

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 392*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Petr Mastný*

**Tepelná čerpadla  
v kombinovaných  
tepelných systémech**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

**Ing. Petr Mastný**

**TEPELNÁ ČERPADLA V KOMBINOVANÝCH  
TEPELNÝCH SYSTÉMECH**

HEAT PUMPS IN THE COMBINED  
HEATING SYSTEMS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika  
Školitel: Ing. Jan Gregor, CSc.  
Oponenti: Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl  
Prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.  
Datum obhajoby: 11. 10. 2006

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tepelné čerpadlo, nízkopotenciální teplo, solární kolektor, solární systém, topný faktor, alternativní zdroje energie.

## **KEY WORDS**

Heat pump, low-potential heat, solar collector, solar system, heating factor.

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

# OBSAH

<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> .....	<b>2</b>
<b>KEY WORDS</b> .....	<b>2</b>
<b>OBSAH</b> .....	<b>3</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>1</b> <b>TEPELNÁ ČERPADLA – ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA</b> .....	<b>5</b>
1.1     TOPNÝ FAKTOR TEPELNÉHO ČERPADLA .....	6
<b>2</b> <b>SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ JAKO ZDROJ PRO TEPELNÉ ČERPADLO</b> .....	<b>7</b>
2.1     AKTIVNÍ VYUŽÍVÁNÍ SLUNEČNÍ ENERGIE VE SPOJENÍ S TEPELNÝM ČERPADLEM .....	8
<b>3</b> <b>NÁVRH KOMBINOVANÉHO SYSTÉMU</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b> <b>EKONOMICKO – ENERGETICKÉ HODNOCENÍ REÁLNÉHO SYSTÉMU</b> .....	<b>11</b>
4.1     POROVNÁVANÝ OBJEKT .....	11
4.1.1 <i>Konstrukční popis objektu</i> .....	11
4.2     NÁVRH ENERGETICKÉHO SYSTÉMU PRO VZOROVÝ OBJEKT .....	12
4.2.1 <i>Tepelné čerpadlo v bivalentním zapojení – varianta „A“</i> .....	12
4.2.2 <i>Tepelné čerpadlo ve spojení se solárním systémem – varianta „B“</i> .....	13
4.2.3 <i>Výpočet prosté návratnosti projektu</i> .....	14
4.3     POROVNÁNÍ INVESTICE Z HLEDISKA PENĚŽNÍCH TOKŮ A VNITŘNÍ VÝNOSOVÉ MÍRY PROJEKTU .....	17
<b>5</b> <b>ZÁVĚR</b> .....	<b>21</b>
5.1     SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	21
5.2     SHRNUTÍ VĚDECKÝCH POZNATKŮ A PŘÍNOSU PRÁCE .....	21
5.3     MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU .....	23
<b>6</b> <b>LITERATURA</b> .....	<b>24</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>25</b>
<b>CURRICULUM VITAE</b> .....	<b>26</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>27</b>



# ÚVOD

V posledních několika letech se ve světě stále více dostává do popředí otázka využití alternativních zdrojů energie a to jak z hlediska energetického a ekonomického, ale také z hlediska ekologie. V Evropě se objevuje velká vlna zájmu o alternativní zdroje energie jako jsou solární energie, tepelná čerpadla a energie větru. A právě v souvislosti s rozšiřováním využívání jak sluneční energie, tak alternativních zdrojů energie vůbec, roste význam využívání alternativních zdrojů u nás. Navíc řada i výkonných zdrojů především odpadního tepla má nevhodný teplotní potenciál pro jeho přímé využití. Cílem této práce je vymezení oblasti použití tepelných čerpadel v kombinovaných tepelných systémech, stanovení rozsahu parametrů (výkony, teploty, teplotní spády) s ohledem na možné zdroje a potřeby.

Hlavní myšlenkou je optimalizace spolupráce kombinovaného systému tepelného čerpadla pracujícího ve spolupráci se solárním zdrojem energie.

Je všeobecně známo, že oba systémy, jak tepelné čerpadlo, tak solární systém, mohou pracovat zcela samostatně jako rovnocenné tepelné zdroje. Účinnost (respektive *topný faktor*) obou systémů je závislá na vstupních parametrech. A právě možnost ovlivnění vstupních parametrů tepelného čerpadla mě přivedla na myšlenku spolupráce tepelného čerpadla se solárním systémem. Solární systém bude využíván jako „bivalentní“ zdroj, který by při poklesu vstupní teploty u tepelného čerpadla zvyšoval tuto teplotu na požadovanou hodnotu, která by zaručovala dostatečně vysoký topný faktor u tepelného čerpadla i v období nedostačujících hodnot teploty vstupního média.

