



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

**KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ ENERGETICKÉ
EFEKTIVITY OBJEKTŮ A PROCESŮ
V PRŮMYSLOVÉ A KOMUNÁLNÍ SFÉŘE**

A COMPLEX APPROACH TO THE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS AND PROCESSES
IN INDUSTRIAL AND MUNICIPAL AREAS

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

OBOR KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

DESIGN AND PROCESS ENGINEERING SPECIALIZATION

BRNO 2016

ABSTRAKT

Předmětem habilitační práce je energetická efektivita objektů a procesů v průmyslové a komunální sféře. Ukazuje se, že běžné postupy energetického managementu jsou pro mnohé průmyslové podniky i veřejné budovy nedostatečné a reálné přínosy zavedených opatření jsou velmi omezené. Pro oblast úspor energie chybí postupy, které by postihovaly variabilitu energetických systémů a přitom si zachovaly praktickou aplikovatelnost. Cílem práce je předložit **komplexní přístup** k projektům energetických úspor, který má přispět k vyplnění této mezery. Komplexní přístup se projevuje ve třech rovinách:

1. technologické – zahrnuje všechny objekty a procesy, které se podílí na výrobě a spotřebě energie,
2. časové – zohledňuje dynamické chování systémů,
3. metodické – postupuje systematicky od úvodní analýzy systému až po návrh úsporného opatření.

Pro efektivitu řešení projektů je stěžejní metodická rovina komplexního přístupu. Jádrem habilitační práce je proto **nová metodika**, která vznikala při řešení široké škály výzkumných projektů zaměřených na energetické úspory. Jednotlivé projekty přitom byly velmi odlišné a pochází jak z průmyslové sféry (moderní systém vytápění výrobní haly s využitím biomasy, energetický systém ve dřevozpracujícím podniku, průmyslové a komerční prádely, odsolování vody a zahušťování digestátu, výroba léčiva na bázi vápníku), tak z komunální sféry (energetický systém Národního divadla Praha, energetický systém areálu kongregace). Obecná podoba metodiky byla díky zpětné vazbě z řešených projektů upravena tak, aby se snáze aplikovala a zvýšil se její praktický přínos.

V práci je zdůrazněn význam analytické fáze projektu, která spočívá v kvalifikovaném sběru dat. Věrohodná experimentální a provozní data otevírají cestu k využití matematických modelů, díky nimž může být dosaženo kvalitnějšího řešení. Práce představuje přínosy matematických modelů v kombinaci s vhodnými softwarovými nástroji pro výpočty klíčových aparátů, optimalizaci procesů a dynamické simulace sloužící ke zkvalitnění regulace. Komplexní přístup k otázce energetické efektivity a jeho implementace v podobě navržené metodiky otevírá cestu k novému, efektivnímu způsobu řešení výzkumných projektů energetických úspor. Může být cennou pomůckou pro výzkumné pracovníky, kteří v této oblasti chtějí spolupracovat nebo již spolupracují s průmyslovými partnery.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetická efektivita, průmyslová a komunální sféra, úspory energie, metodika výzkumných projektů, matematické modelování, měření a regulace.

ABSTRACT

This habilitation thesis discusses the energy efficiency of buildings and processes in commercial and municipal areas. Standard procedures in energy management have proved insufficient for many industrial facilities and the benefits of implemented energy saving measures are rather limited. There is a lack of procedures in the area of energy savings in the literature, which would include the variability of energy systems whilst keeping their practical applicability. This thesis provides **a complex approach** to energy saving projects and thus contributes to closing the existing gap. The complex approach targets three levels:

1. The technological level: all buildings and processes involved in the production and consumption of energy.
2. The time level: in respect to the dynamic behaviour of the systems.
3. The methodological level: a systematic approach from the initial analysis of the system to the design of the energy saving measures.

If any project is to be efficient, the methodological level of the complex approach is the key to success. The thesis is centred around **a new methodology** which was developed thanks to various research projects focused on energy savings. The projects differed greatly in their scope; some researched issues were from the commercial sphere (a modern system of production site heating using biomass, energy system in a wood-processing facility, industrial and commercial laundries, water desalination and digestate thickening, calcium-based pharmaceuticals production), whereas other projects dealt with issues from the municipal sphere (the energy system in the Prague National Theatre, the energy system in the congregation campus). Thanks to the feedback from the above-mentioned projects, the general scheme of the methodology was modified so that the application's potential and practicality may be increased.

The thesis stresses the analytical phase of the project, which deals with acquiring qualified data. Reliable experimental and operational data lead to the use of mathematical models that increase the quality of the final results. The thesis further presents the benefits of mathematical models combined with suitable software tools for calculating key apparatuses, optimizing the processes and dynamic simulations for better control. A complex approach to energy efficiency and implementation of the said methodology creates a new, efficient way to conduct research projects on energy savings. The approach may be a valuable tool for researchers cooperating or willing to cooperate with industry partners.

KEYWORDS

Energy efficiency, industrial and municipal areas, energy savings, research project methodology, mathematical modeling, measurement and control.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svým kolegům Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D., Ing. Petru Bobákovi, Ph.D. a Ing. Mgr. Marku Vondrovi za spolupráci při řešení případových studií. Dále prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c. za důvěru, kterou ve mě vložil při zahájení projektu NETME Centre. Poděkovat chci také svojí ženě Věře za její bezvýhradnou podporu a trpělivost navzdory velkému vytížení našimi dvěma syny.

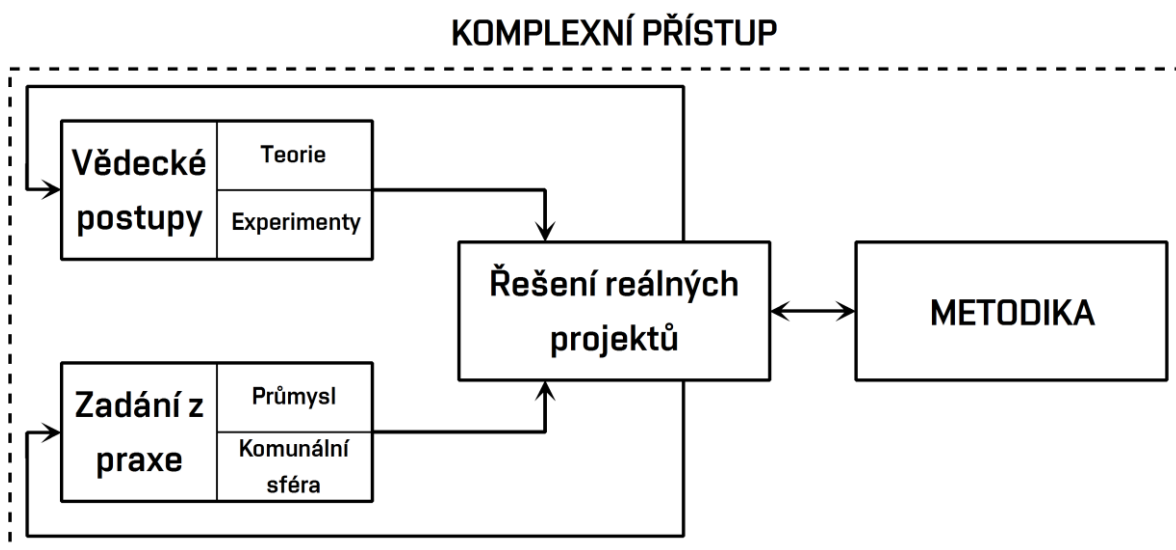
OBSAH

1	ÚVOD	9
1.1	ASPEKTY ENERGETICKÉ EFEKTIVITY.....	10
1.2	VÝROBA A SPOTŘEBA TEPLA V PRŮMYSLOVÉ A KOMUNÁLNÍ SFÉŘE	14
1.3	MOTIVACE PRO KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP.....	20
2	FILOZOFIE KOMPLEXNÍHO PŘÍSTUPU	23
2.1	APLIKACE PRINCIPŮ PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ.....	23
2.2	ZOHLEDNĚNÍ DYNAMIKY SYSTÉMŮ.....	25
2.3	SYSTEMATICKÝ POSTUP ŘEŠENÍ.....	27
2.4	ZOBECNĚNÍ A ZÁVĚRY PRO TVORBU METODIKY.....	29
3	POPIS OBECNÉ METODIKY.....	31
3.1	VÝZNAM SBĚRU DAT A JEHO REALIZACE	35
3.2	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ A VÝPOČTOVÉ NÁSTROJE	37
3.2.1	Analytická a experimentální identifikace	39
3.2.2	Bilanční výpočty a simulační softwarové nástroje	39
3.2.3	Popis dynamického chování systémů pro účely řízení	41
3.2.4	Výpočtové nástroje pro statistiku a optimalizaci.....	43
3.2.5	Formulace zadání a přijatá zjednodušení.....	44
3.3	SYSTÉMY ŘÍZENÍ PROCESŮ.....	44
4	PŘÍPADOVÉ STUDIE	53
4.1	PRŮMYSLOVÁ SFÉRA	53
4.1.1	Vytápění výrobní haly s využitím jednotky na biomasu	53
4.1.2	Energetický systém ve dřevozpracujícím podniku	61
4.1.3	Průmyslové a komerční prádely	64
4.1.4	Odsolování vody a zahušťování digestátu.....	67
4.1.5	Výroba léčiva na bázi vápníku	67
4.2	KOMUNÁLNÍ SFÉRA	69
4.2.1	Energetický systém Národního divadla Praha.....	69
4.2.2	Energetický systém areálu kongregace.....	73
5	UPŘESNĚNÁ METODIKA	77
6	ZÁVĚR.....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	89
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	93
	SEZNAM PŘÍLOH.....	94

1 ÚVOD

Tématem habilitační práce je energetická efektivita objektů (tj. budov) a procesů (tj. zařízení) v průmyslové a komunální sféře. Práce se zaměřuje na systémy s výkony v rozsahu desítek kW až jednotek MW. Řešené systémy mají různý účel, využívají různé formy energie a jsou na různé úrovni technické vyspělosti. Efektivita nakládání s energií je však společným a hojně diskutovaným parametrem těchto systémů, protože přímo ovlivňuje jejich provozní náklady. Měřítkem energetické efektivity systému je pro potřeby této práce množství energie, které systém spotřebuje k dosažení definovaného výsledku. Energetická efektivita systému jako celku souvisí s účinností výroby a spotřeby energie, cenami energií, efektivitou lidské práce, ale také s dopady provozu na životní prostředí [1]. Rostoucí zájem o otázku energetické efektivity dokládá vedle publikační činnosti i zkušenost z průmyslových podniků (průmyslové sféry) a objektů spadajících do pravomocí měst a obcí (komunální sféry). V práci není rozlišováno mezi pojmy *energetická efektivita* a *úspora energie*. Jedná se o dva aspekty jednoho cíle, kterým je **snížení spotřeby energie a úspora provozních nákladů**. Provozovatelé energetických systémů, objektů a procesů však těžko nachází konkrétní postupy a nástroje vedoucí k reálným úsporám. Standardní postupy energetického managementu nabízí jenom dílčí řešení a nejnovější metody publikované v odborné literatuře jsou obtížně aplikovatelné. Odpovědí může být spolupráce s výzkumným týmem, který disponuje potřebným know-how a vybavením. Právě na know-how a vybavení nutné k efektivnímu řešení výzkumných projektů spojených s úsporami energie je zaměřena pozornost předložené práce.

Na základě dlouholeté systematické výzkumné, publikační a realizační činnosti v oblasti energetické efektivity byl zformulován tzv. **komplexní přístup** k otázce energetických úspor v průmyslové a komunální sféře. Klíčovou součástí komplexního přístupu je nová **metodika** pro efektivní řešení projektů (obr. 1.1). Komplexní přístup jako celek zahrnuje **vědecké postupy**, které aplikuje při řešení reálných projektů na základě **zadání z praxe**. Navržená metodika je výstupem z realizační činnosti a zároveň nástrojem, který činnost systematizuje a zefektivňuje.



Obr. 1.1 Koncepce komplexního přístupu k řešení energetické efektivity objektů a procesů v průmyslové a komunální sféře

Komplexní přístup je postupně představen v pěti kapitolách této práce zaměřených na:

- problematiku energetické efektivity v průmyslové a komunální sféře,
- filozofii komplexního přístupu k energetickým systémům průmyslových podniků a budov,
- formulaci obecné metodiky efektivního řešení projektů energetických úspor,
- konkrétní případové studie řešené s využitím komplexního přístupu,
- upřesnění metodiky a podněty pro její další vývoj.

1.1 Aspekty energetické efektivity

K hlavním argumentům politiky snižování spotřeb energie patří omezená dostupnost primárních zdrojů energie a globální oteplování. Česká republika definuje svoji energetickou a environmentální politiku v souladu s prioritami Evropské unie. Určující je v této oblasti Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU o energetické účinnosti [2]. Ukazatele energetické náročnosti řadí ČR nad průměr EU27, což však souvisí i s přetrvávající průmyslovou orientací místního hospodářství.

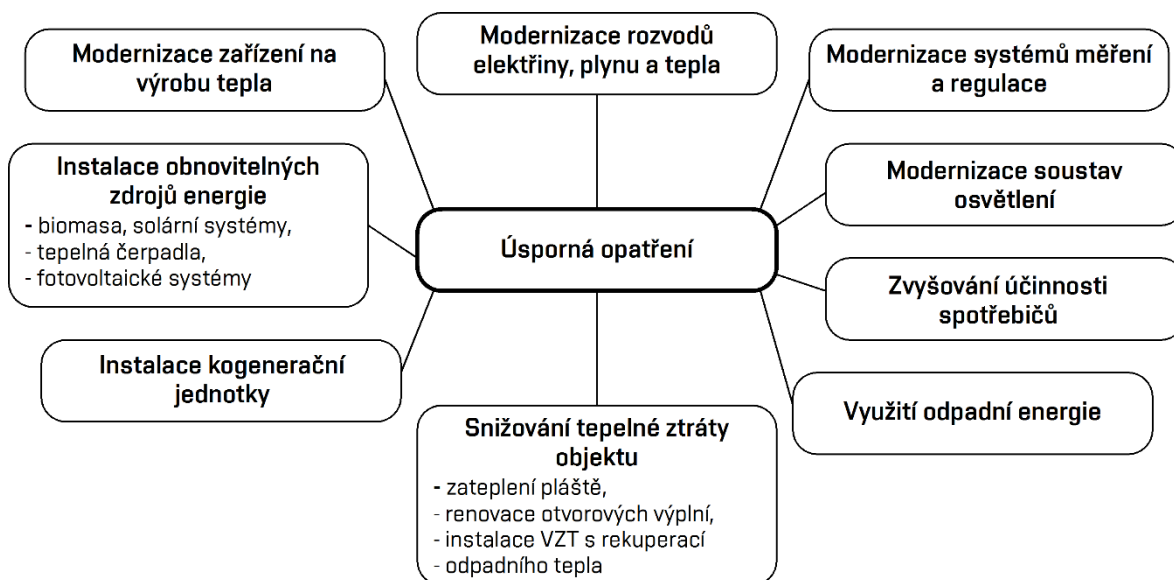
Habilitační práce nahlíží na téma energetické efektivity z pohledu průmyslového podniku nebo správce komunální budovy, který hledá efektivní cestu ke snížení spotřeby energie. U těchto subjektů převažují energetické systémy, jejichž elektrický, příp. tepelný výkon se pohybuje v rozsahu desítek kW až jednotek MW. Pozornost habilitační práce tedy není věnována malým domácím zdrojům, ani velkým průmyslovým energetickým systémům. Vědecké postupy, které práce popisuje, mohou být sice pro hospodaření s energií v domácnostech přínosné, ale širší prostor pro jejich využití u malých domácích zdrojů není. Sofistikované vědecké postupy jsou naopak hojně využívány u velkých průmyslových systémů s výkony v řádu desítek či stovek MW. Účinnost výroby, resp. spotřeby tepla a elektřiny jsou u těchto provozů sledovanými parametry, protože mají přímý dopad na ekonomiku [3]. Pro optimalizovaný návrh a provoz rozsáhlejších průmyslových systémů je široce využíván soubor metod známý jako *process integration* (česky *integrace procesů*). Integrace procesů je zaměřena především na úsporu energie, ale také na environmentální aspekty provozu, zejména emise skleníkových plynů ve spalínách [4]. Vynikajících výsledků tyto metody přinesly v oblasti optimalizace sítí tepelných výměníků (tzv. *heat integration*), díky čemuž se rozšířily i do dalších oblastí, jako je nakládání s vodou, kyslíkem nebo vodíkem [5]. V posledních letech je v rámci *integrace procesů* patrný posun k postupům označovaným jako *total site heat integration*, které zahrnují rekuperaci tepla, využívání odpadního tepla a stále častěji i integraci obnovitelných zdrojů energie (OZE). Přínosy těchto postupů jsou patrné z publikací popisujících konkrétní průmyslové aplikace [6]. U objektů a procesů s výkony v rozsahu desítek kW až jednotek MW, na které se zaměřuje tato práce, nelze uvedené postupy v plné míře uplatnit. Řešené systémy jsou totiž tvořeny relativně nízkým počtem aparátů využívajících velmi omezený počet pracovních médií a teplot. Přesto může být řešení otázky jejich energetické efektivity složitým úkolem. Reálná spotřeba závisí na mnoha provozních a ekonomických faktorech. Jednotlivé aparáty mohou být poměrně složité, mohou mít značně proměnný charakter spotřeb, mohou se vzájemně ovlivňovat apod.

Energetické systémy průmyslových podniků a veřejných budov tvoří převážně lokální kotelny a výtopy provozované v blízkosti místa spotřeby. Častou alternativou je také teplo ze soustavy centrálního zásobování teplem (CZT). Dodávku elektrické energie obvykle zajišťuje externí dodavatel nebo může být částečně kryta vlastní výrobou. Náklady na energii jsou u těchto spotřebitelů součástí režijních výdajů a nejsou obvykle řešeny s takovou důsledností jako u velkých energetických systémů. Potenciál pro snižování

spotřeb primárních zdrojů energie je však v této oblasti významný [7], čehož si je vědoma i státní správa. V rámci snah o naplnění Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU o energetické účinnosti byla v polovině roku 2016 vypsána Ministerstvem průmyslu a obchodu výzva „Úspory energie“ [8]. Výzva je součástí Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost 2014 - 2020. Aktivita podporované touto výzvou jsou dobrým shrnutím obecných variant úsporných opatření (viz obr. 1.1):

- modernizace a rekonstrukce rozvodů elektřiny, plynu a tepla v budovách a v energetických systémech výrobních závodů za účelem zvýšení účinnosti, [9]
- zavádění a modernizace systémů měření a regulace (MaR), [10], [11]
- modernizace, rekonstrukce stávajících zařízení na výrobu energie pro vlastní spotřebu vedoucí ke zvýšení její účinnosti, [12]
- modernizace soustav osvětlení budov a průmyslových areálů. [13]
- realizace opatření ke snižování energetické náročnosti budov v podnikatelském sektoru (stavební opatření mající prokazatelně vliv na energetickou náročnost budovy, instalace vzduchotechniky s rekuperací odpadního tepla), [14]
- využití odpadní energie ve výrobních procesech, [15]
- snižování energetické náročnosti, resp. zvyšování energetické účinnosti výrobních a technologických procesů, [16]
- instalace OZE pro vlastní spotřebu podniku (biomasa, solární systémy, tepelná čerpadla a fotovoltaické systémy), [17], [18]
- instalace kogenerační jednotky s využitím elektrické a tepelné energie pro vlastní spotřebu podniku s ohledem na jeho provozní podmínky. [17], [19]

Aktuálnost jednotlivých opatření dokládají odkazy na publikované vědecké práce, které jsou uvedeny u jednotlivých bodů. Pro dosažení maximálního efektu pro konkrétní energetický systém se často využívají kombinace výše uvedených opatření [9], [20].

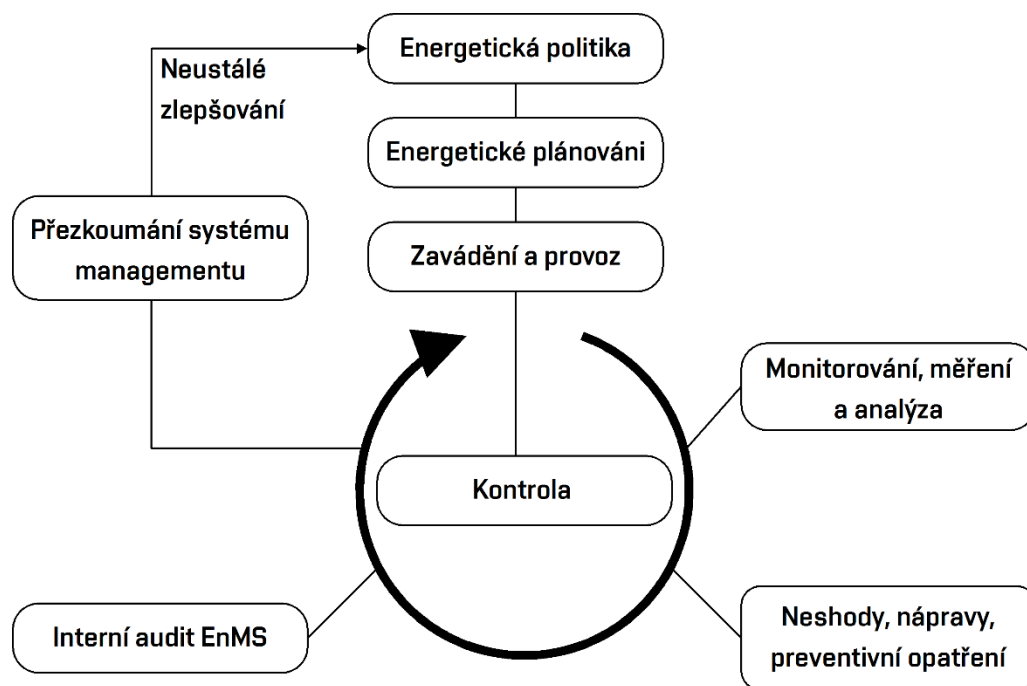


Obr. 1.2 Přehled úsporných opatření pro průmyslovou a komunální sféru

Mezi nejnovější trendy v oblasti energetické efektivity průmyslových provozů patří vyhodnocování energetické náročnosti v reálném čase, širší využívání matematického modelování a podrobnější analýzy spotřeb, např. s ohledem na provozní charakteristiky jednotlivých částí strojů [21]. Komplexnější a podrobnější analýzy energetické náročnosti provozů mají pozitivní dopad na přesnost vytvořených matematických modelů, ale vyžadují velkou časovou a výpočetní investici.

Z pohledu provozovatelů energetických systémů je hlavní otázkou způsob výběru a zavádění konkrétních úsporných opatření. Dostupnost efektivních postupů je velmi omezená. Mezi nejvyužívanější praktické metody pro dosahování úspor lze zařadit tzv. **systém energetického managementu hospodaření s energií (EM) a energetické služby se zárukou (Energy Performance Contracting, EPC).**

Systém managementu hospodaření s energií má být obecným nástrojem k dosažení efektivního řízení a snižování spotřeb energií. Způsob implementace energetického managementu je definován zejména normou ČSN EN ISO 50001. Hlavní charakteristikou EM je jeho systémový přístup projevující se dlouhodobým zlepšováním stavu. Technická implementace EM staví na kvalitním systému sběru dat, na základě něhož probíhá návrh úsporných opatření. Zavedení systému managementu hospodaření s energií dle ČSN EN ISO 50 001 není ve většině případů investičně náročné, ale jeho důsledné uplatňování představuje velkou organizační zátěž. Norma je formulována příliš obecně a provozovateli nenabízí dostatečný návod, jak v praxi postupovat. Těžkopádnou implementaci modelu EM (viz obr. 1.3) podstupují v praxi především větší podniky, u nichž je to vyžadováno zákonem. Pro efektivní provoz méně rozsáhlých energetických systémů není implementace systému dle ČSN EN ISO 50 001 nutná a lze ji dokonce označit za nežádoucí. Přínos EM při dosahování energetických úspor je sice možné doložit řadou vědeckých prací, jak ukazuje rešerše [22]. Popisované úspory však zřejmě plynou zejména ze skutečnosti, že se podnik začal v souvislosti s EM poprvé zabývat otázkou svojí energetické efektivity. Systém energetického managementu nenabízí konkrétní úsporná opatření, která pro konkrétní energetický systém budou nejpřínosnější. Tuto skutečnost dokládají i vědecké články zaměřené na EM v průmyslovém sektoru. Ačkoliv mezi nimi převažují případové studie popisující konkrétní úsporná opatření, jejich přínos na úrovni jednotlivých energetických systémů není hodnocen vůbec nebo jen v krátkodobém měřítku [23].



Obr. 1.3 Model systému managementu hospodaření s energií dle ČSN EN ISO 50 001

V rámci EM je jako hlavní nástroj pro hodnocení energetické efektivity využíván tzv. **energetický audit**. Energetický audit je možné v souladu se zákonem č. 406/2000 Sb. definovat jako písemnou zprávu obsahující informace o úrovni využívání energie v budovách, procesech a energetických systémech s popisem efektivních návrhů na zvýšení úspor energie nebo zvýšení energetické účinnosti, včetně doporučení k realizaci. Energetický audit může být součástí EM nebo může být prováděn nezávisle. Hlavní přínos teorie, která je v pozadí energetických auditů, spočívá v **systematickém přístupu k hodnocení energetické náročnosti systémů a aplikaci vybraných poznatků z termomechaniky**. Systematický přístup zahrnuje metody pro provozní hodnocení budov a jejich zařízení, vyhodnocení ekonomických a environmentálních parametrů a výběr vhodných úsporných opatření [24]. Zákonem definovaný energetický audit však má velmi nízkou vypovídací hodnotu. Jeho cílem totiž obvykle není identifikace nejvhodnějších úsporných opatření, ale naplnění zákonného požadavku. Bývá povrchní a poskytuje příliš obecná doporučení, která mohou být daleko od optimálního řešení. Náplň a rozsah energetického auditu lze přizpůsobit pro konkrétní průmyslové provozy [25], což vyžaduje buď jejich důkladnou znalost nebo rozsáhlý sber dat.

Dalším používaným nástrojem ke snižování spotřeb jsou **energetické služby se zárukou (EPC)**. Jedná se o velmi efektivní a v praxi ověřenou metodu pro snižování provozních nákladů, která je známa od 70. let 20. století a v ČR je využívána už od roku 1993 [26]. Základem metody EPC je mechanismus financování úsporných opatření, který umožňuje rozsáhlou modernizaci energetického systému vedoucí k rychlému snížení spotřeby energie. Důraz je kladen na ekonomický efekt zavedených opatření. Dosažené úspory provozních nákladů by měly být takové, aby s rezervou pokryly splácení investice a ještě vznikl zisk pro obě smluvní strany. Za plánované úspory ručí dodavatel (tzv. *Energy Service Company*, ESCo). Pokud není garantované úspory dosaženo, musí dodavatel rozdíl finančně kompenzovat. Financování investic může být zajištěno z interních zdrojů ESCo, zákazníka nebo externě pomocí úvěru [27].

EPC je komplexní služba zahrnující úvodní energetickou analýzu provozu, návrh konkrétních úsporných opatření, financování projektu, realizaci díla a zaškolení obsluhy zařízení. Projekt by měl zahrnovat i zhodnocení dosaženého stavu a dlouhodobou kontrolu provozních parametrů po dobu trvání smluvního vztahu. Délka smluvního vztahu se odvíjí od předpokládané doby, která je nutná ke splacení pořizovacích nákladů projektu, nejčastěji 5 až 10 let. Úsporná opatření zaváděná v rámci projektů EPC se typicky dotýkají systému vytápění a spotřeby tepla (výměna zdroje, zlepšení regulace, izolace), spotřeby elektřiny (instalace úsporného osvětlení, automatické spínání okruhů) a větrání, příp. klimatizace (rekuperace tepla, izolace). Výběr úsporných opatření sleduje především konzervativní, prověřené postupy s garantovanými výsledky. Pro aplikaci EPC je optimálním projektem rekonstrukce energetického systému větších budov nebo komplexů budov komunální a komerční sféry, kde lze pomocí standardních a prověřených opatření dosáhnout velkých úspor. Snižování tepelné ztráty objektů se do těchto projektů také příležitostně zahrnuje, je však problematické z pohledu doby návratnosti, která překračuje obvyklou délku trvání projektu. Metoda EPC pracuje také s motivací uživatelů objektu k úsporám.

V průmyslové sféře si metoda EPC svoje místo zatím nenašla. Mezi hlavní důvody patří problematické zdůvodňování rozsahu investice a dlouhá doba návratnosti [28]. Součástí energetických systémů průmyslových podniků jsou nejrůznější technologie a procesy, které vyžadují vysokou odbornou specializaci. Energetické systémy často zahrnují vzájemné interakce jednotlivých prvků, akumulaci tepla, exotermické procesy apod. a nalezení optimálního řešení běžnými postupy není možné. Tyto projekty vyžadují sofistikované nástroje pro analýzu systému i optimalizovaný návrh řešení. Často v sobě zahrnují i významný prvek nejistoty. Snaha o maximálně efektivní provoz systému má v těchto případech charakter výzkumné činnosti, která je mimo odborný rozsah ESCo nebo pro ESCo představuje příliš vysoké riziko. Nabídky EPC pro průmysl jsou obvykle zaměřeny na energetickou efektivitu konkrétní technologie, např. elektrických pohonů [29].

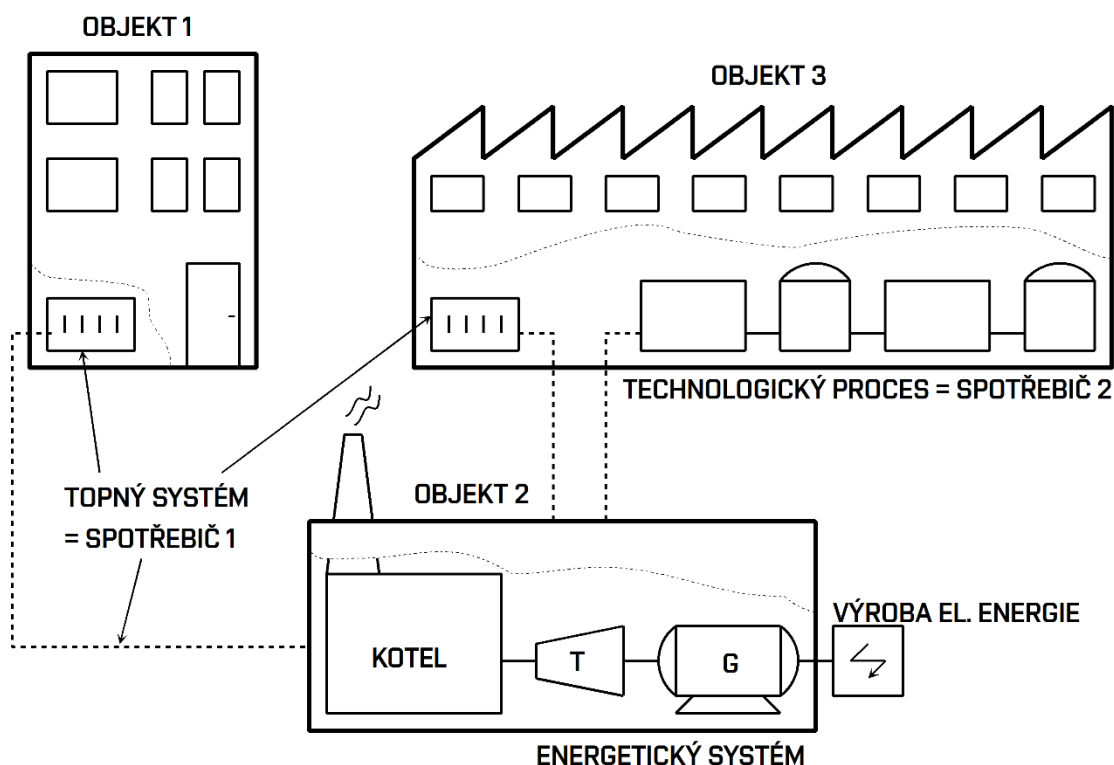
1.2 Výroba a spotřeba tepla v průmyslové a komunální sféře

Pojem **energetický systém** slouží v práci jako obecné označení zdrojové části technologického vybavení objektů v průmyslové a komunální sféře. Jedná se o soubor energetických soustav, které slouží k zásobování **spotřebičů** požadovanými formami energie. Pojmovou logiku ukazuje obr. 1.4 na příkladu tepelného hospodářství průmyslového podniku. Energetickým systémem je v uvedeném případě parní kotel vyrábějící elektrickou energii a teplo. **Spotřebiče** jsou průmyslové **procesy**, ale také **objekty**, v nichž jsou procesy instalovány. Spotřeba objektů je technicky zabezpečena topným systémem, který zahrnuje distribuci tepla a otopná tělesa.

Kromě soustavy zásobování teplem patří k základním energetickým soustavám ještě zásobování elektrickou energií, plynem a stlačeným vzduchem. V praxi se často do „energií“ zahrnuje i spotřeba vody. Efektivní energetický systém by měl zabezpečovat zásobování všech spotřebičů energií v požadovaném množství, čase a formě, a to s **minimálními náklady**. Jeho provoz by měl být také dlouhodobě udržitelný a ohleduplný k životnímu prostředí, což vyžaduje správnou volbu paliva, pravidelnou údržbu a průběžnou modernizaci. Vzhledem k aplikacím a sférám využití výzkumu je v dalším textu pozornost věnována zejména soustavě zásobování teplem (tepelnému hospodářství). O řešení úloh spojených s efektivitou hospodaření s tepelnou energií byl zaznamenán největší zájem ze strany průmyslových podniků a budov.

Rozdělení na průmyslovou a komunální sféru vychází ze specifík ve využívaných technologiích a způsobech nakládání s energií. Soustavy zásobování teplem v komunální sféře jsou obvykle poměrně jednoduché. Jejich primárním účelem je zajištění topné vody

(TV) a teplé (užitkové) vody (TUV). Oblast vytápění a přípravy teplé vody je dlouhodobě předmětem zájmu odborné i laické veřejnosti. Jako významná nákladová položka v sektoru bydlení se totiž dotýká nejširší skupiny obyvatel. Pro tuto oblast existuje detailně zpracovaná legislativa a mnohé normy. Důvodem, proč se vytápěním a teplou vodou zabývá práce z oboru procesního inženýrství, je skutečnost, že bývají obvyklou součástí systému spotřeb i v průmyslové sféře. V energeticky náročných průmyslových odvětvích se spotřebuje nejvíce energie ve výrobě, zatímco v méně energeticky náročných odvětvích jsou hlavním spotřebičem právě podpůrné procesy jako je topení, chlazení, osvětlení apod. [23]. Některé instituce komunální sféry zase využívají teplo také pro jiné účely než vytápění. V nemocnicích je například využívána pára pro ohřev prádelenských strojů nebo při sterilizaci zdravotnických prostředků.



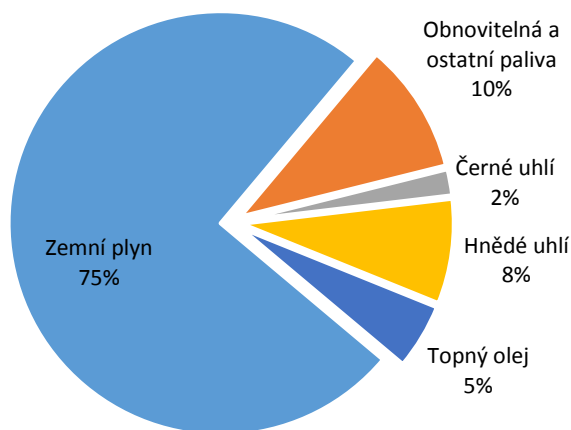
Obr. 1.4 Pojmy související s energetickou efektivitou v průmyslové a komunální sféře

Při hodnocení efektivity tepelného hospodářství je výchozím bodem zdroj tepla. Obecně nejvýkonnějšími výrobci a dodavateli tepla jsou teplárny. K těmto velkým zdrojům může být koncový odběratel připojen pomocí systému centrálního zásobování teplem a teplo nakupovat jako hotový produkt. Druhou možností je výroba tepla ve vlastní režii, což předpokládá vybudování a provoz vlastní kotelny (výtopny). Vlastní výroba, ať už ve formě horké vody nebo páry, může být zajištěna různými zdroji, popř. jejich kombinacemi. Kotle používané v průmyslové praxi můžeme rozdělit podle teplotního média na:

- parní nízkotlaké (do 2,5 MPa), středotlaké (do 6,4 MPa) a vysokotlaké,
- horkovodní (horká voda nad 110°C),
- teplovodní (teplá voda do 110°C).

Méně robustní alternativou k parnímu kotli může být tzv. *vyvíječ páry*. Na rozdíl od kotle neprobíhá ve vyvíječi výrazná akumulace páry, z čehož plynou nižší investiční náklady a volnější legislativní rámec provozu. Parní a horkovodní soustavy jsou využívány

především v průmyslové sféře. V komunální sféře převládají teplovodní systémy. Nejčastějším palivem je ve všech případech zemní plyn a typickým zdrojem je plynový kotel. V nových energetických systémech se instalují především kondenzační plynové kotle s vysokou účinností a to jak v průmyslové sféře [30], tak v sektoru budov [31]. Z hlediska použitých paliv jsou stále aktuální také kotle na hnědé uhlí, biomasu nebo topný olej. V novějších energetických systémech se začíná odrážet intenzivní vývoj obnovitelných zdrojů energie. Vedle biomasy se prosazují především tepelná čerpadla využívající elektrickou energii a solární systémy, případně jejich kombinace [32]. Podíly jednotlivých primárních zdrojů energie v oblasti středních zdrojů tepla (nad 200 kW) ukazuje obr. 1.5, [33]. Podle řady zahraničních studií (např. [9]) se budou OZE podílet na energetickém mixu stále významněji, což se promítá i do energetických strategií EU. Jejich tržní konkurenceschopnosti však bylo zatím dosaženo jen z části a předpokládá se, že ještě minimálně dvě až tři desetiletí budou pouze doplňkovým zdrojem. Obnovitelný zdroj energie může být již dnes velmi vhodnou volbou pro malé a v některých případech střední odběratele tepla [34].



Obr. 1.5 Spotřeba primárních zdrojů energie ve zdrojích nad 200 kW v ČR (lokální vytápění CZT a podnikové zdroje tepla) v r. 2009 [33]

Dnešní stav techniky i legislativy zaručuje vysokou účinnost transformace energie zejména při kombinované výrobě elektrické energie a tepla, tzv. *kogeneraci*. V této kategorii převládají plynové kogenerační jednotky na bázi spalovacích motorů a biomasové kogenerační zdroje. Velký nevyužitý potenciál má v našich podmínkách i energetické využívání odpadu, kde je kogenerace také plně uplatnitelná [35]. Z progresivních kogeneračních technologií se na trhu začínají objevovat plynové mikroturbíny [19] a jednotky na bázi tzv. *organického Rankinova cyklu* (ORC) [36].

Každý z uvedených zdrojů má své specifické vlastnosti (účinnost, dynamiku, provozní rozsah teplot pracovních látek, dosahované výkony, apod.), které určují možnosti jeho využití v praxi. Provozovatelé energetického systému kladou důraz především na investiční a provozní náklady spojené s konkrétním zdrojem.

Tepelná hospodářství v průmyslové i komunální sféře mají zpravidla centralizovaný charakter, což má řadu výhod [37]:

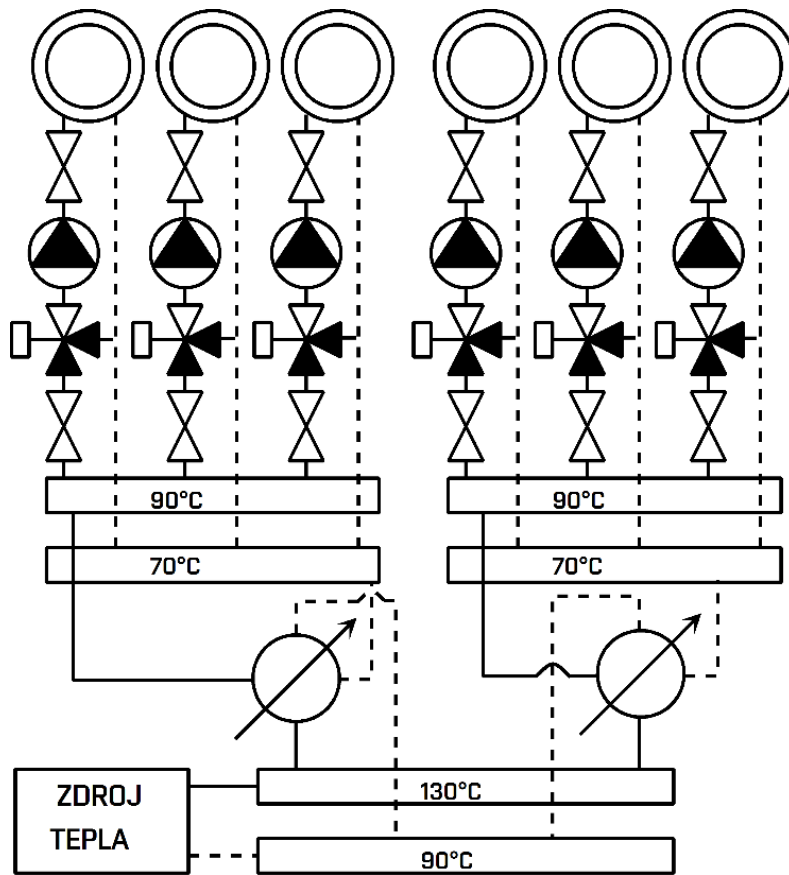
- možnost využití větších jednotkových výkonů, z čehož plynou nižší měrné investiční náklady na jednotku instalovaného výkonu,

- širší uplatnění kombinovaného způsobu výroby energie (kogenerace) a kvalitnější spolupráce výrobních zdrojů,
- efektivnější implementovatelnost dvoupalivového systému, který umožňuje optimalizaci palivových nákladů dle aktuální nabídky paliv na trhu,
- možnost ekologicky způsobilého využití méně ušlechtilých paliv,
- úspora nákladů na budování rozvodů či skládek primárních paliv.

