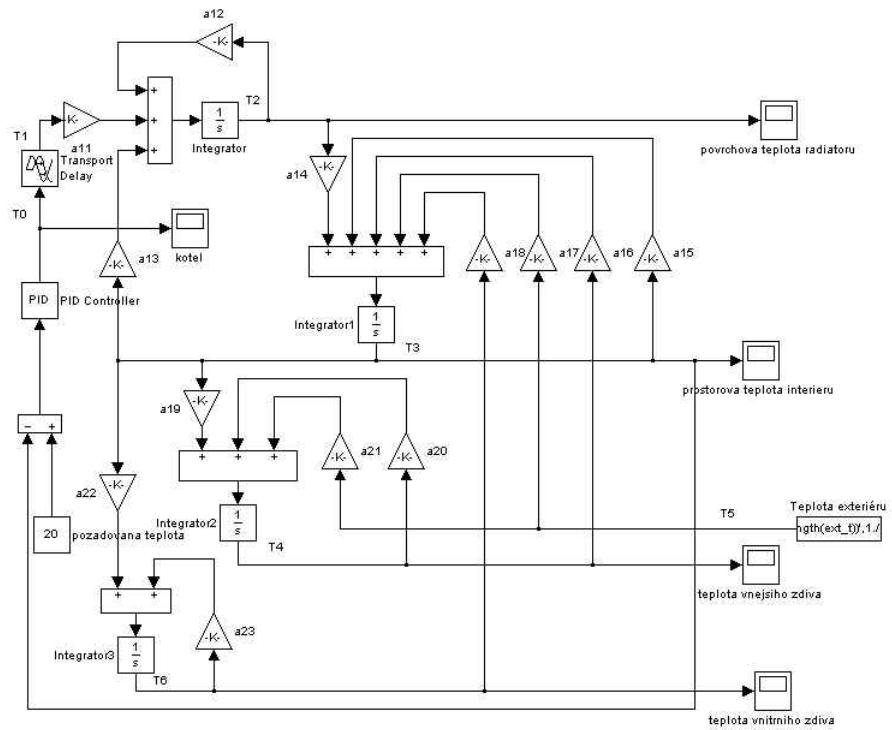
$$\int (T_3 \cdot a_{22} + T_6 \cdot a_{23}) dt = T_6 + T_{60}. \quad (5.38)$$

Kapitola 6

Simulační počítačový model vytápěného objektu

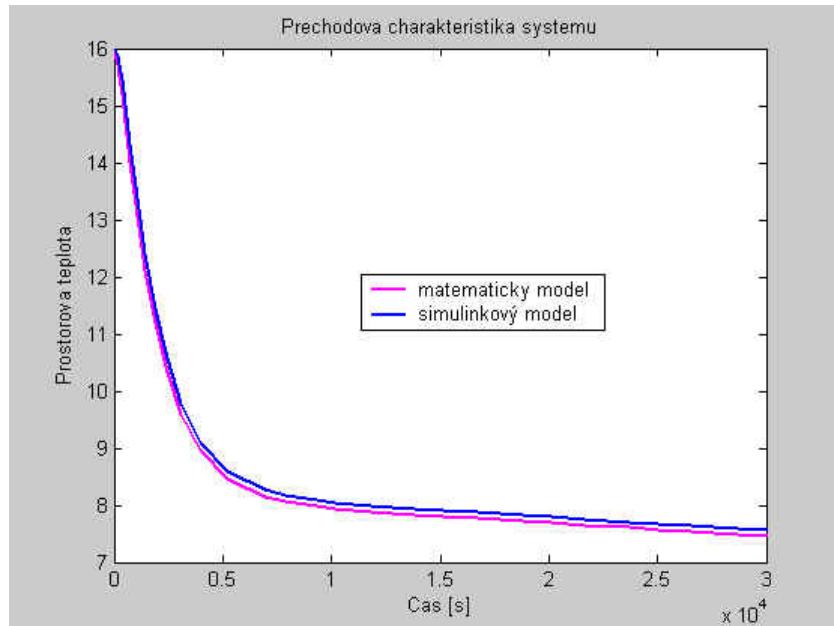
Ze získaného matematického modelu vytápěné budovy vytvořím blokové simulační schéma v programu SIMULINK, který je součástí programového balíku MATLAB.

Simulační počítačový model vytápěného objektu je na obrázku 6.1. Je navržen pro radiátorovou otopnou soustavu. Model postihuje regulaci teploty při konstantní venkovní a požadované vnitřní teplotě. Ekvitemní regulátor tedy nastaví teplotu otopné vody podle venkovní teploty a regulaci potom provádí PID regulátor.



Obrázek 6.1: Simulační model objektu

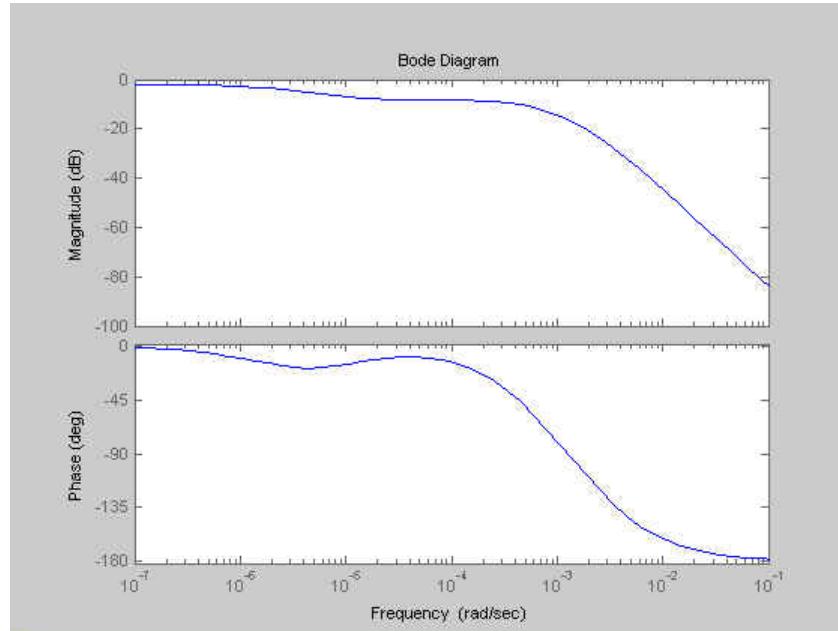
Stanovený simulační model jsem popsala stavovým popisem. Průběh přechodové charakteristiky je na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Přechodová charakteristika