K opodstatněnosti takové spolupráce vede také tato skutečnost. Pokud bychom totiž v zimních měsících (kdy je intenzita slunečního záření nejmenší) chtěli solární systém využívat jako hlavní a jediný tepelný zdroj pro vytápění, tzn. dosahovat na výstupu teploty dostatečné pro vytápění, účinnost solárního systému prudce klesá; mimo zimní období by pak nebyl systém plně využit. Jako mnohem výhodnější se jeví možnost využívat v těchto měsících solární systém tak, aby pomáhal zvyšovat teplotu na vstupu do tepelného čerpadla. Na výstupu ze solárního systému by v takovém případě postačila nižší teplota, ale účinnost celého systému by byla vyšší.

Pokud budu uvažovat o spojení tepelného čerpadla se solárním systémem, předpokládám, že bude možné tímto spojením docílit velmi příznivé energetické bilance celého systému. Je zřejmé, že spolupráci těchto dvou systémů nelze posuzovat pouze z hlediska energetického, ale velmi důležitá je zde také ekonomika. Otázkou je, jestli je vhodné investovat do pořízení obou dvou systémů. Ekonomickou analýzu navrženého systému provedu na základě energetického hodnocení systému a bude postavena na cash-flow tohoto energetického systému. Součástí ekonomické analýzy bude také nezbytný výhled do budoucna postavený na odhadu vývoje cen energií v České republice.

Cílem práce je najít optimální nastavení mnou zvoleného systému, a to tak, aby byla obě dvě zařízení (tepelné čerpadlo i solární systém) během roku co nejvíce využívána. A to jak pro vytápění, tak také pro ohřev TUV. V současné době je spolupráce těchto systémů v praxi realizována zcela minimálně, a převážně je na ně pohlíženo jako na dva samostatně pracující systémy. Cílem práce je navrhnout a ověřit systém, ve kterém bude tepelné čerpadlo spolupracovat se solárním systémem, a to tak, že solární systém bude využit k předehřevu vstupního média do tepelného čerpadla. Na základě této hypotézy předpokládám zlepšení energetické bilance celého systému. Cílem práce je také ověřit, zda je kombinace těchto dvou systémů přínosná i z ekonomického hlediska. Pro ekonomickou analýzu jsou pro nás důležité pořizovací náklady na zvolený systém, náklady provozní a v neposlední řadě také celková cena získané energie. Podrobný rozbor ekonomických hledisek, a s ním spojený i výhled do budoucna, zde bude podrobně probrán.

Jednotlivé cíle práce lze shrnout do několika bodů:

- vymezení oblasti použití tepelných čerpadel
- stanovení rozsahu pracovních parametrů tepelných čerpadel s ohledem na možné zdroje energie
- sestavení modelu tepelného čerpadla
- sestavení kombinovaného systému tepelného čerpadla spolupracujícího se solárním systémem
- návrh kombinovaného systému pro reálnou aplikaci
- zhodnocení energetické bilance kombinovaného systému
- ekonomické zhodnocení provozu kombinovaného systému

## 1 TEPELNÁ ČERPADLA – ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA

Pracovním principem tepelného čerpadla je tzv. chladicí okruh s parním oběhem (obrázek 2.1). Tepelné čerpadlo, respektive chladicí okruh, má čtyři základní části [5, 6]:

- výparník

Do výparníku přivádí cirkulující pracovní látka (chlazená kapalina) nízkopotenciální teplo. Přivedené teplo způsobuje vypařování chladiva, páry chladiva se stávají nositelem této energie a přivádějí ji do kompresoru. Cirkulační pracovní látka (primární okruh TČ), ze které byla tepelná energie odvedena, se ochladí a musí být znovu zvýšena její teplota ve zdroji nízkopotenciálního tepla.

- kompresor

Nasává páry z výparníku, stlačuje je a vytlačuje do kondenzátoru. Práce na pohon kompresoru se přemění v teplo, které se přičítá k teplu přivedenému ve výparníku.