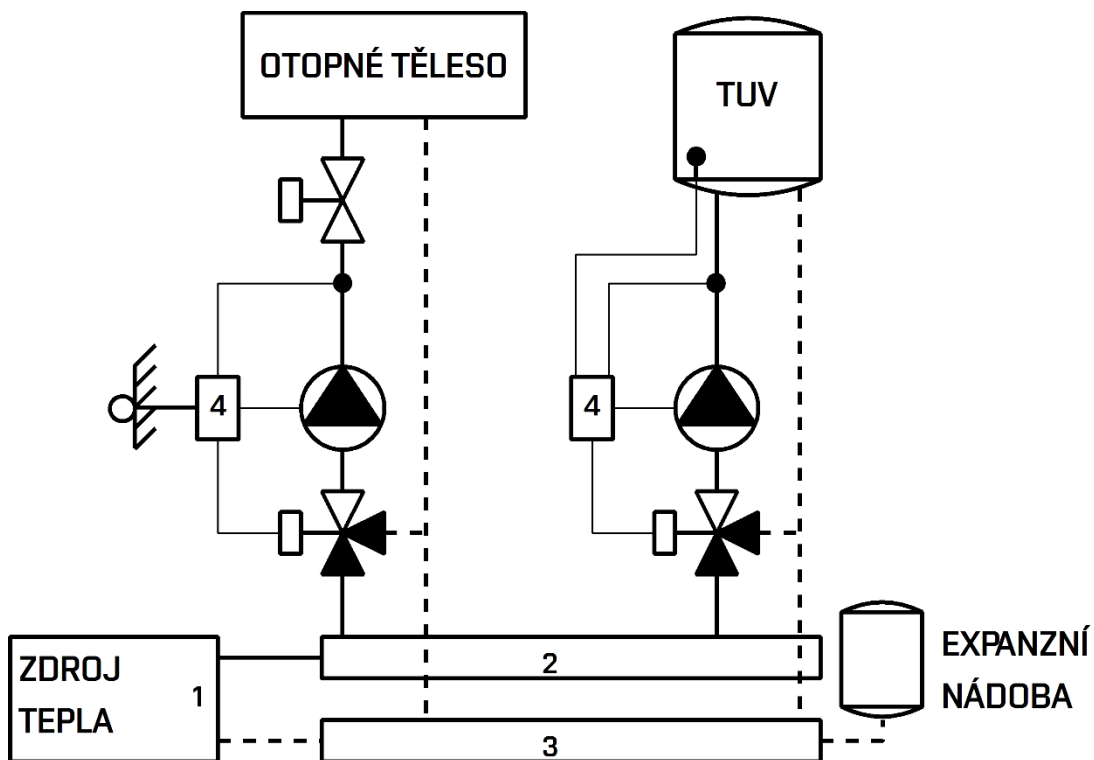
K nevýhodám centralizovaných systémů naopak patří nutnost výstavby centrálních rozvodů, vyšší ztráty tepla v těchto rozvodech a vyšší nároky na údržbu rozvodných zařízení. Decentralizovaná výroba tepla, při níž jsou některé zdroje umístěny v blízkosti spotřebiče, může najít uplatnění zejména v rozsáhlejších areálech, kde je vliv tepelných ztrát v rozvodech významnější nebo tam, kde je potřeba tepla u spotřebiče spíše nárazová.

Distribuční soustava musí nezřídká rozvádět teplo ve formě páry i teplé vody. Rozvaděče tvořené rozdělovači a sběrači mohou být v průmyslových podnicích provozovány na různých teplotních úrovních, což mohou zajišťovat samostatné výměníky u každého z nich. S rozšiřujícím se počtem spotřebičů roste i složitost distribuce tepla. Ukázka podnikového tepelného hospodářství je uvedena na obr. 1.6. Škála možných spotřebičů v průmyslových podnicích je široká. Jedná se o výrobní a zpracovatelské linky i jednotlivé procesy nejrůznějšího zaměření. Některé konkrétní příklady představuje příloha 1.

Obvyklou součástí spotřeb je také teplo na vytápění objektů (tzv. *ústřední vytápění*) a ohřev teplé užitkové vody. Pro vytápění se používá převážně teplá voda, která je k jednotlivým otopným tělesům, resp. do nádrže na TUV, přiváděna pomocí samostatně regulovaných topných větví (obr. 1.7). Velmi častá je i dodávka tepla z CZT pomocí předávací stanice tepla, která bývá umístěna uvnitř vytápěného objektu [38].



Obr. 1.6 Základní prvky tepelného hospodářství průmyslového podniku



Obr. 1.7 Schéma standardní otopné soustavy se (1) zdrojem tepla, (2) rozdělovačem, (3) sběračem a (4) samostatně regulovanými topnými větvemi.

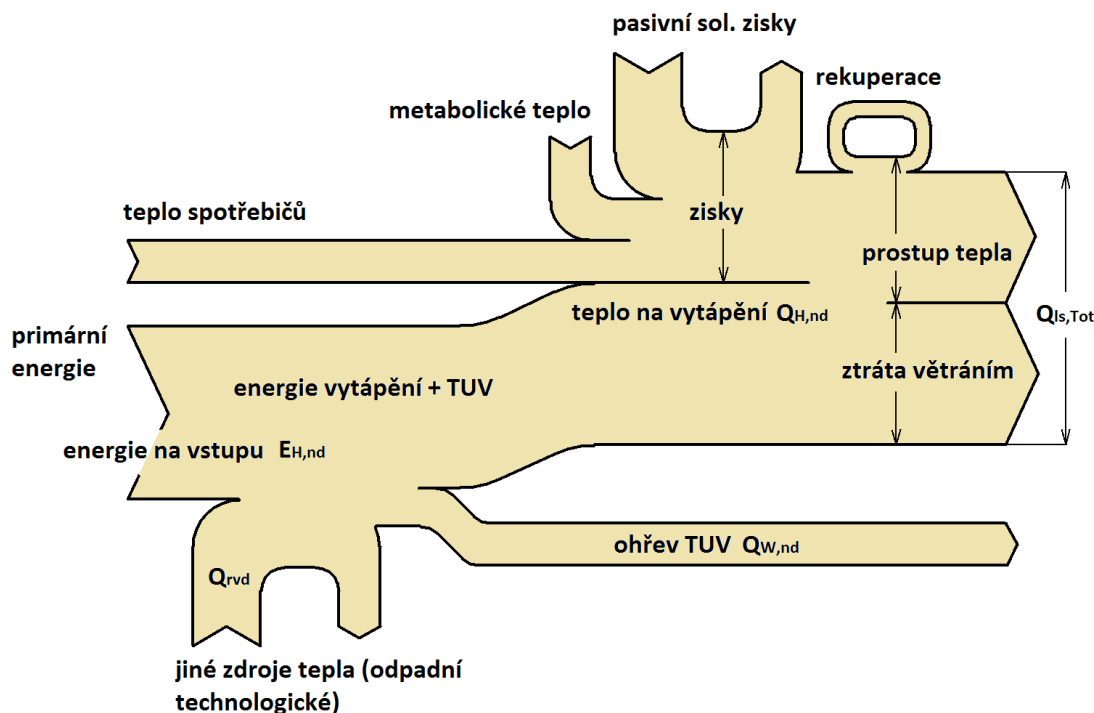
Nakládání s teplem v objektech ilustruje tepelná bilance na obr. 1.8, který pochází ze starší normy ČSN EN 832. Schéma ze starší normy bylo využito s ohledem na jeho názornost a praktickou použitelnost. Při hodnocení konkrétního objektu je třeba kvantifikovat jednotlivé tepelné toky.

Obecně lze rovnici energetické bilance budovy zapsat následujícím způsobem:

$$E_{H,nd} + Q_{rvd} = Q_{H,nd} + Q_{W,nd} + Q_{ls,Tot} \quad (1)$$

kde	$E_{H,nd}$	potřeba energie na vytápění budovy [MJ]
	Q_{rvd}	teplo zpětně získané z přídavných zařízení, z topného systému a z okolního prostředí [MJ]
	$Q_{H,nd}$	potřeba tepla pro vytápění budov [MJ]
	$Q_{W,nd}$	potřeba tepla na ohřev teplé vody [MJ]
	$Q_{ls,Tot}$	celková tepelná ztráta otopného systému [MJ]

Podrobnější informace k výpočtu jednotlivých členů rovnice (1) jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 1.8 Energetická bilance objektu dle ČSN EN 832

Zkušenost z průmyslových podniků i z komunální sféry odhalila tři typické kategorie problémů, které mají negativní dopad na hospodárnost energetických systémů:

- zastaralá technologie často na hranici životnosti,
- nevhodně navržená soustava s negativním dopadem na celkovou účinnost,
- nevhodný/rutinní způsob obsluhy, který nezohledňuje průběžné změny provozních podmínek

Škála myslitelných technických řešení energetického systému a možných spotřebičů vede k nutnosti individuálního přístupu k jednotlivým projektům. Pro kompetentní

posouzení úspor je potřeba plného porozumění způsobu, jakým je energie v systému vyráběna a využívána. Snaha o zvyšování energetické efektivity by se měla dotýkat všech energetických soustav v závislosti na míře využívání jednotlivých forem energie.

1.3 Motivace pro komplexní přístup

Provozovatelé energetických systémů, objektů nebo různých průmyslových procesů jsou si obvykle vědomi, že ve zvyšování energetické efektivity je velký potenciál. Provedení konkrétních změn však často odkládají, což je obvykle způsobeno:

- neznalostí dostupných řešení a nedůvěrou v reálné přínosy úsporných opatření,
- konzervativním přístupem projevujícím se rezervovaností vůči aplikaci výsledků výzkumu a vývoje ve srovnání s „osvědčeným řešením“,
- obavou z negativních dopadů změn na spolehlivost provozu,
- skutečností, že platby za energie jsou součástí režijních nákladů a ty tvoří pouze malé procento provozních výdajů,
- nedostatkem investičních prostředků.

Většina bariér vychází z důrazu podniků na spolehlivost provozu a neochoty zahajovat riskantní projekty s nejistým finančním efektem. Obavy provozovatelů jsou pochopitelné a o přínosech úspor je třeba vhodně komunikovat. Pokud provozovatel změnám otevřený je, naráží na další komplikaci. **Šíře možných řešení je velká a výběr vhodného opatření vyžaduje vysokou odbornost.** Podniky často zůstávají v nesnázích, když se mají rozhodnout pro konkrétní opatření. Částečnou odpovědí mohou být postupy energetického managementu nebo využití externích energetických služeb. Dodavatelé energetických služeb nabízí pozoruhodné postupy a mnohdy i kvalitní výsledky, ale jejich použitelnost je v případě složitějších systémů a průmyslových provozů velmi omezená. Systém energetického managementu je definován příliš obecně a ani odborná literatura nepřináší mnoho návodných příkladů jeho úspěšné implementace v konkrétních provozech [23]. Metoda EPC může posloužit jako efektivní nástroj pro financování investic, což může eliminovat problém s nedostatkem investičních prostředků. Vhodná je ovšem spíše pro zavádění konzervativních úsporných opatření s garantovanou návratností. Pro komplexní řešení otázky energetické efektivity objektů a procesů v průmyslové sféře nejsou postupy EM ani EPC dostatečné.

Výsledkem je, že otázka energetické efektivity je v průmyslové praxi řešena pouze dílčím způsobem. V posledních letech byly vyvinuty různé nástroje a metody, které mají usnadnit volbu úsporného opatření na míru konkrétnímu provozu. Publikované metody mohou být inspirací pro úvodní část projektu, jejímž cílem je definice výchozího stavu energetického systému. Chybí v nich však postupy pro identifikaci a zavádění vhodných úsporných opatření nebo bývají prezentovány na velmi specifických případových studiích [39]. Většina z nich však cílí na sektor budov [14], [40]. Jediná metodika popisující konkrétnější postup v průmyslové sféře byla nalezena pro oblast výrobních procesů [41]. Popsaná metodika vychází z kvalitativního posouzení procesních proudů, které jsou součástí výrobního procesu a mají významný dopad na jeho ekonomiku. Tyto proudy zahrnující energii, výrobní materiál a odpady jsou následně analyzovány kvantitativně a zpracovány ve formě tabulek. Pomocí ekonomického hodnocení jsou pak určeny nejslibnější oblasti pro dosažení úspor a ve spolupráci s výrobním podnikem je navržena jejich technická podoba. Výjimečnost popsané metodiky spočívá v jejím návodném charakteru a aplikovatelnosti v podnikovém měřítku. Nevýhodou je úzká oblast její použitelnosti omezená na výrobní procesy.

Z provedené rešerše odborné literatury je zřejmý nedostatek praktických postupů pro zvyšování energetické efektivity v kontextu každodenního provozu podniků. Pro řešení projektů energetických úspor v průmyslové i komunální sféře dosud nebyl zformulován postup, který by postihoval variabilitu energetických systémů, objektů a procesů a přitom si zachoval praktickou aplikovatelnost. K vyplnění této mezery má přispět tzv. **komplexní přístup**, který představí následující kapitola. Uplatnění komplexního přístupu je navrženo ve třech rovinách:

1. technologické – zahrnuje všechny objekty a procesy, které se podílí na výrobě a spotřebě energie,
2. časové – zohledňuje dynamické chování systémů,
3. metodické – postupuje systematicky od úvodní analýzy až po návrh a implementaci úsporného opatření.

Základem technologické roviny *komplexního přístupu k řešení energetické efektivity objektů a procesů v průmyslové a komunální sféře* je analýza systému jako celku, v němž jsou zahrnuty všechny jeho jednotlivé prvky, jejich vzájemné interakce a všechny vnější faktory ovlivňující provozní vlastnosti systému. Časová rovina je zaměřena na rychlost změn klíčových parametrů zařízení a procesů v průběhu času. Pro efektivitu řešení projektů je stěžejní metodická rovina komplexního přístupu. Proto je v kap. 3 zformulována obecná podoba nové metodiky, která zahrnuje všechny důležité kroky vedoucí k dosažení úspory na míru konkrétního energetického systému. Metodika je představena v teoretických i praktických souvislostech, přičemž je zdůrazněn význam sběru dat a přínos matematického modelování. Nová metodika má být „živým systémem“, který se vyvíjí na základě zpětné vazby z reálných projektů. Vybrané výzkumné projekty, v rámci nichž byl komplexní přístup uplatněn, představuje kap. 4.

Habilitační práce nemá nahradit know-how a služby dodavatelů energetických služeb. Spíše má ukázat prostor pro aplikovaný výzkum v této oblasti a výhodu vědeckého postupu, který je vlastní výzkumným organizacím. Vůči dodavatelům úsporných opatření přitom činnost výzkumného týmu nemusí být konkurenční. Jejich služby může vhodně doplňovat, což platí především u složitějších systémů, pro něž nejsou standardní postupy dostatečné.

2 FILOZOFIE KOMPLEXNÍHO PŘÍSTUPU

U složitějších systémů není snadné vybrat vhodná úsporná opatření a odhadnout jejich dopady. Efektivní přístup k řešení projektů energetických úspor proto musí snižovat nejistotu spojenou s inovativním charakterem návrhu. Systematické a kritické zkoumání řady projektů zaměřených na úspory energie v průmyslové i komunální sféře ukázalo tři kategorie činností, které jsou klíčové pro úspěch těchto projektů:

- **dostupnost kvalitní datové báze,**
- **sestavení věrohodného popisu řešeného systému,**
- **provedení výpočtů směřujících k volbě optimálního úsporného opatření.**

Výše popsané kroky se zdají být logické a evidentní, přesto jsou jako celek přítomny pouze ojediněle. Převažuje stav, kdy podniku chybí potřebná provozní data a úsporná opatření se zavádí metodou „pokus-omyl“. Druhou velmi častou variantou je stav, kdy má sice podnik implementován systém EM, ale nezavádí téměř žádná úsporná opatření, protože neví, která vybrat. Kapitola představuje konkrétní principy a postupy, které je vhodné při provádění výše uvedených činností uplatnit. Převod obecného zadání do podoby konkrétních úsporných opatření podporují **principy procesního inženýrství** (technologická rovina komplexního přístupu). Pro sestavení věrohodného popisu řešeného systému je důležité **zohlednit dynamiku systémů** (časová rovina). Pro dosažení vysoké efektivity řešení jednotlivých projektů je zásadní **systematický postup** od úvodní analýzy systému po návrh úsporného opatření (metodická rovina).

2.1 Aplikace principů procesního inženýrství

Komplexní přístup k řešení projektů energetických úspor musí zohlednit všechny objekty a procesy, které se podílí na výrobě a spotřebě energie. Dále by měl vycházet ze znalostní báze zahrnující soubor možných úsporných opatření pro danou oblast. Hovoříme o **technologické rovině** komplexního přístupu, v rámci něhož je výhodné uplatnit poznatky z oboru procesního inženýrství.

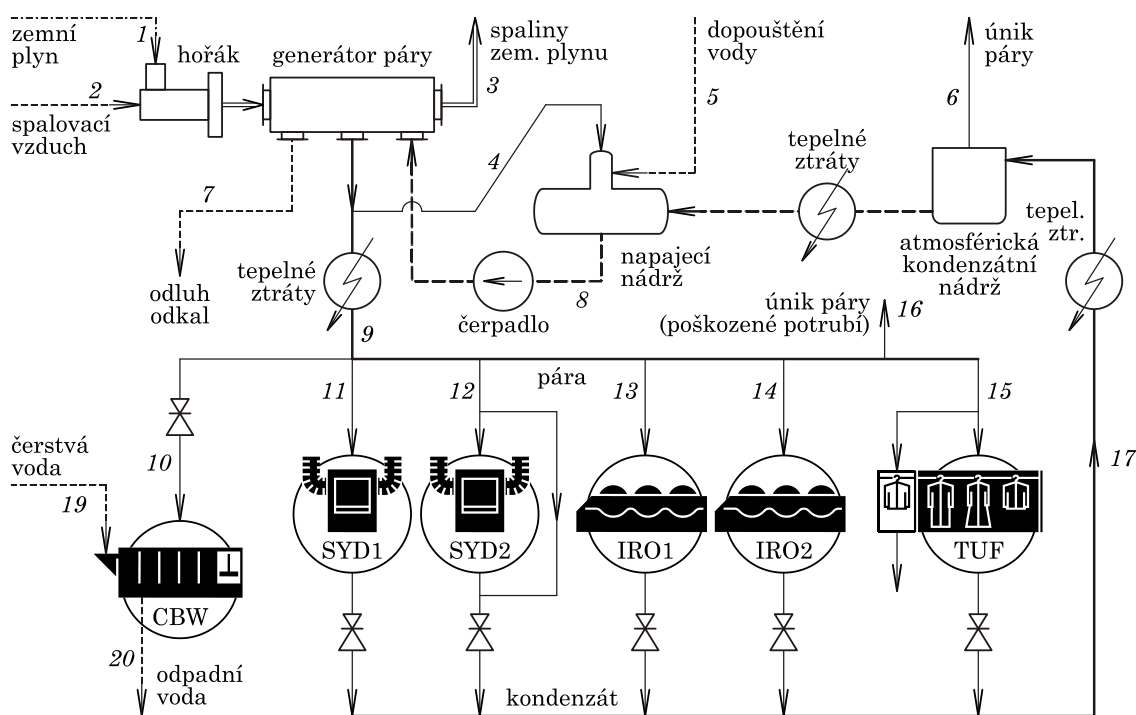
Procesní inženýrství nahlíží na řešený systém jako na proces tvořený souborem jednotkových operací. Bylo ověřeno, že tento přístup je univerzálně aplikovatelný na průmyslový provoz i komplex budov komunální sféry. S využitím postupů procesního inženýrství je možné řešit energetickou efektivitu obou systémů podobným způsobem, protože jde vždy o soubor zdrojů energie a spotřebičů. Při řešení projektů energetických úspor je obvykle potřeba přenést obecné zadání ze strany provozovatele do podoby konkrétních úsporných opatření. Procesnímu inženýrství je postup od obecného ke konkrétnímu vlastní. Konkretizace probíhá tak, že se sestavuje:

- 1) základní přehledové blokové schéma procesu,
- 2) tzv. *process flow diagram* (PFD) s hlavními aparáty a procesními proudy,
- 3) tzv. *piping and instrumentation diagram* (P&ID) zahrnující procesní a regulační instrumentaci,
- 4) soubor půdorysů s rozmístěním aparátů v prostoru,
- 5) dokumentaci popisující pravidla provozu.

Uvedený postup je použitelný jak pro návrh nového procesu, tak při analýze stávajícího. Všechny tyto systémové kroky je třeba opřít o potřebné teoretické znalosti. Jednotlivé prvky systému je možné hodnotit komplexně z pohledu proudění, sdílení tepla

a hmoty. Přínosem principů procesního inženýrství je především efektivní identifikace veličin, které jsou důležité pro ucelený popis řešeného systému. Základním nástrojem při analýze a případné optimalizaci energetického systému jsou **bilanční výpočty**.

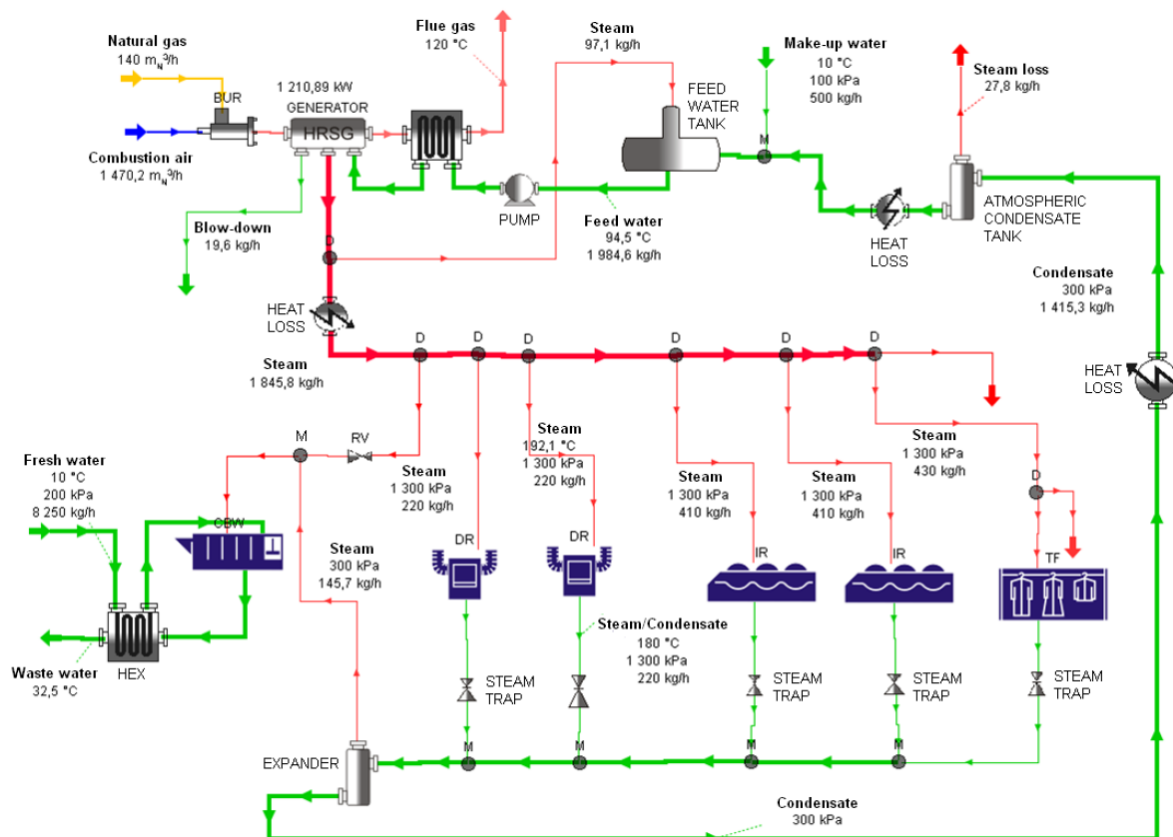
Jako ilustrativní příklad aplikace principů procesního inženýrství při dosahování úspor lze uvést případovou studii zaměřenou na energetickou efektivitu průmyslové prádelny [42], [43]. Ve výchozím stavu využívala předmětná prádelna zastaralého energetického systému (obr. 2.1). Vysokotlaká pára se vyrábí ve vyvíječi páry pomocí spalín z plynového hořáku. Pára se využívá pro ohřev hlavních zařízení, kterými jsou kontinuální prací linka (CBW), systémové sušiče (SYD), korytové žehliče (IRO) a tunelový finišer (TUF). Z těchto strojů, s výjimkou CBW, proudí parokondenzátní směs do kondenzátní nádrže. Kondenzát obsahuje velký podíl expandované páry, která se vytváří po snížení tlaku za odvaděčem kondenzátu. Jedná se o významnou ztrátu tepla. Voda dále proudí z kondenzátní nádrže do nádrže s napájecí vodou, kde se míchá s proudem dopouštěné vody a ostrou parou a následně je čerpána zpět do parního vyvíječe. Potrubí parokondenzátního okruhu jsou ve špatném stavu, což způsobuje ztráty páry. Tato podoba energetického systému je v prádelenských provozech velmi častá.



Obr. 2.1 Přehledové blokové schéma procesu profesní údržby prádla [42]

Na základě provozních dat a následných bilančních výpočtů je možné sestavit kompletní PFD diagram systému, jehož součástí jsou zdroj páry i veškeré spotřebiče. Tento model je účelné softwarově implementovat a simulovat různé varianty úsporných opatření. Díky tomu lze nalézt optimální soubor opatření pro dosažení maximální úspory. Stav po rekonstrukci (obr. 2.2) představuje moderní prádelnu zahrnující následující dílčí opatření:

- Energetický systém je vybaven expandérem, který využívá expandovanou páru z kondenzátu pro ohřev prací lázně v CBW.
- Napájecí voda se předehřívá spaliny ve výměníku tepla (ekonomizéru).
- Čerstvá prací voda se předehřívá odpadní vodou z CBW ve výměníku tepla, díky čemuž se snižuje množství páry potřebné pro ohřev prací lázně v CBW.
- Potrubí je nově izolované a odvaděče nepropouštějí páru do potrubí kondenzátu.



Obr. 2.2 PFD diagram procesu profesní údržby prádla při simulaci úsporných opatření [42]

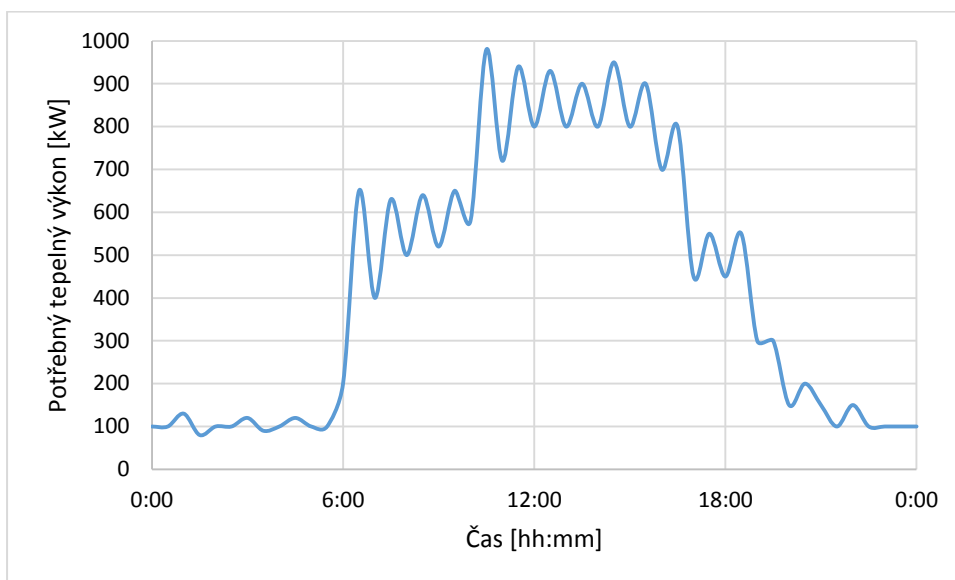
Rekonstruovaná prádelna dosahuje až 60 % úspory na zemním plynu oproti výchozímu uspořádání. Součástí návrhu je v další fázi tvorba podrobného P&ID diagramu, který zahrnuje potřebnou procesní a regulační instrumentaci. Následně je možné stanovit náklady na rekonstrukci a odpovídající dobu návratnosti. Nakonec je třeba návrh převést do souboru půdorysů s rozmístěním aparátů v prostoru. Návrh může být v rámci aplikace principů procesního inženýrství rozšířen o mnoho dalších úloh, např. analýzu spotřeby elektrické energie, posouzení efektivity pracího procesu (teplota, množství prací chemie, čas praní), analýzu zpětného využití odpadní vody z CBW a spalin z SYD a IRO, posouzení tepelných ztrát objektu apod. Rozsah činností závisí na místních podmínkách a konkrétním zadání.

2.2 Zohlednění dynamiky systémů

Komplexní přístup k řešení projektů energetických úspor v nejrůznějších cílových objektech a procesech musí zahrnovat poznatky o dynamickém chování systémů. Hovoříme o **časové rovině** komplexního přístupu.

Pro přehledný popis dynamického chování systému v krátkodobém horizontu je vhodná **křivka denního odběru tepla** (obr. 2.3) udávající časové rozložení odběru tepla během dne. V průmyslových provozech obvykle nestačí jedna křivka pro celé tepelné hospodářství, ale je třeba zpracovat více křivek pro jednotlivé spotřebiče. V příloze 1 jsou představena čtyři konkrétní procesní zařízení z pohledu dynamiky odběru tepla. Příloha dokládá proměnný charakter spotřeb, který u průmyslových technologií a procesů nastává. Při menším počtu spotřebičů je vhodné uvést křivky spotřeb do jednoho grafu i s celkovou kumulativní křivkou denního odběru tepla. Křivku denního odběru tepla lze v modifikované

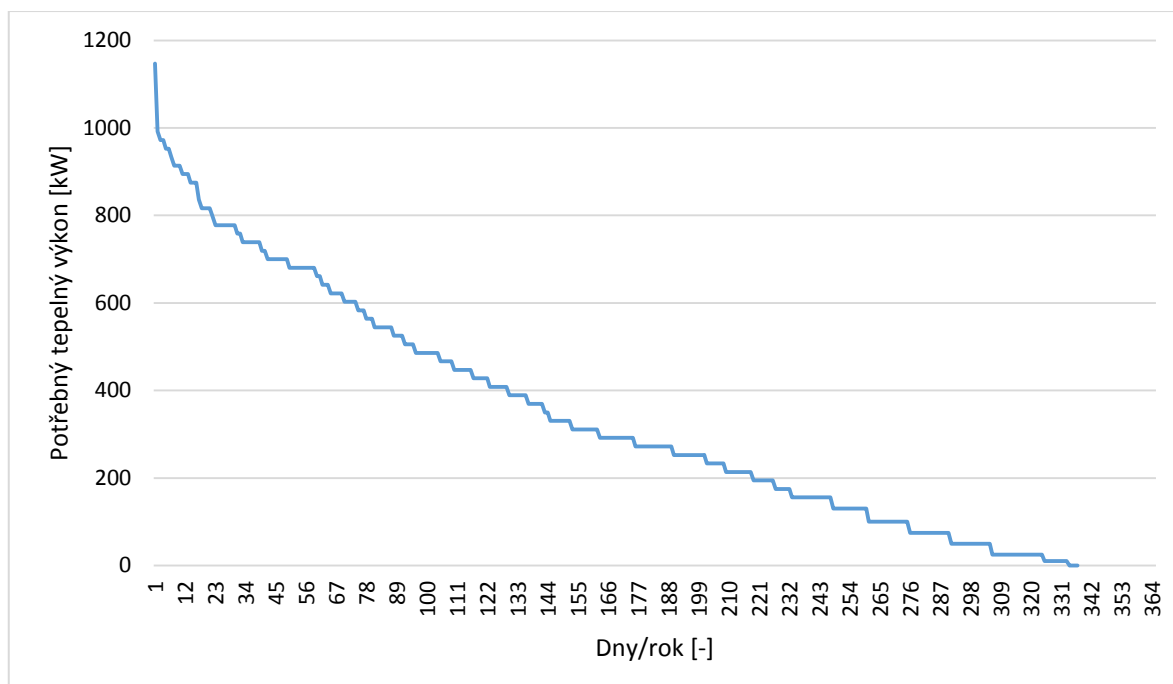
podobě použít i při zpětném hodnocení provozovaných zdrojů tepla, kdy je označována jako *křivka denního zatížení zdroje tepla*. Potřeba tepla pro vytápění a pro ohřev teplé vody bývají zahrnuty v jedné křivce, přestože jsou ovlivňovány zcela odlišnými faktory. Vyplývá to ze skutečnosti, že krytí potřeby tepla pro oba účely obvykle zajišťuje jediný zdroj tepla. Velké kolísání odběru tepla v průběhu dne je nežádoucí kvůli nadměrnému zatěžování zdroje tepla. Stejně tak je nežádoucí i výrazné kolísání elektrické energie, kdy musí být volen méně výhodný odběrový tarif.



Obr. 2.3 Příklad křivky denního odběru tepla v průmyslovém podniku

Další důležitou charakteristikou pro popis dynamického chování energetických systémů je **křivka ročního trvání potřeby tepla** (nebo též *křivka ročního tepelného zatížení zdroje tepla*). Slouží především při dimenzování zdroje tepla. Křivka ročního trvání potřeby tepla znázorňuje trvání potřeby výkonu v závislosti na počtu provozních hodin jednotlivých zdrojů a jsou z ní patrné změny odběru tepla v průběhu jednotlivých období roku (obr. 2.4). Její průběh je závislý na provozním vytížení výrobních procesů a spotřebě otopné soustavy. Při porovnávání energetické náročnosti provozu mezi jednotlivými roky je nutné provést korekci křivky vzhledem k objemu roční výroby a průměrným venkovním teplotám [44]. Příklad kompletního diagramu ročního trvání potřeby tepla pro lokální kotelnu systému CZT, která zajišťuje dodávku topné a teplé vody pro obytné budovy, je uveden v příloze 3. Křivku roční potřeby tepla je možné sestavit i zpětně na základě provozních dat (měřiče tepla na výstupu ze zdroje) a stává se cennou informací o reálném zatížení zdroje v průběhu roku.

Zdroj tepla musí mít dostatečný výkon na to, aby pokryl celý rozsah potřeby tepla během roku, a zároveň musí dostatečně rychle reagovat na změny potřeby tepla během dne. Vhodnou odpovědí na tento požadavek je tzv. *kaskádní řazení kotlů* [45] nebo kombinace základního zdroje tepla se zhoršenou dynamikou (např. biomasového) a špičkovacích zdrojů (plynových) [46]. Rychlé změny odběru je také možné pokrývat dostatečnou akumulací tepla [47].



Obr. 2.4 Typická křivka ročního trvání potřeby tepla pro otopnou soustavu

V mnoha případech je přínosné, když je dynamika jednotlivých systémů popsána nejenom v rámci dne, ale v reálných časových závislostech. V praxi se využívá tzv. *přechodová charakteristika* popisující uvedení zdroje tepla do provozu, rychlost jeho odezvy na změnu odběru, setrvačnost jeho chladnutí apod. S pomocí matematického popisu těchto dynamických vlastností je pak možné spouštět zdroj tepla a regulovat jeho výkon v souladu s průběhem reálné potřeby. Dále může být využit matematický popis pro optimalizaci provozu pomocí simulací různých provozních režimů. Pro uvedené potřeby se obvykle používají obyčejné diferenciální rovnice nebo tzv. *přenosové funkce* (viz kap. 3.2.3). Všechny uvedené možnosti dynamického popisu je možné aplikovat i na spotřebu elektrické energie, zemního plynu nebo stlačeného vzduchu.

2.3 Systematický postup řešení

Systematický postup od úvodní analýzy energetického systému po implementaci vybraných úsporných opatření tvoří třetí, tzv. metodickou rovinu komplexního přístupu. Systematický postup řešení projektů energetických úspor by měl zahrnovat následující kroky:

- 1) analýzu výchozího stavu energetického systému a všech spotřebičů,
- 2) výběr vhodných úsporných opatření,
- 3) podporu při zavádění úsporných opatření,
- 4) zhodnocení dopadů úsporných opatření.

Analýza výchozího stavu energetického systému, objektů a procesů

Dosažení efektivního provozu není možné bez hlubší znalosti konkrétního energetického systému a všech klíčových spotřebičů. Zkušenost ukazuje, že provozovatelům energetických systémů tato znalost chybí. Obecným stavem je hrubý přehled o celkových nákladech na energie a předpokládané životnosti klíčových zařízení. Průmyslová sféra je

v energetickém managementu dál, než komunální. Ani zde však důsledná kontrola výroby a spotřeby na úrovni jednotlivých spotřebičů není obvyklá.

Prvním cílem analýzy výchozího stavu je seznámení s použitými technickými prostředky v rámci energetického systému a systému spotřeb. Další otázkou je, zda je využíváno principů energetického managementu a v jaké míře. Je třeba ověřit rozsah dostupných provozních dat a jejich věrohodnost. Data mohou posloužit pro sestavení hrubé energetické bilance systému formou přehledu o všech důležitých zdrojích a spotřebičích. U průmyslových energetických systémů je žádoucí zjistit celkové denní a roční průběhy potřeby tepla, elektrické energie a plynu. Při podrobnější analýze je třeba tyto průběhy sestavit pro každý spotřebič zvlášť. Charakter odběru u procesních zařízení může být jiný, než výrobcem uváděná jmenovitá hodnota. Hloubka analýzy výchozího stavu musí odpovídat zadání a rozsahu projektu.

Výběr vhodných úsporných opatření

Následujícím krokem by měl být návrh nápravných opatření. Organizační opatření **v průmyslové sféře** jsou spojena především s energeticky šetrným chováním pracovníků. Kromě hospodárného využívání energií je důležité také dodržování správného postupu práce se zařízeními, které zaměstnanci obsluhují. Nízkonákladová investiční opatření zahrnují zavedení rekuperační techniky pro zpětné využití odpadního tepla z výstupních proudů [48] a modernizaci systému řízení. Stále častěji se jako doplňkové zdroje využívají tepelná čerpadla nebo solární kolektory. Pro účinnost výroby tepla je podstatná správná volba tepelného výkonu (dimenzování) zdroje. V případě, že je možné zvýšit účinnost výroby tepla u stávajícího zdroje, nabízejí se různé technologické a konstrukční úpravy, které by tomuto zvýšení napomohly. Komplexní investiční opatření mohou mít například podobu integrace obnovitelných zdrojů energie, kompletní výměnu zdrojů tepla a většího počtu zastaralých spotřebičů nebo náhrady parního systému za horkovodní.

Úsporná opatření **v komunální sféře** jsou zaměřena na snižování tepelných ztrát objektů. Ztráty větráním bývají snižovány rekuperačí odpadního tepla tam, kde je k dispozici řízené větrání. Neinvestiční opatření cílí především na snížení dodávky tepla tak, aby byla stále zajištěna tepelná pohoda uživatelů. Konkrétně lze snižovat dodávky tepla následujícími způsoby:

- Nevytápět prostory na vyšší teplotu, než je nutné (nepřetápět).
- Snížit vnitřní teplotu v době, kdy není teplo požadováno (teplotní útlum).
- Snížit teplotu v místech, kde to není potřeba (zónové vytápění).

Zásadním technologickým opatřením, které zajišťuje výše uvedené cíle je tzv. **termohydraulické vyvážení topné soustavy**, které zohledňuje dynamiku systému, v němž jsou otopná tělesa vybavena termostatickými regulačními ventily (TRV) [49]. Pro snížení spotřeby tepla na ohřev teplé vody se využívá podobných principů jako u topné vody. Základem je neohřívat teplou vodu na vyšší teplotu, než je požadováno projektem a vypínat cirkulaci v době, kdy není teplá voda využívána (mimo provozní dobu, v noci apod.). Řada opatření cílí na snižování spotřeby elektrické energie. Jejich bližší popis je však již mimo rámec této práce.

Výběr vhodného úsporného opatření musí reflektovat požadavky zadavatele, které mají především ekonomický charakter. Vedle toho by měl výzkumný tým zvažovat také nová, kreativní řešení a míru jejich rizika. Pozornost je také nutné věnovat projektovaným parametrům všech prvků systému, protože úsporná opatření, která budou systémem uvádět do nestandardních provozních stavů na hranici regulovatelnosti, mohou být kontraproduktivní.

Podpora při zavádění zvolených úsporných opatření

Výzkumný tým by měl nabídnout ucelenou službu, která vede k dosažení úspory. Při zavádění větších investičních nebo organizačních opatření je důležité zpracovat výchozí podklad, který rozsah a parametry změn popíše. V případě investičních opatření se jedná o tzv. *basic design*, což je jednoduchý výchozí projekt zahrnující nové technologické schéma, půdorysy dotčených prostor a technickou zprávu. Basic design může být použit jako podklad pro vypsání výběrového řízení na dodávku technologie nebo energetické služby. Dále je ho možné použít jako podklad pro zpracování dalšího stupně projektové dokumentace, např. pro ohlášení stavby nebo pro vydání stavebního povolení.