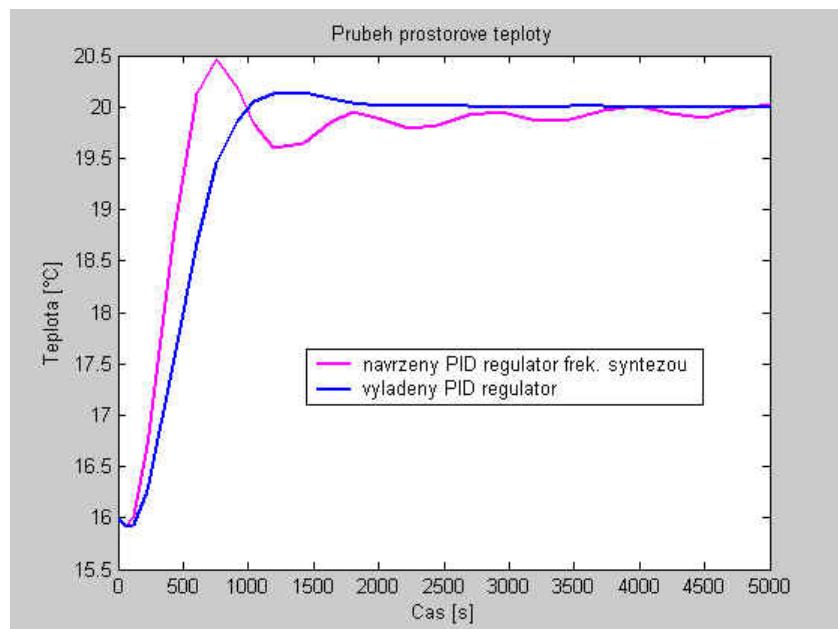
Vzhledem k tomu, že přechodové charakteristiky jsou téměř totožné, můžeme

pro matematický popis vykreslit frekvenční charakteristiky (Obrázek 6.3) a z nich navrhnut PID regulátor.



Obrázek 6.3: Frekvenční charakteristika modelu otopného systému

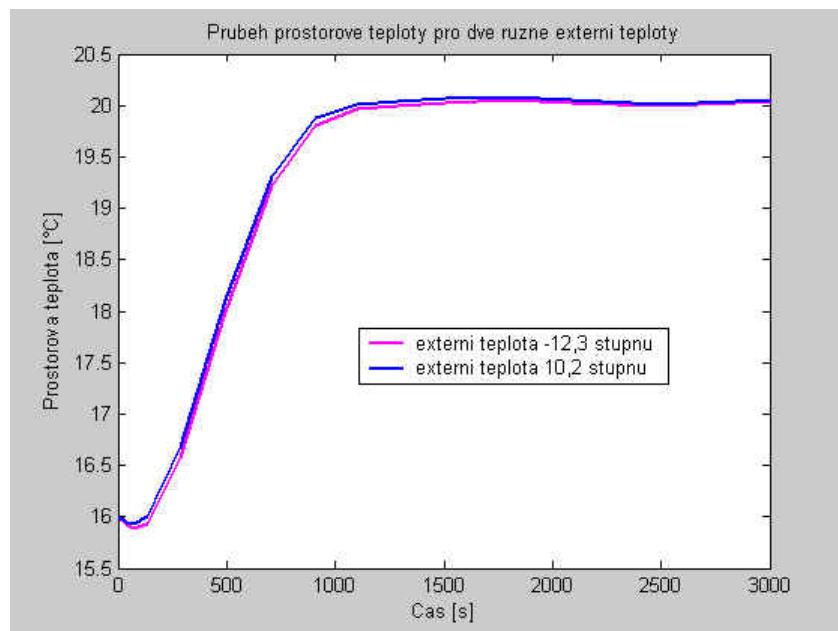
6.1 Návrh PID regulátoru



Obrázek 6.4: Výsledný průběh teploty

Celý návrh byl počítán pro externí teplotu 0°C , neboť pro vypočtené konstanty je vliv externí teploty téměř zanedbatelný. Je to dáno tím, že zvolená místnost má pouze jednu obvodovou stěnu a tři zbylé sousedí s dalšími vytápěnými místnostmi. Podle modelu, neklesne teplota místnosti pod 16°C , za předpokladu provozu kotle. Teplotu 16°C tedy považuji za výchozí.

Pro srovnání jsem celý model spočítala pro dvě externí teploty a výsledné průběhy zobrazila na Obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Průběh prostorové teploty v závislosti na externí teplotě

Kapitola 7

Grafická prezentace

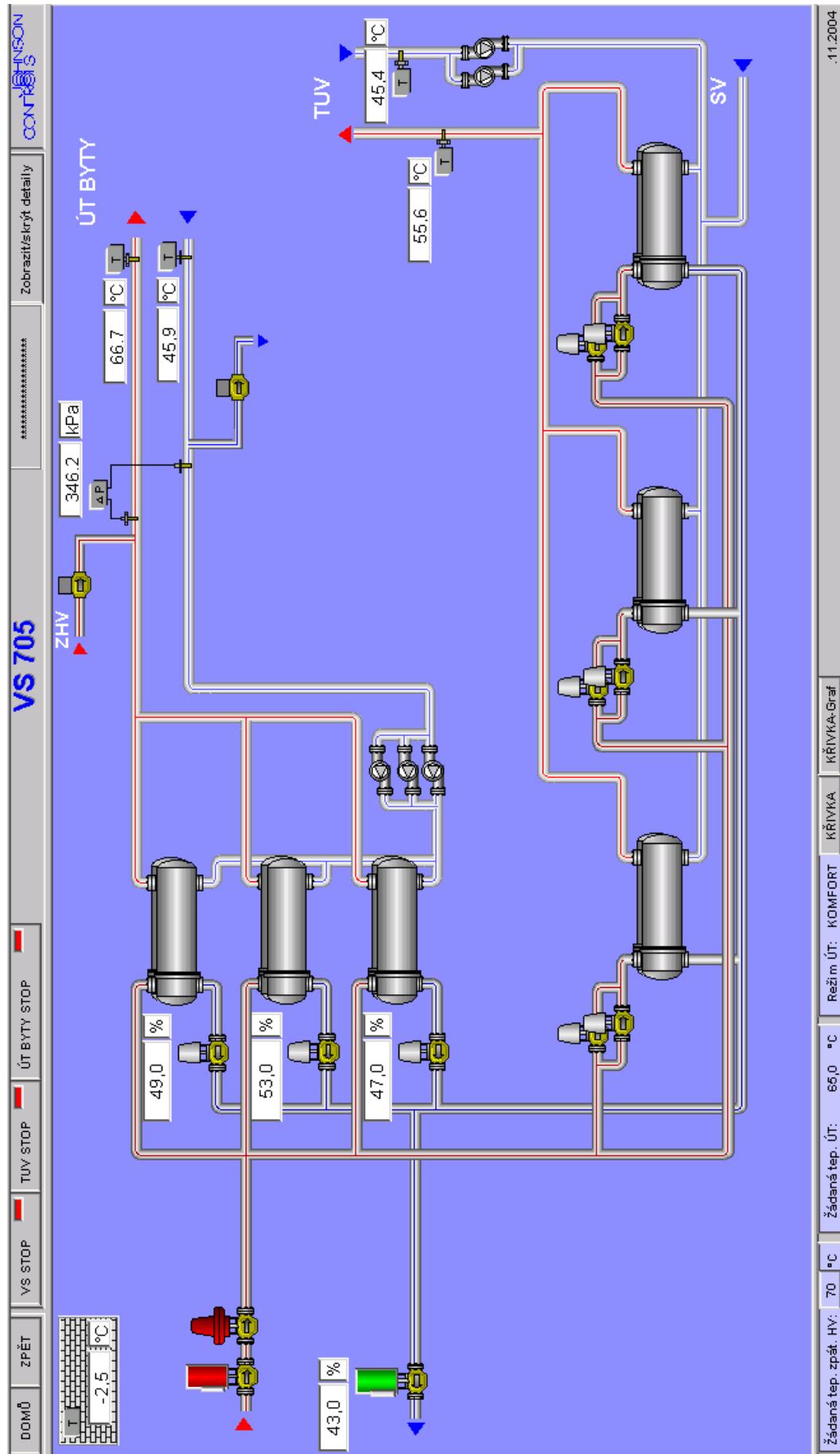
7.1 Návrh vizualizace technologických celků

Pro tuto kapitolu jsem použila [11].