- kondenzátor

Z kondenzátoru odvádí cirkulující pracovní látka (topné médium) teplo, které se přivedlo do kondenzátoru z výparníku a kompresoru. Odvedené teplo způsobuje kondenzaci par chladiva. Energie přivedená do kondenzátoru parami chladiva se převádí do cirkulující pracovní látky (sekundární okruh TČ), převedeným teplem se pracovní látka ohřívá a zavádí se do topného systému.

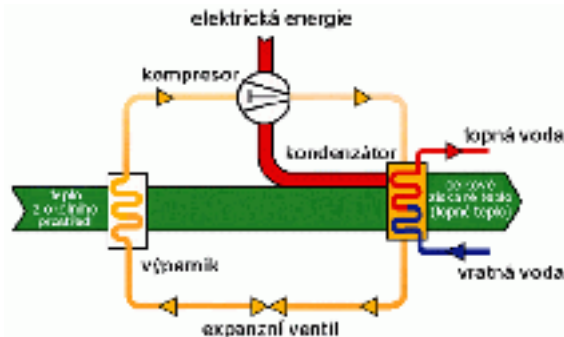
- škrťací ventil

Kapalné chladivo, které zkonzovalo při vyšším (kondenzačním) tlaku se převádí (škrťá) do výparníku, aby se zde opět vypařilo při nižším (vypařovacím) tlaku.

Po stránce technické jsou tepelná čerpadla téměř shodná s chladicími zařízeními. Ale na rozdíl od chladicího zařízení, jehož funkce je většinou nezastupitelná, existuje pro účely ohřevu vždy jiné a zpravidla jednodušší alternativní řešení.

Systémy popsané v této práci pracují na principu chladících oběhů a zajišťují přečerpání nízkopotenciálního tepla na vyšší teplotní hladinu. Podle II. zákona termodynamiky může být toto uskutečněno pouze za přívodu energie.

Produkované teplo může být využito k užitečnému ohřevu vody (teplá užitková voda, cirkulační voda v topných systémech, voda v technologických procesech), nebo vzduchu (v teplovzdušném vytápění, v technologických procesech), řidčeji jiné kapaliny nebo plynu; teplota, při níž se teplo ze systému odvádí, odpovídá požadavkům na ohřev příslušné látky.



Obrázek 1.1 Princip funkce tepelného čerpadla

## 1.1 TOPNÝ FAKTOR TEPELNÉHO ČERPADLA

Poměr získaného tepla (topného výkonu) a energie potřebné pro přečerpání se nazývá *topný faktor*. Vyjadřuje tedy kolikrát více energie získáme než ve formě poháněcí energie přivedeme [2]:

$$\varepsilon = \frac{Q_T}{Q_E} \quad (-; W, W) \quad (1.1)$$

- průměrný topný faktor, vyjadřující poměr průměrných hodnot tepelných výkonů  $Q_{TT}$  a energetických příkonů  $Q_{EE}$

$$\varepsilon = \frac{Q_{TT}}{Q_{EE}} \quad (-; W, W) \quad (1.2)$$

- topný faktor celého systému TČ, zahrnující i nezbytné příkony strojů pro cirkulaci zdroje a ohřivané látky systémem

$$\varepsilon_{TČ} = \frac{Q_{T,TČ}}{Q_{E,TČ}} \quad (-; W, W) \quad (1.3)$$

Poměr topných faktorů libovolného porovnávaného (X) a porovnávacího (Y) oběhu se nazývá porovnávací účinnost (hospodárnost) a je v obecném vyjádření

$$\nu_{X-Y} = \frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_Y} < 1 \quad (-) \quad (1.4)$$

Dosud uvedené vztahy se týkají vlastního přečerpání tepla a za nezbytně převedenou energii je nutno dosazovat čistou poháněcí energii, přivedenou např. u kompresoru poháněného elektromotorem ve formě mechanické energie na hřídel kompresoru, u absorpčního TČ tepelnou energii předanou bohatému roztoku ve vypuzovací apod.