U menších energetických systémů často postačuje pouze kompetentní výběr úspory a základní doporučení k implementaci. Provozovatel pak provádí implementaci svépomocí. Úskalí tohoto přístupu je spojené s nejasnou zodpovědností v případě, že dosažená úspora neodpovídá očekávání. Proto je i v těchto případech vhodná alespoň konzultační účast odborného pracovníka na implementační fázi řešení.

Zhodnocení dopadů úsporných opatření

Posouzení přínosů úsporných opatření by se nemělo omezit jenom na konstatování, že bylo dosaženo určité úspory. Výstupem hodnocení energetické efektivity systému by měly být **měrné veličiny**, které vztáhnou množství spotřebované energie k jednotce výstupního produktu procesu. Touto jednotkou může být kilogram zpracovaného materiálu, metr čtvereční upraveného povrchu apod. Měrná veličina slouží k efektivnímu vyhodnocení účinnosti využívání energie a porovnávání spotřebičů se stejným produktem. Velmi důležité je také dlouhodobé sledování provozních parametrů energetického systému a jeho postupná optimalizace. Zodpovědný, komplexní přístup by měl také zpětně hodnotit dopady úsporných opatření na provoz jednotlivých technologií (jejich údržbu) a na uživatele budovy, příp. zaměstnance podniku (jejich pracovní podmínky).

2.4 Zobecnění a závěry pro tvorbu metodiky

Byly identifikovány tři klíčové prvky komplexního přístupu, které významně zvyšují efektivitu řešení projektů energetických úspor a přinášejí kvalitnější výsledky:

- aplikace principů procesního inženýrství (viz kap. 2.1),
- zohlednění dynamiky jednotlivých prvků systému (viz kap. 2.2),
- využití systematického postupu řešení od úvodní analýzy systému po implementaci vybraných úsporných opatření (kap 0).

Je žádoucí, aby se všechny tyto prvky promítly do navrhované metodiky. Jejich využití vede k identifikaci optimálních úsporných opatření pro daný provoz a k účinné podpoře jejich zavádění do praxe. Nově vytvořená metodika představuje efektivní postup, jak organizovat projekty energetických úspor. Míru využití jednotlivých prvků je třeba zvažovat a přizpůsobovat konkrétním projektům. Výsledkem by měla být ale v každém případě práce **s kvalitní datovouází a věrohodným matematickým popisem řešeného systému.**

Uplatnění komplexního přístupu ve všech jeho navržených rovinách, tj. technologické, časové a metodické může být spojeno s tzv. **synergickým efektem**. Jedná se o důsledek společného působení více faktorů, které vyplývají z jednotlivých prvků komplexního přístupu. Výsledek navrženého komplexního přístupu je v takovém případě významně kvalitnější než prostý součet dílčích výsledků jednotlivých prvků.

První podmínkou dosažení synergického efektu je **kvalitní datová báze**. Pokud nejsou k dispozici věrohodná data, bývá výsledkem úvodní analýzy neúplná identifikace základních nedostatků systému. Následující návrhová činnost je odkázána na konzervativní řešení, u nichž je velká míra jistoty dosažení úspory. Mnoho dalších slibných opatření není zohledněno, protože nelze přesněji odhadnout jejich dopad, a jejich potenciál tak zůstává nevyužit. Omezené jsou i možnosti další provozní optimalizace.

Druhou podmínkou dosažení plného synergického efektu je vedle kvalitní datové báze i existence **matematického modelu systému**, který je na jejím základě sestaven. Kvalitní model postavený na kvalitních datech je efektivním nástrojem pro hodnocení širokého spektra úsporných opatření. Sofistikovaná analýza energetického systému je časově i finančně velmi náročná, ale umožňuje komplexní návrh úspor s možností simulovat více variant řešení. Provozovatel dostane věrohodný a podložený návrh řešení. Po zavedení nejslibnějších opatření je datová báze aktualizována a model adekvátně upraven. Upravený model systému je pak dále využitelný při hledání optimálního provozního režimu vzhledem k vnějším podmínkám (definovaným vstupům modelu).

3 POPIS OBECNÉ METODIKY

Klíčovou součástí komplexního přístupu k řešení projektů energetických úspor probíhajících ve spolupráci výzkumné organizace s partnerem z průmyslové nebo komunální sféry je nově zformulovaná metodika. Její obecná podoba je představena na obr. 3.1. V kapitole je popsán doporučený způsob řešení projektů energetických úspor včetně používaných vědeckých postupů. Metodika má sloužit jako koncepční vodítko umožňující aplikaci vybraných postupů na míru řešenému projektu. Při jejím návrhu byl kladen důraz na praktickou použitelnost a současně dostatečnou univerzálnost.

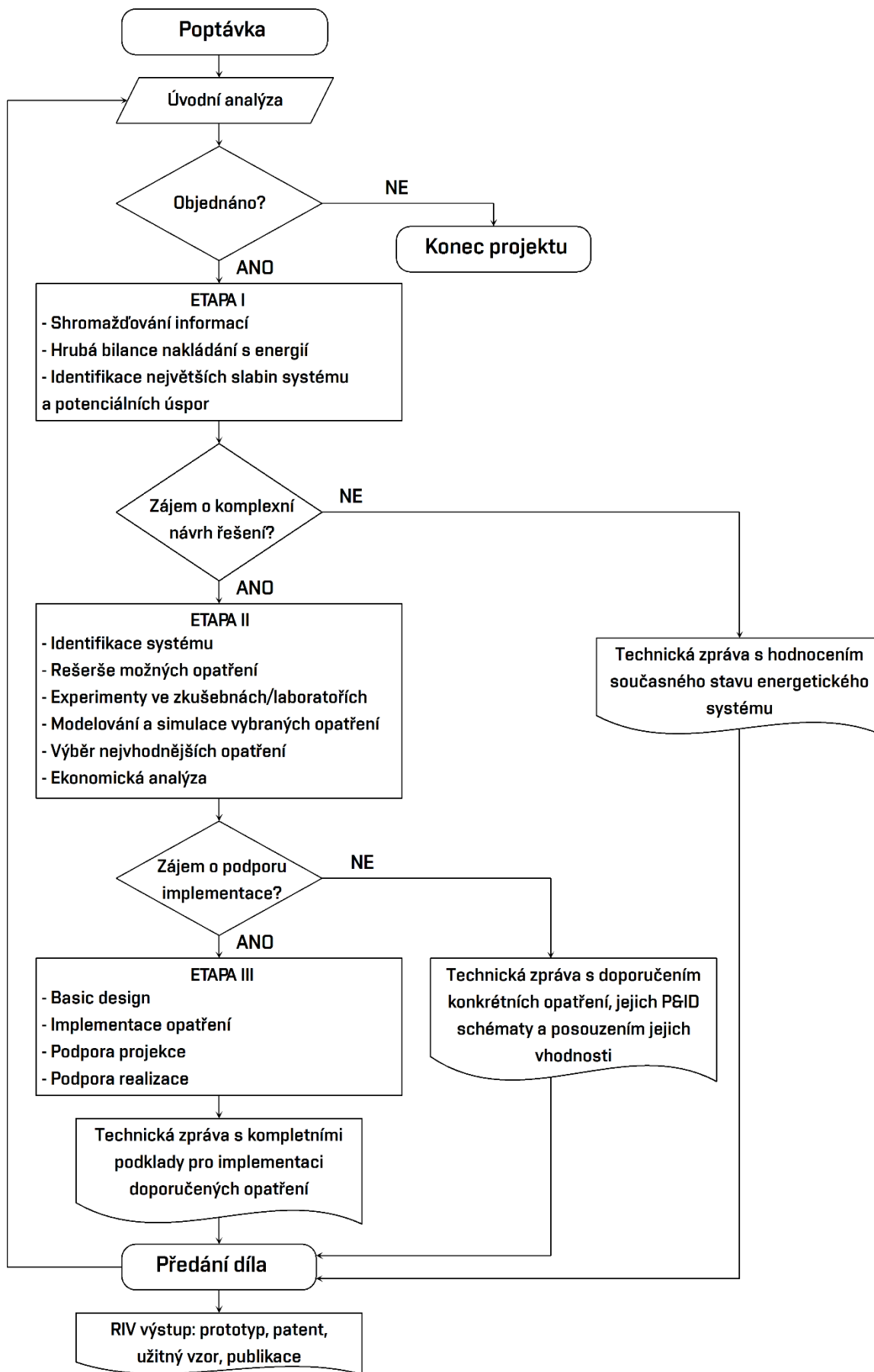
Hlavním přínosem navržené metodiky je prevence neúspěchu projektu způsobeného nejistotou, která je typická pro výzkumnou činnost. Pro prevenci nejistot je důležitý tzv. *agilní přístup* k organizaci projektů. Agilní přístup je založený na průběžném upřesňování cíle projektu díky interakci s provozovatelem řešeného systému. Tento přístup se v metodice promítá rozdělením projektu na **více etap**. Po skončení jedné etapy se vyhodnotí průběžné výsledky a po dohodě obou stran se přistoupí k etapě navazující. **Metodika zajišťuje efektivní implementaci komplexního přístupu, přičemž zohledňuje aktuální stav a individuální potřeby konkrétního energetického systému.**

Rozdělení výzkumné činnosti v rámci projektů energetických úspor se předpokládá do čtyř základních etap v souladu se systematickým postupem řešení (viz kap. 0):

1. analýza systému a zajištění dat,
2. výběr, resp. návrh úsporných opatření,
3. podpora implementace úsporných opatření,
4. zhodnocení dopadů úsporných opatření.

Ještě před zahájením projektu je však třeba zajistit smluvní rámec spolupráce. Návrh metodiky vychází z předpokladu, že mezi výzkumným týmem a provozovatelem energetického systému existuje **smluvní vztah v podobě závazné objednávky nebo smlouvy o dílo**. Alternativami k objednávce, resp. smlouvě o dílo mohou být nekomerční spolupráce nebo společný výzkumný projekt s dotační podporou. Nekomerční spolupráce může být vhodným způsobem, jak navázat spolupráci a vzájemně se poznat. Dlouhodobě však klade velké nároky na motivaci partnerů a jejich zodpovědný přístup k projektu. Pokud není mezi partnery jasný smluvní závazek s finančním rámcem, řešitelé mají tendenci přikládat spolupráci nižší váhu. Důsledkem může být nespokojenost s dosaženými výsledky na obou stranách. U společných výzkumných projektů se vztah „zadavatel-zhotovitel“ přesouvá do roviny koordinované partnerské spolupráce dvou či více řešitelů. Nevýhodou je malá flexibilita výzkumných projektů vůči nejistotě vyplývající z podstaty výzkumné činnosti. Projekty mívají dlouhodobější charakter a soustředí se na získání nových poznatků. Přímý dopad na energetický systém konkrétního podniku nemusí splnit očekávání provozovatele. Nemalá je také administrativní zátěž spojená s dotační podporou. U projektů energetických úspor v průmyslové a komunální sféře lze považovat za nejvhodnější řešení smlouvu o dílo. Zkušenost ukázala, že tato smluvní forma spolupráce umožňuje zacílit projekt na reálnou potřebu zadavatele a poskytuje dostatečnou flexibilitu při jeho řešení.

Vstupem do spolupráce bývá **poptávka** ze strany průmyslového podniku nebo veřejného subjektu. Na poptávku není hned vhodné reagovat nabídkou, resp. smlouvou o dílo. Bez bližšího seznámení s energetickým systémem není možné odhadnout náročnost úlohy a tedy ani její časový a finanční rámec. K základnímu seznámení s řešeným energetickým systémem slouží **úvodní analýza**. Ta musí vycházet z přímé komunikace se zadavatelem a směřovat k upřesnění zadání. Úvodní analýzu by měla provést výzkumná organizace na vlastní náklady.



Obr. 3.1 Obecná metodika řešení projektů v oblasti efektivity energetických systémů

Následující jednání by měla vést k **objednání díla**. Objednávka může zahrnovat všechny čtyři etapy projektu, ale doporučit lze spíše postupné objednávání jednotlivých etap. Etapový způsob řešení dává výzkumné organizaci možnost průběžně specifikovat předmět dalších nabídek a smluvnímu partnerovi poskytuje svobodu pro změnu podmínek nebo cílů spolupráce. Obě strany mohou od spolupráce také snáze odstoupit. Korektní nabídka by měla obsahovat popis plánovaných činností a jejich harmonogram.

První etapa projektu obnáší sběr potřebných provozních dat a podrobnější analýzu energetického systému. Komplexně zpracovaná datová báze by měla zahrnovat následující informace:

- přehled veličin monitorovaných systémem MaR,
- souhrn všech využívaných paliv a forem energie,
- spotřeba paliv a roční náklady na energie,
- parametry zdrojů energie – účinnost výroby tepla, charakteristické provozní režimy, regulační rozsah apod.,
- parametry spotřebičů – účinnost využívání energie, odběrové křivky apod.,
- distribuční soustava – délka a typ rozvodu, komponenty, stav izolace apod.,
- finanční podklady – faktury za elektrickou energii a plyn, příp. teplo, smluvní podmínky, náklady na údržbu jednotlivých prvků systému,
- alternativní možnosti zajištění energií včetně cenových podmínek,
- parametry objektu, budovy, prostorové uspořádání – rozmístění klíčových prvků systému.

Data o spotřebách energií a vody je vhodné vyhodnocovat za období posledních tří let. Kratší časový interval může být ovlivněn nestandardními stavy, kterých si provozovatel nemusí být vědom. Důležité jsou v tomto směru informace o všech zásadních provozních změnách v posledním období, např. rekonstrukcích nebo výměnách spotřebičů. Pro analýzu aktuálního stavu jsou zásadní:

- výsledky energetického auditu (pokud byl proveden) a průkazy energetické náročnosti jednotlivých budov,
- projektová dokumentace,
- technické listy zařízení,
- protokoly o emisním měření.

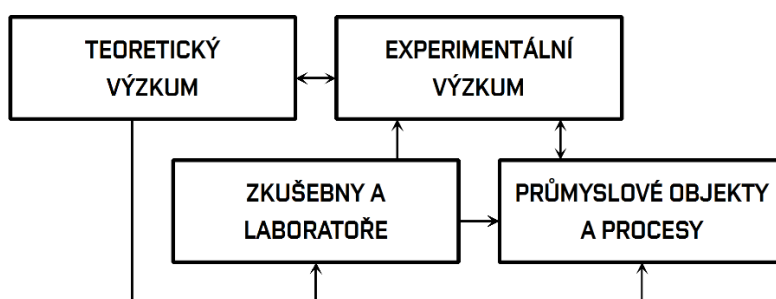
Veškeré relevantní podklady je vhodné převést do elektronické podoby a archivovat ve společném úložišti. Obvykle se jedná o velké množství informací, přičemž mnohé z nich mají interní charakter. V tomto ohledu je třeba budovat vzájemnou důvěru s provozovatelem a klást důraz na dodržování mlčenlivosti.

Vhodným analytickým nástrojem je sestavení **hrubé bilance nakládání s energií**, která všechny zásadní technické parametry přehledně propojí. Hrubou bilancí se myslí přehledová tabulka ročních spotřeb a výroby energií rozepsaná na jednotlivé prvky energetického systému. Pro ověření věrohodnosti systému MaR je vhodná fyzická kontrola měřicí techniky. V analytické fázi projektu je nezbytná osobní návštěva řešitele v době, kdy je systém v provozu. U větších systémů je vhodné věnovat sledování provozu více dní. Součástí místního šetření je tvorba fotodokumentace pokrývající především zdroje, spotřebiče a prostředky MaR.

Výsledkem analýzy by měl být popis výchozího stavu energetického systému. Vedle sestavení přehledu o výrobě a spotřebě jednotlivých druhů energie by v této etapě měla být popsána dynamika systému pomocí roční křivky trvání potřeby tepla a křivky denního

odběru tepla. Tyto charakteristiky je možné vytvořit i pro odběr elektrické energie, zemního plynu a stlačeného vzduchu. Na základě poznatků z první etapy je možné zpracovat **technickou zprávu s hodnocením současného stavu energetického systému**. Součástí zprávy mohou být i obecná doporučení pro zvýšení efektivity. Nebudou však mít podobu návrhu, který by byl podložen výpočtem.

Pokud má smluvní partner zájem o pokračování projektu v podobě **návrhu úsporných opatření**, může projekt vstoupit do své **druhé etapy**. Ve druhé etapě mohou být v širší míře uplatněny pokročilé vědecké metody řešení v čele s matematickým modelováním jednotlivých aparátů i systému jako celku. Vytvořené matematické modely je možné uplatnit při simulaci vybraných úsporných opatření nebo provozní optimalizaci systému. Plný přínos teoretických znalostí pro praxi je podmíněn experimentálním výzkumem. Experimentální data pro ověřování modelů je možné získávat měřením v reálném provozu nebo ve zkušebnách a laboratořích (obr. 3.2). Aby bylo dosaženo velké přesnosti modelů a zároveň jejich relevance pro praxi, je vhodné oba postupy kombinovat.



Obr. 3.2 Kombinace teoretické a experimentální činnosti při řešení projektů

Další činností, která by měla být součástí druhé etapy, je provádění rešerší relevantních patentů a komerčně dostupných řešení. Jedná se o velmi inspirativní činnost a prevenci zdlouhavého hledání již dříve nalezených řešení. Doporučená řešení musí být zpracována v takové formě, aby se zadavatel mohl rozhodnout, zda je implementuje.

Před rozhodnutím o podobě úsporných opatření musí být provedena ekonomická analýza zahrnující investiční i provozní náklady spojené se stávajícím energetickým systémem a zamýšlenou změnou. Z pohledu ekonomiky provozu energetických systémů jsou zásadní náklady na jednotku spotřebované energie. Může se jednat o cenu za kWh dodanou v zemním plynu nebo elektřině, cenu za t pevného paliva nebo cenu za dodaný GJ tepla. Pokud má podnik nebo budova vlastní zdroj energie, pak je nutné zohlednit všechny náklady souvisejících s provozem zdroje (náklady na údržbu, mzda obsluhy, doprava paliva apod.). Při posuzování ekonomiky energetického systému průmyslového podniku je třeba do výpočtu zahrnout spotřeby všech zdrojů energie ve všech zařízeních, nikoliv pouze spotřebu samotného zdroje tepla. Přehled o spotřebách však ještě není dostatečným vstupem pro rozhodování ohledně úsporných opatření. V průmyslové sféře jsou dalším klíčovým vstupem záznamy výrobního nebo zpracovatelského výkonu. Ty by měly být prováděny pro jednotlivé spotřebiče s krátkou časovou periodou, ideálně pro každý cyklus nebo hodinu. Teprve náklady na energii vztahenou k jednotce produktu jsou dostatečným podkladem pro hodnocení energetické náročnosti a zavádění konkrétních úsporných opatření. Tyto tzv. *měrné náklady* také umožňují efektivní porovnávání spotřebičů, která mají stejný produkt. Tyto měrné náklady slouží pro ekonomické hodnocení úsporných opatření a srovnání více variant se využívají zejména doba návratnosti investice (PP), čistá současná hodnota (NPV) a vnitřní výnosové procento (IRR).

Poslední **třetí etapa** směřuje k praktické implementaci úsporných opatření. Podle typu projektu může jít o přímou realizaci opatření výzkumným týmem nebo zpracování podkladů pro realizaci. Vhodnou formou může být tzv. *basic design* navržených řešení, což je jednoduchý výchozí projekt zahrnující kromě P&ID schématu také půdorysy dotčených prostor a technickou zprávu. Basic design specifikuje výchozí požadavky na jednotlivé profese (elektro, plyn, voda apod.), a je vhodným podkladem pro zpracování realizační dokumentace. Zpracování oficiální projektové dokumentace, pokud je požadováno, je možné řešit subdodávkou. Basic design je také možné využít přímo jako technické zadání pro výběrové řízení na realizaci díla.

Očekávaným výsledkem komplexně řešeného projektu je úspěšné předání výstupů třetí etapy. **Předání díla** by však nemělo být posledním krokem. Během řešení projektu obvykle vyvstane řada témat, která mohou být předmětem dalších zakázek smluvního výzkumu. Prvním z žádoucích úloh je **kontrola reálných přínosů zavedených opatření** formou opakované úvodní analýzy. Na základě zjištěných skutečností je možné dále zlepšovat provozní parametry systému tak, aby bylo dosaženo maximální úspory. Projekt často přinese nové poznatky, které mohou být inspirací pro další výzkumné nebo odborné pracovníky. Pokud to smluvní podmínky umožňují, je vhodné tyto poznatky publikovat nebo přenést do jiné formy RIV výstupu (prototyp, patent, užitný vzor, funkční vzorek apod.).

V následujících podkapitolách jsou popsány tři důležité aspekty navržené metodiky, jejichž úroveň rozhoduje o kvalitě výsledku projektu. Jedná se o sběr dat, matematické modelování a systém řízení.

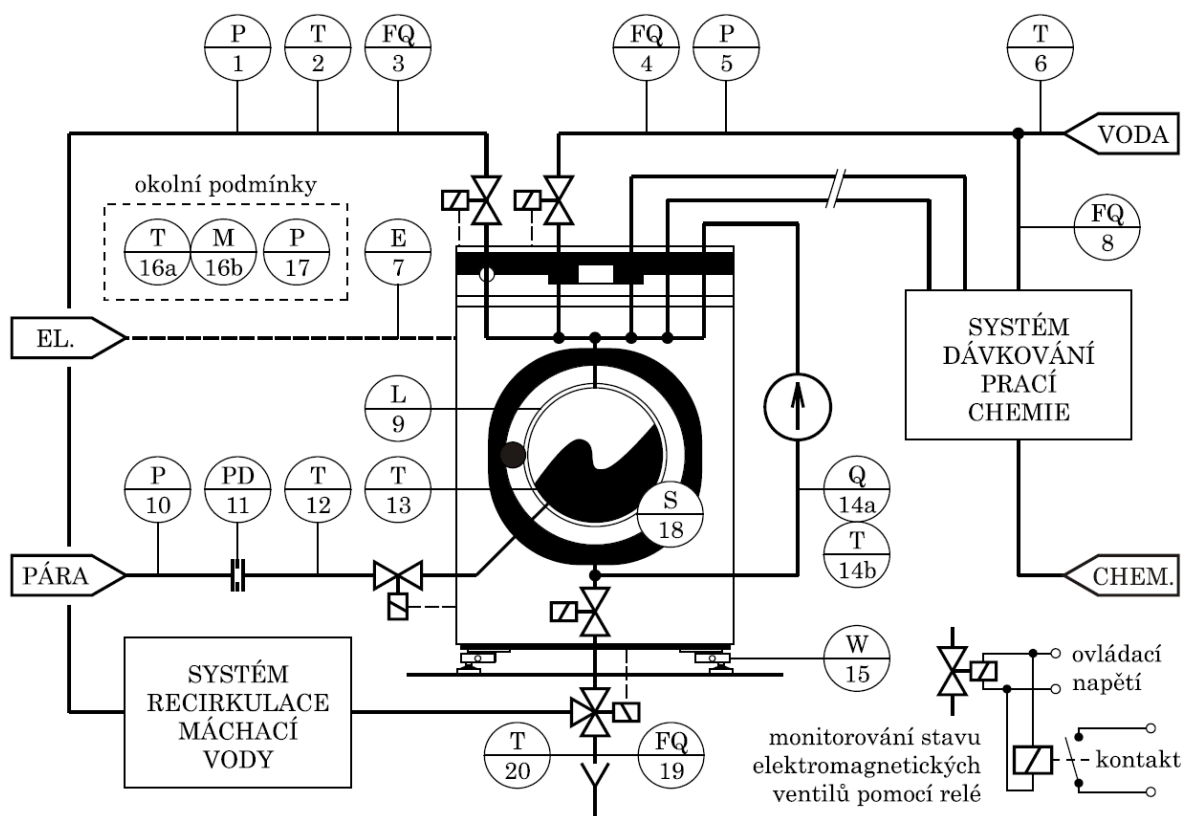
3.1 Význam sběru dat a jeho realizace

Správný sběr dat je klíčem k uplatnění sofistikovaných postupů v čele s matematickým modelováním a simulací variantních řešení. Výzkumný tým musí důsledně **definovat data potřebná** pro popis systému a hledat efektivní způsoby jejich zajištění. Na základě dostatečného množství věrohodných dat lze navrhnout úsporná opatření vyšší kvality, protože jejich návrh lze podložit výpočtem.

V průmyslových provozech vychází výzkumný pracovník při sběru dat ze stávajícího systému MaR. Důsledný monitoring výroby a spotřeby energie je však v průmyslové praxi spíše výjimkou. Data jsou obvykle evidována na základě rutinního postupu a soustředí se na záznamy z patních (obvykle fakturačních) měřidel. Na základě fakturačních měřidel lze porovnávat výdaje za jednotlivá zúčtovací období, ale není možné hodnotit hospodárnost nakládání s energií. Nelze například říct, zda snížení spotřeby vzniklo díky zavedenému opatření nebo vlivem vyšší průměrné venkovní teploty. Tento triviální „sběr dat“ je proto vhodné rozšířit o podružná měřidla, která poskytnou informace o menších odběrových celcích, ideálně jednotlivých spotřebičích. Pokud jsou potřebná data archivována v dostatečném rozsahu, je třeba ověřit jejich kvalitu. Součástí analýzy systému je i eliminace nadbytečných (*redundantních*) dat. Pro větší podniky platí povinnost provádění energetických auditů a posudek může být velmi cenným zdrojem informací. Ve většině případů však není energetický audit dostatečnou alternativou k analýze energetického systému (Etapa I, obr. 3.1). To platí zejména v případech, kdy je potřeba popsat dynamické vlastnosti vyšetřovaného systému. Dalším vstupem pro hodnocení energetické efektivity provozů jsou časové průběhy spotřeb jednotlivých objektů, technologií a procesů. Při provádění analýz bývá výzkumný pracovník konfrontován s následujícími komplikacemi:

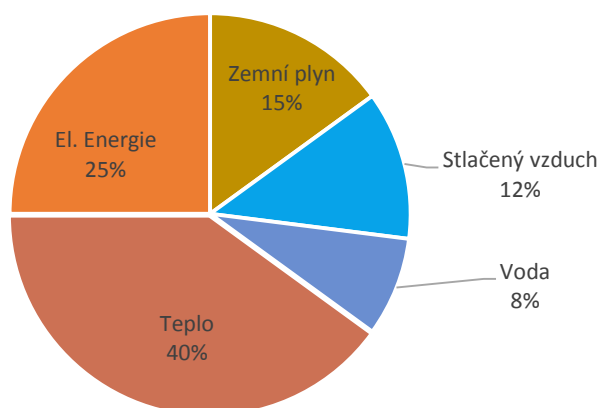
- nedostatečný stávající sběr dat a omezená možnost instalace nových snímačů,
- neochota pracovníků zadavatele ke spolupráci na experimentální činnosti,
- nemožnost uvedení zdroje nebo spotřebičů do potřebných provozních režimů.

Částečnou odpovědí na tyto problémy může být experimentální činnost prováděná **ve zkušebně**. Měřicí technika může být v laboratorním prostředí rozšířena na míru řešené úloze, jak ukazuje příklad měření spotřeb komerční pračky na obr. 3.3. Při experimentálním měření ve zkušebně nehrozí riziko, že dojde k narušení plynulosti provozu zadavatele nebo poškození produktu, který je předmětem obchodní činnosti (např. prádla). Pokud je k dispozici dostatečná infrastruktura, je možné vystavit zdroj nebo spotřebič potřebným vnějším vlivům. Příklad moderní zkušebny zaměřené na aplikovaný výzkum v oblasti prádelnictví je představen v příloze 4 a zdroji [50]. Pokud se vychází z experimentu, pak je nutné zajistit záznam potřebných dat s vhodnou vzorkovací frekvencí. Důležité je vždy zvážit rozsah experimentální činnosti, aby bylo dosaženo kýženého efektu s přiměřeným úsilím. Výběr měřených veličin a správnou volbu počtu opakování měření může usnadnit tzv. **plánování experimentů** (z angl. *Design of experiments*). Jeho přínos je největší u systémů, kde klíčovou sledovanou veličinou (obvykle výkon nebo účinnost) ovlivňuje více dalších veličin (tzv. *faktorů*). Teorie plánového experimentu umožňuje kvantifikovat vliv těchto faktorů s pomocí minimálního počtu měření.



Obr. 3.3 Vsádková pračka s parním ohřevem osazená měřidly pro hodnocení spotřeb [42]

Sběr dat v reálném provozu směřuje k identifikaci možných zdrojů úspor. Hledání úspor začíná u **největších spotřebičů energie**. Základní pomůckou je sestavení hrubé bilance systému v podobě přehledových tabulek a koláčových grafů s rozložením spotřeb pro každý druh energie (obr. 3.4). Následně se zvažuje úprava provozního režimu klíčových spotřebičů, nebo jejich rekonstrukce. Vhodným opatřením může být zpětné využití části odpadního tepla nebo vody. V nejzazším případě je možné navrhnout i výměnu spotřebiče.



Obr. 3.4 Příklad rozložení celkových nákladů na jednotlivé druhy spotřeb pro průmyslový provoz

Dalším předmětem zájmu jsou **zdroje** tepla, chladu, příp. elektrické energie. U nich je posuzována především účinnost. Elektrickou energii a někdy i teplo je možné zajistit i externí dodávkou, což je vhodný výchozí scénář při posuzování alternativních řešení. Také úprava smluv s dodavateli energií a vody má pro snižování nákladů velký potenciál. Tento potenciál roste s velikostí odběru. Šíře možných řešení je velká, a odvíjí se od konkrétních podmínek a potřeb každého provozu. Několik případových studií z průmyslové i komunální sféry představuje kap. 4.

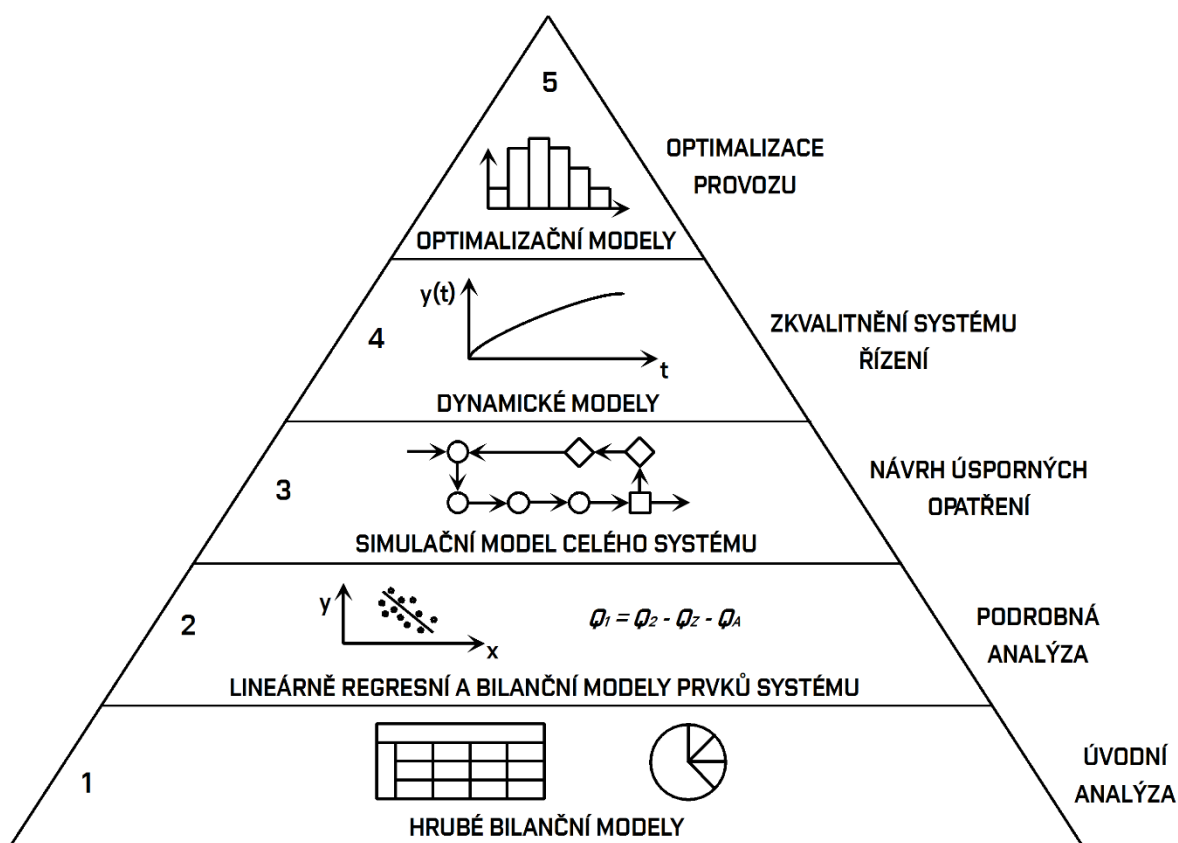
Provozovatelé energetických systémů kladou velký důraz na spolehlivost systému. Při návrhové činnosti je tedy zásadní dobrá znalost dostupných technických řešení a jejich spolehlivosti. Při zvažování nestandardních opatření, jako je integrace obnovitelných zdrojů energie, nebo kogenerace pomocí mikroturbíny či ORC, je vhodné přimá zkušenost s referenční instalací [19]. Návrh by měl počítat se záložním řešením v případě výpadku těchto technologií.

U složitějších systémů, kde se rozsah projektu a výsledky hůře předvídají, roste význam etapového postupu, kdy je po každé etapě rozhodnuto o pokračování nebo ukončení projektu. Důležité je přitom zachovávat pole působnosti, které výzkumnému týmu přísluší. Provozovatel by měl dostat od výzkumného týmu kompetentní a věrohodné doporučení, na základě něhož se rozhodne pro realizaci úsporných opatření. Rizika spojená s realizací by však měl nést on sám. Výzkumnému pracovníkovi lze doporučit roli odborného konzultanta, který provází investora během celého projektu, ale rozhodování nechává na něm.

3.2 Matematické modelování a výpočtové nástroje

S matematickým modelováním vstupuje do projektu energetických úspor významná přidaná hodnota, která rozšiřuje možnosti analytické i návrhové fáze projektu. **Matematické modely do značné míry nahrazují fyzikální modely**, tj. experimentální zařízení ve zkušebně nebo technická zařízení reálného energetického systému. V analytické fázi jsou matematické modely velkým přínosem při kontrole věrohodnosti vstupních dat. V návrhové fázi modely umožňují simulaci různých variant úsporných opatření a provozní optimalizaci energetického systému. Provozovatel dostane věrohodný a podložený návrh řešení. Po zavedení nejslibnějších opatření může být datová báze aktualizována a model adekvátně upraven. Upravený model systému je pak dále využitelný při hledání optimálního provozního režimu vzhledem k vnějším podmínkám (definovaným vstupům modelu).

Na základě zkušenosti z řešení konkrétních výzkumných projektů energetických úspor byl definován systém matematických modelů, které jsou pro tuto oblast vhodné viz obr. 3.5. Základnu pomyslné pyramidy tvoří **hrubé bilanční modely**, které mají formu přehledových tabulek shrnujících hlavní parametry všech důležitých zdrojů a spotřebičů nebo koláčových grafů s rozložením spotřeb energií v systému. Tyto modely jsou sestavovány v rámci úvodní analýzy (viz kap. 3.1) a slouží k základnímu popisu systému. U již provozovaných systémů bývá často hrubá energetická bilance zpracována jako součást projekčních podkladů. Vyšší úroveň tvoří **statické modely jednotlivých prvků systému**, mezi nimiž převažují lineárně regresní modely. Příkladem může být závislost účinnosti kotle na jeho výkonu nebo závislost tzv. *topného faktoru* (COP) na venkovní teplotě u tepelného čerpadla vzduch-voda. Na této úrovni, která je typická pro Etapu I řešení projektu, se mohou dále uplatnit **detailní bilanční modely** jednotlivých prvků systému. Sestavením těchto dílčích modelů do jednoho celku vzniká **simulační model** celého systému, který je vhodný k testování různých úsporných opatření v rámci Etapy II. V případě nedostatků v systému řízení je žádoucí sestavit také **dynamické modely** vybraných zařízení. Tyto modely je následně možné použít pro zkvalitnění regulace. Nejvyšší kategorií jsou **optimalizační modely**, které svoje uplatnění nacházejí zejména při provozní optimalizaci v dlouhodobém měřítku.



Obr. 3.5 Úrovně matematických modelů používaných při řešení projektů energetických úspor

První dvě úrovně modelů jsou pro většinu projektů nezbytné a technicky nejméně náročné. Úroveň matematického modelování musí odpovídat rozsahu a zadání projektu. Je třeba hledat model, který splní požadovaný účel a jeho tvorba je nejméně náročná. Tvorba vyšších úrovní modelů může být náročná časově i finančně, ale umožňuje komplexní návrh úspor s možností simulovat více variant řešení. Kapitola dále (v souladu s obr. 3.5) představí obecné dělení matematických modelů na analytické a experimentální s důrazem na lineárně regresní modely. Poté konkrétněji představí matematické modely pro výpočty klíčových

aparátů a simulaci procesů (kap. 3.2.2), dynamické modely sloužící ke zkvalitnění systému řízení (kap. 3.2.3) a simulační modely pro optimalizaci procesů (kap. 3.2.4). U všech úrovní jsou uvedeny vhodné softwarové nástroje pro tvorbu a využití modelů.

3.2.1 ANALYTICKÁ A EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE

Matematický model energetického systému může být získán matematicko-fyzikální analýzou neboli tzv. *analytickou identifikací systému*. Matematický model tak může vzniknout ještě před technickou realizací dané technologie a nabízí možnost korigovat a vylepšovat projekt, což může uspořit čas i finance. Velká výhoda je také v simulaci nestandardních provozních stavů, kterých by bylo složité docílit v reálném provozu. Tato metoda ovšem vyžaduje hlubokou znalost vyšetřovaného systému a jeho struktury. Sestavení kvalitního matematického popisu vnitřních (fyzikálních) procesů reálného systému je obvykle velmi náročné [51]. Výsledkem analytické identifikace je tzv. *white-box* matematický model. Pro **popis statického chování systému** je možné využít analytickou identifikaci v podobě tvorby bilančních modelů (viz kap. 3.2.2).

Druhou možností, jak získat matematické modely jednotlivých prvků systému, je tzv. *experimentální identifikace*. Experimentální identifikace vychází z analýzy procesu pokusnou formou, tedy měřením předem zvolených vstupních a výstupních hodnot (např. s využitím *plánování experimentů*). Identifikace je prováděna na již existujícím zařízení a při tvorbě modelů není potřeba definovat vnitřní stavy ani procesy. Experimentální identifikace je náročná na přístrojové vybavení a vytvořené modely mají omezenou platnost pouze pro konkrétní testované zařízení [51]. Při tomto tzv. *black-box* přístupu se při tvorbě modelů nejčastěji používají metody *lineární regrese* (LR) a *neuronových sítí* (*artificial neural network*, ANN). V případě LR je označením „lineární“ myšlena linearita koeficientů regrese. ANN modely jsou v porovnání s LR schopny zahrnout i nelineární vazby mezi proměnnými. LR jsou na druhé straně méně složité než ANN, což usnadňuje jejich praktickou využitelnost.

Kombinací obou typů identifikace může vzniknout tzv. *grey-box model* [52]. Srovnání různých technik modelování pro všechny tři uvedené typy modelů je přehledně shrnuto v článku [53] pro oblast topení, větrání a klimatizace. Z článku vyplývá, že pro praktické využití, kterým může být např. implementace modelu do řídicího systému, jsou vhodnější modely s menším počtem parametrů. Analytické modely mohou být příliš složité a nemusí zohledňovat specifické podmínky, které ovlivňují provoz energetického zdroje. *Black-box* a *grey-box* modely jsou na druhé straně použitelné pouze pro rozsah provozních veličin, na základě něhož byly sestaveny.

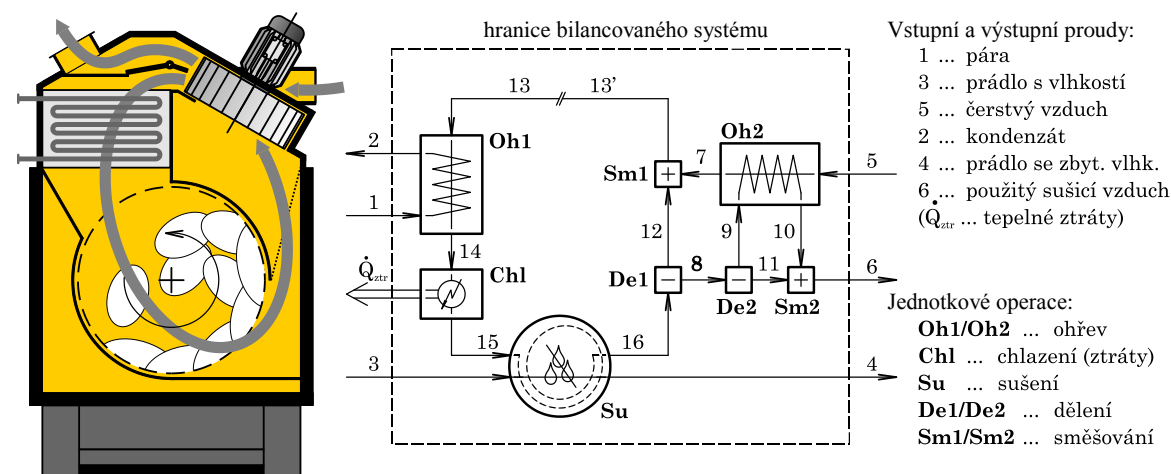
Existuje řada článků, která popisuje tvorbu *black-box* modelů pro zařízení, která bývají součástí energetických systémů. Jedná se o různé typy kotlů, tepelných čerpadel, chladicích jednotek a příležitostně kogeneračních zdrojů nebo solárních panelů. Ve většině studií však data pro modelování poskytl výrobce zařízení nebo byly získány měřením v laboratorních podmínkách. Při reálném provozu však mohou být provozní parametry těchto zařízení (zejména jejich výkon a účinnost) značně odlišné. Dále v praxi nebývá zvykem, že by byl energetický systém dostatečně vybaven měřicí technikou. Tyto skutečnosti mají velký vliv na možnost sestavení modelů, jejich přesnost a reálnou použitelnost.