Pro regulaci, řízení provozu a sledování provozních a poruchových stavů všech zařízení budovy a jejich vzájemných vazeb slouží automatizované systémy řízení (ASŘ). V současné době se používají decentralizované řídicí systémy, využívající na základní (nejnižší) úrovni hiarchické struktury programovatelné mikroprocesorové regulátory. Tyto regulátory řídí podle definovaných algoritmů, uložených v jejich paměti, jednotlivá zařízení - tedy i jednotlivé vzduchotechnické jednotky, otopné nebo chladicí okruhy atd.. Informace jsou v regulátorech uloženy a zpracovány v digitální formě a je proto možné je prostřednictvím datové komunikace přenášet a využívat přitom všech moderních metod dálkového přenosu dat.

Pro účely provozování, seřizování a zvláště servisu technologického zařízení budov je výhodné, je-li možné veškeré informace monitorovat na dispečerském pracovišti. Informace musí být rychle dosažitelné i ze zdánlivě nesouvisejících technologických subsystémů, ale nesmí dojít k zahlcení dispečera. Vizualizace musí informaci kontrolovat a převádět na názorná zobrazení.

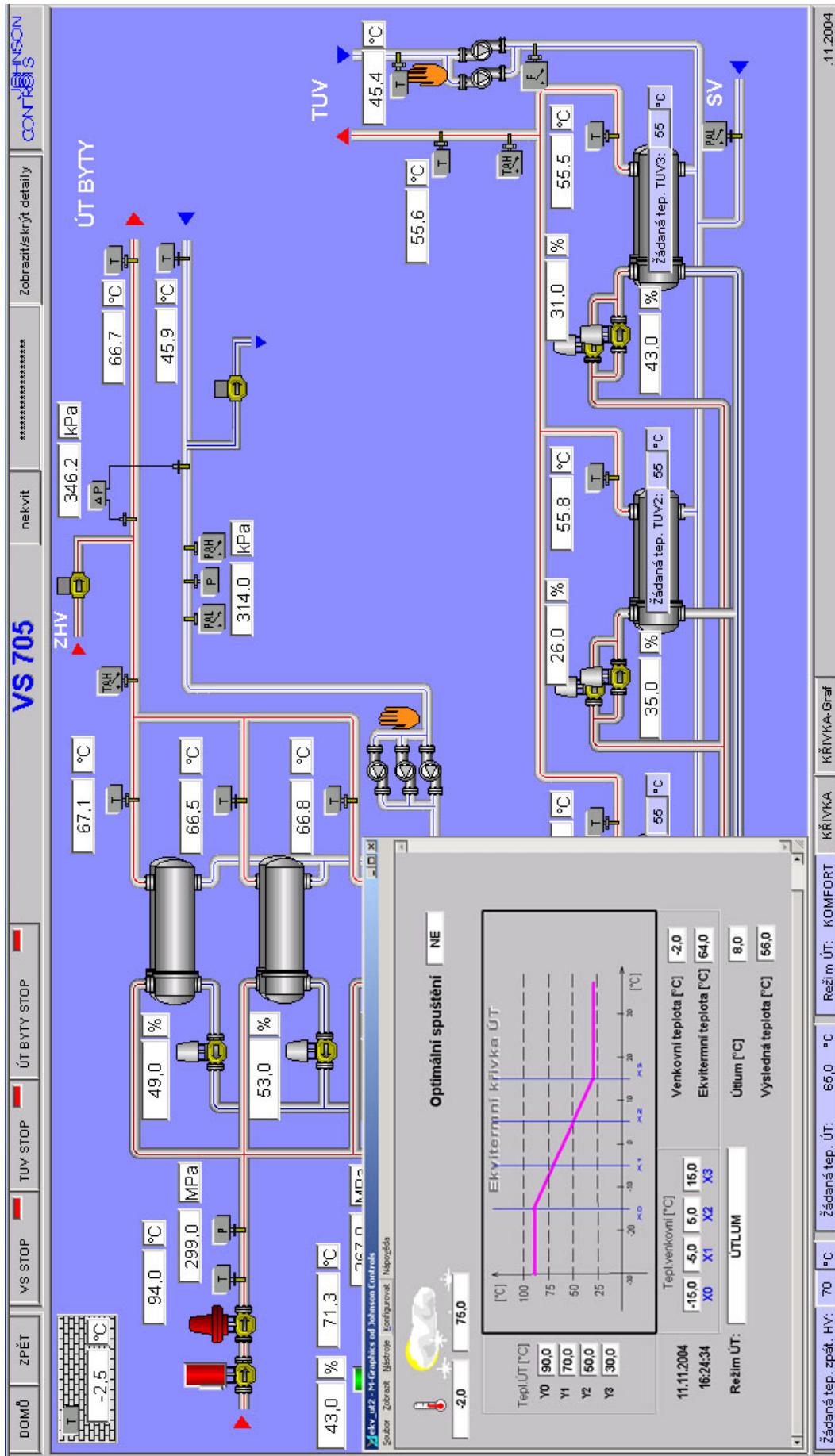
Grafickou prezentaci je možné provádět v různých SCADA (Supervisory Control and Data accquizition) prostředích. Mezi nejznámější patří Genesis od firmy Iconics, InTouch od firmy Intellution nebo WebFactory od firmy Wonder Ware.



Obrázek 7.1: Návrh grafické prezentace

Základním způsobem monitorování provozu technického zařízení budov je vizualizace na dispečerském pracovišti budovy či areálu, kde je dané zařízení provozováno. Řízené technologické zařízení (např. vzduchotechnická jednotka) je graficky znázorněno formou dynamizovaného barevného trojrozměrného schématu, ve kterém jsou okna pro zobrazení dat, odpovídajících jednotlivým měřeným hodnotám nebo provozním stavům zařízení. (Obrázek 7.1) Dynamizací se rozumí vazba mezi grafickými objekty a zdroji dat, jejímž výsledkem je změna zobrazení grafického objektu v závislosti na skutečném stavu příslušného datového bodu. Knihovna aktivních prvků umožňuje různé způsoby dynamizace:

- změnu velikosti objektu, např. znázornění napouštění nádrží, změna sloupkového grafu, apod.,
 - změnu umístění objektu, např. jako je pohyb ukazatelů, tok médií v potrubích, pohyb ventilů a šoupátek apod.,
 - otáčení objektů, jako jsou např. dveře, klapky, ručičky měřicích přístrojů apodně,
 - skrytí určitých grafických objektů, jako např. zpráv nebo varovných textů v závislosti na daných logických podmírkách,
 - změna barvy nebo odstínu po stupních nebo plynule, např. znázornění změny teploty v místnosti,
 - blikání některých objektů pro znázornění poplachového stavu,
 - volbu zobrazení určitého objektu ze skupiny podle určitých zadaných podmínek, např. spotřebiče s maximálním odběrem,
 - animaci provozu objektů, např. čerpadel, ventilátorů, zvlhčování a podobně,
 - zvětšení libovolné části obrazu skokově nebo plynule.
- Dále může být jakékoli schéma rozšířeno přidáním ovládacích tlačítek, výběrových políček a otočných nebo posuvných ovladačů. Kliknutím myší na tyto ovladače lze přímo měnit stav řízené technologie. Na schématech může být též zobrazen reálný čas a datum v několika různých formátech.