Při výpočtu skutečného topného faktoru, musíme uvažovat ztráty vznikající při provozu reálného tepelného čerpadla [2, 4]:

- velikost teplosměnných ploch:

$$v_{c-c,id} = 0,88 \pm 0,07 \quad (1.5)$$

- použití zidealizovaných pochodů skutečného chladicího oběhu a reálného chladiča:

$$v_{R-c} = 0,84 \pm 0,06 \quad (1.6)$$

- pochody ve skutečném kompresoru:

$$v_{R,sk-R} = 0,58 \pm 0,04 \quad (1.7)$$

- ztráty tepla do okolí:

$$v_{sk-R,sk} = 0,94 - 0,95 \quad (1.8)$$

- příkon pomocných zařízení:

$$v_{TČ-sk} = 0,84 - 0,94 \quad (1.9)$$

Pro topný faktor skutečného oběhu se nejčastěji v literatuře uvádí vztah [2]:

$$\varepsilon_{sk} = 0,9 + 0,74 \cdot \frac{T_0}{T_k - T_0} - 0,0032 \cdot T_0 - 0,765 \frac{T_0}{T_k} \quad (-; K, K) \quad (1.10)$$

nebo zjednodušený vzorec:

$$\varepsilon = 0,4 \cdot \frac{(T_K + 273,15)}{(T_K - T_0)} \quad (-) \quad (1.11),$$

kde konstanta 0,4 prezentuje ztráty při provozu reálného tepelného čerpadla.

## 2 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ JAKO ZDROJ PRO TEPELNÉ ČERPADLO

Sluneční záření převedené solárním systémem na tepelnou energii může sloužit jako energetický zdroj pro TČ. Teplo ze solární energie se pro účely vytápění získává a využívá dvojím způsobem: *aktivním* a *pasivním*. Při aktivním způsobu se teplo v kolektorech převádí do teplotnosné látky (topného média), používaného pro vytápění objektu, nebo přípravu TUV, teplovodními topnými soustavami, např. velkoplošnými radiátory. Další a mnohem lepší možností je využití podlahového nebo stěnového vytápění. Při pasivním způsobu teplo získané skleníkovým efektem, případně dále zvýhodněné akumulací tepla do hmotných stěn, přímo ohřívá osluněné místnosti. Další neosluněné místnosti mohou být vytápěny cirkulací vzduchu.

Na rozdíl od ostatních přírodních zdrojů tepla v určitých obdobích při dostatečně velkém a vhodně pro tento účel konstruovaném solárním systému se jím dosahuje takových teplot a množství tepla, že není třeba použít TČ. Solární systém je tedy, zejména v letních měsících, konkurence schopný TČ, takže se stavějí jednak pouhé solární systémy určené pro ohřev látek (nejčastěji vzduchu a vody) hlavně v letních měsících, méně často v přechodných měsících, jednak se tyto systémy doplňují TČ, přičemž tato kombinace vede k zlevnění vlastního solárního systému a k prodloužení jeho provozu [1].

Návrh systémů využívajících sluneční záření je otázkou hlavně ekonomickou, při jejímž řešení se vychází především z ceny TČ a solárního systému, zejména kolektorů nebo absorbérů. U nízkoteplotních systémů, pracujících s teplotami do 50 až 60°C se nejčastěji používají ploché kolektory, méně často koncentrující nebo vakuované. Konstrukce kolektoru je vždy určitým kompromisem mezi teoretickými poznatky a výrobními možnostmi. Pro tyto systémy jsou obecně výhodnější kolektory jednoduché, jež mají sice nižší účinnost, ale jsou levnější, v provozu spolehlivé při dostatečné životnosti.



## 2.1 AKTIVNÍ VYUŽÍVÁNÍ SLUNEČNÍ ENERGIE VE SPOJENÍ S TEPELNÝM ČERPADLEM

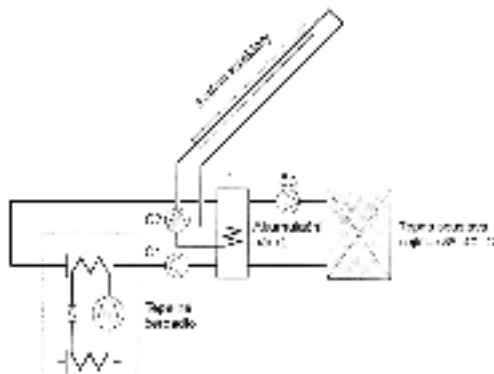
Myšlenka spolupráce aktivního solárního systému a tepelného čerpadla je založena na těchto předpokladech [3]:

- účinnost kolektoru a množství tepla získaného z kolektorového systému závisí na teplotě ohřivaného média
- účinnost a množství tepla je tím větší, čím nižší je tato teplota
- použije-li se získané teplo jako nízkopotenciální pro tepelné čerpadlo, může jeho teplota být o desítky °C nižší než pro přímé vytápění a přípravu TUV.