3.2.2 BILANČNÍ VÝPOČTY A SIMULAČNÍ SOFTWAROVÉ NÁSTROJE

Výpočet energetické a hmotnostní bilance systému je základním nástrojem při analýze a případné optimalizaci energetických systémů. Na významu nabývá především u větších průmyslových provozů. Bilanční výpočty jsou základem analytické identifikace a používají

se především pro vnější popis statického chování systému. Analytické bilanční modely vycházejí z teorie základních fyzikálně-chemických dějů. Při hodnocení již provozovaného systému by bilanční modely měly být přizpůsobeny reálným provozním datům. Ukázka bilančního modelu průmyslového sušiče je na obr. 3.6.

Bilanční posouzení průmyslového provozu musí zahrnovat všechny zdroje a všechny spotřebiče. Cílem je sestavení kompletního bilančního modelu energetického systému, který sestává z bilančních modelů jeho jednotlivých prvků (viz obr. 2.2 v kap 2.1). U rozsáhlejších provozů může být velmi náročné bilanci sestavit, protože zde mohou být přítomny zpětné proudy označované jako *recykl*. Komplikací je zejména více propletených zpětných proudů v rámci jednoho systému [54]. Při výpočtech mohou být pomocí stávající technologická schémata s definovanými průtoky a tlaky všech proudů. Kromě všech aparátů jsou v technologickém schématu naznačeny i nejdůležitější prvky systému MaR a lze z něho zjistit, které veličiny jsou měřeny. Možnost přizpůsobení analytického bilančního modelu reálnému provozovanému systému je závislá na úrovni sběru dat, především na přítomnosti podružných měřidel u jednotlivých spotřebičů. Pokud není podružných měřidel dostatek, je nutné postupovat analyticky. Výsledný bilanční model systému (úroveň 3 obr. 3.5) je obvykle kombinací analytických a experimentálních modelů jednotlivých prvků systému.



Obr. 3.6 Bilanční model sušiče využívaného v průmyslových prádelnách [42]

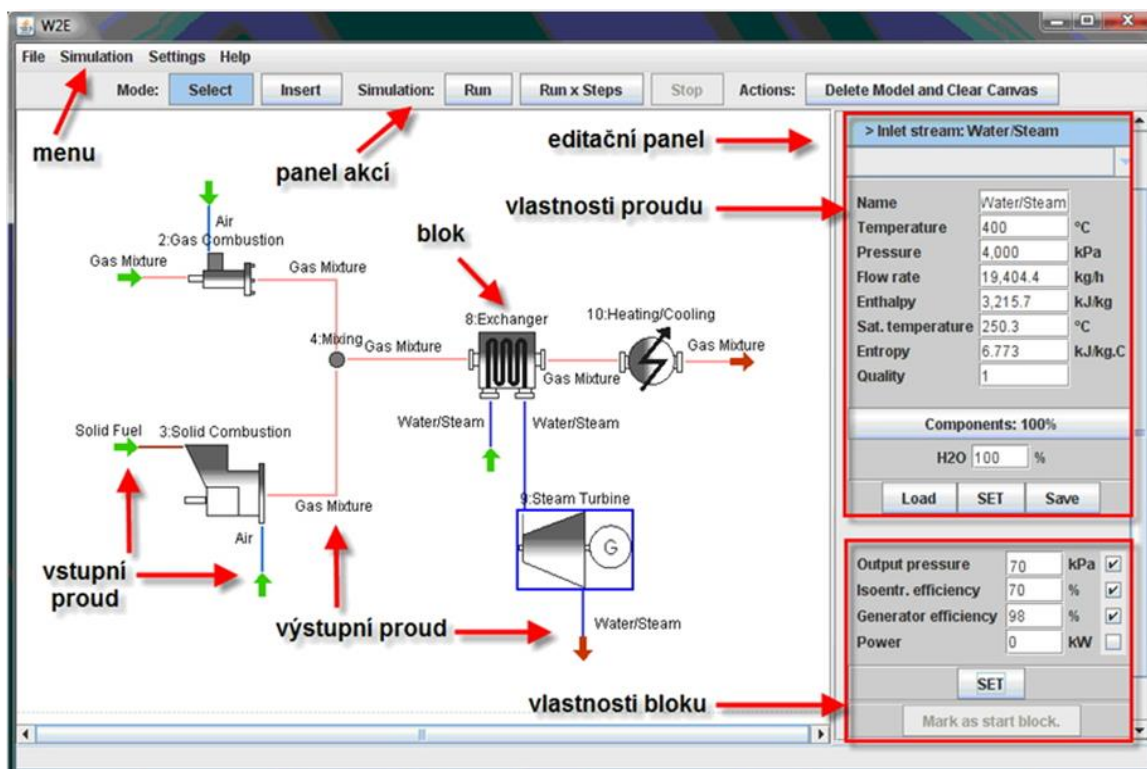
Při sestavování bilančních modelů je možné využít komerční simulační softwarové nástroje nebo vlastní (in-house) výpočtové nástroje. Mezi nejznámější komerční simulační nástroje lze zařadit:

- *PRO/II*
- *ASPEN PLUS*
- *Aspen HYSYS*
- *CHEMCAD*
- *EnviPro Designer*
- *SuperPro Designer*

Tyto programy se využívají jako univerzální simulační systémy, pomocí nichž lze namodelovat téměř jakýkoli proces. Obsahují velké množství uzlů (aparátů) a rozsáhlé databáze chemických složek s příslušnými termofyzikálními vlastnostmi. Jejich univerzálnost s sebou na druhou stranu přináší zvýšenou uživatelskou náročnost, která

předpokládá delší odborné zaškolení uživatele. Většina funkcí těchto univerzálních programů zůstává při řešení projektů energetických úspor nevyužita.

Cena těchto softwarových systémů je natolik vysoká, že jejich využití musí být opodstatněno rozsahem zakázky. Od výzkumného pracovníka se samozřejmě očekává korektní nakládání s akademickými licencemi těchto softwarových systémů. Pro zjednodušení tvorby bilančních modelů konkrétního energetického systému mohou být vhodnější vlastní (in-house) softwarové nástroje, které jsou více zacíleny a mohou zahrnovat uživatelské funkce, které v komerčních systémech chybí. Jedním z těchto *in-house* softwarových nástrojů je *W2E* (*Waste-to-Energy*). Simulační program *W2E* byl původně zaměřen na oblast energetického využití odpadů a biomasy [55]. Systém je však otevřený a průběžně je rozšiřován o další modely [56]. Vzhled výsledného produktu je patrný z obr. 3.7. Program *W2E* byl využit v několika případech, např. při modelování větších prádelenských provozů (viz obr. 2.2 v kap 2.1) nebo v případě technologické jednotky pro spalování biomasy (obr. 4.4 v kap. 4.1.1). Jeho přínos spočívá v možnosti popsat standardní provozní stavy technologie a získat ustálené hodnoty jednotlivých sledovaných veličin. Statické modely získané pomocí *W2E* lze implementovat v prostředí *MATLAB/Simulink* při sestavování dynamických modelů. Software *MATLAB/Simulink* je blíže představen v následující kapitole.



Obr. 3.7 Vzhled uživatelského rozhraní SW *W2E* a simulační model vybraného systému [56]

3.2.3 POPIS DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ SYSTÉMŮ PRO ÚČELY ŘÍZENÍ

U jednotlivých projektů energetických úspor je zásadní otázkou, zda postačuje využití výhradně statického popisu energetického systému nebo je žádoucí definovat také jeho dynamické vlastnosti. Obvyklou motivací pro tvorbu dynamických modelů je zvýšení kvality regulace. Pro dynamický popis systému lze důrazně doporučit lineární modely. Matematická teorie spojená s určováním, parametrizací a využitím lineárních modelů je ve

srovnání s nelineárními výrazně jednodušší. Pro lineární popis dynamického chování systémů se používá tzv. *přenosová funkce*. Přenosová funkce (nebo pouze *přenos*) $G(s)$ slouží pro vnější popis systému, tedy pro matematický popis vztahu mezi výstupní a vstupní veličinou [57]. Konkrétně je definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny $Y(s)$ k Laplaceovu obrazu vstupní veličiny $U(s)$ při nulových počátečních podmínkách:

$$G(s) = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)}, \quad (2)$$

Jakýkoliv popis reálného systému ve formě lineární přenosové funkce příslušného řádu je vždy určitým zjednodušením (aproximací) předpokládané závislosti. Pro jednodušší systémy je možné použít proporcionalní přenos prvního řádu s dopravním zpožděním T_d :

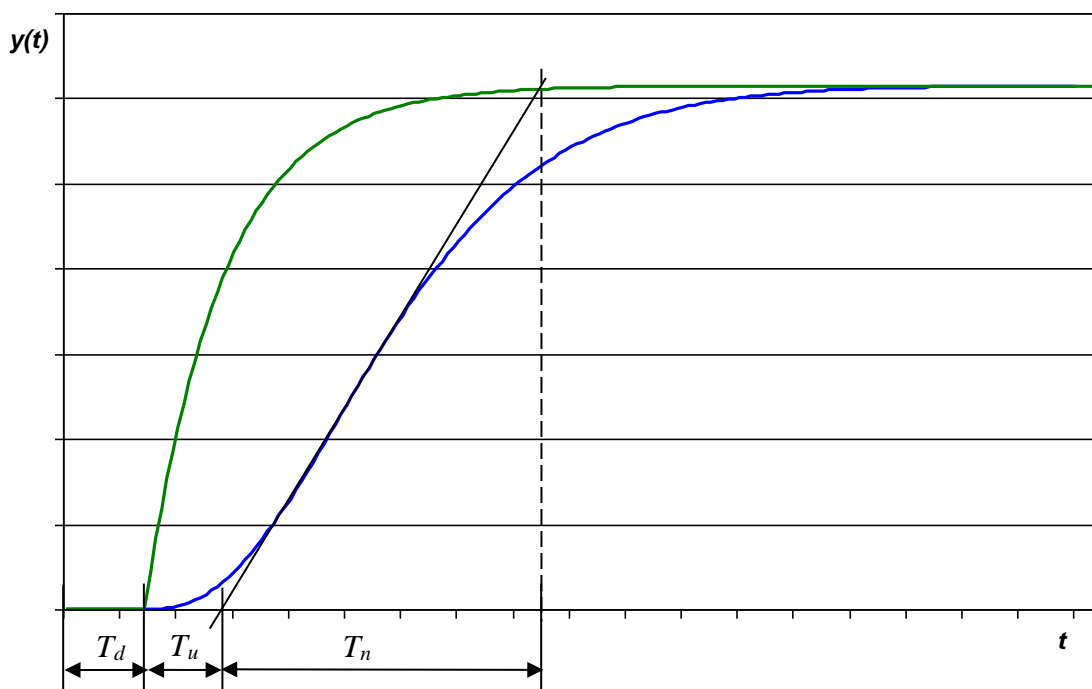
$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot e^{-T_d s}, \quad (3)$$

Takto definovaný přenos regulované soustavy poskytuje jasnou informaci o směru a charakteru odezvy regulované veličiny $y(t)$ na změnu akční veličiny $u(t)$ (viz obr. 3.8, zelená charakteristika), včetně délky dopravního zpoždění T_d . Vyčíslení tří základních parametrů, které ve vztahu (3) vystupují – dopravního zpoždění T_d , zesílení K a časové konstanty T – je v mnoha případech vhodné provést „ručně“, na základě zaznamenaných průběhů přechodových charakteristik.

Přechodová charakteristika je odezva výstupní veličiny sledovaného systému na jednotkový skok přivedený na jeho vstup. Průběh přechodového děje však bývá u velké části reálných soustav složitější (viz modrá charakteristika na obr. 3.8) a pro jeho popis je třeba využít přenosových funkcí vyšších řádů, s větším počtem časových konstant ($T_1, T_2, T_3 \dots$):

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1) \dots} \cdot e^{-T_d s}, \quad (4)$$

Analýza přechodové charakteristiky je základní postup používaný pro parametrizaci přenosu v praxi. Jedná se o deterministickou metodu, vycházející z analytického rozboru odezvy proporcionalních přenosových členů [51]. V případech, kdy má přechodová charakteristika nekmitavý (aperiodický) průběh, je řád setrvačnosti soustavy možné určit z poměru doby průtahu T_u a doby náběhu T_n . Tyto hodnoty lze odečíst z přechodových charakteristik soustav vyššího řádu (viz obr. 3.8, modrá křivka). Konstanta soustavy k je ustálená hodnota přechodové charakteristiky (současně určuje zesílení K soustavy).



Obr. 3.8 Základní parametry přechodové charakteristiky nekmitavé proporcionální soustavy vyššího řádu (modrá křivka) a ukázka přechodové charakteristiky soustavy prvního řádu (zelená křivka) s dopravním zpožděním T_d

Postupů pro analýzu (aproximaci) přechodových charakteristik existuje větší množství. Nejdůležitější postupy často odkazované v odborné literatuře jsou uvedené v [58] a [59]. Jednotlivé postupy se liší podle vlastností přechodové charakteristiky (aperiodický či kmitavý průběh) a řádu soustavy, kterým je možné charakteristiku aproximovat. Jejich praktické aplikace jsou popsány v literatuře [51].

Nejvyužívanějším prostředkem pro simulaci dynamického chování systémů je *MATLAB* se simulační nadstavbou *Simulink* [60]. Pro parametrizaci modelů tento software používá metodu nejmenších čtverců [61] implementovanou v tzv. *System Identification Toolboxu*. *Simulink* umožňuje sestavení kompletního regulačního obvodu sestávajícího z regulátoru a regulované soustavy. Velmi efektivně je možné provádět simulaci různých parametrů regulátoru a různých typů jeho zapojení.

3.2.4 VÝPOČTOVÉ NÁSTROJE PRO STATISTIKU A OPTIMALIZACI

Při vyhodnocování většího množství dat jsou velkou pomocí vhodné softwarové nástroje pro statistiku. Základním nástrojem pro tyto účely je tabulkový editor *MS Excel*. Kromě tvorby tabulek a grafů umožňuje také pokročilou analýzu dat pomocí kontingenčních tabulek a základní statistické výpočty. Sestavování vlastních algoritmů je v *MS Excel* možné díky programovacímu jazyku *VBA*. Pro základní popis většiny energetických systémů program *Excel* plně postačuje a díky své rozšířenosti je výhodný při sdílení dat mezi více řešiteli. Speciální statistické výpočty včetně plánování experimentů je možné provádět v *SW Statistica*. Pokud se do energetické efektivity promítá více faktorů, které jsou ve vzájemné interakci, bývá žádoucí hledat jejich správné nastavení pomocí vhodných optimalizačních algoritmů (např. metodou Monte Carlo). Největší využití nachází matematická optimalizace při ekonomickém hodnocení úsporných opatření. Pro realizaci rozsáhlejších optimalizačních výpočtů lze využít *SW GAMS (General Algebraic Modeling System)*.

3.2.5 FORMULACE ZADÁNÍ A PŘIJATÁ ZJEDNODUŠENÍ

Pro volbu úrovně matematického modelování je rozhodující rozsah díla definovaný zadáním. Výchozím podkladem při formulaci zadání je poptávka ze strany provozovatele energetického systému. V mnoha případech je ovšem poptávka příliš obecná a výzkumný pracovník by měl být zadavateli při formulaci zadání oporou. Klíčem k určení míry využití matematického modelování bývá objem dostupných finančních prostředků. Z rozsahu díla se odvíjí i míra zjednodušování problému.

Snaha o matematický popis reálného systému je vždy do určité míry zjednodušující a modely energetických systémů nejsou v tomto ohledu výjimkou. Zjednodušování přispívá ke snížení složitosti analýz, výpočtů i návrhů. Během *úvodní analýzy* a *Etapy I* (viz metodika na obr. 3.1), jejichž cílem je především globální popis fungování systému, bývá míra zjednodušování výrazná. Analýza dat pracuje především s průměrnými hodnotami spotřeb a účinností za delší období. Nezohledňuje konkrétní provozní stavy technologií ani veškeré faktory ovlivňující jejich účinnost a spotřebu. Zanedbány jsou například tepelné ztráty v distribuční soustavě, tepelné zisky ve vytápěných prostorách apod. Ani během hlubší analýzy v *Etapě II* není možné zjednodušování eliminovat. Klíčové je, aby model popisoval ty závislosti, které jsou rozhodující z pohledu záměru projektu. Mezi typická zjednodušení při tvorbě matematických modelů patří zejména:

- využití provozních dat s delší periodou archivace (např. hodinové průměry),
- použití lineární aproximace nelineárních závislostí pomocí přenosové funkce,
- využití katalogových hodnot nebo odhadů místo reálně změřených veličin,
- zanedbání chyb měřidel nebo použití patního měřidla pro měření malých odběrů,
- tvorba závislostí z nízkého počtu neměřených intervalů,
- vynechání některých (méně důležitých) parametrů v ekonomickém modelu,

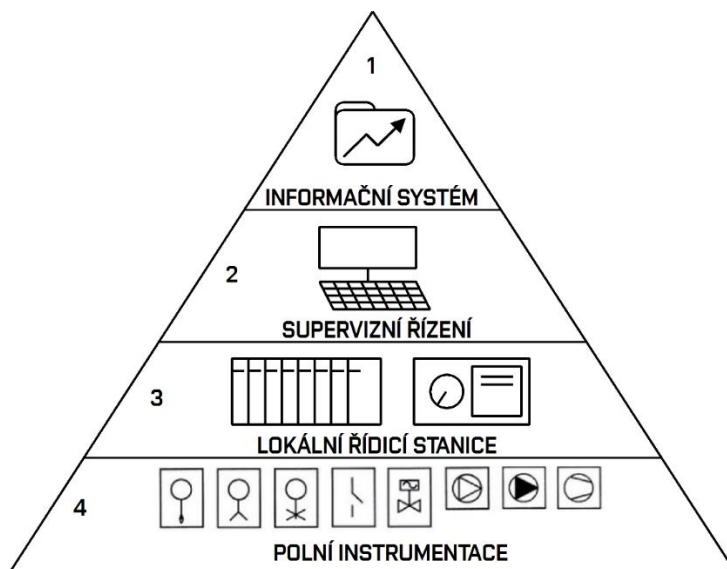
Vytvořený model je potřeba vždy ověřit na základě provozních dat a vymežit jeho použitelnost. Model energetického zdroje může například poskytnout dostatečně přesné informace pro ekonomické hodnocení jeho provozu, ale není použitelný pro jeho regulaci, protože nepopisuje přechodové děje (např. zvyšování a snižování výkonu). Model určený pro regulaci zase není možné použít pro stanovování obsahu škodlivých složek ve spalínách, protože nezahrnuje matematický popis spalování. Typické je, že model popisuje pouze nejčastější provozní konfigurace a obvyklé výkony. Takový model pro hodnocení hospodárnosti obvykle postačuje, protože pokrývá většinu provozních stavů technologie.

3.3 Systémy řízení procesů

Hospodárný provoz energetického systému vychází z jeho kvalitního řízení. Technologický vývoj energetických systémů probíhá v posledních desítkách let především díky pokroku v oblasti automatického řízení [35]. Technicky je řízení energetických systémů zabezpečeno systémem měření a regulace. Systém MaR umožňuje soubor zdrojů a spotřebičů provozovat jako komplexní celek v souladu s aktuálními energetickými potřebami. Nezanedbatelný význam má i pro bezpečnost a spolehlivost provozu.

Rozsah a technická vyspělost systému MaR mají obvykle přímou vazbu na výkon a stáří energetického systému. V průmyslu i ve větších budovách se používá distribuovaných řídicích systémů s hierarchickou (pyramidovou) strukturou - viz obr. 3.9. Nejnovější vývojové trendy upřednostňují síťová uspořádání řídicího systému s distribuovanými kompetencemi, což je možné díky zvyšujícím se komunikačním možnostem regulační techniky. V průmyslové praxi jsou však zatím síťová uspořádání využívána výjimečně.

Jednotliví výrobci automatizace navrhují svoje vlastní modely a systémy řízení, které jsou přizpůsobeny jejich zaměření. Úroveň systému vychází z objemu finančních prostředků, které jsou pro oblast MaR vyhrazeny. Kompletní hierarchie řízení zobrazená na obr. 3.9 je využívána především ve velkých podnicích a komplexech budov.



Obr. 3.9 Hierarchické uspořádání řídicích systémů ve čtyřech úrovních

První a nejvyšší úroveň pyramidy řízení je **podnikový informační systém** zahrnující strategické plánování a řízení zdrojů podniku. Anglické označení je *Enterprise Resource Planning* (ERP). Obvykle se jedná o balík aplikací, který umožňuje management všech zdrojů podniku, zejména:

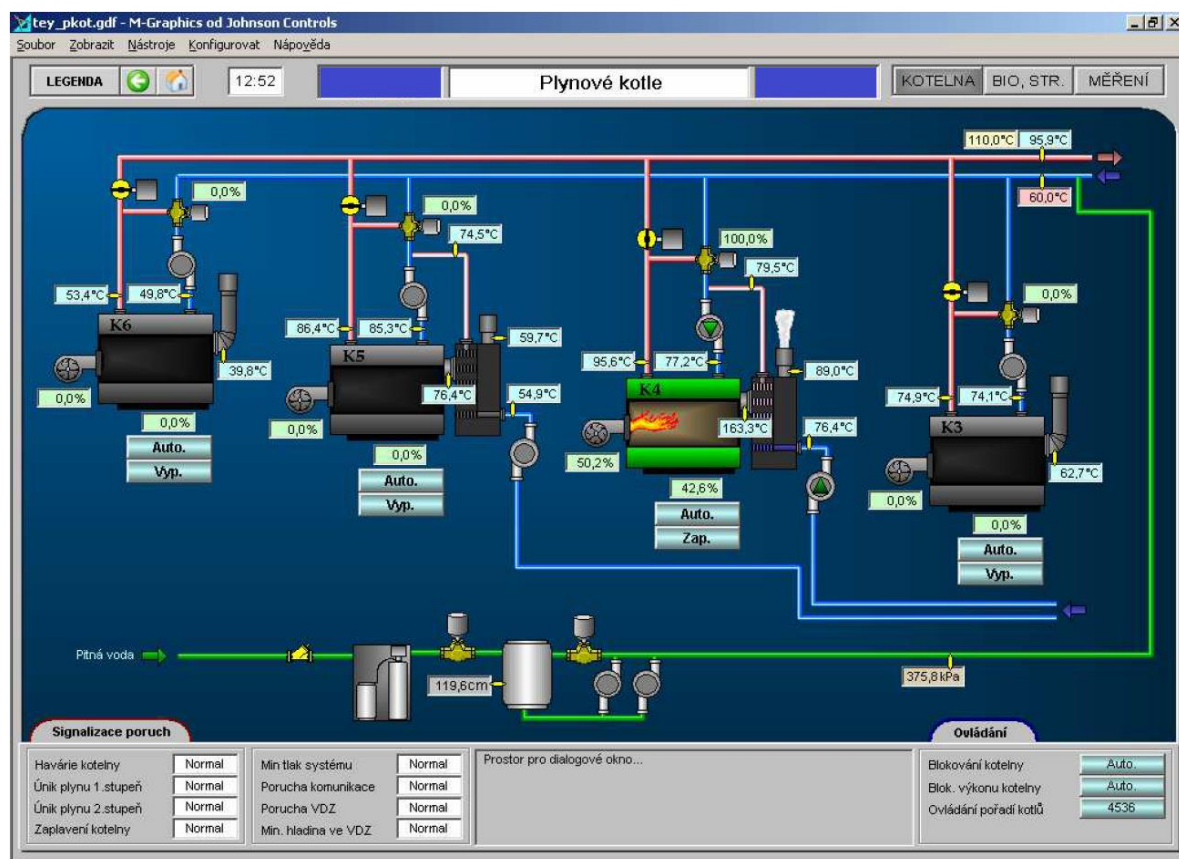
- Personalistiky a řízení lidských zdrojů (*Human Resources Management*)
- Plánování (*Planning*)
- Logistiky a dopravy materiálu
- Finančního řízení a ekonomiky podniku

V rámci ERP probíhá také manažerské řízení energetických systémů. Díky přehledu o množství spotřebované energie a souvisejících nákladech je možné strategicky plánovat úsporná opatření a předvídat jejich dopady ve všech výše uvedených oblastech. Řízení na úrovni ERP má dlouhodobý charakter a ke své funkci potřebuje průběžně archivovaná a věrohodná provozní data. ERP v komunální sféře může mít pokročilou podobu systému pro správu budov (tzv. *Facility managementu*), který kromě energetického systému zahrnuje také správu všech ostatních zařízení budov včetně požárních a bezpečnostních systémů, správu pronájmů, údržbu, úklid, apod.

Archivace dat potřebných pro úroveň ERP je zajištěna systémem **supervizního řízení a sběru dat** (*Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA*). Na této druhé úrovni jsou energetické systémy, objekty a procesy sledovány a řízeny v reálném čase. Smyslem SCADA systému je zpřístupnit přehledně a centralizovaně skutečné údaje o technologickém procesu a zajištit vyšší řídicí algoritmy. Mezi ně patří zadání nového požadovaného provozního režimu jednotlivých regulovaných soustav (např. letního nebo zimního provozu), zásahy v důsledku mimořádných nepředvídatelných událostí, manuální ovládání akčních členů, přestavování parametrů regulačních obvodů, řízení sekvenčních procesů

apod. Součástí SCADA systému je také vizualizace všech důležitých prvků systému včetně alarmových stavů. Ukázka vizualizace je uvedena na obr. 3.10.

SCADA systém je obvykle nainstalován na operátorském PC, které může být vybaveno dalšími softwarovými nástroji. Pro řízení energetických systémů se používají specializované softwarové systémy, jejichž funkci můžeme označit jako *Energetický dispečink*. Energetický dispečink by měl být automatizovanou implementací energetického managementu na míru danému podniku. Zahrnuje automatickou analýzu archivovaných dat a výpočet výkonnostních a finančních parametrů energetického systému, optimalizaci a řízení odběru elektrické energie a plynu a řízení servisních zásahů. Práce s ekonomickými parametry tvoří přesah do ERP úrovně řízení. Hlavními nástroji pro zvyšování hospodárnosti energetických systémů je nastavení tzv. **čtvrt hodinového maxima u elektrické energie a denního maxima u zemního plynu**. Jedná se o smluvní limity s dodavatelem těchto komodit, které mají významný dopad na jejich celkovou cenu. Regulace zajišťuje, aby nebyl tento limit překročen. Snižuje odběr některých spotřebičů nebo je odstavuje podle předem definované strategie.



Obr. 3.10 Ukázka vizualizace plynové kotleny ve SCADA systému Metasys [45]

Na další, třetí úrovni (obr. 3.9) jsou **lokální řídicí stanice**, které jsou obvykle tvořeny jedním nebo více programovatelnými regulátory PLC (*Programmable Logic Controller*). Ty mohou být podle velikosti energetického systému kompaktní nebo modulární. Jedná se o malé průmyslové počítače zajišťující přímé řízení konkrétního technologického celku, např. jednoho kotle nebo předávací stanice tepla. Komunikace mezi PLC a nadřazenou SCADA úrovní probíhá s využitím průmyslového ethernetu s rychlostí až 100 Mbit/s. Tyto komunikační možnosti významně zvyšují objem přenášených dat a otevírají cestu

dálkovému řízení zdrojů pomocí internetu. Regulátor zpracovává signály z připojených snímačů a ovládá konkrétní akční členy.

V oblasti řízení energetických systémů se používají dva typy regulace. Základní a často používanou variantou je tzv. **dvoustavovém řízení**, jehož výhodou je jednoduchost. Technicky je realizováno pomocí spínání a vypínání zdrojů podle aktuální potřeby tepla. Významnou nevýhodou mohou být časté starty a vypínání. Těm se však dá předejít rozšířením spínací difference nebo akumulací tepla [62]. Pokročilejší variantou řízení je využití PID (proporcionálně-integračně-derivačního) algoritmu, který lze použít například u kotlů vybavených spojitou regulací hořáku nebo spojitou regulací dodávky paliva. Hovoříme o tzv. *modulovaném provozu*, při němž je výkon zdroje spojitě přizpůsobován skutečnému odběru [63]. Matematicky lze funkci spojitého PID regulátoru popsat následující rovnicí:

$$v = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (5)$$

kde v je výstup z regulátoru, r_0 je proporcionální konstanta (P), $e(t)$ je regulační odchylka, T_I je integrační časová konstanta (I) a T_D je derivační časová konstanta (D).

Společným vstupem všech tří složek regulátoru je tzv. *regulační odchylka*, která vyjadřuje rozdíl mezi žádanou a reálnou hodnotou regulované veličiny. U zdrojů tepla jde typicky o rozdíl mezi žádanou a reálnou teplotou teplé vody. Proporcionální složka určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky, integrační složka určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky a derivační složka určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky.

Čtvrtou úroveň tzv. **polní instrumentace** tvoří snímače a akční členy. Z hlediska efektivity energetických systémů je klíčové měření veličin, které charakterizují účinnost výroby a spotřeby jednotlivých druhů energií. Typickými měřicími prvky jsou měřiče tepla, elektroměry, plynoměry, vodoměry apod. Nejběžnějšími snímači jsou teploměry, tlakoměry, průtokoměry, snímače výšky hladiny apod. Základními akčními prvky jsou ventily, relé a stykače.

V rámci aplikace komplexního přístupu při dosahování úspor je třeba pracovat s technickými prostředky MaR na všech čtyřech úrovních řízení. Někdy je třeba přistoupit i k úpravě nebo rozšíření systému MaR, což může být spojeno s nemalou investiční zátěží. Význam jednotlivých úrovní pro efektivitu energetických systémů je následující:

- 1) **Polní instrumentace** by měla zajišťovat přesné měření všech důležitých veličin a možnost ovlivňovat provozní parametry energetického systému, zejména v oblasti spotřeb. Hlavní dovedností očekávanou od výzkumného pracovníka je výběr vhodné měřicí a regulační techniky a její správná instalace.
- 2) **Lokální řídicí stanice** musí interpretovat analogové i digitální výstupy ze snímačů a ve srozumitelné podobě je předávat k dalšímu zpracování. Důležitá je volba komunikačních prostředků a formy dalšího zpracování dat. Lokální regulátor musí také spolehlivě zabezpečovat všechny potřebné řídicí funkce.
- 3) **Supervizní řízení** by mělo zajistit centralizovanou archivaci dat s dostatečnou frekvencí. Výpočet hlavních parametrů hospodárnosti a přehled o jejich dlouhodobém vývoji umožňují výběr vhodného provozního režimu jednotlivých regulovaných soustav či zásah v důsledku mimořádných nepředvídatelných událostí. Nejvyšším stupněm využití provozních dat je tvorba matematických

modelů jednotlivých prvků systému a následně i celku. Kvalitní model energetického systému se může stát součástí řídicího algoritmu. Výsledkem může být i možnost optimalizace provou v reálném čase.

- 4) **Informační systém podniku** by měl umožňovat průběžné hodnocení hospodárnosti systému jako celku a strategické plánování kroků k jejímu zvyšování.

Jednotlivé úrovně řízení jsou vzájemně provázané. Ve směru od procesní k ERP úrovni jde o zajištění dostatečného množství věrohodných dat. V opačném směru jde o řízení energetického systému tak, aby byl jeho provoz co nejhospodárnější.

Regulace zdrojů tepla v průmyslové a komunální sféře

Konkrétnější představení problematiky řízení procesů bude provedeno u zdrojů tepla, které jsou základní součástí energetických systémů v průmyslové i komunální sféře. Výklad se zaměří především na **spojité zpětnovazební řízení s využitím PID algoritmu** definovaného rovnicí (5). Toto řízení se používá u většiny průmyslových zdrojů tepla, zejm. u kotlů na zemní plyn nebo topný olej. U kotlů spalujících pevná paliva (typicky uhlí nebo biomasu) se spojitěho řízení dosahuje proměnnou rychlostí dodávky paliva [64]. Elektrokotle a tepelná čerpadla se řídí převážně dvoustavově. Nejjednodušší technickou realizací dvoustavového řízení je termostat. Pokročilejší variantou je tzv. *dvoustupňová regulace*, která umožňuje nastavení dvou různých výkonů, čímž se účinně prodlužuje doba chodu kotle.

Variant zapojení zpětnovazebního regulačního obvodu se u zdrojů tepla vyskytuje celá řada. Základní funkce systému ale zůstává vždy stejná. Musí zajišťovat regulaci topného výkonu zdroje (P_t). V případě, že je nosným médiem voda, může být pro definici topného výkonu použita následující modifikace kalorimetrické rovnice:

$$P_t = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T}{3600} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot c \cdot (T_{výst} - T_{vrat})}{3600}, \quad (6)$$

<i>kde</i>	P_t	topný výkon zdroje [W]
	\dot{m}	hmotnostní průtok topné vody [kg.h ⁻¹]
	\dot{V}	objemový průtok topné vody [m ³ .h ⁻¹]
	ΔT	rozdíl teplot, tzv. <i>teplotní spád</i> [K]
	$T_{výst}$	teplota výstupu topné vody z kotle [K]
	T_{vrat}	teplota vratná do kotle [K]
	c	měrná tepelná kapacita topné vody [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
	ρ	měrná hmotnost topné vody [kg.m ³]

Parametry vody je možné pro účely řízení považovat za konstantní a hmotnostní průtok se z technologických důvodů obvykle také nemění. Regulovanou veličinou je tedy **teplota vody**, která vystupuje ze zdroje tepla.

Složitější regulaci vyžadují parní kotle. Jmenovitý výkon parního kotle [kg/s], [t/h] je definován jako výkon, který kotel musí trvale dodávat při dodržení jmenovitých hodnot

základních parametrů, kterými jsou tlak přehřáté páry, teplota přehřáté páry, teplota přihřáté páry a teplota napájecí vody (více viz ČSN 07 0010). Pro stanovení teoretického provozního výkonu kotle je třeba rovnici (6) upravit do následujícího tvaru:

$$P = \frac{\dot{m}_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv})}{3600}, \quad (7)$$

kde	P	provozní výkon parního kotle [W]
	\dot{m}_{pp}	průtok přehřáté páry na výstupu z kotle [kg.h ⁻¹]
	i_{pp}	entalpie přehřáté páry [J.h ⁻¹]
	i_{nv}	entalpie napájecí vody [J.h ⁻¹]

Výstupem kotle je přehřátá pára a hlavní regulovanou veličinou je obvykle její tlak p . Tlak se ve vztahu přímo nevyskytuje, ale má společně s teplotou přímý vliv na entalpii přehřáté páry.

Parní kotel je poměrně složitou regulovanou soustavou, u které se současně reguluje několik veličin. Hovoříme o tzv. *víceparametrové regulaci*. Kotel má obvykle pět regulačních obvodů, které zajišťují regulaci:

- výkonu kotle,
- spalování,
- tahu,
- napájení,
- teploty páry.

Pokud se omezíme na parní kotle spalující plynná a kapalná paliva, pak regulace výkonu probíhá proměnným výkonem hořáku. Hořák má definovaný regulační rozsah (většinou 1:2,5 až 1:5) v závislosti na druhu paliva, způsobu rozprašování a poměru typové velikosti hořáku k typové velikosti kotle. Při regulaci spalování se většinou používá mechanicky nebo elektronicky řízený poměr mezi množstvím paliva a spalovacího vzduchu bez korekce přebytku vzduchu. Pokud je zařízení vybaveno kyslíkovou sondou, je možné v mírných mezích kontinuálně korigovat obsah zbytkového kyslíku ve spalínách a tím i komínovou ztrátu. Regulace tahu je zajištěna udržováním konstantního podtlaku ve spalovacím prostoru. Regulace napájení parního kotle probíhá na žádanou hladinu napájecí vody. Regulační obvody parních kotlů se vyznačují tím, že nejsou autonomní (vzájemně nezávislé). Zásah akčního orgánu jednoho obvodu se obvykle projeví u ostatních obvodů jako porucha, která vede k odchylce jejich regulovaných veličin, takže musí zasáhnout i akční členy těchto obvodů [65].

Nezákladnějším způsobem spojitého zpětnovazebního řízení teplovodních a horkovodních kotlů je **regulace na konstantní hodnotu teploty výstupní topné vody** [64]. Regulace výkonu zdroje je v tomto případě závislá výhradně na výstupní teplotě topné vody. Předpokladem je konstantní průtok topné vody v systému. Poruchová veličina ve formě odběru tepla se projeví nejprve poklesem teploty vratné topné vody ze systému a postupně i poklesem teploty výstupní vody. Na tuto změnu pak reaguje regulátor zvýšením výkonu. Není třeba zajišťovat kontinuální měření odběru tepla, ani řídit průtok topné vody pomocí čerpadla s frekvenčním měničem. Nevýhodou je ovšem prodloužení doby reakce na změnu zatížení, které může vést až k nestabilitě regulace. Tato regulace se obvykle používá i u parních kotlů, kde se reguluje na konstantní hodnotu tlaku páry. Parní kotel využívá své akumulární schopnosti a reaguje až na snížení tlaku páry způsobené odběrem.

Vyšší úrovní je **regulace dle odběru spotřebitele**, kterým může být jedna konkrétní technologie nebo celý rozsáhlý proces. Jako měřítko regulace výkonu kotle je v tomto případě použit měřený odběr tepla spotřebitelem. Tento způsob se také označuje jako *vlečná regulace* [57]. Žádaný výkon zdroje je dosahován prostřednictvím teplotního spádu topné vody, resp. jejím průtokem.

Pro provozy, kde zdroj tepla zajišťuje i vytápění, mohou být uvedené postupy kombinovány s **ekvitermní regulací teploty** v akumulární nádrži na topnou vodu. Při ekvitermní regulaci se řídí teplota topné vody v závislosti na venkovní teplotě. Reguluje se podle tzv. *ekvitermních křivek*, které udávají závislost mezi venkovní teplotou a teplotou topné vody potřebnou pro dosažení požadované teploty ve vytápěných prostorách. Ekvitermní křivka je nastavena podle projektovaných, vypočtených nebo změřených tepelných ztrát objektu. Při slunečném počasí (resp. silném větru či mrazu) se může křivka automaticky posouvat o příslušný počet stupňů směrem dolů (resp. nahoru). Ekvitermní regulace může být korigována teplotou, která je měřena ve vytápěném prostoru. Pak hovoříme o **ekvitermní regulaci se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu**. Regulátor při ní postihuje i poruchovou veličinu, kterou je neočekávaná změna teploty ve vytápěném prostoru (např. díky větrání, tepelným ziskům od spotřebičů apod.). Pokud je v objektu více vytápěných prostor, jsou podle referenční teploty ve vybrané místnosti vytápěny i všechny ostatní. Nevýhodou je, že regulační odchylka, která vznikne v této tzv. *referenční místnosti*, vyvolá změnu ve vytápění celého objektu. Tento způsob regulace je výhodný v kombinaci s TRV na otopných tělesech ve všech vytápěných prostorách. V referenční místnosti by však TRV být neměly, protože by se oba systémy regulace ovlivňovaly. Popsaný způsob regulace je nejzákladnější variantou **individuálního řízení vytápění jednotlivých místností v objektu** (IRC, *Individual Room Control*). V pokročilejší variantě je v každé řízené místnosti umístěn samostatný řídicí termostat, který na základě porovnání s nastavenou požadovanou teplotou zapíná nebo vypíná příslušné topidlo. Řízení výkonu topidel probíhá podle typu topidla buď pomocí TRV metodou pulzně šířkové modulace (PWM, [66]) nebo s pevnou hysterezí např. u elektrických sálavých infrapanelů. Metoda PWM se používá i u podlahového vytápění.

Hlavní význam IRC regulace spočívá v tom, že reaguje na přídatné zdroje tepla např. tepelné zisky osluněním nebo ze spotřebičů. Eliminují se také povětrnostní a klimatické vlivy působící na objekt z různých světových stran. Dalším přínosem je nastavitelnost časových programů pro jednotlivé místnosti, kdy je vytápěno na komfortní teplotu pouze tehdy, když je to žádoucí. Zavedením systému IRC se v projektech EPC dosahuje výrazného zvýšení energetické efektivity vytápění.

Výše popsaným ekvitermním řízením a řízením ohřevu teplé vody je zformulován požadavek na množství dodávaného tepla. Výkon zdroje tepla je podle tohoto požadavku regulován různým způsobem. V praxi převládají zdroje tepla s akumulací. Typicky jde o kotel s akumulární nádrží. Výkon je řízen tak, aby bylo dosaženo požadované teploty v této akumulární nádrži. Vstupní teplota vody do otopné soustavy je regulována samostatně, typicky pomocí směšovacího ventilu se servopohonem (obr. 1.7). Ohřev teplé vody obvykle tvoří samostatný okruh [63].