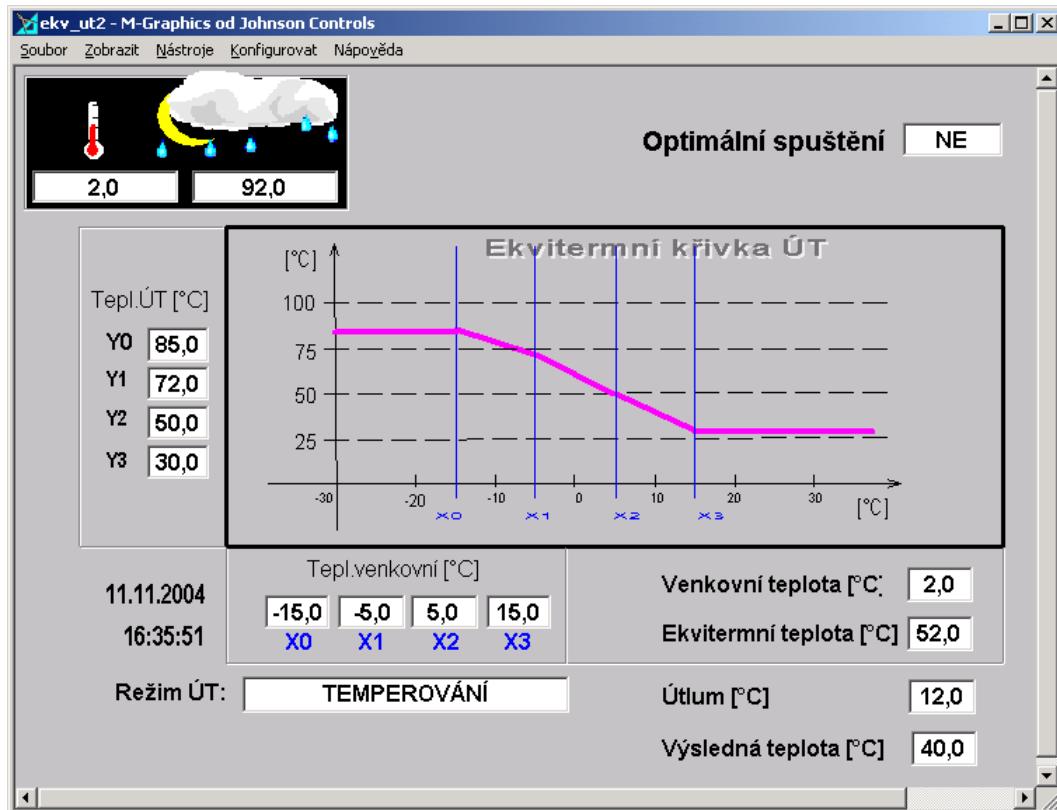


Obrázek 7.2: Návrh grafické prezentace se zobrazenými detailey

Zobrazené hodnoty mohou být také výsledkem výpočtů předem definovaných výrazů, pro které lze použít aritmetické, relační, logické a bitové operátory nebo funkce.

Pro účely grafické prezentace sledovaných algoritmů inteligentní budovy bylo přehledové schéma Obrázek 7.1 doplněno skrytými detailemi a rozbalovacími okny, které dispečer zobrazí pomocí myši stisknutím virtuálních tlačítek Obrázek 7.2. Takové řešení je přínosem z několika důvodů:

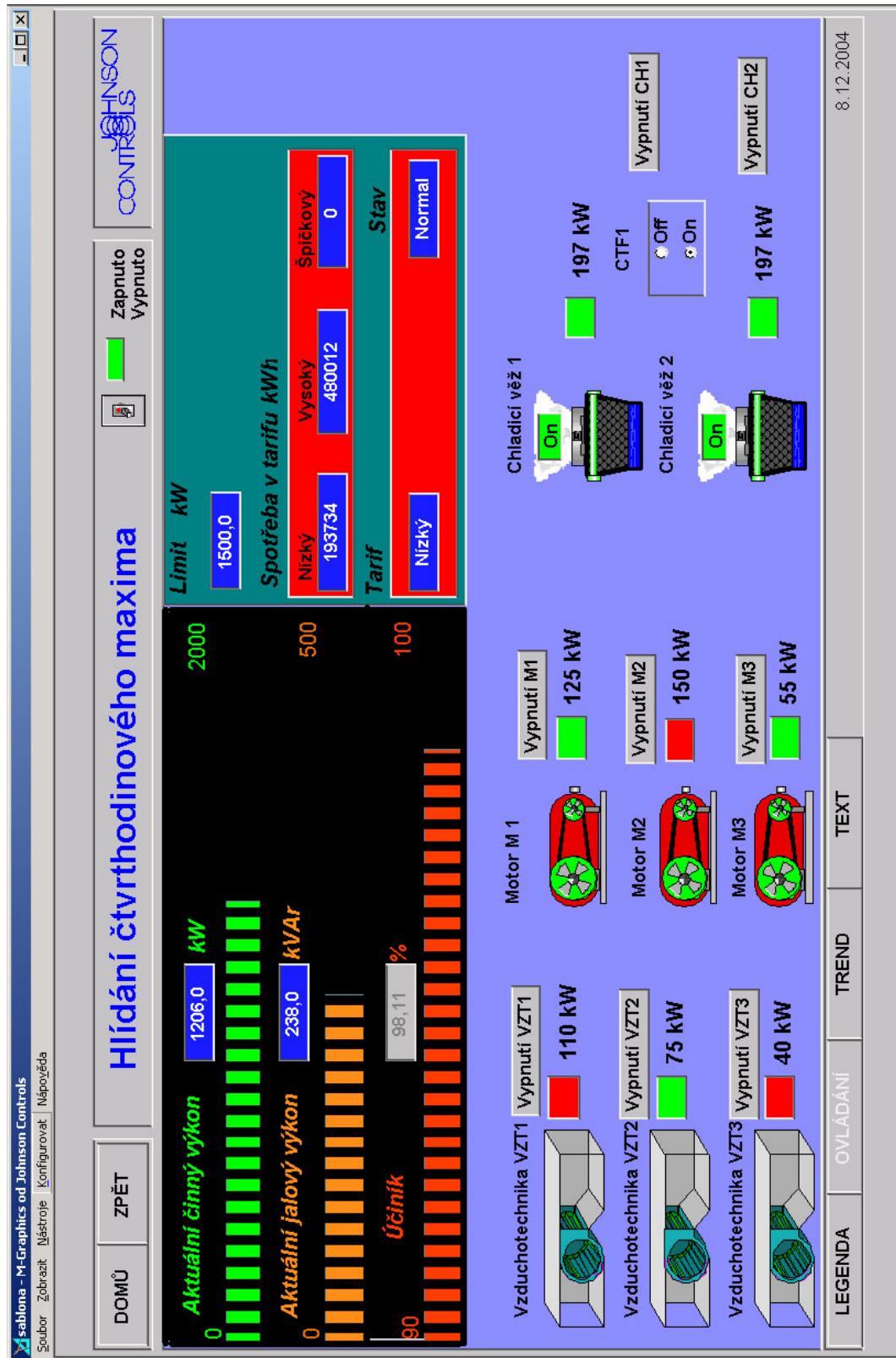
- a) skrytí detailů při rutinném sledování řízené technologie zpřehledňuje obrazovku a dispečer se může soustředit na podstatné věci,
- b) skrytá okna zobrazují zejména ty detaile, které se používají pouze občas nebo slouží k ručnímu povelování a neměly by proto být na obrazovce při automatickém provozu, ale měly by být zároveň rychle dostupné v případě potřeby,
- c) Skrytí detailů má rovněž vliv na zatížení komunikační sítě řídicího systému, neboť zobrazovaná data jsou neustále občerstvována. V případě bezdrátové komunikace v podmírkách silného rušení bývá proto výhodné, když nejsou komunikační kanály příliš vytěžovány.