Podle výše uvedeného by se v topné sezóně zvýšilo jak množství tepla získaného z kolektorového systému, tak především množství tepla získaného tepelným čerpadlem, vlivem vynaložené hnací energie.

Jedna z možností zapojení solárního systému s tepelným čerpadlem je na obrázku 3.1. Oba systémy v tomto zapojení pracují nezávisle. To znamená, že mají společnou akumulaciční nádrž a solární systém „pouze“ zvyšuje teplotu topného média v akumulaciční nádrži, čímž se zvedne účinnost celého systému, a také topný faktor tepelného čerpadla. Pro efektivnost takového zapojení je nutné správně zvolit plochu solárních kolektorů a dimenzovat průtok média kolektorem tak, aby jeho vliv na topné médium v akumulaciční nádrži byl patrný. Je potřeba najít optimální oblast spolupráce těchto dvou systémů.

Nevýhodou takto navrženého systému je, že solární systém musí pracovat s teplotou média vhodnou pro vytápění (teplota vstupu otopné soustavy), čímž se podstatně sníží účinnost samotného solárního systému v zimních měsících. Další nevýhodou takto navrženého systému je cena. Celý systém musí být naddimenzován, což zvyšuje náklady. Důsledkem naddimenzování systému je velmi dlouhá doba návratnosti způsobená nevyužitím solárních panelů v průběhu celého roku.



Obrázek 2.1 Příklad zapojení TČ ve spolupráci s aktivním solárním systémem

## 3 NÁVRH KOMBINOVANÉHO SYSTÉMU

Systém s tepelným čerpadlem může pracovat ve dvou režimech, a to v *monovalentním* nebo *bivalentním*. V monovalentním zapojení kryje energetickou potřebu objektu pouze tepelné čerpadlo. V bivalentním zapojení je k tepelnému čerpadlu přidán pomocný zdroj, který je využíván v případě, kdy teplota média na vstupu tepelného čerpadla poklesne pod určitou hodnotu (tzv. teplotu bivalence).

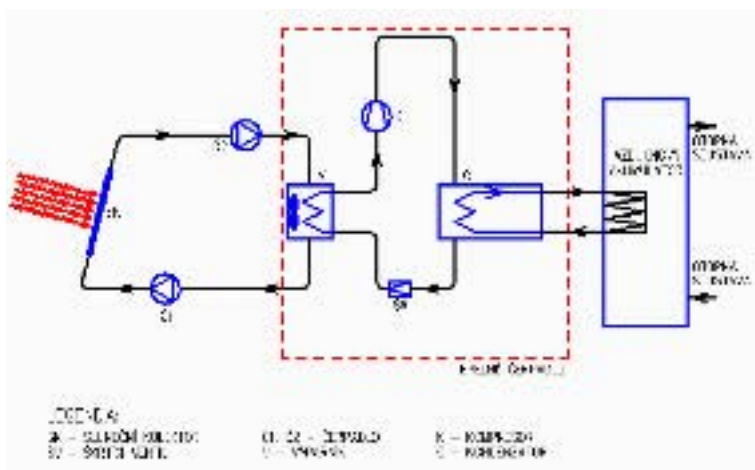
Nová koncepce spočívá ve spojení tepelného čerpadla se solárním systémem jako doplňkovým zdrojem (obrázek 4.1). V navrhovaném systému se při poklesu teploty pod bod bivalence aktivuje solární kolektor a tepelná energie získaná solárním systémem je využita pro zvýšení teploty na vstupu modelu tepelného čerpadla vzduch-vzduch. Zvýšením teploty vzduchu na vstupu tepelného čerpadla docílíme zvýšení *topného faktoru* celého systému. Hlavním přínosem takto sestaveného systému je vysoká účinnost solárního systému, který pracuje s nižší teplotou než je teplota vytápěcího systému.

Pro účely ověření mých předpokladů a hypotéz jsem za pomoci grantu FRVŠ sestavil na Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně funkční model tepelného čerpadla vzduch-vzduch (obrázek 4.2). K sestavenému modelu TČ byl následně přiřazen solární systém, aby bylo možné ověřit původní hypotézu spolupráce těchto systémů.