Při zajištění tepla pro větší objekty se používá většího počtu zdrojů nebo dokonce kombinace více druhů zdrojů. Důležitou roli hraje zabezpečení dostatečné rezervy pro případ selhání některého zdroje. Častá bývá i 100% výkonová záloha s využitím náhradního zdroje. Složitější provozní schémata platí pro energetické systémy, které využívají více zdrojů různých druhů. Hovoříme o tzv. **bivalentních zdrojích**, jejichž reprezentantem může být kotelná s kombinací biomasového kotle a kotlů plynových [45]. V uvedeném případě se jedná o tzv. *paralelně-bivalentní provoz*. Biomasový kotel je v chodu celoročně a když jeho výkon nestačí pro krytí potřeby tepla v chladnějších obdobích, spustí se výroba na plynových kotlích a zdroje na dosažení celkového požadovaného výkonu spolupracují. Příkladem tzv.

alternativně-bivalentního provozu je zdroj s tepelným čerpadlem vzduch-voda jako hlavním zdrojem tepla. Tepelné čerpadlo je v nejchladnějších obdobích otopného období odstaveno a teplo dodává druhý (sekundární) zdroj. Tím může být plynový kotel nebo elektrokotel, který však musí být dimenzován tak, aby pokryl veškeré tepelné ztráty objektu při nejnižších teplotách. Více zdrojů tepla v jednom tepelném hospodářství otevírá cestu k optimalizaci jejich provozu v závislosti na vnějších podmínkách, kterými mohou být venkovní teplota, cena paliva nebo tarifní limity pro odběr paliva. To klade zvýšené nároky na kvalitu technicko-ekonomického posouzení provozu zdroje.

U rozsáhlejších zdrojů tepla zajišťují základní regulaci jednotlivých prvků energetického systému **lokální řídicí stanice** na bázi PLC. Jejich nadřazené řízení včetně optimalizace odběru elektřiny a plynu je pak zajišťováno systémem **SCADA**, který zároveň umožňuje vzdálený monitoring zdroje tepla i celého energetického systému. Postupnou integrací všech spotřebičů může vzniknout **systém komplexního řízení výroby a spotřeby energií**, který je při snižování energetické náročnosti velkých průmyslových provozů neocenitelným nástrojem.

4 PŘÍPADOVÉ STUDIE

Nový komplexní přístup k řešení projektů energetických úspor byl opakovaně aplikován při řešení konkrétních projektů z průmyslové a komunální sféry. Ačkoliv se rozsah využití komplexního přístupu v jednotlivých případech lišil podle zadání projektu, jeho základní rámec definovaný novou metodikou zůstal vždy zachován. Metodika slouží jako koncepční vodítko umožňující okamžitou aplikaci nejnovějších výsledků výzkumu. Přínos nové metodiky byl ověřen při řešení reálných výzkumných projektů, v rámci nichž byla získána potřebná provozní data a zkušenosti pro její další vývoj.

4.1 Průmyslová sféra

Většinu praktických aplikací tvoří výzkumné projekty z průmyslové sféry. Poptávka ze strany průmyslových podniků dokládá velké rezervy v jejich energetické efektivitě. Projekty se týkají převážně tepelných zdrojů a spotřebičů tepla.

4.1.1 VYTÁPĚNÍ VÝROBNÍ HALY S VYUŽITÍM JEDNOTKY NA BIOMASU

Jedna z prvních aplikací komplexního přístupu k řešení energetické efektivity byla spojena s tepelným zdrojem, který od r. 2009 zásobuje teplem výrobní podnik. K základním charakteristikám projektu patří:

- nově instalovaný, unikátní zdroj tepla v podobě progresivní technologické linky,
- zvýšení účinnosti zdroje a snížení koncentrace škodlivých emisí ve spalinách,
- rozsáhlé využití matematického modelování,
- návrh nové koncepce systému řízení.

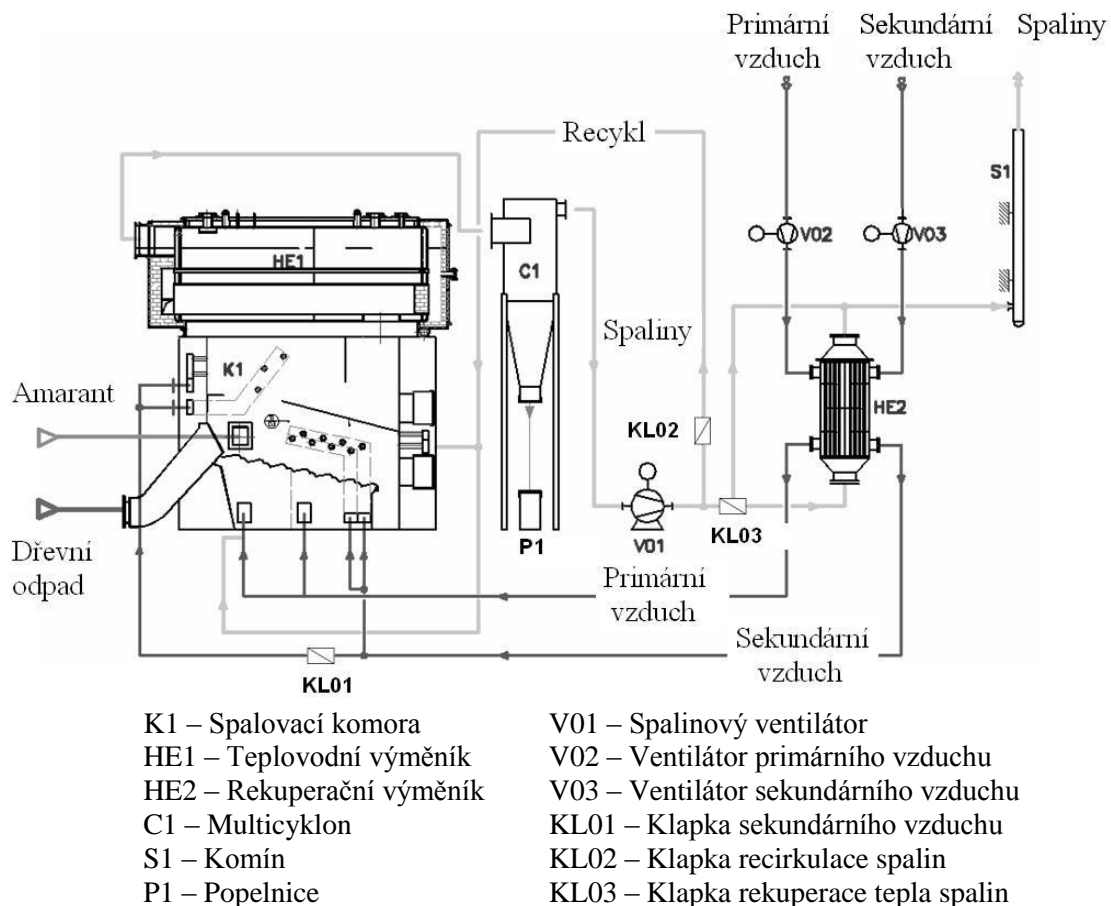
Úvodní analýza a zadání projektu

Zdrojem je teplovodní technologická jednotka o výkonu 1 MW, která spaluje především dřevní štěpku. Jednotka je unikátní díky možnosti spalování různých druhů biomasy a využití nestandardních prvků zvyšujících její účinnost, kterými jsou předehřev primárního i sekundárního spalovacího vzduchu a recirkulaci části spalin zpět do spalovací komory. Technologické uspořádání celého zařízení je znázorněno na obr. 4.1. Vyrobená teplá voda je využívána výhradně k vytápění haly, kde probíhá výroba ocelových konstrukcí a technologických zařízení. Otopný systém zahrnuje také ventilátorové jednotky označované jako *vzduchové clony*, které krátkodobě ohřívají prostor vrat při jejich otevření. Technologická jednotka byla dostupná pro provádění opakovaných měření za účelem analýzy provozu energetického systému.

Regulátor byl uvedení jednotky do provozu intuitivně nastaven technikem MaR. Toto nastavení však bylo daleko od optimálního. Negativními projevy intuitivně nastaveného regulátoru byly zejména příliš dlouhá doba ustálení po změně žádané hodnoty regulované veličiny a zhoršená stabilita regulace při nižších výkonech. Toto nestabilní chování mělo negativní dopad na účinnost zdroje i produkci emisí znečišťujících látek. Dalším předpokládaným rizikem nestabilního provozu bylo snížení životnosti zařízení.

Cílem výzkumu byl návrh inovovaného systému řízení tak, aby mohla být technologická jednotka provozována maximálně hospodárně. Návrh řízení musel zahrnovat

i popsané nadstandardní prvky systému. Výzkum byl publikován v [64], [67] a následující text je shrnutím dosažených výsledků. Publikace [67] je uvedena v plném znění v příloze 5.



Obr. 4.1 Zjednodušené technologické schéma jednotky [67]

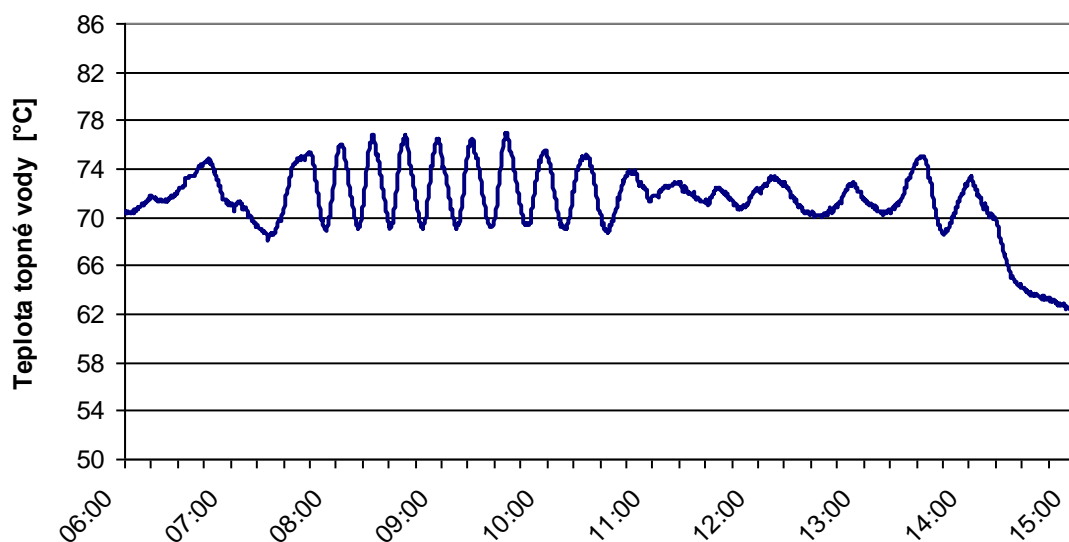
Etapa I: Analýza systému

Klíčové vstupní a výstupní veličiny energetického systému shrnuje tab. 4.1. V tabulce jsou také další veličiny, jejichž znalost byla nutná pro úspěšnou identifikaci jednotky. Informace o měřených veličinách byly získávány ze tří nezávislých měřicích míst (viz sloupec *Zdroj dat*). Prvním záznamovým prostředkem byl *SCADA* systém na operátorském PC. Pro jednorázová měření byl dále využit analyzátor spalin *Infralyt 50*, resp. přenosný analyzátor *Testo T350* (se záznamem dat v notebooku). Pro měření průtoku topné vody byl instalován lopatkový průtokoměr *Data Industrial SDI* a instrumentace pro archivaci jeho průběhu.

Na obr. 4.2 je zaznamenán průběh teploty výstupní topné vody při běžném provozu vyšetřované jednotky. Jedná se o pracovní den (1. 2. 2009), kdy v době od 7:00 do 14:00 probíhala regulace teploty topné vody na konstantní hodnotu 75 °C. Díky přibližně stálým tepelným ztrátám vytápěné haly není systém zatížen výraznými výkyvy odběru tepla. Přesto se regulátoru nepodařilo teplotu topné vody ustálit. Tento nepříznivý regulační průběh je způsoben zejména problematickou setrvačností biomasových kotlů a dopravním zpožděním dodávky paliva. Akční veličina (průtok paliva a adekvátní množství spalovacího vzduchu) během takto nestabilního regulačního pochodu kolísá mezi svojí maximální a minimální hodnotou. Toto odstavování a najíždění celé technologie (tzv. *cyklování*) výrazně zatěžuje akční členy používané pro regulaci (ventilátory, pohony).

	Označení	Jednotka	Předpokládaný provozní rozsah	Zdroj dat
VSTUPNÍ VELIČINY				
Průtok (množství) paliva	$u_1(t)$	kg/h	150÷350	SCADA
Průtok sekundárního vzduchu	$u_2(t)$	m_N^3/h	1400÷2400	SCADA
Otevření klapky recirkulace spalin	$u_3(t)$	%	0÷100	SCADA
VÝSTUPNÍ VELIČINY				
Teplota výstupní topné vody	$y_1(t)$	°C	70÷90	SCADA
Teplota ve spalovací komoře	$y_2(t)$	°C	max. 950	SCADA
Koncentrace O ₂ ve spalinách	$y_3(t)$	%	5÷15	Analyzátor spalin
DALŠÍ SLEDOVANÉ VELIČINY				
Průtok primárního vzduchu	-	m_N^3/h	700÷1100	SCADA
Průtok recirkulovaných spalin	-	m_N^3/h	0÷800	SCADA
Objemový průtok topné vody	-	m_N^3/h	30÷35	DataLab, SDI
Teplota vratné topné vody do jednotky	-	°C	50÷65	SCADA, Ni 1000
Teplota výstupních spalin z HE2	-	°C	100÷140	SCADA, Ni 1000
Teplota prostoru kotelny	-	°C	5÷25	SCADA, Ni 1000
Podtlak ve spalovací komoře	-	Pa	30÷70	SCADA

Tab. 4.1 Přehled zvolených veličin pro identifikaci regulované soustavy



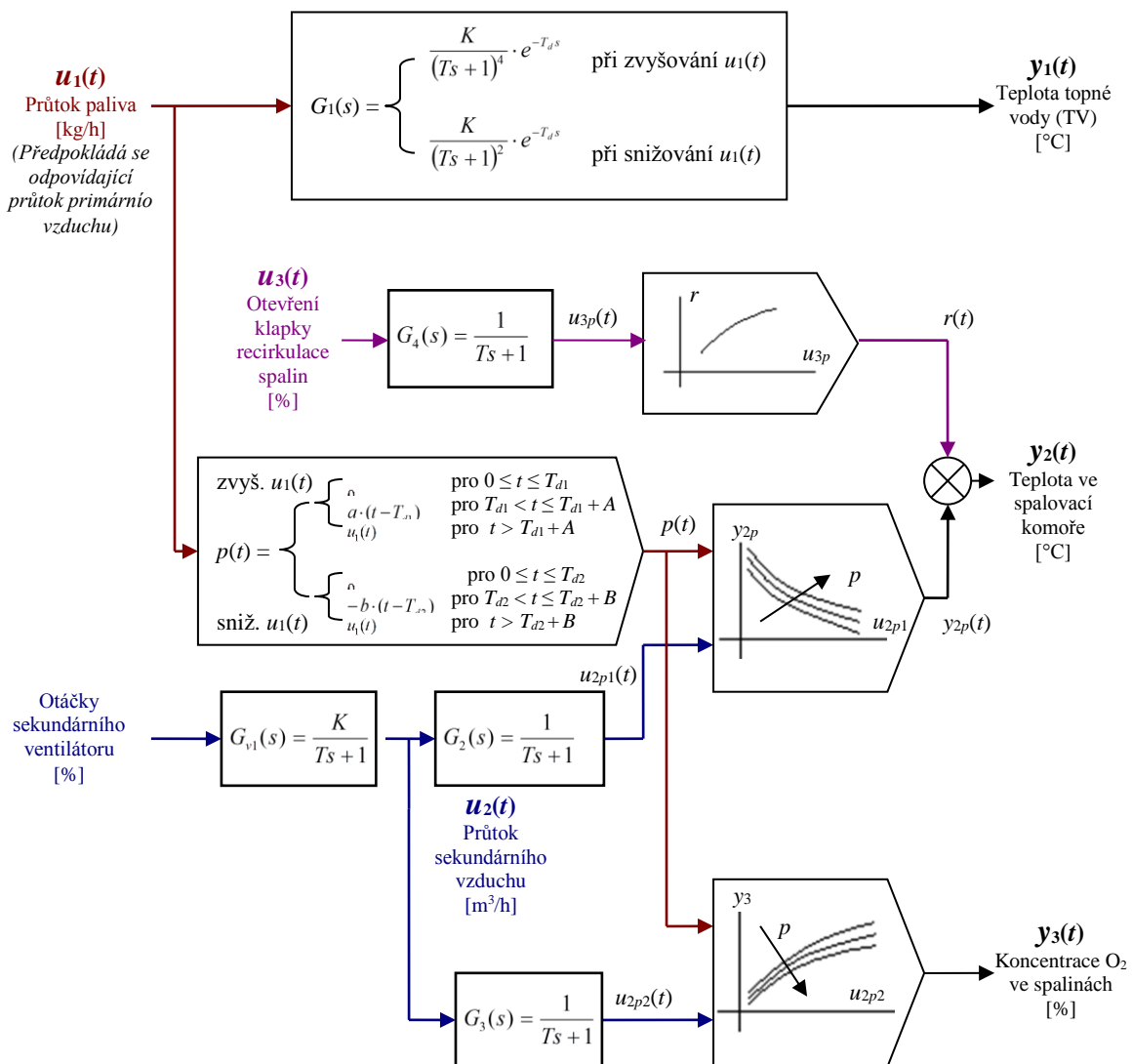
Obr. 4.2 Nežádoucí kolísání výstupní teploty topné vody

Etapa II: Tvorba matematického modelu a návrh nápravných opatření

Základem pro zvýšení hospodárnosti provozu technologické jednotky bylo **vytvoření jejího matematického modelu**. Motivace k vytvoření modelu vycházela z možnosti širšího simulačního testování alternativních nastavení parametrů jednotky a její regulace bez nutnosti přímé vazby na provozované zařízení. Rozsáhlejší testování tohoto zdroje bylo možné jenom v omezené míře, protože ihned po svém zprovoznění musela jednotka spolehlivě plnit svoji funkci.

Výsledný model byl vytvářen pro účely regulace, a proto musel popisovat chování systému v širším pásmu než jen v konkrétním pracovním bodě a jeho nejbližším okolí. Proto bylo nutné sestavit statické charakteristiky všech nelinearit v předpokládaném provozním rozsahu a začlenit je do výsledného modelu. Model jednotky pro spalování biomasy se vyvíjel postupně s přibývajícím zkušenostmi z jejího provozu. Výsledná struktura modelu, která postihuje všechny důležité komponenty a vnitřní vazby, je znázorněna na obr. 4.3.

Přesnějšího a jednoduššího popisu modelované soustavy lze docílit jejím rozložením na dílčí bloky. Dynamické chování jednotky bylo v souladu s tab. 4.1 popsáno pomocí tří vstupních veličin $u(t)$ a tří výstupních veličin $y(t)$. Jejich vazby jsou v obr. 4.3 definovány propojením bloků s lineárním popisem (v obdélnících) a nelineárním popisem (v pětiúhelnících).



Obr. 4.3 Struktura modelu regulované soustavy – technologické jednotky pro spalování biomasy

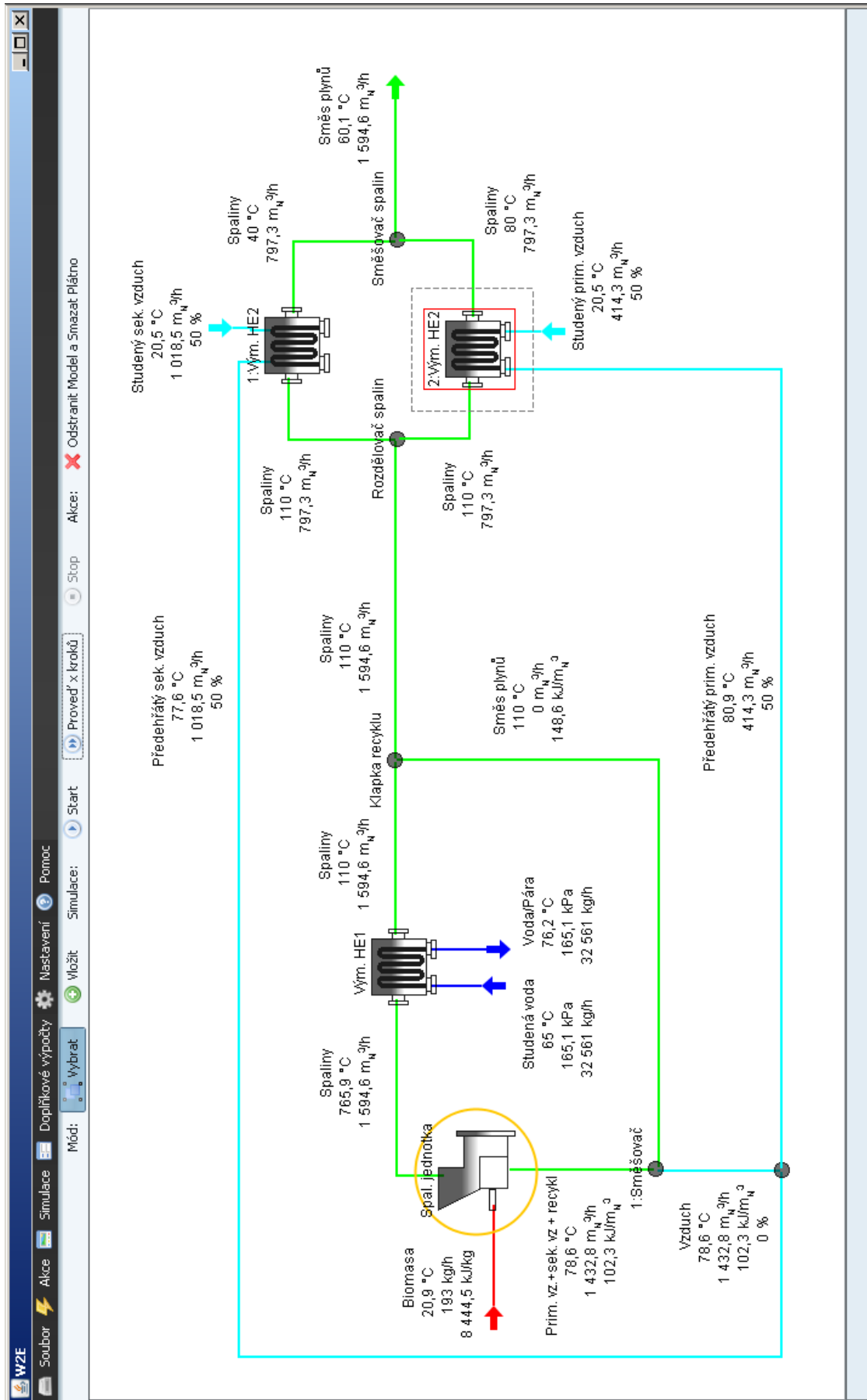
Během provozních zkoušek a následných analýz naměřených dat se ukázalo, že regulovanou soustavu není třeba vyšetřovat jako mnohorozměrový systém. Hlavní regulovaná veličina *teplota výstupní topné vody* $y_1(t)$ je totiž ovlivňována pouze jedinou akční veličinou *průtokem paliva* $u_1(t)$. Parametrizace modelu proběhla pomocí zmíněné analytické a experimentální identifikace. Analytická identifikace měla podobu bilančního modelu vytvořeného v SW *W2E* (více o něm viz kap. 3.2.2) v souladu s technologickým uspořádáním předmětné jednotky (obr. 4.1). Výslednou strukturu bilančního modelu systému ukazuje obr. 4.4. Bilanční model *W2E* byl použit zejména pro získání statického popisu předmětné jednotky. Aby bylo použití bilančního modelu pro tvorbu modelu regulované soustavy přínosem, musel být bilanční model přizpůsoben reálným provozním parametrům (zejména zavedením relevantních tepelných ztrát).

Experimentální identifikace probíhala na základě přechodových charakteristik, které vhodně popisují dynamické vlastnosti systému. Pro možnost přímé *analýzy přechodových charakteristik* byl zvolen skok jednotlivých akčních veličin $u_1(t)$, $u_2(t)$ a $u_3(t)$. Žádané změny je možné u zkoumané technologie provádět přímým zadáním na operátorském PC. Na základě přechodových charakteristik byly sestaveny všechny potřebné přenosové funkce.

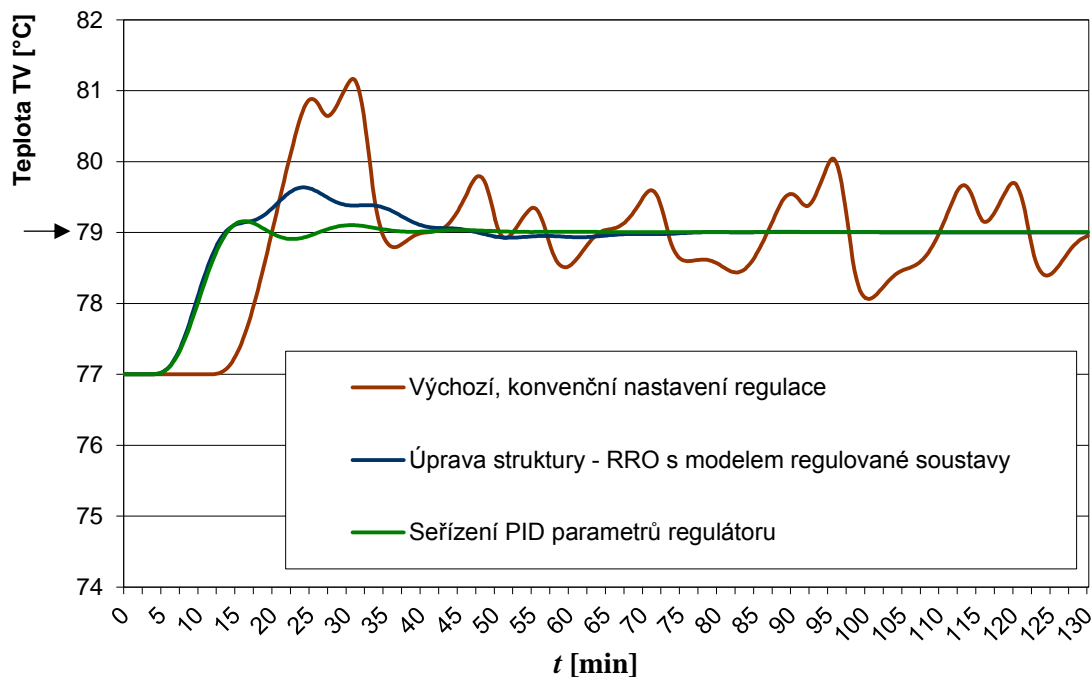
Na základě navržené struktury modelu (obr. 4.3) bylo sestaveno zapojení modelu regulované soustavy (technologické jednotky) v programu *Matlab/Simulink*. Model byl vytvořen pomocí kombinace experimentální a analytické identifikace a jedná se tedy o *grey-box* model (definice viz. kap. 3.2.1). Model zahrnuje vazby mezi všemi důležitými provozními veličinami a také dynamiku systému. Pro stanovení parametrů přenosových funkcí, které slouží pro popis dynamického chování systému, byl využit *System Identification Toolbox*, který je součástí systému *Matlab*.

Výsledkem byl **první model svého druhu zahrnující všechny důležité nelineární charakteristiky systému a popisující chování jednotky v celém jejím provozním rozsahu**. Srovnání potvrdilo, že model popisuje chování jednotky s dostatečnou přesností vzhledem k jejímu dalšímu využití pro inovace systému řízení. Provedené simulace také ukázaly významnou slabinu kotlů na biomasu, kterou je vysoké dopravní zpoždění dodávky paliva.

Díky znalosti regulované soustavy bylo možné při návrhu regulace použít metodu nastavení regulátoru podle přechodové charakteristiky regulované soustavy [57]. Nově navržená regulace byla aplikována na sestavený matematický model jednotky v SW *Simulink*. Schéma celého zapojení včetně modelu regulace je na obr. 4.5. S uzavřeným regulačním obvodem byly následně provedeny simulační testy. Prvotní návrh vycházel z tradiční koncepce zpětnovazebního řízení, která byla aktuálně využita v provozu. Potvrdilo se, že klasický přístup není pro dosažení stabilní regulace dostatečný. Proto byla navržena **nová koncepce řízení se strukturou** tzv. *rozvětveného regulačního obvodu (RRO) s modelem regulované soustavy* [57], díky níž došlo ke stabilizaci regulačního pochodu. Opakované simulace s různým nastavením PID parametrů regulátoru (viz vysvětlení v kap. 3.3) napomohly jeho vynikajícímu seřízení, a tím i k dalšímu výraznému zkvalitnění regulace. Obr. 4.6 ukazuje regulační pochod s žádanou teplotou výstupní topné vody 79 °C s výchozí a nově navrženou regulací.



Obr. 4.4 Bilanční model experimentální jednotky na spalování biomasy v SW W2E [64]



Obr. 4.6 Průběh regulované veličiny $y_1(t)$ při zvýšení žádané teploty topné vody ze 77°C na 79°C a postupných úpravách regulace [64]

Vzhledem k vysoké přesnosti použitého modelu lze předpokládat, že zavedení zmíněných úprav do reálného řídicího systému by přineslo stabilní regulaci s výrazně lepší dynamikou, než je u standardních kotlů na biomasu běžné. Hlavním projevem stabilní regulace při provozu jsou vysoká kvalita procesu spalování a plynulé změny otáček ventilátorů. Příznivý dopad by tedy změna měla zejména na **celkovou účinnost výroby tepla i na emise ve spalinách**. Další přínos lze předpokládat ve snížení servisních nákladů.

4.1.2 ENERGETICKÝ SYSTÉM VE DŘEVOZPRACUJÍCÍM PODNIKU

Zkušenosti s technologickou jednotkou na biomasu popsanou v předchozí kapitole byly využity i při výzkumné spolupráci s výrobcem interiérových dveří a dveřních zárubní. K základním charakteristikám projektu patří:

- existující, problematicky provozovaný energetický systém,
- stabilizace provozu energetického systému a snížení emisí ve spalínách,
- návrh efektivního nakládání s vyrobeným teplem.

Úvodní analýza a zadání projektu

Hlavním zdrojem tepla v podniku je horkovodní biomasový kotel o výkonu 2,5 MW z r. 2005. V kotli jsou spalovány dřevní zbytky z výroby, převážně dřevotříska. Horká voda je využívána především pro ohřev strojů ve výrobě a v zimním období i pro vytápění.

Avizovaným problémem byl nestabilní provoz kotle, který se projevoval cyklováním a zvýšenými emisemi ve spalínách. Cílem výzkumného projektu, který byl zahájen v létě r. 2014, byla analýza důvodů nestabilního provozu a návrh nápravných opatření. Poptávaná **analýza výroby a spotřeby tepla** měla obnášet následující činnosti:

1. seznámení se s energetickým systémem podniku včetně souvisejících projekčních podkladů a technické dokumentace,
2. kompletace dostupných historických dat ze systému MaR a jejich příprava pro zpracování,
3. neinvazivní sběr dat přímo v provozu zahrnující jednorázové měření emisí CO, NO_x, SO₂ ve spalínách,
4. vyhodnocení dostupných dat ze SCADA systému za účelem stanovení ročního průběhu potřeby tepla a ověření věrohodnosti historických dat.

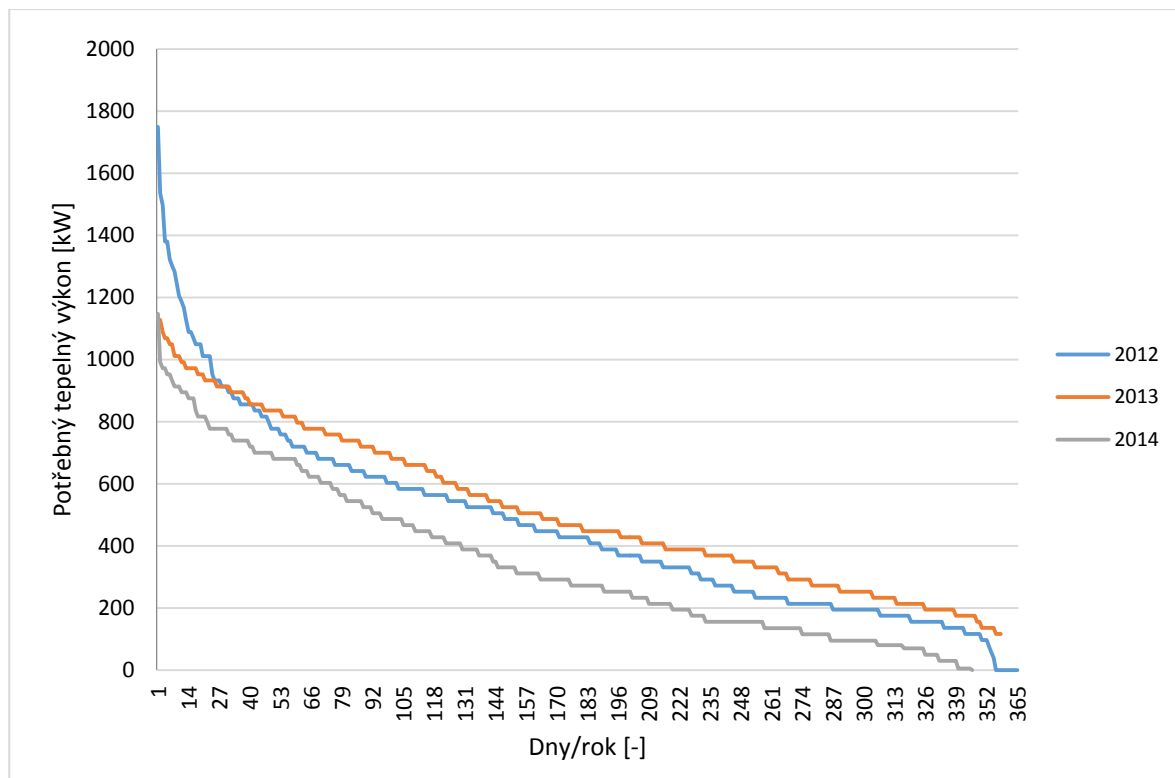
Etapa I: Podrobná analýza systému

Při analýze energetického systému podniku byly použity následující nástroje:

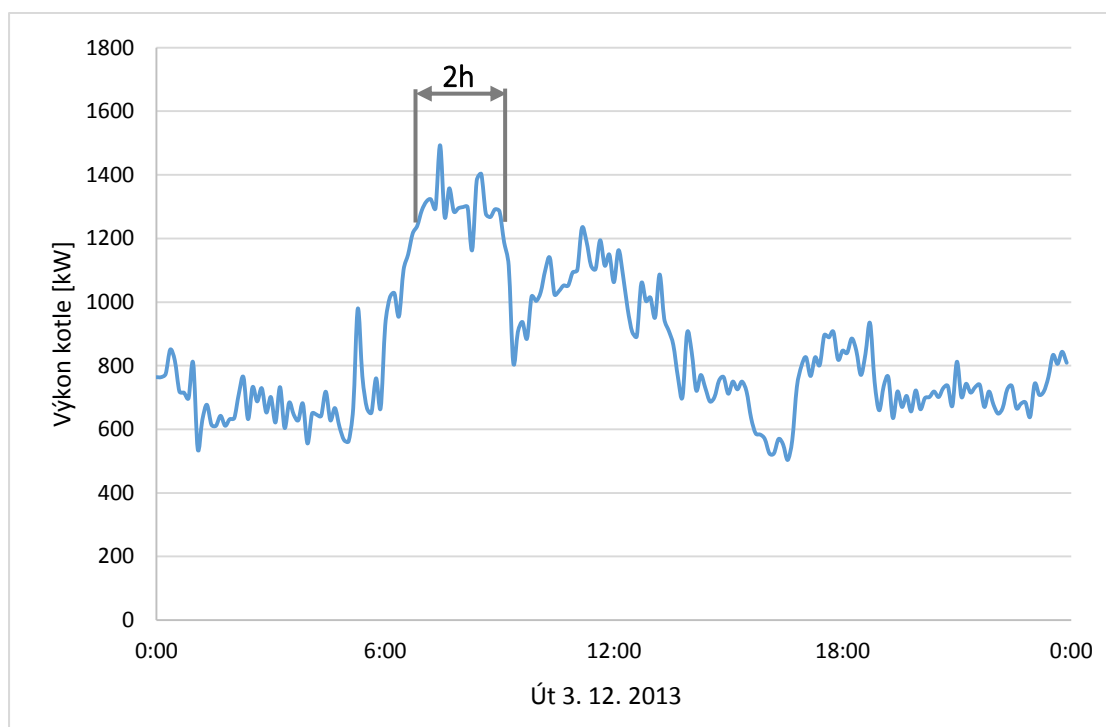
- křivka ročního trvání potřeby tepla,
- křivka denního odběru tepla,
- posouzení účinnosti a emisí kotle v závislosti na provozních stavech systému,
- stanovení dostupného objemu a vlastností používaného paliva.

Archivaci a vizualizaci provozních dat zajišťuje ve výrobním podniku **SCADA systém InTouch**. V tomto systému jsou dostupné téměř všechny veličiny charakterizující provoz energetického systému. Jako doplňkový zdroj informací byly použity ruční záznamy topiče z let 2012-2014 zahrnující údaje o provozních hodinách kotle (h/den) a spotřebě paliva (t/den). Křivka ročního trvání potřeby tepla (obr. 4.7) byla sestavena na základě záznamů topiče jako součin denní spotřeby paliva v biomasovém kotli a výhřevnosti paliva. Hodnoty na ose y jsou tedy denními průměry výkonu kotle. V rámci analýzy proběhlo také technologické měření emisí znečišťujících látek ve spalínách. Pro ověření výhřevnosti paliva byl také proveden palivářský rozbor.

Kotel byl navržen tak, aby pokrýval potřebu tepla celého výrobního závodu. V praxi to znamená, že křivka jeho výkonu kopíruje průběh potřeby tepla během dne. Charakteristický průběh výkonu ukazuje obr. 4.8.



Obr. 4.7 Křivky ročního trvání potřeby tepla pro r. 2012 až 2014



Obr. 4.8 Křivka denního odběru tepla (12, 2013)

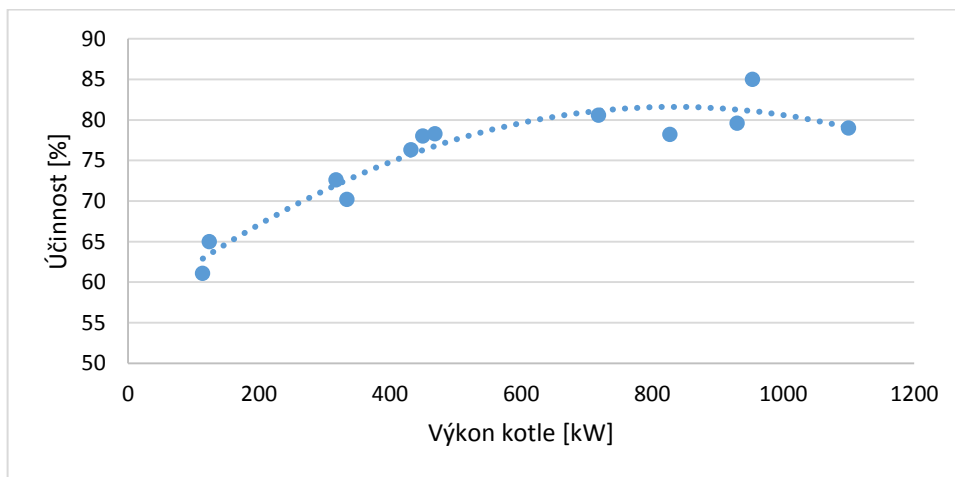
Kotel je nejvíce vytížen ráno, kdy je celý topný systém nahříván po nočním útlumu. Do denní křivky výkonu se promítá především spotřeba topné vody, spotřeba výrobních lisů a tepelné ztráty v rozvodech. V letním období výkon kotle nepřekračuje 400 kW, v zimním

období ve špičkách stoupá k 1 200 až 1 400 kW. Kotel je tedy provozován v rozsahu 15 až 50 % nominálního výkonu. Spotřeba odpovídající horní výkonové úrovni nastává pouze nárazově a v několika málo dnech v roce.

Účinnost kotle a množství emisí znečišťujících látek jsou spolu úzce spojeny. Pokud je v kotli zajištěno maximálně kvalitní spalování, pak je dobrá i jeho účinnost. Účinnost biomasového kotle byla posuzována v několika výkonových pásmech. Jak ukazuje obr. 4.9, účinnost kotle se pohybuje v rozsahu 60 až 80 %, přičemž vyšších hodnot je dosaženo při vyšších výkonech. Ve vyšším výkonovém pásmu (nad 700 kW) není kotel provozován často. Pokud se tak stane, je jeho provoz neustálený (obr. 4.8). Toto je pravděpodobně příčinou nerostoucího trendu účinnosti při vyšších výkonech v obr. 4.9.

Výsledkem provozu na spodní hranici regulovatelnosti je zvýšená úroveň emisí oxidů dusíku NO_x a oxidu uhelnatého CO. Na základě analýzy procesu spalování bylo zjištěno, že tyto emise vyplývají z **nedostatečného promíchání spalovacího vzduchu se spaliny** ve spalovací komoře. Díky nízkému výkonu kotle není jeho rošt rovnoměrně pokryt vrstvou paliva. Spalovací vzduch z primárních ventilátorů prochází přes rošt především v místech s nižší tlakovou ztrátou, tedy tam, kde není vrstva paliva (a zbývá už jen popel). Obchází tak ohnisko spalování. Sekundární vzduch má zase nedostatečnou kinetickou energii na to, aby pronikl do spalin a podpořil hoření, protože nemá při daném průtoku dostatečnou rychlost.

Palivem je odpadní dřevní hmota z výrobního závodu a k dispozici je průběžně po celý rok. Z rozboru paliva provedeného v rámci analýzy vyplynula výhřevnost na úrovni 16,8 MJ/kg. Jedná se o kvalitní palivo, kterého je v závodě dostatek a je zdarma. Pro návrhovou fázi proto byla odpadní dřevní hmota výchozím palivem.