Obrázek 7.3: Detail ekvitermní křivky

Detailní okno ”Ekvitermní křivka” také obsahuje další relevantní informace nutné pro výpočet pracovního bodu topné (chladicí) soustavy:

- venkovní teplotu,
- relativní vlhkost
- časový režim tepelného komfortu s příslušnou hodnotou útlumu,
- zobrazení aktuálního data a času,
- informaci o chodu algoritmu optimálního spouštění.



Obrázek 7.4: Přehled spotřeb a odepnutých zátěží

Obrázek 7.4 zobrazuje přehled spotřeb a odepnutých zátěží podle algoritmu omezování spotřeby a odpínání zátěží. Umožňuje operátorovi rychlou orientaci v energet-

ických tocích budovy a zároveň ukazuje, která technologická zařízení jsou odepsaná optimalizačním algoritmem.

Výkonným nástrojem k analýze provozních dat zařízení je zobrazení trendů datových bodů. Umožňuje uživateli ve formě tabulek nebo grafických diagramů si multánně zobrazit libovolnou kombinaci hodnot informačních bodů, pravidelně odcítaných a ukládaných v databázi. V jednom náhledu může uživatel zobrazit libovolnou kombinaci zdrojů dat. Diagram poskytuje grafy s volitelnými zobrazeními vlastnostmi. Při analýze každého datového zdroje může uživatel nastavit libovolný časový posun. Při tom se zobrazená data přesunou tak, že data vzniklá v rozdílných časech může uživatel vyhodnocovat společně, aniž by musel celé zobrazení rolovat. Tento posun je výhodně použit při porovnání účinnosti různých úprav regulačních charakteristik s předešlým obdobím. Dále může operátor rychle zobrazen podrobnější informace o jednotlivých datových zdrojích jednoduchým kliknutím na příslušnou zobrazenou hodnotu a též zvětšit libovolný výřez diagramu k provedení přesné analýzy.

Grafické zobrazení trendu (viz. Obrázek 7.5) se může skládat z jednoho nebo více grafů. Při tom lze on-line nastavovat parametry zobrazení, jako je například rozsah, barva a způsob vykreslování diagramu. Vícenásobné grafy jsou velmi výhodné při porovnávání datových zdrojů s různými rozsahy nebo jednotkami (teplota, tlak a průtok).

Obrázek 7.5 zachycuje vícenásobný trend s následujícími hodnotami naměřenými ve Fakultní nemocnici v Motole:

AI_1 - venkovní teplota

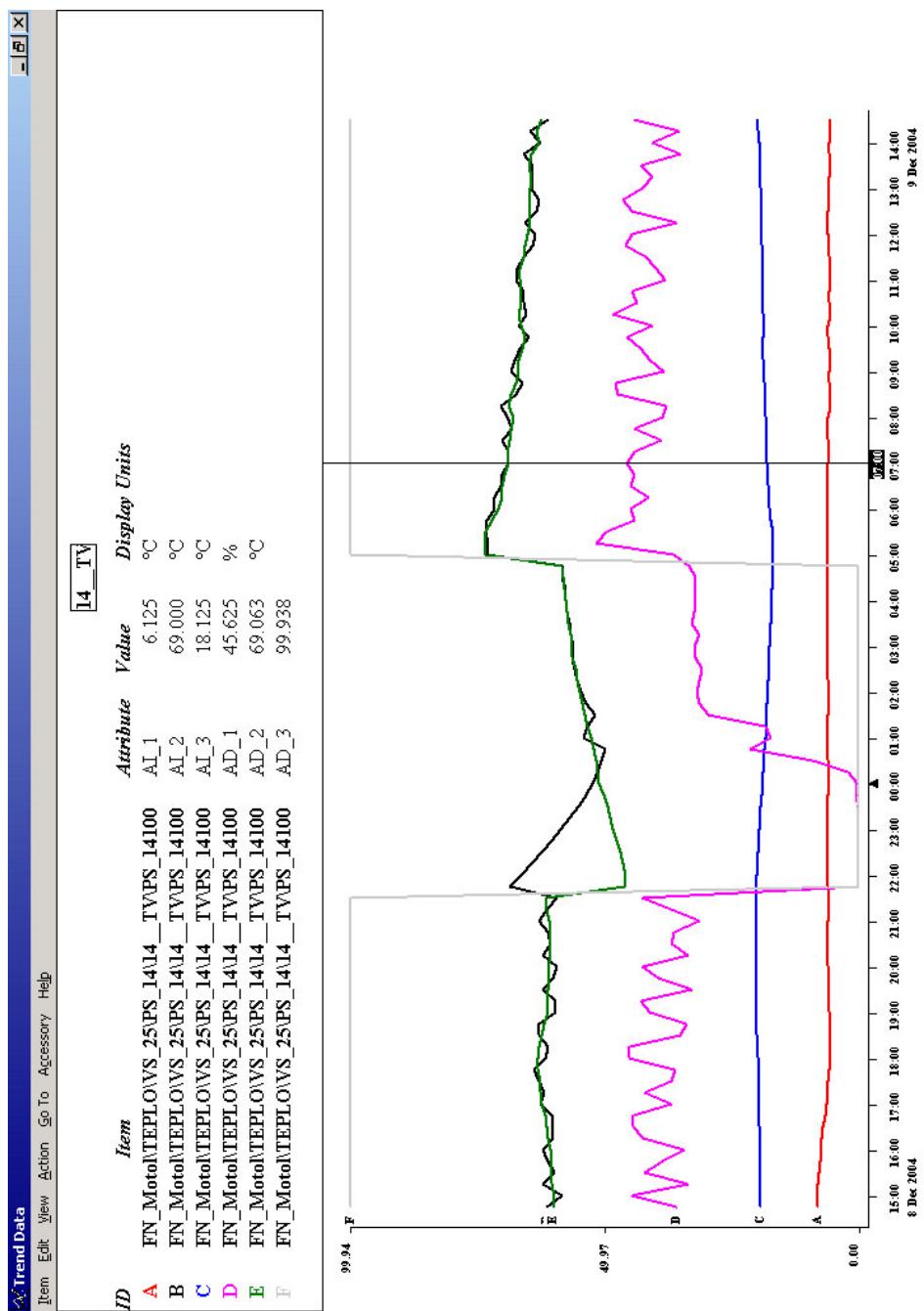
AI_2 - teplota topné vody

AI_3 - prostorová teplota

AD_1 - poloha regulačního ventilu

AD_2 - žádaná teplota topné vody (ekviterma se započítáním nočního útlumu)