Tepelné čerpadlo bylo sestaveno pomocí komponent chladírenské techniky a je složeno z těchto základních částí:

- Kompresorová jednotka (kompresor + kondenzátor) KCHJ - CGP14TB3NR
- Výparník EVS 180
- Škrťací ventil TMVX – R 134a

Jako chladicí náplň byla použita látka  $C_2H_2F_4$ /SUVA 134a, známá pod označením R-134a.



**Obrázek 3.1 Technologické schéma kombinovaného systému s modelem tepelného čerpadla**



**Obrázek 3.2 Vnější jednotka modelu tepelného čerpadla**

Hlavním cílem disertační práce je určit, jaký vliv má přiřazení solárního systému na topný faktor tepelného čerpadla. Myšlenkou je využít solární systém k přehřevu vstupního média, v mém případě vzduchu, do tepelného čerpadla a tím zvýšit topný faktor tepelného čerpadla. Jak bylo uvedeno výše, cílem je zvýšit teplotu vstupního vzduchu v rozmezí 5–10°C. Pro toto rozmezí teplotního rozdílu jsem provedl návrh plochy solárního systému. Návrh byl podložen naměřenými hodnotami intenzity slunečního záření a teplotami vzduchu pro vybranou oblast (Brno). Na základě tohoto návrhu jsem následně určil jaký vliv má takové zvýšení teploty vstupního média na topný faktor tepelného čerpadla [11].

měsíc	$t_{stř}$	$I_{stř}$	COP ( $t_{stř}$ )	COP ( $t_{stř}+5^{\circ}\text{C}$ )	COP ( $t_{stř}+8^{\circ}\text{C}$ )	COP ( $t_{stř}+10^{\circ}\text{C}$ )
	$^{\circ}\text{C}$					
leden*	0,6	286	0,97	1,24	1,43	1,57
únor*	5,2	337	1,23	1,54	1,78	1,95
březen*	6,6	397	1,33	1,65	1,90	2,09
duben*	11,6	413	1,72	2,09	2,40	2,64
květen*	13,2	463	1,87	2,25	2,59	2,85
červen	19,2	495	2,56	2,99	3,44	3,79
červenec	20,6	487	2,76	3,19	3,68	4,04
srpen	21,5	454	2,89	3,33	3,84	4,22
září*	17,8	419	2,38	2,80	3,22	3,54
říjen*	8,0	346	1,43	1,76	2,03	2,23
listopad*	7,4	284	1,38	1,71	1,97	2,16
prosinec*	3,4	251	1,12	1,42	1,63	1,79

\* - označuje měsíce, ve kterých probíhala měření na tepelném čerpadle. Pro ostatní měsíce jsou hodnoty COP určeny výpočtem pomocí aproximace z naměřených hodnot.

Jednotlivé hodnoty COP po zvýšení vstupní teploty jsou určeny pro velikost kolektorového pole 6, 10 a 14m<sup>2</sup> při průtoku médi kolektorem 830 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>

**tabulka 1 Změna topného faktoru COP při zvýšení vstupní teploty**

měsíc	$t_{stř}$	$I_{stř}$	$\Delta COP$ ( $S = 6m^2$ )	$\Delta COP$ ( $S = 10m^2$ )	$\Delta COP$ ( $S = 14m^2$ )
	°C	$W.m^{-2}$	%	%	%
leden*	0,6	286	28,0	47,5	62,1
únor*	5,2	337	25,0	44,1	58,4
březen*	6,6	397	24,2	43,1	57,3
duben*	11,6	413	21,1	39,6	53,4
květen*	13,2	463	20,1	38,4	52,2
červen	19,2	495	16,6	34,3	47,7
červenec	20,6	487	15,8	33,4	46,6
srpen	21,5	454	15,2	32,8	46,0
září	17,8	419	17,4	35,3	48,7
říjen	8,0	346	23,3	42,1	56,2
listopad*	7,4	284	23,7	42,5	56,7
prosinec*	3,4	251	26,2	45,4	59,8
$\Delta COP$ (průměr) (%)			21,4	39,9	53,8

\* - označuje měsíce, ve kterých probíhala měření na tepelném čerpadle

**tabulka 2 Procentuální nárůst topného faktoru [9]**

Velikost přírůstku topného faktoru ( $\Delta COP$ ), kterou uvádím v tabulce 2, je platná pro příslušnou velikost kolektorového pole  $S = (6, 10, 14) m^2$  s rychlostí průtoku média kolektory  $830 m^3.h^{-1}$ , což odpovídá rychlosti průtoku vzduchu výparníkem modelu tepelného čerpadla.