Obr. 4.9 Účinnost biomasového kotle v závislosti na provozním výkonu

Etapa II: Návrh nápravných opatření

Úvodní analýza ukázala, že potřeba tepla a tím i výkon kotle po většinu roku nepřekračuje 600 kW (20 % nominálního výkonu). V několika málo zimních dnech dosáhne špičkově k 1 200 až 1 400 kW, přičemž se jedná o intervaly v řádu desítek minut. Protože je již nainstalován biomasový kotel o nominálním výkonu 2 500 kW, bylo třeba navrhnout úpravu energetického systému tak, aby mohl být kotel odstaven nebo byl provozován pravidelně na přijatelném výkonu. Vzhledem k zadání nebylo pro návrh nápravných opatření využito matematického modelování, ale důkladného technicko-ekonomického hodnocení více alternativ řešení. Nakonec byla navržena tři základní opatření, která mohou být využita samostatně nebo souběžně.

a) Nový zdroj tepla

Základním opatřením je investice do nového biomasového kotle, který by udržoval stálý výkon mezi 300 a 600 kW a vhodného doplňkového zdroje, který by pokrýval výkonové špičky. Jako doplňkový zdroj byl nejvhodnější kondenzační kotel na zemní plyn. Tato varianta by vedla k úplnému odstavení stávajícího kotle. Z pohledu všech kritérií ekonomického hodnocení vyšla tato varianta nejlépe.

b) Akumulace tepla

Druhým opatřením je rozšíření systému o akumulaci přebytečného tepla. Jako vhodný prostředek se jeví jedna nebo více tepelně izolovaných nádrží na horkou vodu. V krajním případě by akumulace horké vody umožňovala i zachování stávající zdroj tepla. Požadavek na objem akumulačních nádrží by však byl vysoký. Díky akumulaci by bylo možné stávající kotel provozovat okolo 1 250 kW (50 % nominálního výkonu) po dobu několika hodin během dne. Následně by probíhal přenos tepla ze systému akumulačních nádrží (tzv. *vybíjení*) a kotel by byl provozován v útlumovém režimu. Tento způsob provozu je šetrnější, než výchozí situace, ale z hlediska životnosti kotle a emisí škodlivých látek ve spalinách není ideální. Akumulace horké vody je žádoucí i pro stabilní chod případného nového biomasového kotle.

c) Integrace jednotky ORC

Zajímavým inovativním řešením by mohlo být rozšíření systému o kogenerační ORC jednotku. Horká voda z kotle by ohřívala termoolej, který ORC jednotka používá jako pracovní médium. Jako technicky vhodné se jeví toto řešení v kombinaci se systémem akumulačních nádrží. Pro konkrétnější představu byla vytipována jednotka o výkonu do 65 kW_e. U vybrané jednotky byl jmenovitý příkon v horké vodě 400 až 860 kW_t. Dopočítaná účinnost se pohybuje v rozsahu 5 až 7,5 %. Výrobce předpokládá teplotu ohřevného media (horké vody) přes 100 °C a průtok 12,6 l/s (tj. cca 45,4 m³/h), což kotel splňuje. Teplo uvolněné jednotkou do chladicí vody (odpadní proud) by bylo možné dále využívat pro vytápění nebo ohřev teplé vody.

Závěr

Biomasový kotel byl v dřevozpracujícím podniku provozován po většinu roku na řádově nižším výkonu, než doporučuje výrobce. Během pracovních dnů navíc docházelo k výrazným výkonnostním výkyvům. Tyto provozní podmínky se projevovaly nízkou účinností kotle a zvýšenými emisemi znečišťujících látek ve spalinách. Byla navržena dvě základní řešení – **výměna zdroje tepla a zavedení akumulace tepla**, jejichž detailní návrh a projekce se mohou stát předmětem další etapy spolupráce. Zkušenost z řešení tohoto projektu vedla k hlubšímu studiu otázky dimenzování biomasových zdrojů tepla. Výsledkem byla publikace popisující způsob volby výkonu biomasového zdroje a řešení provozních problémů spojených s příliš vysokým výkonem [12]. Její plný text je uveden v příloze 6.

4.1.3 PRŮMYSLOVÉ A KOMERČNÍ PRÁDELNY

Tématem řady výzkumných projektů byla energetická náročnost prádelenských provozů. Od r. 2009 byly prováděny rozsáhlé analýzy spotřeb v prádelenských provozech různých kapacit v ČR i v zahraničí. Mnoho dílčích experimentálních měření proběhlo také

ve specializované zkušebně představené v příloze 4. Výsledky rozsáhlé výzkumné činnosti v oblasti energetické efektivity profesní údržby prádla shrnují publikace [19], [68], [69], [70] a [71]. Klíčové publikace [19] a [68] jsou uvedeny v plném znění v přílohách 7 a 8. Navržený komplexní přístup byl v nejširší míře využit při řešení konkrétního projektu, který lze charakterizovat následovně:

- existující, problematicky provozovaný energetický systém,
- nekontinuální provoz a omezené možnosti měření,
- návrh efektivního sběru dat a úspor tepla a vody,
- rozsáhlá projekční činnost.

Cílem projektu bylo zhodnocení energetické náročnosti klíčových zařízení prádelenského provozu a návrh vhodných úsporných opatření. Úvodní etapa byla pojmenována jako *výchozí energetický audit*.

Etapa I: Analýza systému (výchozí energetický audit)

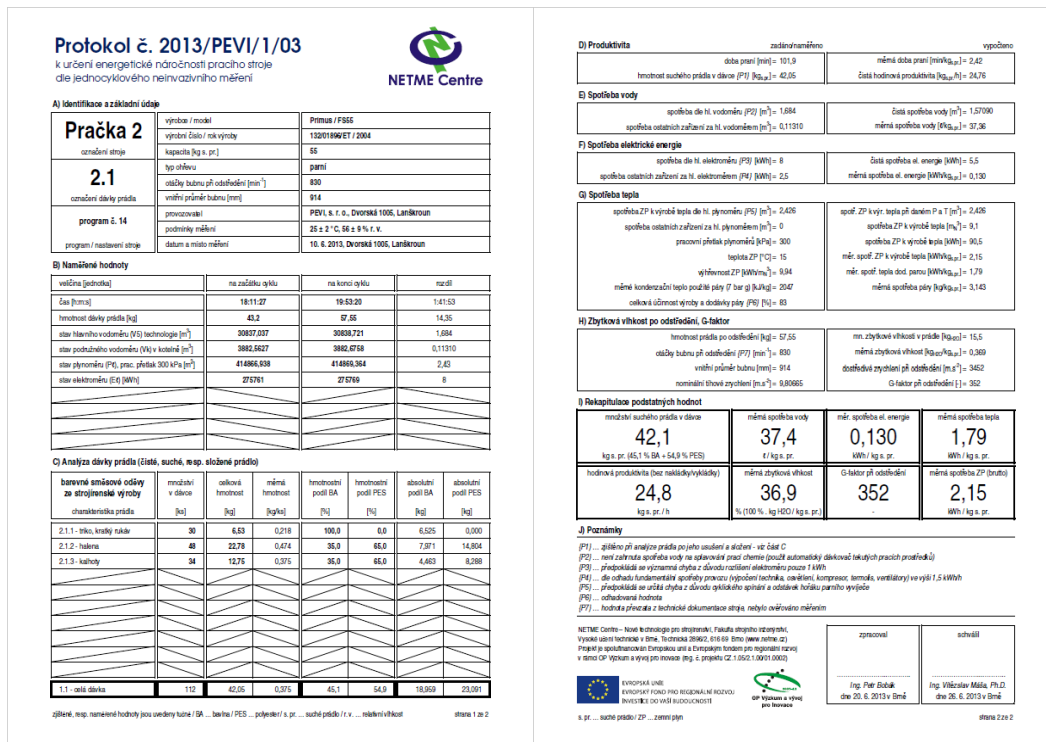
Hlavními spotřebiči prádelenského provozu jsou tři parní vsádkové pračky, plynový sušič a plynový tunelový finišer (obr. 4.10). U jednotlivých spotřebičů nebyla naistalována podružná měřidla, a proto bylo nutné jejich spotřebu sledovat pomocí fakturačních měřidel na přípojkách. Prací lázeň v pračkách byla ohřívána středotlakou párou (7 bar(g), 170 °C) vyráběnou ve vyvíječi páry. Spotřeba tepla v pračkách musela být stanovena nepřímo pomocí spotřeby zemního plynu tohoto vyvíječe. Z těchto skutečností vyplynula metodika měření, která předpokládala, že během sběru dat bude provozováno pouze jedno zařízení. Tento způsob měření je časově náročný a narušuje plynulost provozu prádelny. S měřicí technikou, která byla v objektu nainstalovaná, však jiný postup nebyl možný a provoz se musel po dobu tří dnů probíhajícímu měření přizpůsobit.



Obr. 4.10 Klíčové spotřebiče prádelenského provozu

Při hodnocení spotřeb bylo třeba zohlednit materiálové složení zpracovávaného prádla. Vyšší podíl bavlny oproti polyesteru zvyšuje zbytkovou vlhkost prádla po odstředění, s čímž souvisí zvýšené energetické nároky na sušení. Výsledky měření byly zpracovány ve formě přehledových tabulek pro každý spotřebič (obr. 4.11). Hlavním výstupem pro pračky byla měrná spotřeba tepla a elektrické energie vztahovaná na kilogram suchého prádla. U sušiče a kalandru, kde je pro odpařování vody využíváno spalin zemního plynu, byla hlavním výsledkem měrná spotřeba zemního plynu a elektrické energie vztahovaná na kilogram odpařené vody. Nakonec byla hodnocena produktivita jednotlivých strojů na základě dat od provozovatele. Hodnocení zahrnovalo celkovou hmotnost vypraného prádla jednotlivými pracími stroji, četnosti pracích programů, hmotnosti prádla vztahového k jednotlivým pracím

programům a vytiženosti (počtu spuštění) jednotlivých pracích strojů. Posledním krokem byla analýza provozních nákladů rozdělená na zemní plyn, elektřinu a vodu.



Obr. 4.11 Výstupní protokoly z energetického auditu

Etapa II: Návrh řešení a jeho implementace

Výchozí energetický audit prádelenského provozu přinesl detailní studii energetické náročnosti klíčových zařízení a analýzu produktivity provozu včetně provozních nákladů. Pro zadavatele byl audit jedním z klíčových podkladů pro navazující projekt rekonstrukce prádelny, který měl současně výrazně zvýšit její zpracovatelskou kapacitu. Na základě provedeného ekonomického hodnocení stávajícího provozu se zadavatel rozhodl pro kompletní rekonstrukci prádelny. Pozornost se tedy nesoustředila na výběr vhodných úsporných opatření, ale na **návrh technologie nové prádelny** s vysokou energetickou efektivitou.

Do přípravy projekčních podkladů se výzkumný tým zapojil jako **odborná podpora** projektanta. Nad rámec běžných projekčních postupů bylo využito simulačních výpočtů postihujících více variant technologického řešení. Výsledkem bylo komplexní technologické schéma nového energeticky efektivního provozu se všemi funkčními bloky a definicemi všech procesních proudů. V rámci druhé etapy spolupráce byly stanoveny základní provozní parametry důležité pro návrh infrastruktury nové prádelenské technologie. Součástí díla byl také návrh prostorového uspořádání prádelenské techniky včetně dispozičního uspořádání potrubních a kabelových tras k jednotlivým strojům (soubor půdorysů). Tato data a následně konzultace byly podmínkou pro úspěšnou projekci všech důležitých technických systémů objektu prádelny na míru investičnímu záměru. Popsaná návrhová činnost byla možná díky vlastní datové bázi získané experimentální činností ve zkušebně (viz příloha 4).

4.1.4 ODSOLOVÁNÍ VODY A ZAHUŠŤOVÁNÍ DIGESTÁTU

Téma odsolování a zahušťování procesních odpadních vod z vybraných procesů bude představeno pouze rámcově, vzhledem ke skutečnosti, že řešení projektu je předmětem obchodního tajemství. Projekt byl zahájen na základě podnětu od průmyslového podniku vyrábějícího destilační odsolovací jednotky typu MSF (*Multi-Stage Flash*). Jeho cílem bylo nové využití těchto jednotek při zahušťování digestátu z bioplynových stanic (BPS). K hlavním charakteristikám projektu patřilo řešení následujících úkolů:

- rozsáhlá experimentální činnost ve zkušebnách a laboratořích,
- návrh nové technologie (tzv. *Grassroot design*),
- návrh efektivního sběru dat a optimalizace provozu,
- využití odpadního tepla z průmyslových procesů.

Digestát je vedlejším produktem anaerobní digesce biomasy a je používán při hnojení zemědělské půdy. Redukce objemu těchto vod slibuje úspory energie nutné pro jejich transport, snížení skladovacích kapacit, možnost zpětného využití získané vody a tedy snížení nákladů pro provozovatele. V rámci úvodní analýzy byly v letech 2014 a 2015 provedeny testy pilotní MSF odsolovací jednotky. Následně byly navrženy úpravy, které vedly ke zvýšení její účinnosti. Na základě analýzy vybraných vlastností odpadních vod z bioplynových stanic (pěnovost, viskozita, hustota, množství sušiny) a díky aplikaci poznatků z procesního inženýrství byly ve druhé etapě provedeny první úspěšné zahušťovací testy digestátu. Technicko-ekonomické zhodnocení procesu zahušťování fermentačních zbytků z bioplynových stanic a relevantní technické postupy představuje článek [72], který je v plném znění uveden v příloze 9. Výzkumná činnost směřuje k efektivní integraci těchto jednotek do provozů BPS. Výhodou technologie MSF je možnost využití odpadního tepla, kterého je v bioplynových stanicích přebytek. Možnosti využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů jsou představeny v publikaci [73].

Současně byl zahájen vlastní výzkum zaměřený na rozšíření aplikovatelnosti technologie na další odpadní procesní vody (např. z prádelenského procesu). Za tímto účelem byla vyvinuta vlastní experimentální MSF jednotka, která byla osazena rozsáhlou měřicí technikou a upravena tak, aby byl proces lépe sledovatelný i regulovatelný. Při použití slané vody nebo fermentačních zbytků z bioplynových stanic již jednotka potvrdila svoji funkčnost. Výsledkem výzkumné činnosti je také výpočtová a znalostní základna, která poslouží při konstrukci a zprovoznění dalších MSF jednotek koncipovaných na míru konkrétním aplikacím.

4.1.5 VÝROBA LÉČIVA NA BÁZI VÁPNIKU

Příkladem výzkumného projektu z farmaceutického průmyslu je spolupráce s výrobcem léčiv na bázi přírodního vápníku. Výrobní surovinou jsou vaječné skořápky. Cílem projektu byla inovace výrobní linky, konkrétně části, kde dochází k praní vaječných skořápek. Možnost bližšího popisu je v případě tohoto projektu omezena závazkem mlčenlivosti. K hlavním charakteristikám projektu patří:

- existující, problematicky provozovaný technologický proces,
- návrh úsporných opatření se zaměřením na spotřebu vody,
- optimalizace procesu při zachování přísných požadavků na farmaceutický provoz.

Cílem projektu bylo zejména:

- snížení spotřeby prací vody,
- zvýšení účinnosti vypírání nežádoucích látek (zejména bílku a nečistot) a oddělování vaječných skořápek a blán,
- zajištění vhodného způsobu odloučení podskořápkových blán z odpadní vody,
- zvýšení komfortu obsluhy.

V souladu s navrženou metodikou byl v první etapě spolupráce proveden výchozí energetický audit zaměřený na spotřebu vody a elektrické energie dvou pracích linek, které jsou v podniku nainstalovány. Jedna z pracích linek je na obr. 4.12. Současně byl analyzován celý výrobní proces a všechny jednotkové operace.



Obr. 4.12 Technologická linka určená pro praní vaječných skořápek

Audit potvrdil předpoklad, že provoz je náročný zejména na spotřebu vody. Při zachování současné technologie byl největší potenciál pro úspory nalezen ve změně režimu napouštění. Prací proces ve výchozím stavu probíhal za neustálého přítoku čisté vody. Nově navržená koncepce počítá s dávkovou výměnou vody neboli tzv. *vícestupňovou extrakcí*.

Druhá etapa spolupráce měla za cíl provést patentovou rešerši a na základě laboratorních testů navrhnout konkrétní inovace směřující k uplatnění výše stanovených cílů. Tento výzkumný projekt zahrnoval širokou škálu odborných specializací od chemického inženýrství, přes výpočtové modelování dynamiky tekutin (CFD), až po konstrukci zařízení. Výsledkem druhé etapy byly návrhy konkrétních inovací.

Třetí etapa měla za cíl implementovat navržené inovace do stávajícího procesu. Jedna z pracích linek byla demontována a převezena do zkušebny řešitele, kde proběhla veškerá vývojová a experimentální činnost. Výsledkem je prototypové zařízení, které potvrdilo reálný přínos všech navrhovaných inovací. Spotřeba vody byla oproti výchozímu stavu snížena asi o 50 %, přičemž bylo dosaženo výrazně vyšší čistoty výstupního produktu. Poslední čtvrtá etapa, která bude zahájena na začátku r. 2017, směřuje k výrobě zcela nové prací linky. Nová linka bude zahrnovat pokročilý systém řízení, který výrazně zvýší komfort obsluhy.

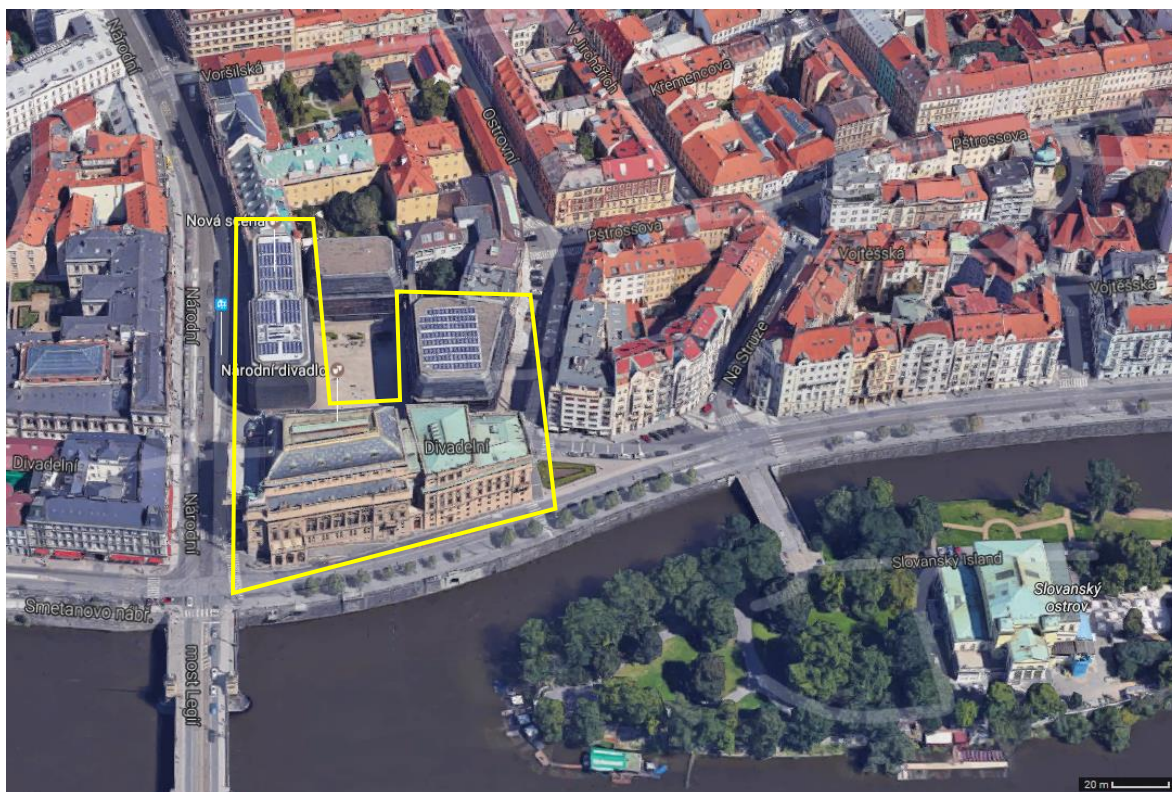
4.2 Komunální sféra

V komunální sféře nalezl komplexní přístup svoje uplatnění především u energetických systémů sestávajících z více zdrojů tepla, příp. chladu. Projekty byly zaměřeny na snižování spotřeby tepla v rozsáhlejších komplexech budov.

4.2.1 ENERGETICKÝ SYSTÉM NÁRODNÍHO DIVADLA PRAHA

Energetický systém Národního divadla Praha zajišťuje topení a chlazení areálu čtyř budov o celkové kapacitě 265 950 m³ (viz obr. 4.13). V letech 2007 a 2008 prošel energetický systém rozsáhlou rekonstrukcí v rámci EPC projektu, který ovšem postrádal systémový přístup. Rekonstrukce probíhala jako prostá výměna starších zařízení za nová bez vazby na řídicí systém. Během rekonstrukce byly mimo jiné doplněny nové zdroje tepla a chladu, díky čemuž se stal energetický systém výrazně složitějším. Výzkum se zaměřil na úpravu systému řízení tak, aby umožňoval efektivní využívání všech prvků energetického systému. K hlavním charakteristikám projektu patří:

- moderní energetický systém nekompatibilní se stávajícím systémem MaR,
- problematický provoz topení a chlazení z pohledu energetické efektivity,
- rozsáhlé využití matematického modelování,
- návrh rozšíření systému řízení pro snížení spotřeb energie.

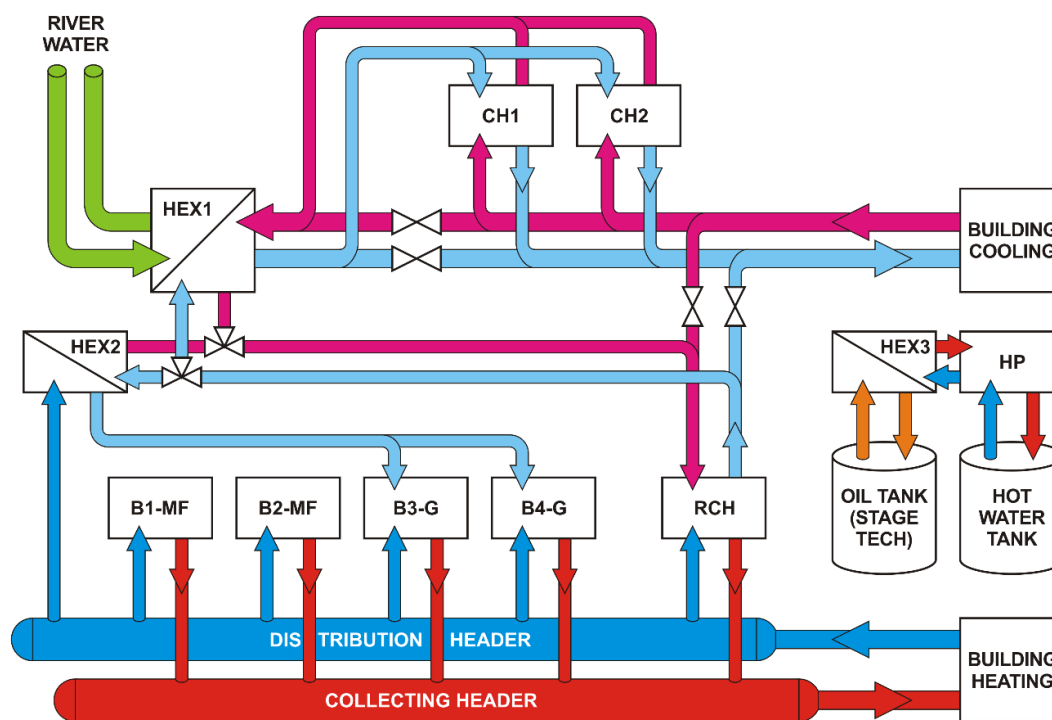


Obr. 4.13 Areál Národního divadla Praha v době řešení projektu (mapová data ©2016 Google)

Úvodní analýza a zadání projektu

Zjednodušené schéma energetického systému je na obr. 4.14. Hlavním zdrojem tepla je v ND Praha dvojice nových kondenzačních plynových kotlů (B3-G, B4-G), každý o

výkonu 1 440 kW. Tyto kotle byly v rámci projektu EPC zvoleny pro svoji vysokou účinnost. Dále jsou v kotelně dva původní nízkoteplotní kotle (B1-MF, B2-MF), každý o výkonu 3 120 kW, které jsou vybaveny dvoupalivovými hořáky umožňující spalovat zemní plyn a extra lehký topný olej (ELTO). Tyto starší kotle jsou využívány pouze pro krytí odběrových špiček tepla v nejchladnějších obdobích roku. Teplá voda může být ohřívána v popsané kaskádě kotlů nebo alternativně pomocí malého tepelného čerpadla (HP) o výkonu 30 kW. Toto tepelné čerpadlo zhodnocuje přes výměník (HEX3) odpadní teplo z hydraulického oleje používaného pro pohon jevištní techniky.



Obr. 4.14 Blokové schéma topného a chladicího systému Národního divadla Praha [52]

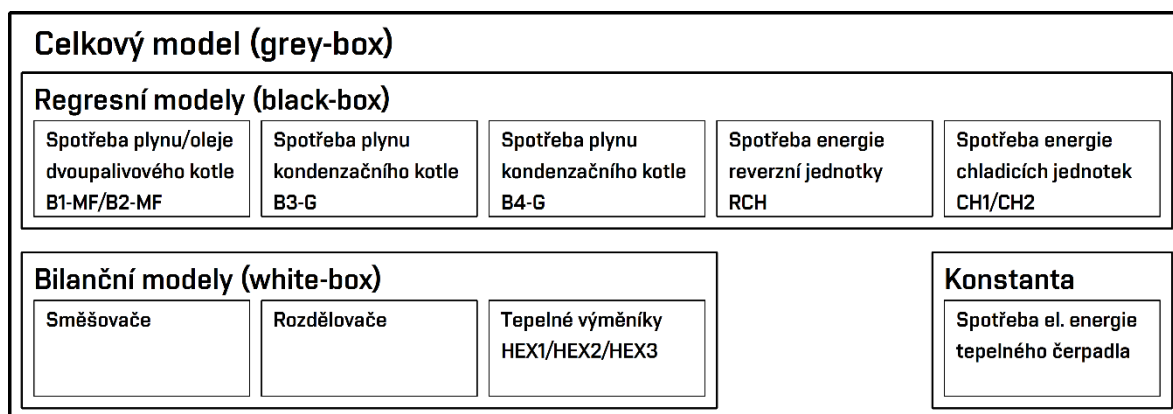
Chladicí systém je tvořen dvěma chladicími jednotkami (CH1, CH2) s výkonem 826 kW každé z nich. Jednotky chladí fasády vystavené slunečnímu záření. Toto přebytečné teplo je prostřednictvím chladicího okruhu uvolňováno do Vltavy (přes výměník HEX1). Možné je také přímé chlazení pomocí vody z Vltavy.

Klíčovou jednotkou, která byla v rámci EPC projektu doplněna, je reverzní chladicí jednotka (RCH). Tato jednotka může být provozována jak v topném režimu jako tepelné čerpadlo s výkonem až 1 422 kW, tak v kombinovaném režimu, kdy využívá nízkopotenciální teplo z chlazení fasády pro ohřev topné nebo teplé užitkové vody. Chladicí výkon je v tomto režimu 470 kW. Reverzní jednotka propojuje systém topení a chlazení. Kromě chlazení fasád může jednotka využívat teplo z Vltavy nebo odpadní teplo z vratného potrubí kondenzačních plynových kotlů (HEX2), což zvyšuje jejich účinnost.

Uvedené možnosti topení a chlazení nebylo možné plně využívat při stávajícím manuálním způsobu volby zdroje tepla a chladu. Za tuto volbu zodpovídá technický pracovník provozu budovy. Efektivita jednotlivých provozních variant je ale významně ovlivňována mnoha faktory, zejména cenou paliva, venkovní teplotou, teplotou vody ve Vltavě apod. Tyto vlivy nezvládá technický pracovník vyhodnocovat a zohledňovat je při spouštění zdrojů. Jako řešení byla zvolena cesta identifikace systémů a matematického modelování.

Etapa I: Analýza systému a tvorba matematického modelu

Pro analýzu systému byla využita data ze systému SCADA. Po identifikaci a odstranění některých chyb ve sběru dat byla sestavena kompletní datová báze potřebná k využití vědeckých postupů. **Jádrem výzkumné činnosti bylo využití provozních dat pro sestavení modelů zdrojů tepla a chladu pomocí experimentální identifikace.** Využito bylo metod lineární regrese (LR) a neuronových sítí (ANN). Na základě porovnání výsledných modelů byly pro finální model zvoleny lineárně regresní modely. Neuronové modely vykazovaly podobnou přesnost jako regresní, ale jejich implementace byla výrazně složitější. Pro matematický popis výměníků tepla, rozdělovačů a sběračů byla využita analytická identifikace ve formě bilančních modelů. Zdroje tepla a chladu byly popsány pomocí *black-box* modelů, výměníky a rozvaděče pomocí *white-box* modelů. Model celého systému, který je zobrazen na obr. 4.15, můžeme označit jako *gray-box* (více viz kap. 3.2.1). Celkový model zahrnuje všechna zařízení, která se podílí na výrobě tepla a chladu v Národním divadle Praha.



Obr. 4.15 Celkový model energetického systému tvořený modely dílčích aparátů [52]

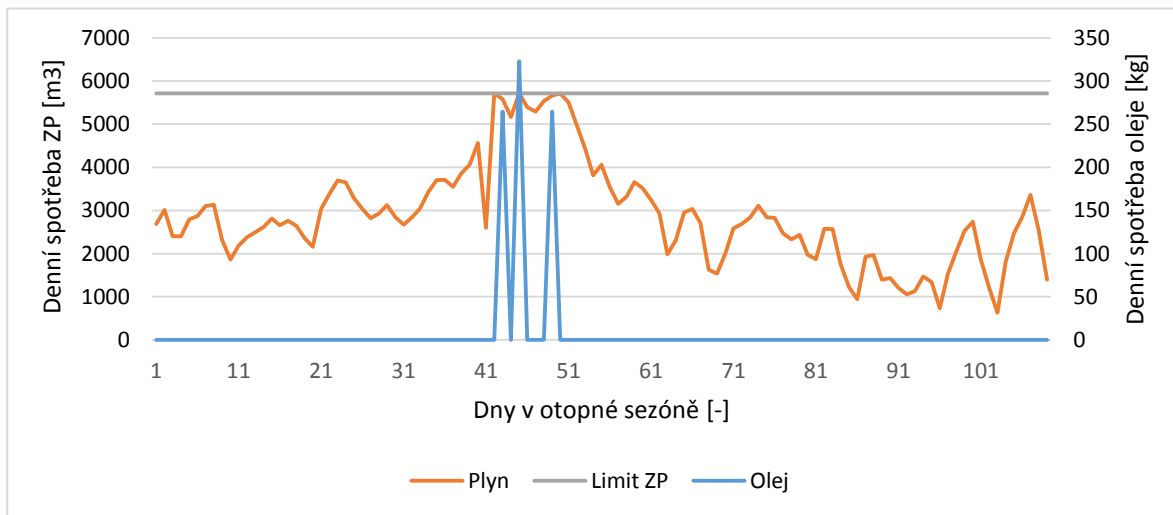
Etapa II: Návrh a realizace úsporných opatření

Vytvořený model byl využit dvěma způsoby. Předně poskytl možnost **optimální volby zdroje tepla a chladu** na základě vyhodnocení účinností zdrojů vzhledem k aktuálním provozním podmínkám. V letním období vyvstávalo dilema ohledně volby zdroje chladu. Chlazení může zabezpečovat chladicí jednotka (CH) nebo reverzní jednotka (RCH). RCH má nižší tzv. *topný faktor* COP než CH, ale RCH je výrazně účinnější při současné potřebě chladu i tepla. Operátor může s pomocí modelu rozhodnout, který zdroj je v daných podmínkách výhodnější. Komplikace s volbou správného zdroje přicházela také v přechodném období na jaře a během podzimu, kdy je systém nutné často přepínat mezi režimem chlazení a topení. Rozhodování dále komplikovala skutečnost, že provoz kondenzačních kotlů a reverzní jednotky se může vzájemně ovlivňovat díky možnosti chlazení vratné vody do kotlů. Všechny tyto aspekty model efektivně vyhodnocuje a pomáhá technickému pracovníkovi s optimální volbou zdroje. Tento příklad ukazuje aplikaci modelu v krátkodobém měřítku pro účely přímého řízení energetického systému. Dále bylo možné s modelem provést **optimalizaci denního odběrového limitu pro zemní plyn**. Cílem bylo najít optimální hodnotu denní rezervované kapacity zemního plynu, a tím snížit náklady na toto palivo. Optimalizace předpokládala dokonalou znalost potřeby tepla během topné sezóny (hodinová data), která má být pokryta zdroji tepla B1/2-MF, B3/4-G a RCH. Dále byla nutná znalost teploty vratné topné vody, která je proměnná v důsledku ekvitermní

regulace. Otázkou bylo, jakou hodnotu denní rezervované kapacity zvolit pro smlouvu s dodavatelem plynu a jak provozovat zdroje tepla, aby se dosáhlo minimálních provozních nákladů. Pro reálnou aplikaci jsou toto důležité faktory, které významně ovlivňují ekonomiku provozu energetického systému. Účelová funkce má pro tento případ podobu dle (8).

$$z = \sum_{\text{otopné období}} E_e \cdot c_e + \sum_{\text{otopné období}} Q_p \cdot c_p + \sum_{\text{otopné období}} m_o \cdot c_o + Q_{p,d} \cdot c_{p,d} + \sum_{\text{otopné období}} Q_{p,pen} \cdot c_{pen} \quad (8)$$

kde E_e je spotřeba elektrické energie (kWh/den), c_e je cena za elektrickou energii, Q_p je objem spotřebovaného zemního plynu (m_N^3/den), c_p je cena zemního plynu, m_o je hmotnost spotřebovaného ELTO (kg/den), c_o je cena ELTO, $Q_{p,d}$ je denní rezervovaná kapacita ZP (m_N^3/den), $c_{p,d}$ je cena za rezervovanou kapacitu ZP, $Q_{p,pen}$ je objem odebraného ZP nad denní rezervovanou kapacitu (m_N^3/den) a c_{pen} je pokuta za překročení rezervované kapacity. Zvýšené náklady spojené se spuštěním nízkoteplotních kotlů na ELTO nebyly do výpočtu zahrnuty (viz přijímaná zjednodušení popsaná v kap. 3.2.5). Pro analýzu bylo využito otopné období 2011/2012 o délce 109 dní s potřebou tepla odpovídající reálným provozním podmínkám. Pro zjednodušení byly použity denní průměry potřeby tepla místo hodinových a teplota vratné vody kotlů byla použita také průměrná. Optimalizace byla provedena prostřednictvím softwarového systému GAMS. Výsledky ukazuje obr. 4.16.



Obr. 4.16 Spotřeba zemního plynu a topného oleje během otopné sezóny a optimální rezervovaná kapacita zemního plynu [52]

Minimální hodnota účelové funkce je 136 300 EUR a optimální denní rezervovaná kapacita plynu je $4\,315 \text{ m}_N^3/\text{d}$. Při uvedené hodnotě denního limitu by byly nízkoteplotní kotle uvedeny do provozu třikrát za celé otopné období (31., 78. a 81. den). Jejich účelem je předejít překročení limitu částečnou náhradou zemního plynu topným olejem. V ostatních dnech, kdy spotřeba ZP dosáhne denního limitu, je využito tepelného výkonu RCH.

Vypočítaná optimální denní rezervovaná kapacita plynu je platná pouze pro analyzované otopné období 2011/12, kdy byla potřeba tepla známa. Praktické využití modelu pro optimalizaci denního limitu zemního plynu předpokládá znalost budoucí potřeby tepla. Ta však není předvídatelná.

Řešením je provedení simulačního výpočtu, který by neurčitost trvání potřeby tepla zohlednil. Pro výpočet byla použita metoda *Monte Carlo* s 500 náhodně vygenerovanými průběhy potřeb tepla. Výsledky umožní provozovateli vybrat hodnotu denního limitu s vědomím pravděpodobnosti, s jakou bude skutečný odběr plynu stejný nebo nižší než tato hodnota. Čím bezpečnější (vyšší) hodnotu provozovatel zvolí, tím vyšší budou jeho fixní náklady na zemní plyn. Při nižší hodnotě ušetří, ale nastane více krizových situací na hranici limitu. V důsledku příliš nízké hodnoty limitu mohou celkové náklady na provoz energetického systému vzrůstat díky nákladům na ELTO. Užitečným nástrojem při rozhodování o správném limitu může být také citlivostní analýza celkových nákladů na hodnotu denní rezervované kapacity zemního plynu.

Na základě provedených výpočtů bylo možné nakonec doporučit hodnotu denní rezervované kapacity okolo 4 800 m³/d. **Model našel využití jak na úrovni SCADA systému při řízení provozu energetického systému, tak na úrovni ERP při rozhodování o optimální denní rezervované kapacitě zemního plynu.** Výsledek lze označit jako neinvestiční úsporné opatření (software), a proto nebylo třeba speciální implementační podpory. Jedinečnost tohoto projektu dokládá skutečnost, že podobný výzkum nebyl dosud publikován. Srovnatelné modelování energetických zdrojů je z odborné literatury známo spíše u velkých zdrojů používaných v energetickém průmyslu. Podmínkou úspěchu bylo vytvoření finančně náročného modelu, který je však vzhledem k rozsahu systému a dlouhodobému přínosu opodstatněný. Výsledky výzkumu byly podrobně popsány v publikacích [74] a [11]. Klíčová publikace [11] je v plném znění uvedena v příloze 10.

4.2.2 ENERGETICKÝ SYSTÉM AREÁLU KONGREGACE

Areál kongregace sestává z několika budov (kláštera, kostela a školy), které využívají společný energetický systém (obr. 4.17). Cílem projektu bylo zvýšit energetickou efektivitu kombinovaného zdroje tepla sestávajícího z předávací stanice tepla a souboru čtyř tepelných čerpadel. K základním charakteristikám projektu patří:

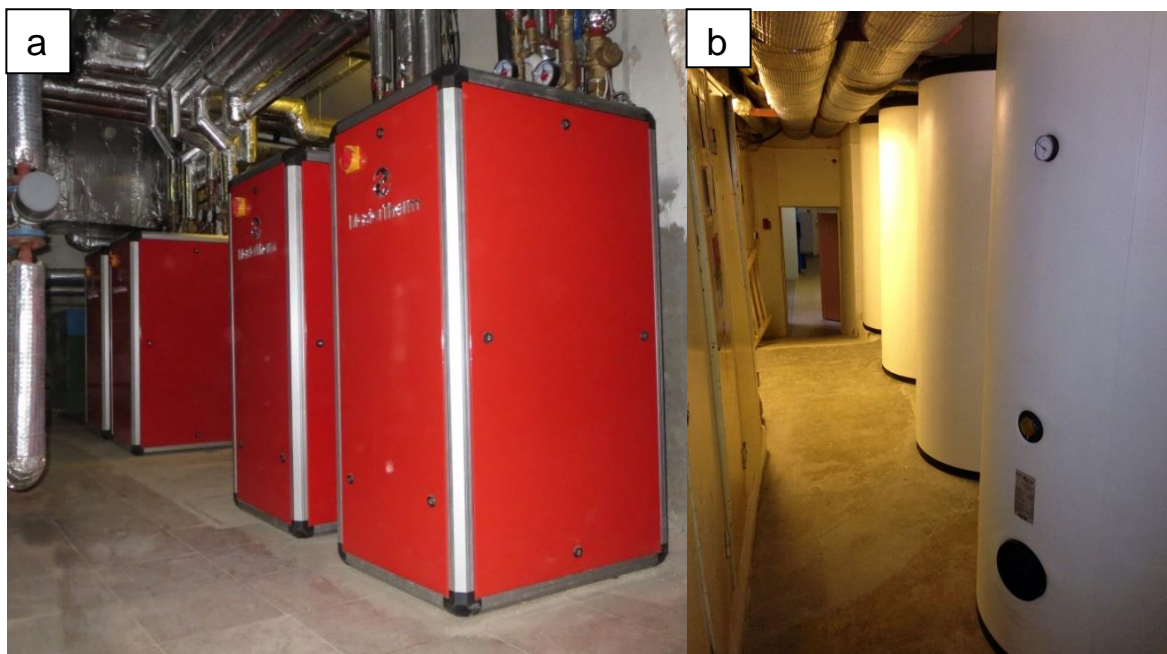
- existující, problematicky provozovaný energetický systém,
- souběh starší předávací stanice tepla a moderních tepelných čerpadel,
- návrh efektivního provozu energetického systému.

Úvodní analýza a zadání projektu

Ústřední zdroj tepla areálu tvoří objektová předávací stanice tepla, která byla v r. 2014 rozšířena o sestavu čtyř tepelných čerpadel vzduch-voda (obr. 4.18 a). Katalogová hodnota topného výkonu každého čerpadla je 123 kW pro teplotu vstupního vzduchu 7 °C a teplotu výstupní vody 35 °C. Upřesnění těchto teplotních parametrů je důležité, protože teploty vstupního vzduchu a výstupní vody nejdůležitěji ovlivňují COP tepelných čerpadel. Tématem výzkumného projektu byla analýza COP tepelných čerpadel v závislosti na těchto provozních podmínkách a návrh opatření pro zlepšení ekonomiky jejich provozu. Problematiku ekonomického hodnocení integrace tepelných čerpadel vzduch-voda do předávacích stanic systému CZT popisuje podrobně publikace [75], která byla sestavena na základě zkušeností získaných při řešení tohoto projektu. Její plný text tvoří přílohu 11.