AD_3 - ovládací signál oběhového čerpadla



Obrázek 7.5: Zobrazení trendu

Průběh trendu lze interpretovat následujícím způsobem:

- Dne 8.12.2004 ve 21:30 byl zapnuto noční útlum vytápění - vypnulo se čerpadlo, žádaná teplota se snížila a regulační ventil se uzavřel.
- Poté se postupně začala snižovat teplota vody v topném systému, v úseku cca do 00:00 vidíme pokles po exponenciální křivce, pozvolna se snižuje také prostorová teplota v budově.

- V 00:00 hodin 9.12.2004 vlivem poklesu venkovní teploty žádaná teplota topné vody zvolna roste, pootevírá se regulační ventil a roste i teplota vody v hydraulickém systému. Protože oběhové čerpadlo zůstává po dobu útlumu vypnuté, prostorová teplota stále mírně klesá.
- Ve 4:45 končí noční útlum, systém se opět rozbíhá a prostorová teplota se začíná zvyšovat.

7.2 Vizualizace aktuálních a historických dat

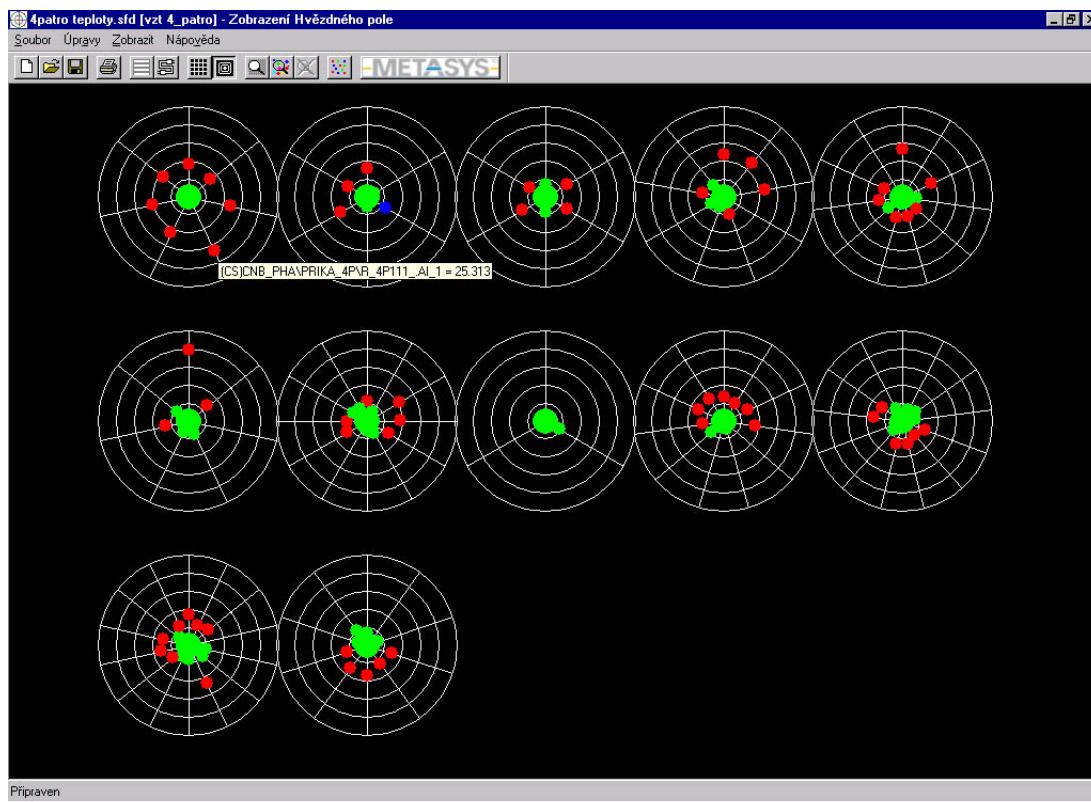
Uživatelům řídicích systémů budov jsou často během celého dne nabízena enormní množství dat, což vede k obtížnému určování, která systémová data vyžadují největší pozornost popřípadě nejrychlejší zásah.

Proto byla vyvinuta řada způsobů přehledného koncentrovaného zobrazení velkého množství aktuálních a historických dat. Pro účely prezentace dílčích parametrů tepelného komfortu v řízených místnostech a zároveň vazeb na algoritmy omezování spotřeby a přesouvání zátěží a na algoritmy optimálního spouštění a odstavování byly vybrány tyto metody vizualizace:

- * ”Hvězdné pole”
- * Řeka času
- * Barevné spektrum

7.2.1 ”Hvězdné pole”

Tento způsob zobrazení (viz. Obrázek 7.6) představuje abstrakci technologických systémů řízené budovy. Podstata funkce spočívá v možnosti transpozice grafického zobrazení známého systému na neznámý proces nebo systém. ”Hvězdné pole” spojuje různá data o řízených technologiích do jediného okna a zajišťuje tak celkový přehled o činnosti až sta řízených systémů.



Obrázek 7.6: "Hvězdné pole"

Tím, že zobrazení "Hvězdné pole" zpřehlední velké množství dat, velmi usnadní práci operátorům a umožní jím lepší porozumění a snadnější řízení komplexních systémů.

Reálná data řídicího systému jsou převedena do grafického zobrazení podobného hvězdné obloze s množstvím souhvězdí. Některé vlastnosti hvězdy jako velikost, jas nebo barva, umístění vzhledem k ostatním hvězdám a relativní pohyb odpovídají skutečným vlastnostem řízené technologie. S pomocí těchto vlastností lze charakteristiky zařízení jednoznačně zobrazit.

Hvězdy reprezentují digitální a analogovou informaci. Každá skupina se skládá z hlavní hvězdy a z vedlejších hvězd. Hlavní hvězda představuje stav digitálního bodu. Vedlejší hvězdy znázorňují rozdíl mezi analogovými hodnotami a příslušnými body nastavení. Vlastnosti hvězd odpovídají reálným vlastnostem podle následující tabulky:

Vlastnost	Hodnota	Hlavní hvězda	Vedlejší hvězdy
Velikost	Malá	Vypnuto	
	Velká	Zapnuto	
Barva	Zelená	Normální	Uvnitř pásmá necitlivosti
	Červená	Alarm	Hodnota > bod nastavení (+ pásmo necitlivosti)
Modrá			Hodnota < bod nastavení (- pásmo necitlivosti)
	Vzdálenost hlavní a vedlejší hvězdy		Úměrné odchylce od bodu nastavení

Tabulka 7.1: Vlastnosti hvězd a vizualizovaných veličin

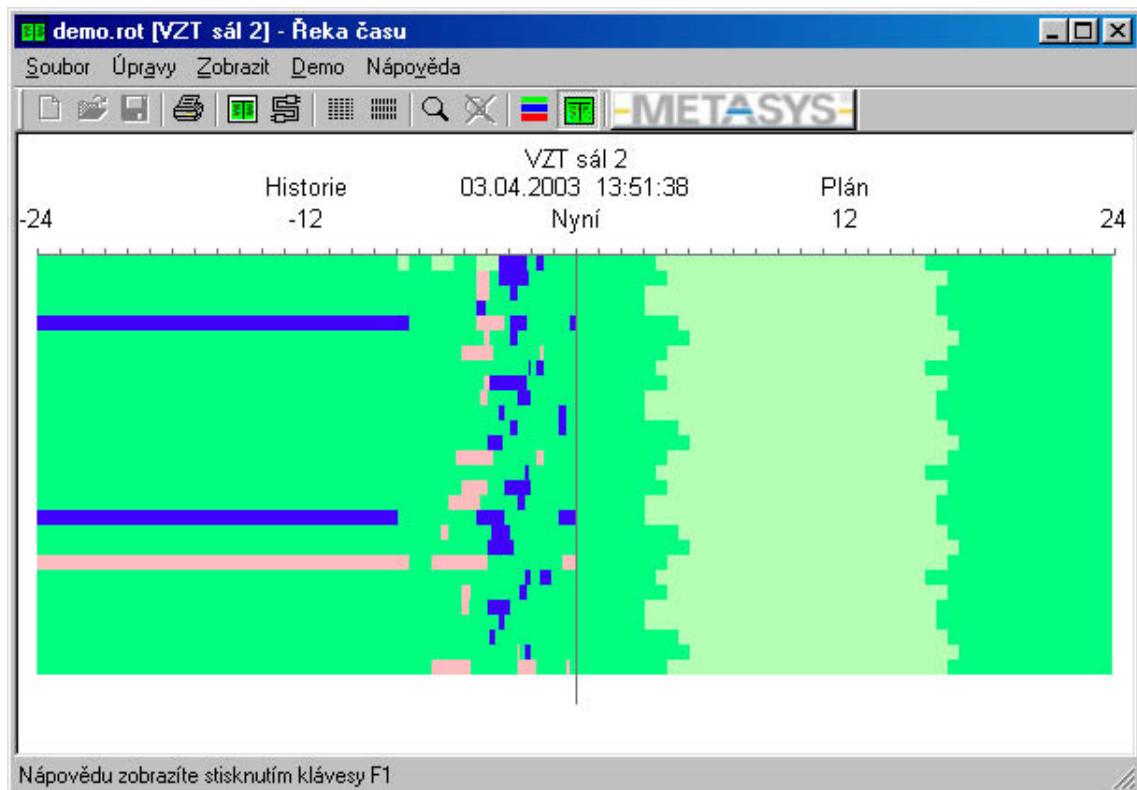
Pro sběr dat se používá technologie OPC (OLE for Process Controls). Zobrazení typu "Hvězdné pole" lze použít s libovolným uživatelským rozhraním, obsahujícím OPC server.

Tento způsob zobrazení informací umožňuje operátorům upravovat malé provozní odchylky před tím, než začnou být nepříjemné obyvatelům budovy. Operátor má přehled o tom, které vzduchotechnické zařízení pracuje v přípustných mezích a které vyžaduje okamžitou pozornost.

Obrázek 7.6 znázorňuje v koncentrované formě 12 vzduchotechnických zařízení, připravujících klima pro 4. Patro rozlehlé budovy. Každé vzduchotechnické zařízení (je reprezentováno jedním souhvězdím) vhání vzduch do cca 5 až 8 místností, kde je komfort dále upravován pomocí fan-coilů a radiátorů. Dispečer pak jediným pohledem na obrazovku vidí situaci v asi 60 místnostech najednou a dokáže rychle určit, které z nich vyžadují jeho přednostní pozornost.

7.2.2 Řeka času

Řeka času (viz. Obrázek 7.7) popisuje několik dynamických dat v jednom zobrazení, které nabízí přehled operací mnoha částí technologického zařízení. Výsledkem je snadné a rychlé vyhodnocení operátorem, které zařízení potřebuje zvýšenou pozornost.



Obrázek 7.7: Řeka času

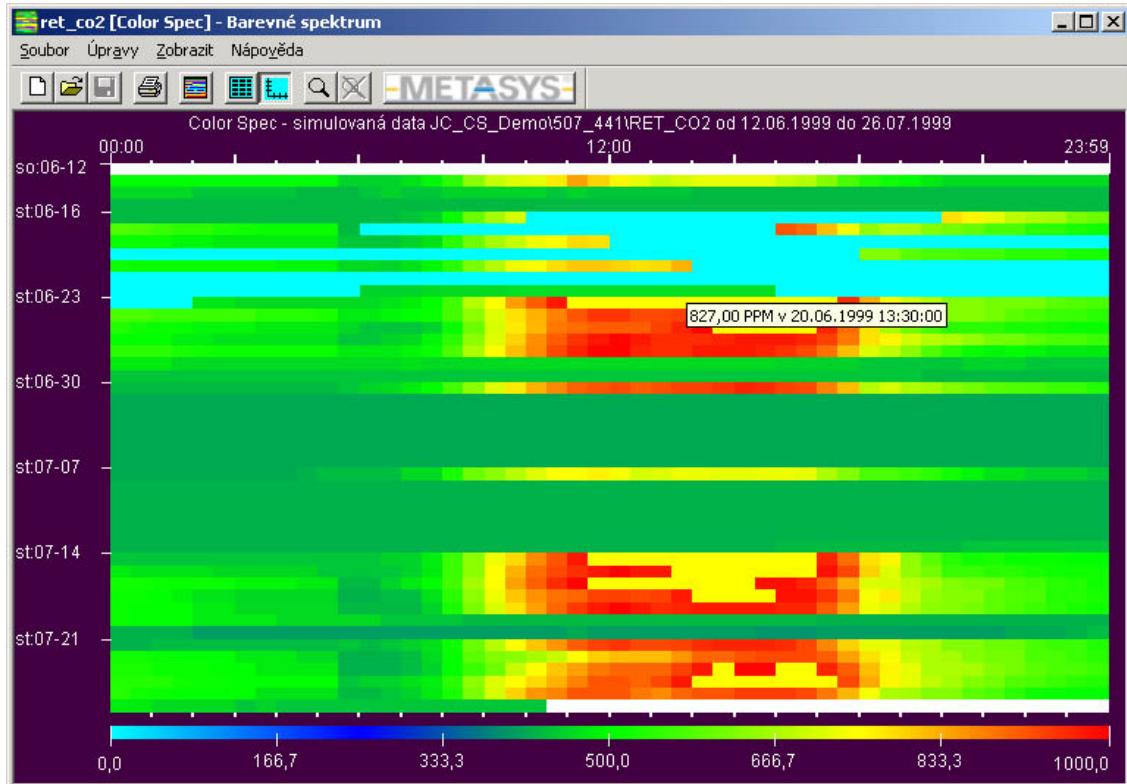
Řeka času je dynamickým zobrazením, které používá pro znázornění minulých a budoucích stavů binárních dat vodorovné sloupce. Data z minulosti jsou historickým stavem bodu, zatímco budoucí data jsou informací o časovém plánu bodu. Sloupce jsou rozděleny do částí, jejichž délka je proporcionální času, po který byl nebo bude daný bod v tomto stavu. Barva je použita pro zobrazení každého stavu bodu. Na vodorovné ose je zobrazen čas. Střed zobrazení reprezentuje aktuální čas a datum. Data za uplynulých 24 hodin se nacházejí od středu vlevo, zatímco data pro příštích 24 hodin (časový plán) se nacházejí od středu vpravo.