Obr. 4.17 Areál Kongregace milosrdných sester III. řádu sv. Františka pod ochranou Svaté rodiny v Brně (mapová data ©2016 Google)



Obr. 4.18 (a) Tepelná čerpadla typu vzduch-voda v kotelně areálu kongregace a (b) zásobníky teplé vody [76]

Etapa I: Analýza systému a rozšíření systému pro sběr dat

V analyzovaném případě je vstupním médiem venkovní vzduch, výstupním médiem je teplá užitková voda (dále jen TUV) o žádané teplotě 50 °C, která se akumuluje v systému čtyř nádrží (obr. 4.18 b) s kapacitou 1000 l každé z nich. Pro přehled o zapojení bylo vytvořeno P&ID schéma systému (viz příloha 12). Tepelná čerpadla umožňují také přehřev topné vody během otopného období. Stávající technologii bylo třeba nejprve osadit potřebnou měřicí technikou a všechny snímače zapojit do ústředny pro sběr dat. Ve stávajícím systému MaR byla k dispozici pouze celková spotřeba elektrické energie sestavy TČ a několik teploměrů pro kontrolu teploty v akumulacích nádržích. Na základě stanovení potřebných veličin byla navržena vhodná **měřicí sestava** včetně měřicí ústředny s potřebnými komunikačními možnostmi. Součástí projektu byla také instalace měřicí techniky a zapojení signálů z řídicího systému tepelných čerpadel. Měřicí systém od března 2016 úspěšně archivuje 99 veličin z provozu kotelny. Záznam dat probíhá v měřicí ústředně s periodou jedné minuty a každých 24 hodin dochází k odeslání balíku s daty do centrálního úložiště.

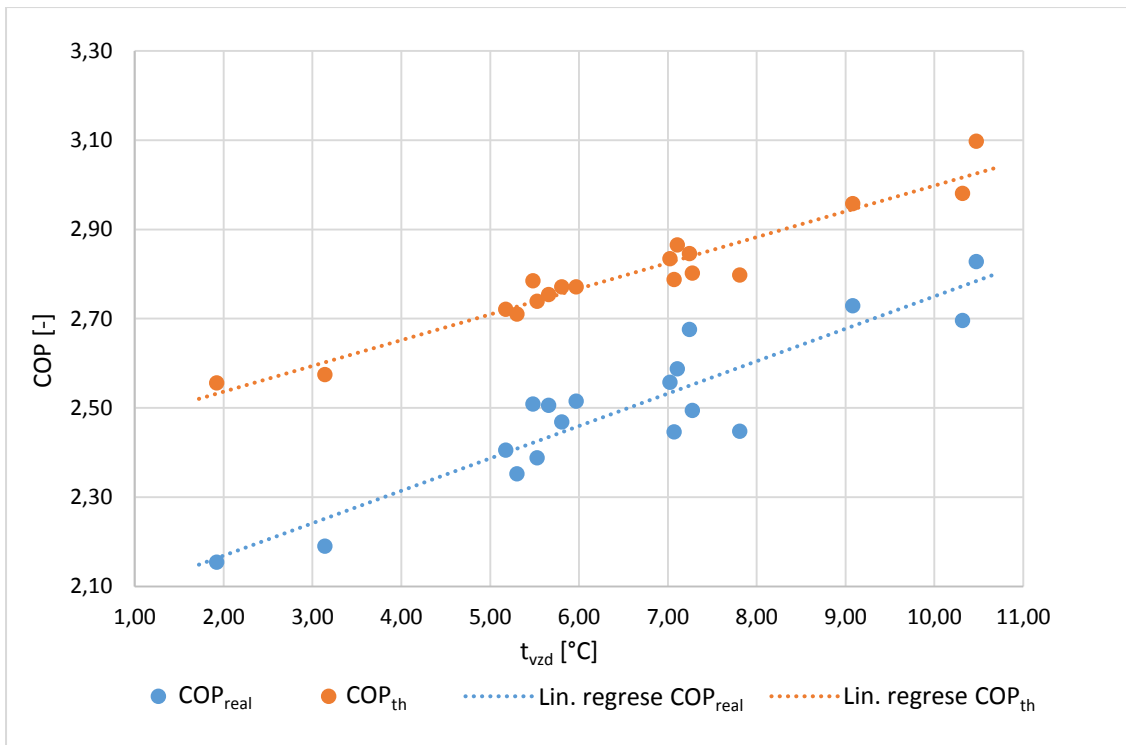
Další činnost byla soustředěna na hodnocení energetické efektivity zdroje tepla na základě archivovaných dat. Byla provedena **analýza topného výkonu a topného faktoru (COP)** tepelných čerpadel v závislosti na provozních podmínkách.

Etapa II: Tvorba matematických modelů a návrh úsporných opatření

Na základě kompletní datové báze bylo možné sestavit šest *black-box* modelů definujících teoretické a experimentálně zjištěné hodnoty tepelného výkonu a COP pro tři různé teploty výstupní vody ($45 \pm 1,25$ °C, $47,5 \pm 1,25$ °C a $50 \pm 1,25$ °C). Pro určení teoretických hodnot byl vytvořen vícekrokový výpočetní algoritmus, který zahrnuje teoretickou účinnost kompresoru a všechny parazitní spotřeby elektrické energie (ventilátory ve výparníkových jednotkách, oběhová čerpadla apod.) [77]. Pro popis bylo využito LR modelů. Výsledná podoba LR modelu pro teplotu 47,5 °C je uvedena na obr. 4.19.

Nejdůležitějším zjištěním, který analýza přinesla, je obecně nízká hodnota COP tepelných čerpadel. Hlavním důvodem je zřejmě nevhodný způsob zapojení čerpadel přes akumulacní zásobník (příloha 12, pozice 4). Tento zásobník se během provozu TČ rychle ohřeje a zvýšená teplota vratné vody vyvolává snížení COP tepelných čerpadel. Situace je ještě nepříznivější tehdy, když je v provozu více tepelných čerpadel. Další slabinou instalace je nízké využívání tepelných čerpadel oproti dodávce tepla z CZT.

V rámci druhé etapy bylo také provedeno technicko-ekonomické zhodnocení systému a **návrh změny zapojení tepelných čerpadel pro zvýšení jejich COP**. Navazující práce budou zaměřeny na vyčíslení úspor plynoucích z tohoto opatření. Už nyní je však zřejmé, že finanční přínos navrženého opatření v krátké době vykompenzuje náklady spojené s provedenou analýzou i úpravou.



Obr. 4.19 Hodnoty experimentálně zjištěného (real) a teoretického (th) COP pro teplotu výstupní vody 47,5 °C v závislosti na teplotě vstupního vzduchu t_{vzd} [°C] [77]

5 UPŘESNĚNÁ METODIKA

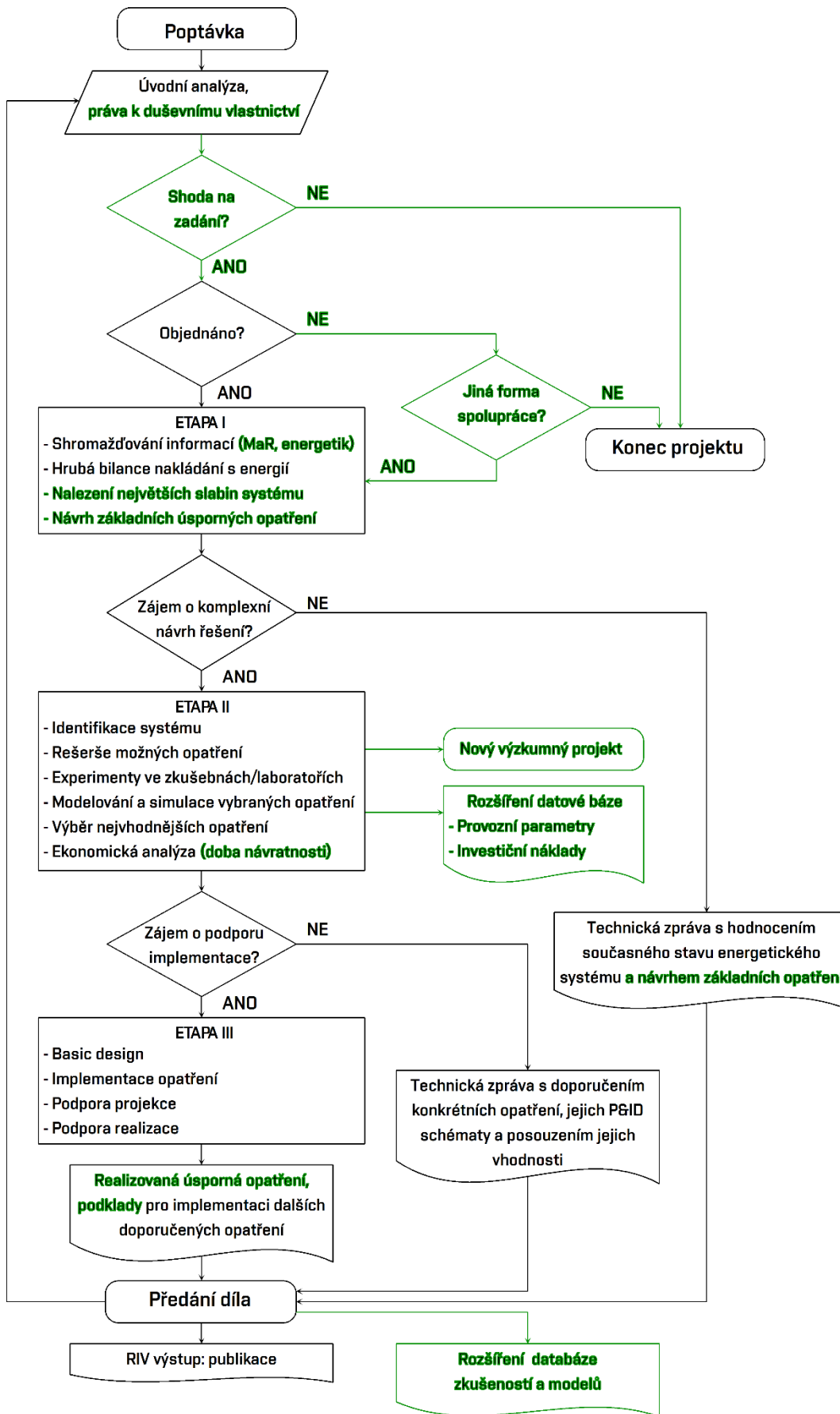
V kap. 3 byla představena obecná metodika efektivního řešení projektů energetických úspor v průmyslové a komunální sféře. Představené případové studie přinesly několik důležitých poznatků, které je vhodné do metodiky zahrnout, aby lépe ukazovala **postupy a způsoby řešení jednotlivých etap**. Kompletní upřesněná metodika zahrnující všechny klíčové poznatky z praxe je zobrazena na obr. 5.1. Bližší vysvětlení provedených změn je stručně shrnuto v následujících bodech:

1. Úvodní analýza:

- V případě, že jednání s provozovatelem energetického systému ukážou nepřekonatelnou překážku v ceně díla, lze zvážit **jinou formu spolupráce**, např. výzkumný projekt podpořený dotací. Taková spolupráce však s sebou nese svoje rizika a měla by být navázána pouze s partnerem, který je prověřený.
- Už při přípravě smlouvy o dílo je třeba myslet na otázku práv k **duševnímu vlastnictví**, aby byla oběma stranám zřejmá pravidla pro nakládání s dosaženými výsledky.
- Výstupem z úvodní analýzy by mělo být zformulované **zadání projektu**. Shoda zúčastněných stran na zadání projektu je podmínkou jeho dalšího smysluplného pokračování. Zadání je třeba formulovat jasně, aby byl zřejmý rozsah díla a bylo možné sestavit cenovou nabídku.

2. Etapa I:

- Přes neochotu k investicím ze strany zadavatele je třeba prosazovat **důležitost analytické fáze**. Nepřesná nebo nedostupná data se významně promítají do kvality všech výsledků projektu.
- Klíčovou roli při analýze systému hraje systém **MaR**, zejména systém SCADA. Druhou oporou je **energetik**, případně technický pracovník, který zodpovídá za hospodaření s energií v podniku. Věrohodnost zjištěných informací je třeba ověřovat. Informace z obou uvedených zdrojů by měly být ve shodě.
- Při hodnocení energetické efektivity objektu by měl být výzkumnému týmu oporou protokol k průkazu energetické náročnosti budovy. Je však třeba upozornit, že ne všechny energetické audity jsou prováděny zodpovědně.
- Často se stává, že zadavatel chce výsledek (úsporu) bez hlubší analýzy a rozporuje nutnost Etapy I. Proto je důležité, aby řešitel vhodně **zvolil rozsah úvodní etapy** a vysvětlil zadavateli její význam.
- Během Etapy I je obvykle možné **navrhnout základní úsporná opatření** s rychlým ekonomickým efektem. Někdy je možné vhodná opatření odhadnout již během úvodní analýzy a nakonec může jít o ta nejúčinnější. Zadavatel je rychlým efektem činnosti výzkumného týmu motivován k další spolupráci.



Obr. 5.1 Konkretizovaná metodika řešení projektů energetických úspor

3. Etapa II:

- Druhá etapa je hlavním zdrojem poznatků pro **rozšíření datové báze**. Důležitá je zejména archivace poznatků o provozních a ekonomických parametrech jednotlivých prvků systému. Jedná se především o výkony a účinnosti všech zdrojů a spotřebičů a dále o investiční náklady spojené se všemi nově zakoupenými technologiemi.
- Výstupem Etapy II může být také **nový výzkumný projekt**, zaměřený například na inovaci konkrétního procesního zařízení (viz případové studie v kap. 4.1.4 a 4.1.5).
- Při obhajobě úsporných opatření u zadavatele hraje velký význam schopnost doložit navrhované řešení **referencí** nebo ho ověřit ve zkušebně.
- Výpočet kritérií technicko-ekonomické efektivity může být u rozsáhlejších projektů náročný. Velkou komplikací bývá dostupnost informací o investičních nákladech spojených s nákupem nových technologií. Nejvíce se využívá **doba návratnosti** investice a jako výstup pro zadavatele lze doporučit závislost doby návratnosti na výši investice.
- Při dosahování úspor je třeba brát ohled na **projektované parametry vnitřního prostředí objektů**. Výsledkem úsporných opatření by nemělo být např. snižování teploty pod minimální projektem stanovenou hodnotu, což by mělo být využito jako omezení při případné optimalizaci. Nedostatečné vytápění objektů může způsobovat zvyšování vlhkosti v prostoru s rizikem tvorby plísní. Nedostatečný ohřev teplé vody zase zvyšuje hygienická rizika spojená s jejím přímým využitím apod.

4. Etapa III:

- Zadavatel chce obvykle rychle dosáhnout úspory. Nejběžnější a nejefektivnější formou podpory implementace úsporných opatření je tedy **přímé zapojení výzkumného pracovníka do realizace**.
- Technickou zprávu není žádoucí koncipovat jako rozsáhlé výzkumné dílo, ale jako **účelné a přehledné shrnutí** hlavních zjištění a dosažených výsledků.

5. Po úspěšném předání díla:

- Výsledky projektu mohou mít více podob (prototyp, patent, užitný vzor apod.). Vzhledem k charakteru výzkumu v oblasti energetické efektivity lze ale jako základní výstup doporučit **publikaci**.
- Druhým důležitým výstupem z projektu by mělo být rozšíření **datové báze zkušeností a matematických modelů**. Přínosem průběžného doplňování této databáze je rozšiřování portfolia možných aplikačních oblastí metodiky a zvyšování efektivity řešení dalších projektů.
- Zpětné hodnocení projektu je pro výzkumný tým cenným zdrojem informací a může být provedeno i **bez nároku na odměnu**.

Navržená metodika není v plné míře uplatnitelná vždy a všude. Jednotlivé projekty se významně liší a je třeba **individuálního přístupu** ke každému z nich. Náplň jednotlivých etap je třeba přizpůsobit technickému stavu energetického systému a jeho rozsahu. Případové studie ukazují konkrétní dílčí odchylky od navrhované náplně jednotlivých etap. Někdy je vhodné rozdělit analýzu nebo návrh úsporných opatření na více dílčích kroků (viz

případ popsany v kap. 4.1.1). V některých případech je Etapa I věnována pouze rozšíření systému pro sběr dat (viz případ popsany v kap 4.2.2). Jindy už je možné přejít v rámci první etapy přímo k tvorbě matematického modelu nebo návrhu konkrétních opatření (viz případy popsané v kap. 4.1.2 a 4.1.3). Navržená metodika si proto neklade nárok na definitivnost. Kvalitní výsledky s dlouhodobým efektem jsou však obvykle podmíněny **přítomností všech tří klíčových prvků** uvedených v kap. 2:

- zajištění kvalitní datové báze,
- sestavení věrohodného popisu řešeného systému,
- a provedení výpočtů směřujících k volbě optimálního úsporného opatření.

Při řešení jednotlivých projektů je třeba hledat cesty k dalšímu zvyšování efektivity výzkumné činnosti, která je v tomto případě zaměřena na velmi aktuální otázku energetických úspor a souvisejících ekonomických a environmentálních dopadů. Navrženou metodiku je ve světle případových studií nutno chápat jako otevřený koncept, který by se měl s každým dalším výzkumným projektem vyvíjet. Vedle projektů zaměřených na energetickou náročnost energetických systémů může být metodika aplikována i na další technologie a procesy. Tyto technologie mohou být součástí energetického systému průmyslového podniku nebo může jít o jednotlivé spotřebiče (viz případy popsané v kap. 4.1.4 a 4.1.5).

6 ZÁVĚR

Předkládaná práce je shrnutím hlavních poznatků autora z oblasti hospodárnosti energetických systémů průmyslových podniků a větších komplexů budov. V uvedené oblasti je významná poptávka po zvyšování energetické efektivity a dosahování úspor, což vytváří prostor pro uplatnění nových výzkumných týmů zaměřených na tuto oblast. V průmyslové i komunální sféře je obvyklá jednak technologická rozmanitost využívaných energetických systémů, objektů a procesů a jednak nedůvěra provozovatelů v nepodložená řešení. Standardní postupy energetického managementu nepřinášejí uspokojivé výsledky, což otevírá cestu k využití sofistikovanějších, vědeckých metod. Hlavním cílem práce byla formulace tzv. komplexního přístupu k projektům energetických úspor, jehož jádrem je nová metodika řešení. Navržená metodika vychází z publikovaných teoretických postupů a vlastních zkušeností autora. Byla sestavena ve snaze o vysokou univerzálnost a současně snadnou praktickou aplikovatelnost. Kromě nového systematického postupu vnáší komplexní přístup do řešení projektů také principy procesního inženýrství a vliv dynamiky řešených systémů. Výsledkem jsou úsporná opatření podložená výpočty, která jsou vhodná pro konkrétní provoz.

Při komplexním řešení projektů energetických úspor by měla být vždy využita určitá úroveň matematického modelování. Existence kvalitních matematických modelů umožňuje simulaci různých variant úsporných opatření a také provozních režimů energetického systému. Velký potenciál pro uplatnění matematických modelů je především u složitých systémů, kde není možné zvolit optimální řešení standardními empirickými postupy. Různé úrovně matematického modelování pro oblast energetické efektivity v průmyslové a komunální sféře byly systematicky popsány pomocí pyramidové struktury.

Propojení aktivit výzkumné organizace s reálnými potřebami průmyslových podniků není jednoduchým úkolem. Výzkumný pracovník klade důraz na hlubokou analýzu řešeného systému a uplatnění kreativních, inovativních postupů. Požadavkem provozovatelů energetických systémů je ucelené řešení s konkrétním výsledkem v podobě snížení nákladů na energii, přičemž prioritou jsou jednoduchá implementace a spolehlivost navrženého opatření. Podmínkou úspěšné analýzy energetického systému a výběru správného řešení je dostupnost věrohodných provozních dat. Správný sběr dat je klíčem k uplatnění sofistikovaných postupů v čele s matematickým modelováním a simulací variantních řešení. Výzkumné týmy musí získat potřebná data od příslušných zaměstnanců podniku i z řídicích systémů. Na základě dostatečného množství věrohodných dat lze navrhovat i kreativní úsporná opatření, protože jejich návrh je podložen výpočty a předvídá rizika spojená s jejich implementací.

Na průběh výzkumných projektů má vždy zásadní vliv komunikace se zadavatelem. Průběžné upřesňování náplně projektu, aktivní přístup výzkumného pracovníka a korektní uznání vlastních omezení napomáhají společnému hledání a vzájemné důvěře. V práci byly na základě případových studií popsány konkrétní praktické kroky, které významně přispívají k úspěšnému dokončení projektu. Komplexní přístup k otázce energetické efektivity a jeho implementace v podobě navržené metodiky otevírá cestu k novému, efektivnímu způsobu řešení výzkumných projektů energetických úspor. Může být cennou pomůckou pro výzkumné pracovníky, kteří v této oblasti chtějí spolupracovat nebo již spolupracují s průmyslovými partnery.

Důležité je ještě zdůraznit význam etiky výzkumné práce. Výzkumné týmy by se měly mít na pozoru před požadavky na „úpravu“ dat dle potřeby zadavatele. Častý je také tlak na vyslovování závěrů dříve, než jsou věrohodně podloženy měřením nebo výpočtem. Nekorektní požadavky hrozí zejména v případech, kdy je energetický systém spravován

externím dodavatelem, nikoliv majitelem. Výzkumný tým by měl pracovat na své pověsti věrohodného, objektivního a kompetentního partnera. Vyjít vstříc požadavku na neobjektivní studii může být krátkodobě výhodné, ale z dlouhodobého hlediska snižuje kredit výzkumného týmu i vzájemnou důvěru jeho členů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Li, M., Tao, W., *Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry*. Applied Energy, in press, DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.039.
- [2] Ministerstvo Průmyslu a Obchodu, *Národní akční plán energetické účinnosti ČR*, 2016, [online], dostupné z: <www.mpo.cz/assets/dokumenty/50711/63238/651838/priloha004.pdf>.
- [3] Touš, M., Pavlas, M., Putna, O., Stehlík, P., Crha, L., *Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short- term basis*. Energy, 2015, vol.90, p.137-147, ISSN: 0360-5442, Elsevier.
- [4] Klemeš, J., Varbanov, P., Lam, H., Yusup, S., *Energy, Water and Environmental Footprint Interactions: Implications for the Major Economy sectors of Europe, South East Asia and Worldwide*. Procedia Engineering, 2016, vol.148, p.1199-1205. ISSN: 1877-7058, Elsevier.
- [5] Friedler, F., *Process integration, modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction*. Applied Thermal Engineering, 2010, vol. 30, p.2270-2280, ISSN: 1359-4311, Elsevier.
- [6] Liew, P., Theo, W., Alwi, S., Lim, J., Manan, Z., Klemeš, J., Varbanov, P., *Total Site Heat Integration planning and design for industrial, urban and renewable system*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, in press, DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.086.
- [7] Backlund, S., Thollander, P., Ottosson, M., *Extending the energy efficiency gap*. Energy Policy, 2012, vol.51, p.392-396, ISSN: 0301-4215, Elsevier.
- [8] Ministerstvo Průmyslu a Obchodu, *Výzva I programu podpory Úspory energie*, 2016, [online], dostupné z: <www.mpo.cz/dokument158278.html>.
- [9] International Energy Agency, *Energy Efficiency Market Report*. 2016, [online], dostupné z: <www.gita.org.in/Attachments/Reports/MediumTermEnergyefficiencyMarketReport2015.pdf>.
- [10] Ippolito, M.G., Sanseverino, E., Zizzo, G., *Impact of building automation control systém and technical building management systém on the energy performance call of residential buildings: An Italian case study*. Energy and Buildings, 2014, vol. 69, p.33-40, ISSN: 0378-7788, Elsevier.
- [11] Máša, V., Touš, M., Pavlas, M., *Using a utility system grey-box model as a support tool for progressive energy management and automation of buildings*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, vol.18, no.1, p.195-208, ISSN: 1618-954X, Springer.
- [12] Máša, V., Vondra, M., *Operational Problems: Biomass Boilers with Oversized Output*. Chemical Engineering Transactions, 2015, vol.45, p.331-336. ISBN: 978-88-95608-36-5. ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.
- [13] Xu, L., Pan, Y., Yao, Y., Cai, D., Huang, Z., Linder, N., *Lighting energy efficiency in offices under different control strategies*. Energy and Buildings, in press, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.006.

- [14] Dall'O', G., Galante, A., Pasetti, G., *A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks*. Sustainable Cities and Society, 2012, vol.4, p.12-21, ISSN: 2210-6707, Elsevier.
- [15] BCS Incorporated. *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. 2008, USA, U.S. Department of Energy.
- [16] Yoon, H., Kim, E., Kim, M., Lee, J., Lee, G., Ahn, S., *Towards greener machine tools – A review on energy saving strategies and technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol.48, p.870-891, ISSN: 1364-0321, Elsevier.
- [17] Lund, H., Mathiesen, B., *Energy system analysis of 100% renewable energy systems – The case of Denmark in years 2030 and 2050*. Energy, 2009, vol.34, p.524-531, ISSN: 0360-5442, Elsevier.
- [18] Bianco, V., Scarpa, F., Tagliafico, L., *Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector*. Applied Thermal Engineering, in press, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058.
- [19] Máša, V., Bobák, P., Vondra, M., *Potential of gas microturbines for integration in commercial laundries*. Operational Research, in press, DOI: 10.1007/s13251-016-0263-8.
- [20] Sorrell, S., *Reducing energy demand: A review of issues challenges and approaches*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol.47, p.74-82, ISSN: 1364-0321, Elsevier.
- [21] Zhou, L., Li, Jian., Li, F., Meng, Q., Li, Jing, Xu, X., *Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review*. Journal of Cleaner Production, 2016, vol.115, p.3721-3734, ISSN: 0959-6526, Elsevier.
- [22] Lee, D., Cheng, Ch., *Energy savings by energy management systems: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol.56, p.760-777, ISSN: 1364-0321, Elsevier.
- [23] Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., *Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework*. Journal of Cleaner Production, 2016, vol.112, p.3692-3708, ISSN: 0959-6526, Elsevier.
- [24] Thumann, A., Younger, W.J., Niehus, T., *Handbook of energy audits*. The Fairmont Press, 2010, Lilburn, US, 8th ed., ISBN: 978-1-4398-2145-9.
- [25] Kluczek, A., Oslzewski, P., *Energy audits in industrial processes*. Journal of Cleaner Production, in press, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.123.
- [26] Fang, W., Miller, S., Yeh, Ch., *The effect of ESCOs on energy use*. Energy Policy, 2012, vol.51, p.558-568, ISSN: 0301-4215, Elsevier.
- [27] Bertoldi, P., Rezessy, S., Vine, E., *Energy service companies in European countries: Current status and a strategy to foster their development*. Energy Policy, 2006, vol.34, p.1818-1832, ISSN: 0301-4215, Elsevier.
- [28] Pätäri, S., Sinkkonen, K., *Energy Service Companies and Energy Performance Contracting: is there a need to renew the business model? Insights from a Delphi study*. Journal of Cleaner Production, 2014, vol.66, p.264-271, ISSN: 0959-6526, Elsevier.

- [29] Siemens AG, *Optimization of drive applications covered by savings*, [online], dostupné z: <w3.siemens.com/services/global/en/portfolio/retrofit-modernization/energy_performance_contracting/pages/index.aspx>.
- [30] Chen, Q., Finney, K., Li, H., Zhang, X., Zhou, J., Sharifi, V., Swithenbank, J., *Considering boiler applications in the proces industry*. Applied Energy, 2012, vol.89, p.30-36, ISSN: 0306-2619, Elsevier.
- [31] Lazzarin, R., *Condensing boilers in buildings and plants refurbishment*. Energy and Buildings, 2012, vol.47, p.61-67, ISSN: 0378-7788, Elsevier.
- [32] Kamel, R., Fung, A., Dash, P., *Solar systems and their integration with heat pumps: A review*. Energy and Buildings, 2015, vol.87, p.395-412, ISSN: 0378-7788, Elsevier.
- [33] Taures, a.s., *Zpracování návrhu optimální varianty vývoje teplárenství*. 2011, [online], dostupné z: <tpue.cz/jacube/files/set-plan/navrh_optimalni_varianty.pdf>.
- [34] Ministerstvo Průmyslu a Obchodu, *Národní akční plán pro obnovitelné zdroje energie*. 2016, [online], dostupné z: <www.mpo.cz/dokument169894.html>.
- [35] Stehlík, P., *Up-to-Date Waste to Energy Approach. From Idea to Industrial Application*. 2016, Switzerland, Cham, ISBN: 978-3-319-15466-4, Springer.
- [36] Sun, W., Yue, X., Wang, Y., *Exergy efficiency analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) and ORC-based combined cycles driven by low-temperature waste heat*. Energy Conversion and Management, in press, DOI: 10.1016/j.enconman.2016.12.042.
- [37] ENERGO-ENVI, s.r.o., *Zpracování vybraných vzorkových projektů zvyšování účinnosti užití energie při výrobě a distribuci energie v malých a středních podnicích*. 2013, [online], dostupné z: <www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/ef13_3106_energo_envi_zpracovani-vzorovych-projektu-mpo-efekt.doc>.
- [38] Vytápění, Učební text pro obor instalatér, [online], dostupné z: <www.publi.cz/books/176/02.html>.
- [39] Kroner, M., Müller, E., *An Approach for Reducing Energy Consumption in Factories by Providing Suitable Energy Efficiency Measures*. Procedia CIRP, 2014, vol.17, p.505-510, ISSN: 2212-8271, Elsevier.
- [40] Sesana, M., Grecchi, M., Salvalai, G., Rasica, C., *Methodology of energy efficient building refurbishment: Application on two university campus-building case studies in Italy with engineering students*. Journal of Building Engineering, 2016, vol.6, p.54-64, ISSN: 2352-7102, Elsevier.
- [41] Smith, L., Ball, P., *Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flow*. International Journal of Production Economics, 2012, vol.140, p.227-238, ISSN: 0925-5273, Elsevier.
- [42] Bobák, P., *Snižování energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla*. Dizertační práce, 2014, 95 s., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [43] Bobák, P., Galčáková, A., Pavlas, M., Kšenzuliak, V., *Computational Approach for Energy Intensity Reduction of Professional Laundry Care Process*. Chemical Engineering Transactions. 2011, vol.25, p.147–152, ISBN: 978-88-95608-16-7, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.

- [44] ČEA, *Klimatické údaje*. 2002, [online], dostupné z: <www.mpo-efekt.cz/dokument/2186.pdf>.
- [45] Vališ, I., *Výkony kotelen s kaskádovým řazením kondenzačních kotlů*. 2006, [online], dostupné z: <www.tzb-info.cz/3227-vykony-kotelen-s-kaskadovym-razenim-kondenzacnich-kotlu>.
- [46] Máša, V., *Regulace tepelného zdroje, kombinace plynových a biomasových kotlů*. Diplomová práce, 2006, 77s, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [47] České vysoké učení technické v Praze, *Projekční podklady a pomůcky – Návrh zařízení plynové kotelny a spotřeba paliva*. [online], Katedra technických zařízení budov, dostupné z: <<http://tzb.fsv.cvut.cz/?mod=podklady&id=28&TZB=cf1d60>>.
- [48] Havlásek, M., Máša, V., *Využívání nízkopotenciálního odpadního tepla v průmyslu*. Energetika, 2016, č.4/2016, s.114-119, ISSN: 0375-8842, Asociace energetických manažerů, z.s.
- [49] Galád, V., Matějček, J., Müller, V., Ráž, J., *Aktivní úspory tepla metodou termohydraulického řešení pro 21. století*. 2008, [online], dostupné z: <www.tzb-info.cz/4832-aktivni-uspory-tepla-metodou-termohydraulickeho-reseni-pro-21-stoleti-iv-dil>.
- [50] NETME Centre, *Energeticky náročné procesy*. [online], dostupné z: <www.netme.cz/cs/energy-intense-processes/>.
- [51] Noskievič P., *Modelování a identifikace systémů*. 1999, Ostrava, ISBN: 80-7225-030-02, Montanex.
- [52] Máša, V., Touš, M., Pavlas, M., *Using a utility system grey-box model as a support tool for progressive energy management and automation of buildings*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, vol.18, no.1, p.195-208, ISSN: 1618-954X, Springer.
- [53] Afram, A., Janabi-Sharifi, F., *Review of modeling methods for HVAC systems*. Applied Thermal Engineering, 2014, vol.67, no.1-2, p.507-519, ISSN: 1359-4311, Elsevier.
- [54] Vysoká škola Báňská, *Základy procesního inženýrství*, 2010, [online], dostupné z: <www.homen.vsb.cz/~wih15/ProcIng/ESF_ZaklProcIng.pdf>.
- [55] Pavlas M., *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů*. Dizertační práce, 2008, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [56] Touš M., Houdková L., Bébar L., Pavlas M., Stehlík P., *Waste-to-energy (W2E) software - a support tool for decision making process*. Chemical Engineering Transactions, 2009, vol.18, p.971-976, ISBN: 978-88-95608-04-4, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.
- [57] Švarc I., *Automatizace – Automatické řízení*. 2002, Brno, ISBN: 80-214-2087-1, CERM.
- [58] Eck V., *Identifikace a modelování*. skriptum, 1987, Praha, 103s., ČVUT.
- [59] Isermann R., *Identifikation Dynamischer Systeme 1*. 1992, Berlin, ISBN: 3-540-54924-2, Springer-Verlag.

- [60] Mathworks, *Matlab documentation*. 2016, [online], dostupné z: <www.mathworks.com/help/matlab>.
- [61] Macalík R., *Identifikace regulované soustavy – experimentální jednotka pro spalování biomasy*. Diplomová práce, 2008, 73s., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [62] Bašta, J., *Dva přístupy k odstraňování „taktování“ kotle*. 2010, [online], dostupné z: <www.topin.cz/download.php?idx=86049&di=7>.
- [63] Bašta, J., *Řízení a regulace ve vztahu k hospodárnosti provozu vytápěcích zařízení*. 2007, [online], dostupné z: <www.casopisstavebnictvi.cz/rizeni-a-regulace-ve-vztahu-k-hospodarnosti-provozu-vytapecich-zarizeni_N518>.
- [64] Máša, V. *Matematický model kotle na biomasu pro účely řízení*. Dizertační práce, 2010, 119s., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [65] Polach, V., *Parní kotle*. [online], dostupné z: <www.kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf>.
- [66] Vidim, J., *PWM signál a práce s ním*. 2014, [online], dostupné z: <www.vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/11990-pwm-signal-a-prace-s-nim>.
- [67] Máša, V., Pavlas, M., Švarc, I., *Mathematical Model of Biomass Boiler for Control Purposes*. Chemical Engineering Transactions, 2011, vol.25, no.1, p.743-748, ISBN: 978-88-95608-16-7, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.
- [68] Máša, V., Bobák, P., Stehlík, P., Kuba, P., *Analysis of energy efficient and environmentally friendly technologies in professional laundry service*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2013, vol.15, no.3, p.445-457, ISSN: 1618-954X, Springer.
- [69] Bobák, P., Pavlas, M., Máša, V., Jegla, Z., Kšenzuliak, V., *Heat Recovery in Professional Laundry Care Process*. Chemical Engineering Transactions, 2012, vol.29, no.1, p.391-396, ISBN: 978-88-95608-20-4, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.
- [70] Máša, V., Bobák, P., Stehlík, P., Kuba, P., *Energy Intensive Process in Professional Laundry Service: Up to date Approach*. Chemical Engineering Transactions, 2013, vol.35, no.1, p.259-264, ISBN: 978-88-95608-26-6, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.
- [71] Kuba, P., Bobák, P., Máša, V., Vondra, M., *Acquisition of Operational Data in Industrial Laundry Facilities*. Chemical Engineering Transactions, 2014, vol.39, p.1645-1650, ISBN: 978-88-95608-30-3, ISSN: 2283-9216, Aidic Servizi Srl.
- [72] Vondra, M., Máša, V., Bobák, P., *The Potential for Digestate Thickening in Biogas Plants and Evaluation of Possible Evaporation Methods*. Chemical Engineering Transactions, 2016, vol.52, no.1, p.787-792, ISBN: 978-88-95608-42-6, ISSN: 2283-9216, Aidic Servizi Srl.
- [73] Vondra, M., Bobák, P., Máša, V., *Využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů*. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2015, č.6/2015, s.35-43, ISSN: 0322-8916, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka.