Obrázek 7.7 zobrazuje chování cca 30 VZT jednotek, vždy 24 hodin do minulosti a časový plán jejich provozu 24 hodin dopředu. Z barevných průběhů lze snadno identifikovat chod a režim činnosti každé jednotky, zda byla v poruše, zda byla řízena ručně, zda kontroléry jednotek komunikovaly a zda nejsou historická data k dispozici (byla smazána nebo se z nějakého důvodu neukládala).

7.2.3 Barevné spektrum

Barevné spektrum (viz. Obrázek 7.8) je informační vrstva aplikace, která běží na pracovních stanicích nebo na PC připojeném k pracovní stanici řídicího systému

budovy. Barevné spektrum zobrazuje historická analogová data tím, že tato data mapuje do barev. Hodnoty měřených položek jsou zobrazeny jako vertikální vrstvené proužky, každý proužek reprezentuje hodnoty dat za 24 hodin. Vzorky odpovídajícího času každého dne jsou vertikálně zarovnány tak, že opakující se vzorky jsou viditelné. Čas dne je zobrazen na horizontální ose a na vertikální ose je zobrazen den v týdnu.



Obrázek 7.8: Barevné spektrum

Zobrazení je velmi husté, protože zobrazuje sto a více proužků (bodů) dat. Zobrazuje na jediné obrazovce 20 000 a více vzorků dat. Tento formát zobrazení umožňuje uživateli sledovat opakující se vzorky v datech a tudíž nalézt nepravidelnosti v systémech vytápění, ventilace, klimatizace, atd..

Obrázek 7.8 zobrazuje hodnoty CO₂ ve vzduchu zasedací místnosti po dobu více než 6 týdnů. Ze spektra jsou zřetelně patrné dva týdny, kdy místnost nebyla prakticky využívána.

Kapitola 8

Závěr

V průběhu diplomové práce byla shrnuta koncepce řídicího systému inteligentní budovy. Bylo poukázáno na důležitost multidisciplinárního přístupu k jeho budování a na rozhodující vliv integrace jednotlivých subsystémů, ať již formou komunikační brány (gateway) nebo standardních komunikačních rozhraních a protokolů, jako je EIB, LonWorks nebo BACnet.

Analýza programové aplikace omezování spotřeby a přesouvání zátěží podle čtvrt-hodinového maxima ukázala, že největšími přínosy není absolutní úspora energie, ale zamezení penalizace při překročení sjednaného čtvrt hodinového maxima a také úspora plateb za technické maximum.

Při práci nad realizací algoritmu optimálního spouštění a odstavování při zachování tepelného komfortu byl nejprve analyzován stávající algoritmus konkrétní sledované budovy. Naměřené hodnoty potvrzují významnou úsporu energie na vytápení objektu dosahující 23 procent v porovnání s běžnou ekvitemní regulací a nočními a víkendovými útlumy. Poté byl sestaven simulační model otopného systému. Ukázalo se, že by syntéza optimálního regulátoru pro řízení v uzavřené regulační smyčce nebo řešení problému optimálního ovládání pro případ otevřené smyčky přesahovaly rámec této práce. Všechna naměřená data a simulované průběhy si je možné prohlédnout na přiloženém CD.

V rámci návrhu grafické prezentace optimalizačních algoritmů na dispečerských pracovištích inteligentních budov byla připravena řada schémat představujících řízenou technologii s různými variantami přehlednosti a detailního zobrazení. Klasická barevná dynamizovaná a animovaná grafická schémata a trendy historických dat byly doplněny o návrh dispečerských obrazovek využívajících nové metody přehledné vizualizace velkého množství aktuálních a historických dat formou logické abstrakce

technologických systémů do "Hvězdného pole", Řeky času a Barevného spektra. Takové pojetí vizualizace umožňuje dispečerům rychlé a efektivní rozhodování v krizových situacích a zároveň jim poskytuje koncentrovanou informaci ze složitě provázaných řídicích algoritmů inteligentních budov, kdy řada funkčních vazeb není na první pohled patrná a mohla by vést k desinterpretacím.

Literatura

- [1] ZINOBER, A. S. I.: *Optimal Control Theory*
The University of Sheffield, Jaro 2001
- [2] KRAUSS J.: NEUROBAT - a self - commissioned heating control system, *Sensors Application*, Ročník 2., Wiley-VCH, Duben 2001
- [3] BUSHBY, STEVEN T.: *BACnet - A Standard Communication Infrastructure for Intelligent Buildings*, Automation in Construction, vydání 6., č. 5-6, str. 529-540, 1997
- [4] TOMAN, K., KUNC, J.: *Systémová technika budov - Elektroinstalace podle standardu EIB*, FCC Public spol. s r.o., 1998
- [5] ECHELON CORPORATION: *Introduction to the LONWORKS System*
Palo Alto, USA, 1999
- [6] NEWMAN, H. M.: BACnet - The New Standard Protocol, *Electrical Contractor*, číslo 9., str. 119-122, Září 1997
- [7] HORÁČEK, P.: *Systémy a modely*, Vydavatelství ČVUT, 2001
- [8] ŠTECHA, J.: *Optimální rozhodování a řízení*, Vydavatelství ČVUT, 1999
- [9] ING. HYNIOVÁ K., CSc.: a DOC. ING. STŘÍBRSKÝ A., CSc. *Instrumentace procesů*, Návody ke cvičení, Vydavatelství ČVUT, 1996
- [10] BOJANOVSKÝ J.: *Inteligentní budova - Sborník konference vytápění Třeboň 2003*, str. 235 - 240, STP 2003
- [11] BOJANOVSKÝ J., DUŠEK B., ČÁSLAVA D.: *Monitorování provozu technologického zařízení budov*, Časopis společnosti pro techniku prostředí - Vytápění, větrání, instalace, číslo 3., str. 120 - 123, 2002
- [12] HONEYWELL: *AQUTROL 1000 - Samoadaptivní, Ekvitermní regulátor*, Aplikační příručka, Prosinec 1999

- [13] JOHNSON CONTROLS INTERNATIONAL, INC.: *Manuál systému - Systém 91*, Technická příručka DX-9100, Rev. 3, 2000
- [14] JOHNSON CONTROLS INTERNATIONAL, INC.: *Inteligentní budova - Řídící, bezpečnostní a informační systémy moderních budov*, Rev. 3, 02/2004
- [15] KREMPASKÝ, J.: *Fyzika*, Vydavatelství SNTL, 12/1982
- [16] CIHELKA, J.: *Vytápění a větrání*, Nakladatelství technické literatury, 1975
- [17] SAZIMA, M., KMONÍČEK,: *Teplo*, Vydavatelství SNTL, 1989