- [74] Touš, M., Máša, V., Pavlas, M., Avramov, V., *Improving the energy management of a building complex through utility system modelling*. Computer Aided Chemical Engineering, 2014, vol.33, p.445-450, ISBN: 978-0-444-63443-4, Elsevier.
- [75] Máša, V., Havlásek, M., *Integration of air to water heat pumps into industrial district heating substation*. Chemical Engineering Transactions, 2016, vol.52, no.1, p.739-744, ISBN: 978-88-95608-42-6, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.
- [76] ETES, s.r.o. *Kongregace milosrdných sester III. řádu sv. Františka pod ochranou Svaté rodiny v Brně, Grohova ulice, Brno*. 2015, [online], dostupné z: <www.etes-teplo.cz/products/kongregace-milosrdnychsester-iii-radu-sv-frantiska-pod-ochranou-svate-rodiny-v-brne-grohova-ulice-brno/>.
- [77] Miklas, V., *Analýza účinnosti kaskády tepelných čerpadel*. Bakalářská práce, 2016, 74s., Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
c	<i>měrná tepelná kapacita vody</i>	$J/(kg \cdot K)$
c_e	<i>cena elektrické energie</i>	$Kč/kWh$
c_p	<i>cena zemního plynu</i>	$Kč/m_N^3$
$c_{p,d}$	<i>cena za rezervovanou kapacitu zemního plynu</i>	$Kč/m_N^3$
c_o	<i>cena lehkého topného oleje</i>	$Kč/kg$
c_{pen}	<i>pokuta za překročení denní rezervované capacity zemního plynu</i>	$Kč/m_N^3$
$e(t)$	<i>regulační odchylka</i>	-
E_e	<i>spotřeba elektrické energie</i>	kWh/den
$E_{H,nd}$	<i>potřeba energie na vytápění budovy</i>	MJ
$G(s)$	<i>přenosová funkce systému</i>	-
i_{nv}	<i>entalpie napájecí vody</i>	J/h
i_{pp}	<i>entalpie přehřáté páry</i>	J/h
K	<i>zesílení</i>	-
\dot{m}	<i>hmotnostní průtok vody</i>	kg/h
m_o	<i>hmotnost spotřebovaného lehkého topného oleje</i>	kg/den
\dot{m}_{pp}	<i>průtok přehřáté páry na výstupu z kotle</i>	kg/h
P_t	<i>topný výkon zdroje</i>	W
Q_p	<i>objem spotřebovaného zemního plynu</i>	m_N^3/den
$Q_{p,d}$	<i>denní rezervovaná kapacita zemního plynu</i>	m_N^3/den
$Q_{p,pen}$	<i>objem odebraného zemního plynu nad denní limit</i>	m_N^3/den
$Q_{H,nd}$	<i>potřeba tepla pro vytápění budov</i>	MJ
$Q_{ts,Tot}$	<i>celková tepelná ztráta topného systému</i>	MJ
Q_{rvd}	<i>teplo zpětně získané z přídavných zařízení, z topného systému a z okolního prostředí</i>	MJ
$Q_{W,nd}$	<i>potřeba tepla na ohřev teplé vody</i>	MJ
r_o	<i>proporcionální konstanta</i>	-
T	<i>časová konstanta</i>	-
T_D	<i>derivační časová konstanta</i>	-
T_d	<i>dopravní zpoždění</i>	s
T_I	<i>integrační časová konstanta</i>	-
T_n	<i>doba náběhu</i>	s

T_u	<i>doba průtahu</i>	<i>s</i>
T_{vrat}	<i>teplota vratné vody do kotle</i>	<i>K</i>
$T_{výst}$	<i>teplota výstupní topné vody z kotle</i>	<i>K</i>
$U(s)$	<i>Laplaceův obraz vstupní veličiny</i>	-
$u(t)$	<i>vstupní veličina</i>	-
\dot{V}	<i>objemový průtok topné vody</i>	<i>m³/h</i>
$Y(s)$	<i>Laplaceův obraz výstupní veličiny</i>	-
$y(t)$	<i>regulovaná veličina</i>	-
z	<i>účelová funkce</i>	<i>EUR</i>
ΔT	<i>rozdíl teplot, tzv. teplotní spád</i>	<i>K</i>
ρ	<i>měrná hmotnost vody</i>	<i>kg/m³</i>
v	<i>výstup z regulátoru</i>	-

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
<i>ANN</i>	<i>Metoda neuronových sítí</i>
<i>BPS</i>	<i>Bioplynová stanice</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics (výpočtové modelování dynamiky tekutin)</i>
<i>COP</i>	<i>Topný faktor</i>
<i>CZT</i>	<i>Centrální zásobování teplem</i>
<i>ČR</i>	<i>Česká republika</i>
<i>ČSN</i>	<i>Česká technická norma</i>
<i>ELTO</i>	<i>Extra lehký topný olej</i>
<i>EM</i>	<i>Energetický management</i>
<i>EPC</i>	<i>Energetické služby se zárukou</i>
<i>ERP</i>	<i>Strategické plánování a řízení zdrojů podniku</i>
<i>ESCo</i>	<i>Energy Service Company</i>
<i>EU</i>	<i>Evropská unie</i>
<i>CH</i>	<i>Chladicí jednotka</i>
<i>IRC</i>	<i>Individuální regulace teplot</i>
<i>IRR</i>	<i>Internal Rate of Return (vnitřní výnosové procento)</i>
<i>LED</i>	<i>Světelné diody</i>
<i>LENP</i>	<i>Laboratoř energeticky náročných procesů</i>
<i>LR</i>	<i>Lineární regrese</i>
<i>MaR</i>	<i>Měření a regulace</i>
<i>MSF</i>	<i>Vícestupňové mžikové odpařování</i>
<i>ND</i>	<i>Národní divadlo</i>
<i>NO_x</i>	<i>Oxidy dusíku</i>
<i>NPV</i>	<i>Net Present Value (čistá současná hodnota)</i>
<i>ORC</i>	<i>Organický Rankinův cyklus</i>
<i>OZE</i>	<i>Obnovitelné zdroje energie</i>
<i>PC</i>	<i>Počítač</i>
<i>P&ID</i>	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
<i>PID</i>	<i>Proporcionálně integračně derivační</i>
<i>PLC</i>	<i>Programovatelný regulátor</i>
<i>PP</i>	<i>Payback Period (doba návratnosti)</i>
<i>RCH</i>	<i>Reverzní chladicí jednotka</i>

<i>RIV</i>	<i>Rejstřík informací o výsledcích</i>
<i>SCADA</i>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<i>SW</i>	<i>Software</i>
<i>TČ</i>	<i>Tepelné čerpadlo</i>
<i>TUV</i>	<i>Teplá užitková voda</i>
<i>TV</i>	<i>Topná voda</i>
<i>VZT</i>	<i>Vzduchotechnika a klimatizace</i>
<i>W2E</i>	<i>Waste-to-Energy</i>
<i>ZP</i>	<i>Zemní plyn</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Koncepce komplexního přístupu k řešení energetické efektivity	9
Obr. 1.2	Přehled úsporných opatření pro průmyslovou a komunální sféru	11
Obr. 1.3	Model systému managementu hospodaření s energií dle ČSN EN ISO 50 001	13
Obr. 1.4	Pojmy související s energetickou efektivitou v průmyslové a komunální sféře	15
Obr. 1.5	Spotřeba primárních zdrojů energie ve zdrojích nad 200 kW v ČR v r. 2009 [33]	16
Obr. 1.6	Základní prvky tepelného hospodářství průmyslového podniku	18
Obr. 1.7	Schéma standardní otopné soustavy	18
Obr. 1.8	Energetická bilance objektu dle ČSN EN 832	19
Obr. 2.1	Přehledové blokové schéma procesu profesní údržby prádla [42].....	24
Obr. 2.2	PFD diagram procesu profesní údržby prádla při simulaci úsporných opatření [42]	25
Obr. 2.3	Příklad křivky denního odběru tepla v průmyslovém podniku.....	26
Obr. 2.4	Typická křivka ročního trvání potřeby tepla pro otopnou soustavu	27
Obr. 3.1	Obecná metodika řešení projektů v oblasti efektivity energetických systémů	32
Obr. 3.2	Kombinace teoretické a experimentální činnosti při řešení projektů.....	34
Obr. 3.3	Vsádková pračka s parním ohřevem osazená měřidly pro hodnocení spotřeb [42].....	36
Obr. 3.4	Příklad rozložení nákladů na jednotlivé druhy spotřeb pro průmyslový provoz	37
Obr. 3.5	Úrovně matematických modelů používaných při řešení projektů energetických úspor	38
Obr. 3.6	Bilanční model sušiče využívaného v průmyslových prádelnách [42].....	40
Obr. 3.7	Vzhled uživatelského rozhraní SW W2E a simulační model vybraného systému [56].....	41
Obr. 3.8	Základní parametry přechodové charakteristiky.....	43
Obr. 3.9	Hierarchické uspořádání řídicích systémů ve čtyřech úrovních	45
Obr. 3.10	Ukázka vizualizace plynové kotelny ve SCADA systému Metasys [45]	46
Obr. 4.1	Zjednodušené technologické schéma jednotky [67]	54
Obr. 4.2	Nežádoucí kolísání výstupní teploty topné vody	55
Obr. 4.3	Struktura modelu regulované soustavy – jednotky pro spalování biomasy	56
Obr. 4.4	Bilanční model experimentální jednotky na spalování biomasy v SW W2E [64].....	58
Obr. 4.5	Dynamický model regulace experimentální jednotky na spalování biomasy	59
Obr. 4.6	Průběh regulované veličiny $y_1(t)$ při zvýšení žádané teploty topné vody	60
Obr. 4.7	Křivky ročního trvání potřeby tepla pro r. 2012 až 2014.....	62
Obr. 4.8	Křivka denního odběru tepla (12, 2013)	62
Obr. 4.9	Účinnost biomasového kotle v závislosti na provozním výkonu.....	63
Obr. 4.10	Klíčové spotřebiče prádelenského provozu	65
Obr. 4.11	Výstupní protokoly z energetického auditu	66
Obr. 4.12	Technologická linka určená pro praní vaječných skořápek	68
Obr. 4.13	Areál Národního divadla Praha v době řešení projektu	69
Obr. 4.14	Blokové schéma topného a chladicího systému Národního divadla Praha [52]	70
Obr. 4.15	Celkový model energetického systému tvořený modely dílčích aparátů [52]	71
Obr. 4.16	Spotřeba zemního plynu a topného oleje během otopné sezóny.....	72
Obr. 4.17	Areál Kongregace v Brně.....	74
Obr. 4.18	Tepelná čerpadla typu vzduch-voda v kotelně areálu kongregace.....	74
Obr. 4.19	Hodnoty COP v závislosti na teplotě vstupního vzduchu.....	76
Obr. 5.1	Konkretizovaná metodika řešení projektů energetických úspor	78

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1

Dynamika odběru tepla u vybraných procesních zařízení

Příloha č. 2

Výpočet tepelné bilance objektu

Příloha č. 3

Digram ročního trvání potřeby tepla pro lokální kotelnou systému CZT

Příloha č. 4

Příklad zkušebny/laboratoře umožňující zajištění experimentálních dat

Příloha č. 5

Článek [67]: Máša, V., Pavlas, M., Švarc, I., *Mathematical Model of Biomass Boiler for Control Purposes*. Chemical Engineering Transactions, vol.25, 2011, p.743-748, ISBN: 978-88-95608-16-7, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 6

Článek [12]: Máša, V., Vondra, M., *Operational Problems: Biomass Boilers with Oversized Output*. Chemical Engineering Transactions, vol.45, 2015, p.331-336, ISBN: 978-88-95608-36-5, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 7

Článek [19]: Máša, V., Bobák, P., Vondra, M., *Potential of Gas Microturbines for Integration in Commercial Laundries*. Operational Research, in press, DOI: 10.1007/s13251-016-0263-8, Springer.

Příloha č. 8

Článek [68]: Máša, V., Bobák, P., Stehlík, P., Kuba, P., *Analysis of Energy Efficient and Environmentally Friendly Technologies in Professional Laundry Service*. Clean Technologies and Environmental Policy, vol.15, 2013, no.3, p.445-457, ISSN: 1618-954X, Springer.

Příloha č. 9

Článek [72]: Vondra, M., Máša, V., Bobák, P., *The Potential for Digestate Thickening in Biogas Plants and Evaluation of Possible Evaporation Methods*. Chemical Engineering Transactions, vol.52, 2016, p.787-792, ISBN: 978-88-95608-42-6, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 10

Článek [11]: Máša, V., Touš, M., Pavlas, M., *Using a Utility System Grey-box Model as a Support Tool for Progressive Energy Management and Automation of Buildings*. Clean Technologies and Environmental Policy, vol.18, 2016, no.1, p.195-208, ISSN: 1618-954X, Springer.

Příloha č. 11

Článek [75]: Máša, V., Havlásek, M., *Integration of Air to Water Heat Pumps into Industrial District Heating Substation*. Chemical Engineering Transactions, vol.52, 2016, p.739-744, ISBN: 978-88-95608-42-6, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 12

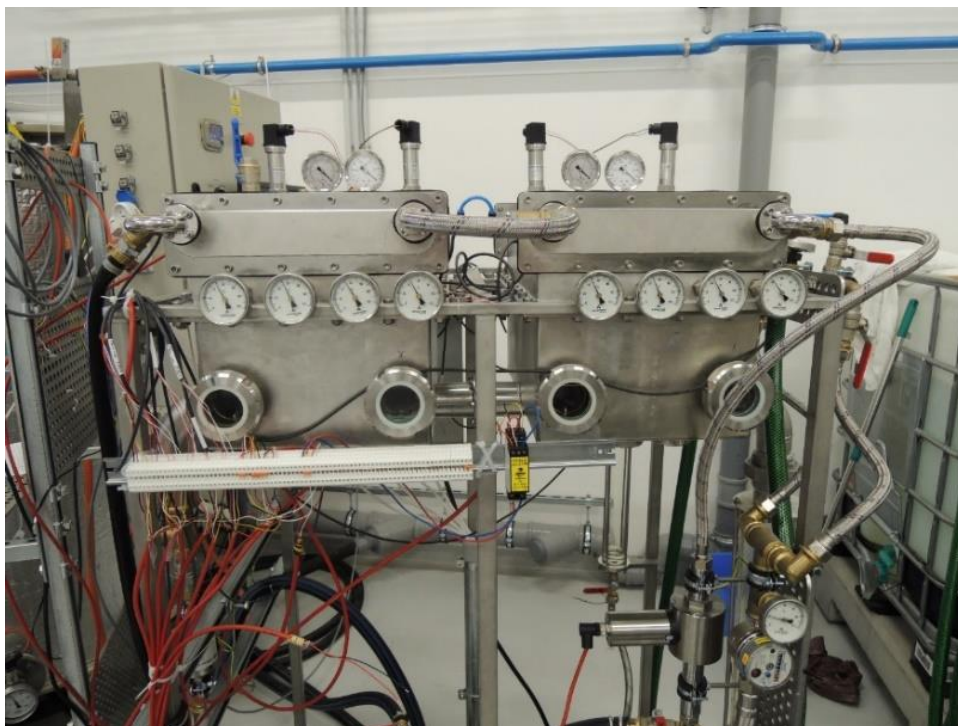
Zjednodušené P&ID schéma zapojení tepelných čerpadel pro ohřev teplé užitkové vody a předehřev topné vody (případová studie)

Příloha č. 1 *Dynamika odběru tepla u vybraných procesních zařízeních*

V této příloze jsou představeny charakteristické křivky denního odběru tepla pro čtyři vybraná procesní zařízení. Jedná se o odsolovací jednotku typu MSF, hydraulický lis používaný při výrobě dveří a dále vsádkovou pračku a parní sušič, což jsou zařízení používaná v komerčních a průmyslových prádelnách. Představené křivky spotřeb vychází z reálných měření a ukazují různorodost způsobu odběru tepla u různých zařízeních.

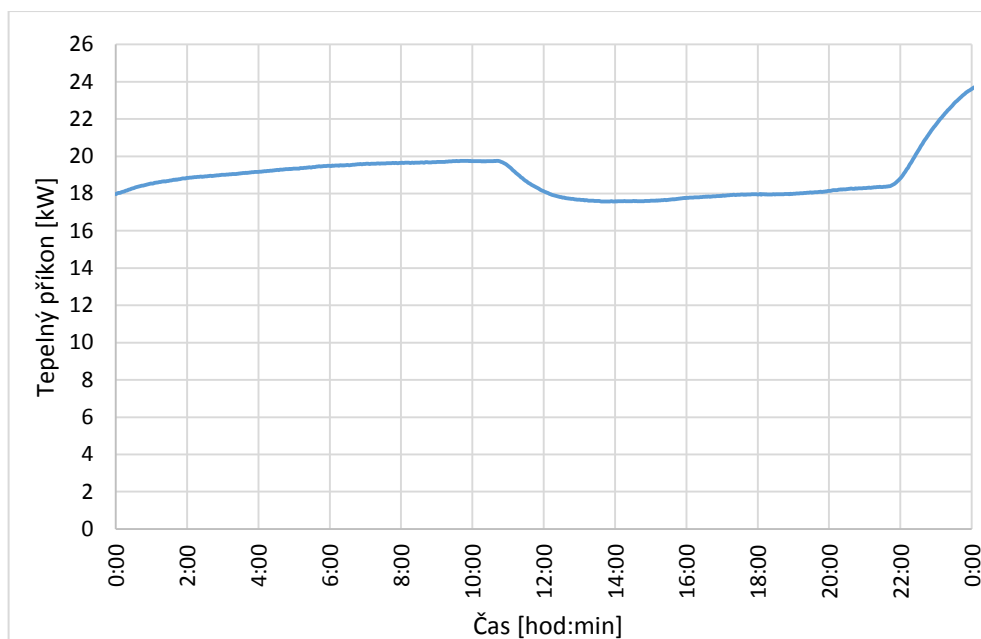
Odsolovací jednotka typu MSF

Prvním příkladem je experimentální jednotka sloužící k odsolování mořské vody na obr. P1.1.



Obr. P1.1 Experimentální odsolovací MSF jednotka

Jedná se o jednotku nižší kapacity, která umožňuje výrobu asi 50 l destilované vody za hodinu. Využívá principu mžikové destilace, která probíhá při vysokém podtlaku (až 0,05 bar(a)). Díky tomu stačí pro experimentální účely teplota slané vody na vstupu okolo 60 °C. Její ohřev zajišťuje výměník tepla na vstupu do jednotky. Provozní výkon výměníku je poměrně konstantní a pohybuje se okolo 20 kW. Reálná spotřeba je závislá na teplotě a průtoku vstupní slané vody, teplotě nástřiku na vstupu do odpařovací komory a úrovni podtlaku v jednotlivých komorách. Jednodenní průběh odběru tepla ukazuje křivka na obr. P1.2.



Obr. P1.2 Křivka denního odběru tepla odsolovací jednotky typu MSF

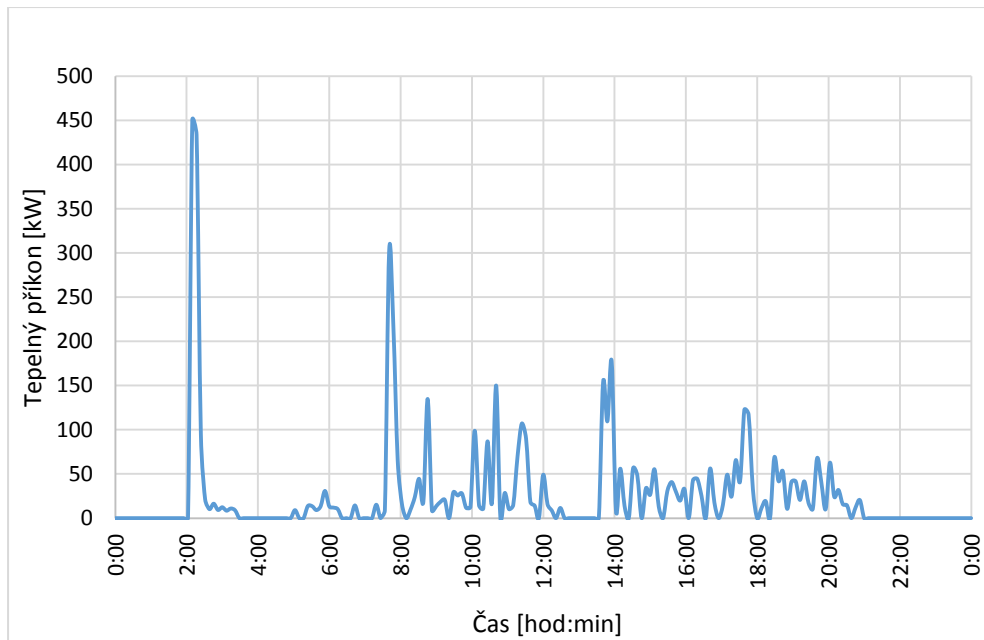
Hydraulický lis používaný při výrobě dveří

Druhým příkladem je spotřeba tepla hydraulického taktového lisu Bürkle ODW používaného při lisování polotovarů ve výrobě dveří (obr. P1.3). Lis je ohříván horkou vodou kvůli zajištění teploty pro vytvrnutí pojiva.



Obr. P1.3 Hydraulický lis Bürkle ODW

Jmenovitý výkon lisu je dle výrobního štítku 47 kW. Reálně naměřené hodnoty jsou však značně proměnlivé v závislosti na provozním vytížení technologie. Při najíždění sahá odběrová špička až k 450 kW (viz obr. P1.4).



Obr. P1.4 Křivka denního odběru tepla hydraulického taktového lisu Bürkle ODW

Vsádková pračka

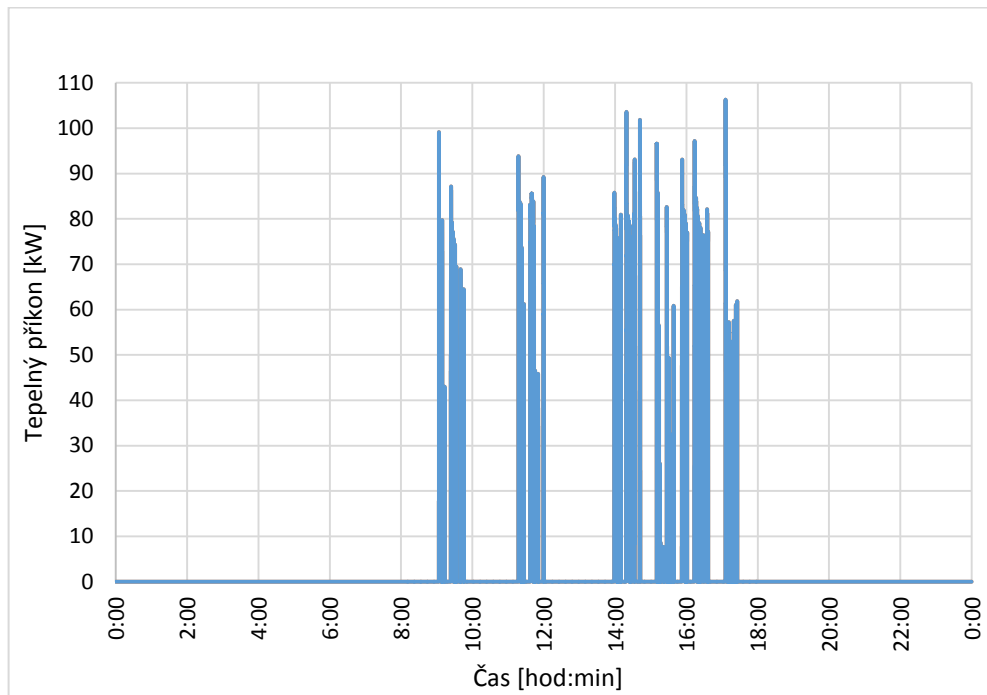
Komerční vsádková pračka PRIMUS FX 24 s kapacitou 24 kg suchého prádla na obr. P1.5 je součástí vybavení Laboratoře energeticky náročných procesů NETME Centre. Laboratoř je představena v příloze 4.



Obr. P1.5 Vsádková pračka PRIMUS FX 24 s kapacitou 24 kg suchého prádla

Pračka využívá k ohřevu prací lázně páru. Odběr páry na ohřev prací lázně probíhá v průběhu pracích cyklů nárazově s ohledem na teplotní požadavky konkrétních pracích programů. Obr. P1.6 ukazuje charakteristický odběr během čtyř pracích cyklů. Pro pračku je typický intenzivní odběr páry pro ohřev lázně na začátku předpírky a hlavního praní a poté nulový odběr během dalších kroků pracího cyklu, kterými je máchání a odstředění. K další

spotřebě dochází až v rámci následujícího pracovního cyklu. Odběrové špičky se pohybují okolo 100 kW (pára 8 bar(g)).



Obr. P1.6 Křivka denního odběru tepla komerční vsádkové pračky PRIMUS FX 24

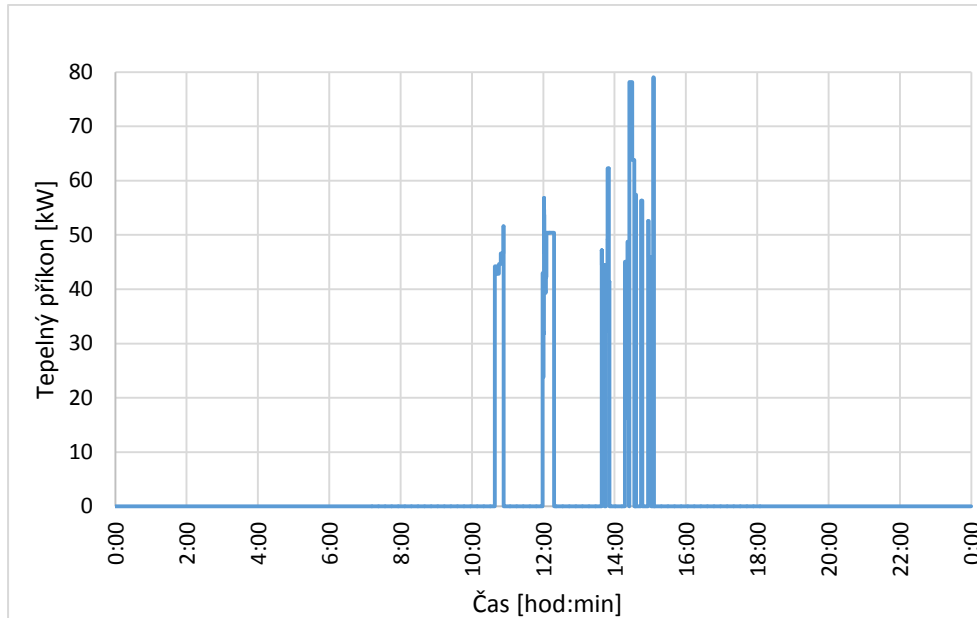
Parní sušič

Prádelenský sušič PRIMUS T 24 s parním ohřevem a kapacitou 24 kg suchého prádla (viz obr. P1.7) je také součástí vybavení LENP NETME Centre. Sušič je využíván pro kompletní sušení froté ručníků a osušek nebo předsušení prádla před jeho žehlením.



Obr. P1.7 Sušič PRIMUS T 24 s kapacitou 24 kg suchého prádla

Pro ohřev sušiče je využita pára, která předává teplo sušicímu vzduchu přes výměník tepla. Jmenovitý příkon v parním ohřevu 27 kW (pára 3 bar(g)) až 36,2 kW (pára 10 bar(g)). Jedná se ovšem o průměrné hodnoty za dobu sušicího cyklu, v jehož průběhu je odběr páry dvoustavově regulován ventilem. Skutečné krátkodobé odběrové špičky dosahují až 80 kW (pára 8 bar(g)).



Obr. P1.8 Křivka denního odběru tepla sušiče PRIMUS T 24

Vybraný průběh na obr. P1.8 ukazuje šest sušicích cyklů, během nichž může být podle potřeby ohřev relativně rovnoměrný nebo cyklicky dvoustavový, když dochází k průběžnému otevírání a zavírání parního ventilu.

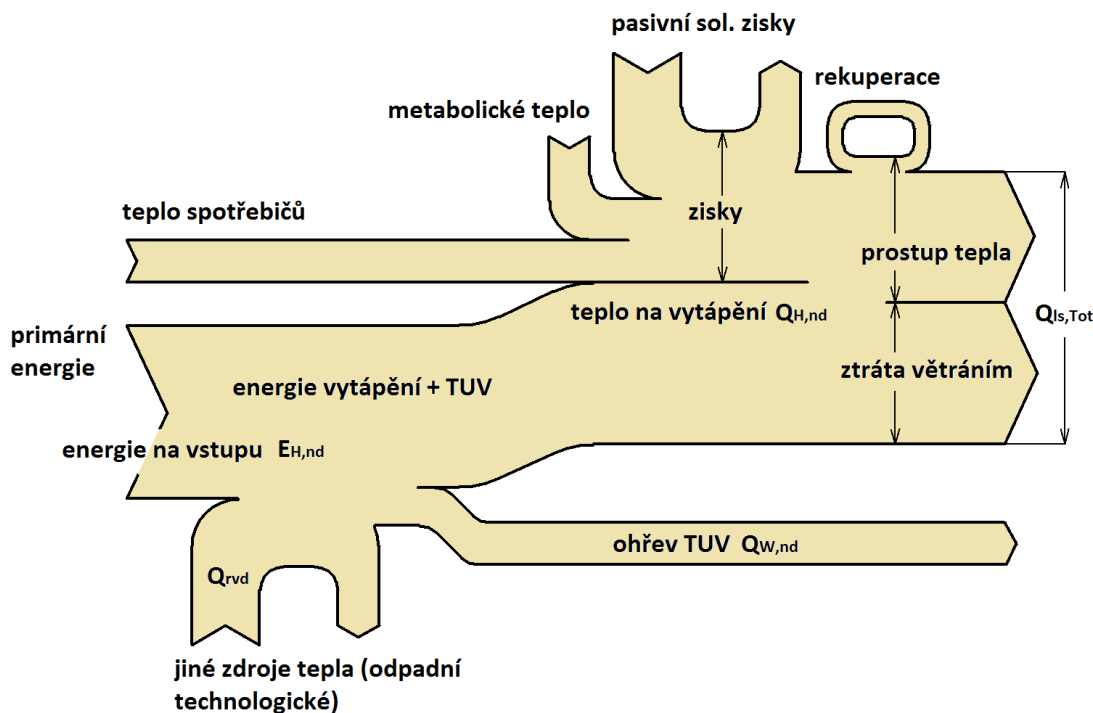
Příloha č. 2 Výpočet tepelné bilance objektu

Výpočet tepelné bilance objektů ilustruje obr. P2.1, který pochází ze starší normy ČSN EN 832. Schéma ze starší normy bylo využito s ohledem na jeho názornost. Při hodnocení konkrétního objektu je třeba kvantifikovat jednotlivé tepelné toky.

Obecně lze rovnici energetické bilance budovy zapsat následujícím způsobem:

$$E_{H,nd} + Q_{rvd} = Q_{H,nd} + Q_{W,nd} + Q_{ls,Tot}, \quad (1)$$

kde	$E_{H,nd}$	potřeba energie na vytápění budovy [MJ]
	Q_{rvd}	teplo zpětně získané z přídavných zařízení, z topného systému a z okolního prostředí [MJ]
	$Q_{H,nd}$	potřeba tepla pro vytápění budov [MJ]
	$Q_{W,nd}$	potřeba tepla na ohřev teplé vody [MJ]
	$Q_{ls,Tot}$	celková tepelná ztráta otopného systému [MJ]



Obr.P2.1 Energetická bilance objektu dle ČSN EN 832

Energetické nároky na přípravu teplé vody ($Q_{W,nd}$) jsou dány počtem osob, které objekt využívají a jejich hygienickými návyky a potřebami. Pokud nejsou známy údaje o skutečné spotřebě teplé vody, je možné potřebu teplé vody stanovit podle ČSN EN 15316-3-1 [1], Vrána následovně:

$$Q_{W,day,nd} = 4,182 \cdot V_{W,day,nd} \cdot (T_W - T_{W,0}), \quad (2)$$

kde	$Q_{W,day,nd}$	denní potřeba tepla na ohřev teplé vody [MJ/den]
	$V_{W,day,nd}$	denní potřeba (objem) teplé vody [m ³ /den]
	T_W	teplota teplé vody [K]
	$T_{W,0}$	teplota studené vody přiváděné do ohřivače (referenční) [K]

Denní potřeba (objem) teplé vody $V_{W,day,nd}$ [m³/den] se stanoví podle vztahu:

$$V_{W,day,nd} = \frac{V_{W,f,day,nd} \cdot f}{1000}, \quad (3)$$

kde $V_{W,day,nd}$ denní potřeba (objem) teplé vody [m³/den]
 $V_{W,f,day,nd}$ denní specifická potřeba teplé vody na podlahovou plochu [l/(m².den)]
 f podlahová plocha [m²]

Orientační hodnoty specifické potřeby teplé vody $V_{W,f,day,nd}$ jsou tabelizovány ve výše uvedené normě [1]. **Roční potřeba tepla na ohřev teplé vody** $Q_{W,an,nd}$ se získá vynásobením $Q_{W,day,nd}$ počtem dní, kdy je objekt využíván. Výpočet dle ČSN EN 15316-3-2 a 3 dále zahrnuje tepelné ztráty rozvodu teplé vody, zásobníku teplé vody a přívodního a zpětného potrubí topné vody k ohřivači vody.

Roční potřeba tepla na vytápění ($Q_{H,an,nd}$) je dána klimatickými podmínkami během roku.

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn}, \quad (4)$$

kde $Q_{H,nd}$ potřeba tepla na vytápění [MJ]
 $Q_{H,ht}$ množství přeneseného tepla v režimu vytápění [MJ]
 $\eta_{H,gn}$ faktor využitelnosti tepelných zisků v režimu vytápění [-]
 $Q_{H,gn}$ solární a vnitřní tepelné zisky budovy v režimu vytápění [MJ]

Množství přeneseného tepla v režimu vytápění $Q_{H,ht}$ je závislé na tepelných ztrátách objektu, a tedy na okolní teplotě (5).

$$Q_{H,ht} = (H_T + H_V) \cdot D, \quad (5)$$

kde H_T měrný tepelný tok prostupem [W/°C]
 H_V měrný tepelný tok větráním [W/°C]
 D počet denostupňů [°C.den]

Počet denostupňů odráží vliv klimatických podmínek (6). Jedná se o součin počtu dnů t vytápění v jistém časovém období a rozdílu středních teplot vnitřního a venkovního vzduchu ($\theta_i - \theta_e$) během tohoto období

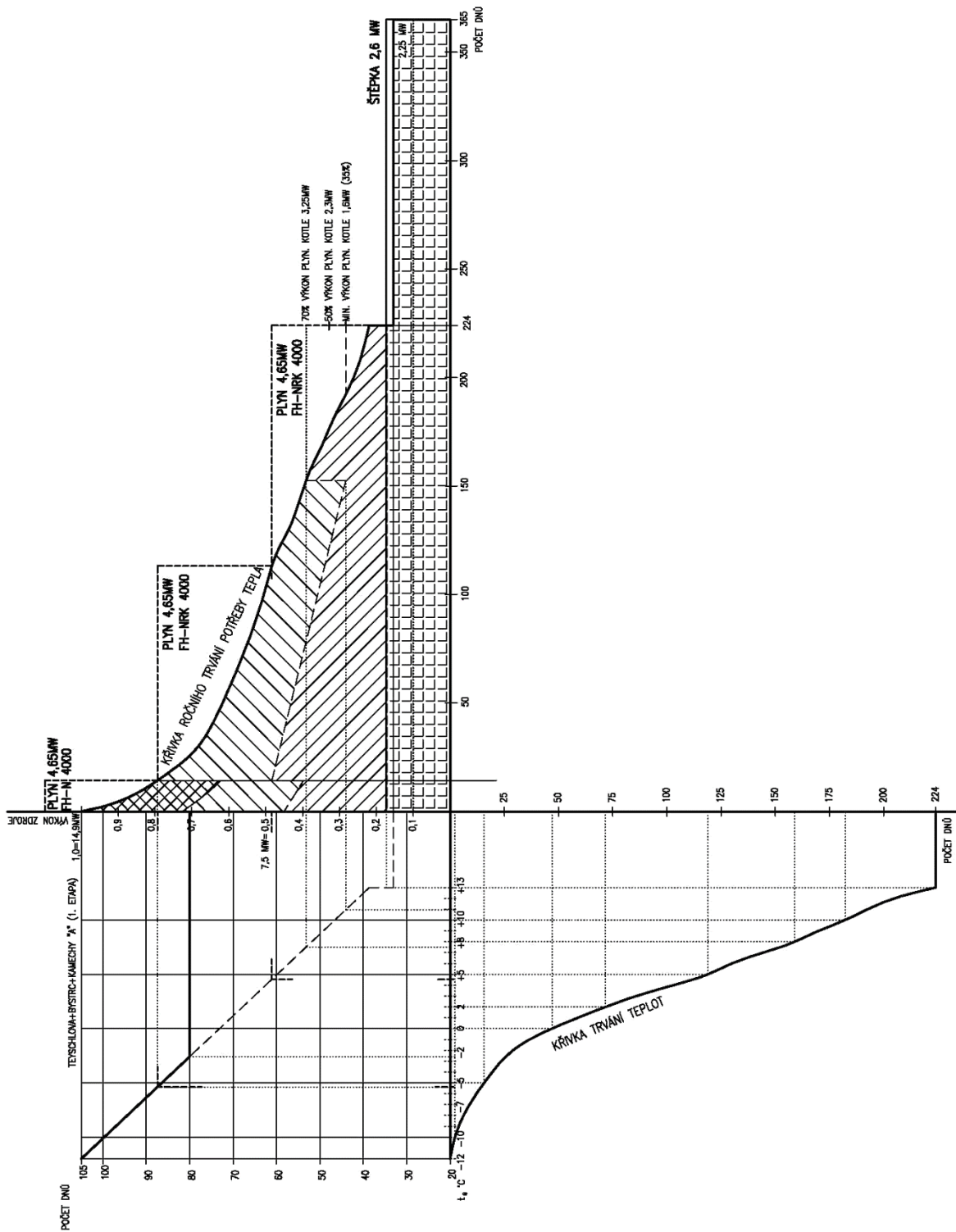
$$D = t \cdot (\theta_i - \theta_e), \quad (6)$$

Při návrhu nového zdroje tepla se pro výpočet potřeby tepla využívá tzv. **klimatických denostupňů**. Ty vychází z historických průměrných teplot udávaných ČHMÚ. Při kontrole provozu již hotových zdrojů je však vhodnější používat tzv. **meteorologické denostupně**. Ty se stanovují podle teplot naměřených v určitém konkrétním časovém úseku, např. během jednoho otopného období. Meteorologické denostupně lze využít i při porovnávání jednotlivých otopných období z hlediska dopadu na potřebu tepla pro vytápění, což umožní např. vyčíslit vlivy úsporných opatření [2]. Meteorologické i klimatické denostupně, délka otopného období a průměrná venkovní teplota a doby slunečního svitu pro cca 68 míst jsou uvedeny v publikaci ČEA [3], která je průběžně aktualizována. Slabé stránky využití denostupňů při predikci spotřeb ukazuje zdroj [4].

Seznam použitých zdrojů

- [1] Vrána, J., *Potřeba vody a tepla pro přípravu teplé vody*. 2010, [online], dostupné z: <www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/6839-potreba-vody-a-tepla-pro-pripravu-teple-vody>.
- [2] ČEA, *Užití EN norem pro výpočet potřeby tepla a využití primární energie*. 2005, [online], dostupné z: <www.mpo-efekt.cz/dokument/5138.pdf>.
- [3] STÚ-E, s.r.o., *Klimatologické údaje*. 2013, [online], dostupné z: <www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/EF13_3105_STU-E_Klimatologie.pdf>.
- [4] Galád, V., *Patří denostupňová metoda do archivu?* 2016, [online], dostupné z: <www.vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/14332-patri-denostupnova-metoda-do-archivu>.

Příloha č. 3 Digram ročního trvání potřeby tepla pro lokální kotelnu systému CZT



Příloha č. 4 Příklad zkušebny/laboratoře umožňující zajištění experimentálních dat

Laboratoř energeticky náročných procesů je moderní zkušebna, která je součástí výzkumného centra NETME Centre (obr. P4.1). NETME Centre neboli *Centrum nových technologií pro strojírenství* je koncipováno jako regionální výzkumné a vývojové centrum, založené na vědecké a výzkumné základně Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.



Obr. P4.1 Experimentální infrastruktura s modelem průmyslové prádelny v hlavní hale Laboratoře energeticky náročných procesů, NETME Centre

Univerzální experimentální infrastruktura této laboratoře umožňuje připojit a testovat široké spektrum domácích a průmyslových spotřebičů. Kromě praček, sušičů, žehliček a jiné prádelenské techniky, na kterou se laboratoř specializuje, to mohou být např. reaktory, kogenerační jednotky, tepelná čerpadla, odparky, myčky, sterilizátory, chladničky apod.

Ústředním procesem, který je v laboratoři provozován a studován, je **proces profesní údržby prádla**. Motivací pro studium tohoto procesu je jeho energetická náročnost a obecná známost. Integrací uceleného souboru prádelenské techniky a provozního příslušenství do infrastruktury laboratoře vznikl plně funkční model průmyslové prádelny s kapacitou až 500 kg prádla za směnu s nadstandardním výzkumným zázemím jako tzv. *model energeticky náročného procesu* (obr. P4.1 a P4.2). Tento model umožňuje testování úsporných opatření v provozním měřítku.

Hlavní vývojovou aktivitou LENP je testování prádelenských strojů zaměřené na jejich inovace. Měřicí technika laboratoře umožňuje centralizovaný sběr dat z měření nejrůznějších fyzikálních veličin – od měření teplot, tlaků a průtoků přes vlastnosti elektrické sítě po tenzometrické měření deformací konstrukce strojů. Dlouhodobý výzkum je zaměřen na specializované testy nových prádelenských strojů. Pro tento účel byla laboratoř schválena organizací **CSA Group** jako zkušebna pro provádění certifikačních testů průmyslových praček pro kanadský trh. Dále v laboratoři probíhalo např. testování radio-frekvenční identifikace prádla nebo analýza degradace textilií s podílem nanovláken vlivem praní.



Obr. P4.2 Válcové žehliče, které jsou součástí modelu průmyslové prádelny v Laboratoři energeticky náročných procesů, NETME Centre

Unikátním prvkem laboratoře je plynová mikroturbína *Capstone C30* (obr. P4.3), která představuje progresivní kogenerační technologii využívající zemní plyn. Při spalování zemního plynu generuje až 30 kW elektrického výkonu a ve spalínách (o teplotě okolo 300 °C) až 90 kW tepelného výkonu (cca 60 kW efektivně).



Obr. P4.3 Plynová mikroturbína Capstone C30 v Laboratoři energeticky náročných procesů, NETME Centre

Příloha č. 5 Článek [67]:

Mathematical Model of Biomass Boiler for Control Purposes

Máša Vítězslav, Pavlas Martin, Švarc Ivan,

Chemical Engineering Transactions, vol.25, 2011, p.743-748.

ISBN: 978-88-95608-16-7, ISSN: 1974-9791, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 6 Článek [12]:

Operational Problems: Biomass Boilers with Oversized Output

Máša Vítězslav, Vondra Marek,

Chemical Engineering Transactions, vol.45, 2015, p.331-336.

ISBN: 978-88-95608-36-5, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 7 Článek [19]:

Potential of Gas Microturbines for Integration in Commercial Laundries

Máša Vítězslav, Bobák Petr, Vondra Marek,

Operational Research, in press.

DOI: 10.1007/s13251-016-0263-8, Springer.

Příloha č. 8 Článek [68]:

*Analysis of Energy Efficient and Environmentally Friendly Technologies
in Professional Laundry Service*

Máša Vítězslav, Bobák Petr, Stehlík Petr, Kuba Pavel,

Clean Technologies and Environmental Policy, vol.15, no.3, 2013, p.445-457.

ISSN: 1618-954X, Springer.

Příloha č. 9 Článek [72]:

*The Potential for Digestate Thickening in Biogas Plants
and Evaluation of Possible Evaporation Methods*

Vondra Marek, Máša Vítězslav, Bobák Petr,

Chemical Engineering Transactions, vol.52, 2016, p.787-792.

ISBN: 978-88-95608-42-6, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 10 Článek [11]:

*Using a Utility System Grey-Box Model as a Support Tool
for Progressive Energy Management and Automation of Buildings*

Máša Vítězslav, Touš Michal, Pavlas Martin,

Clean Technologies and Environmental Policy, vol.18, no.1, 2016, p.195-208.

ISSN: 1618-954X, Springer.

Příloha č. 11 Článek [75]:

*Integration of Air to Water Heat Pumps
into Industrial District Heating Substation*

Máša Vítězslav, Havlásek Martin,

Chemical Engineering Transactions, vol.52, 2016, p.739-744.

ISBN: 978-88-95608-42-6, ISSN: 2283- 9216, Aidic Servizi Srl.

Příloha č. 12 Zjednodušené P&ID schéma zapojení tepelných čerpadel pro ohřev teplé užitkové vody a předehřev topné vody (případová studie)

Popis schématu: Tepelná čerpadla (TČ) jsou v tzv. *splitt provedení* – jedná se o dělenou konstrukci, kdy je tepelné čerpadlo rozděleno na kompresorovou skříň (pozice 2a–d) obsahující kompresor, kondenzátor, regulační techniku aj. a výparníkovou skříň (poz. 1a–d) obsahující expanzní ventil, výparník, ventilátor atd. Obě skříně jsou propojeny chladivovým potrubím. Zdrojem nízkopotenciálního tepla je venkovní vzduch. TČ jsou rovněž vybavena tzv. *desuperheatery*, což jsou tepelné výměníky odebírající teplo o vysoké teplotě přehřátým parám chladiva na výstupu z kompresoru.

Tepelná čerpadla jsou do systému pro ohřev TUV a TV zapojena přes akumulaciční zásobník o objemu 1 000 l (poz. 4). Topný okruh mezi TČ a zásobníkem je doplněn o automatické doplňování topného systému a expanzní nádobu (poz. 3). Oběh vody v tomto okruhu je zajištěn vestavěnými oběhovými čerpadly TČ. Samotný ohřev TUV je realizován ve čtyřech nádržích (poz. 5), přičemž kapacita každé nich činí 1 000 l. Tři z těchto nádrží jsou součástí podružného topného okruhu, který slouží k přenosu tepla z výše uvedených akumulacičních nádob. Tento okruh je opatřen oběhovým čerpadlem (poz. 7). Čtvrtý ohříváč přejímá teplo o vyšší kvalitě přímo z okruhu desuperheaterů. Oběh je zajištěn pomocí vlastního oběhového čerpadla (poz. 6).