V následující tabulce uvádím hodnoty energie, kterou je možno dodat solárním systémem při středních účinnostech kolektoru určených pro žádaná oteplení vstupního média v jednotlivých měsících.

Výsledné hodnoty možného množství dodané energie pomocí solárních kolektorů jsou platné pro úhel sklonu osluněné plochy  $\alpha = 30^\circ$ . Jak jsem zde již několikrát uvedl, výsledné hodnoty korespondují s naměřenými hodnotami z let 2003 až 2004 na UEEN VUT FEKT v Brně.

měsíc	$I_{stř}$	$t_{stř}$	$\tau_{den\ stř}$	$\eta_{stř1}$ ( $\Delta t=5^\circ C$ )	$\eta_{stř2}$ ( $\Delta t=8^\circ C$ )	$\eta_{stř3}$ ( $\Delta t=10^\circ C$ )	$Q_{Gm\ teor}$	$Q_{Gm\ skut\ 1}$	$Q_{Gm\ skut\ 2}$	$Q_{Gm\ skut\ 3}$	
	$W.m^{-2}$	°C	h	%	%	%	$kW.h.m^{-2}$	$kW.h.m^{-2}$	$kW.h.m^{-2}$	$kW.h.m^{-2}$	
leden	286	0,6	8,26	75	68	64	73,23	54,57	49,96	46,88	
únor	337	5,2	10,12	76	71	67	95,49	72,67	67,57	64,17	
březen	397	6,6	12,00	77	73	70	147,68	114,37	107,68	103,21	
duben	413	11,6	13,90	78	73	70	172,22	133,88	126,37	121,37	
květen	463	13,2	15,70	79	75	72	225,34	176,94	168,18	162,34	
červen	495	19,2	16,34	79	75	73	242,65	191,55	182,72	176,84	
červenec	487	20,6	15,70	79	75	73	237,02	186,87	178,11	172,27	
srpen	454	21,5	13,90	78	74	72	195,63	153,36	145,60	140,43	
září	419	17,8	12,00	78	74	71	150,84	117,41	110,93	106,61	
říjen	346	8,0	10,12	76	71	68	108,55	82,85	77,21	73,44	
listopad	284	7,4	8,26	74	68	64	70,38	52,38	47,92	44,95	
prosinec	251	3,4	7,85	73	65	61	61,08	44,62	40,24	37,32	
celkem $Q_{Grok} = \sum Q_{Gm}$ ( $kW.h.m^{-2}$ )							1780,1	1381,5	1302,5	1249,8	
								pro $\eta_{stř1}$	pro $\eta_{stř2}$	pro $\eta_{stř3}$	

**tabulka 3 Předpokládané měsíční úhrny tepelné energie dodané předřazením solárního systému o velikosti  $1m^2$**

## 4 EKONOMICKO – ENERGETICKÉ HODNOCENÍ REÁLNÉHO SYSTÉMU

Ekonomické zhodnocení investice do systému s tepelným čerpadlem je možno provést porovnáním investičních a provozních nákladů s jinými zdroji tepla.

Ekonomické hodnocení jsem provedl pro reálný projekt nízkoenergetického domu s instalovaným tepelným čerpadlem. Pro energetické i ekonomické hodnocení vycházím z hodnot naměřených na modelu tepelného čerpadla a na solárním systému. Výsledkem bude nalezení velikosti solárního systému, pro možnost zvyšování teploty vstupního média na vstupu tepelného čerpadla v požadovaném rozmezí  $\Delta t = 5-10^{\circ}\text{C}$  v průběhu topného období.

### 4.1 POROVNÁVANÝ OBJEKT

Pro možnost srovnání vytápění pomocí tepelného čerpadla s jinými možnými zdroji jsem vyšel z výchozího projektu obytného domu, jehož stavba byla realizována v blízkosti města Brna. Výchozí parametry uvažovaného objektu potřebné pro výpočet uvádím v kapitole 5.1.1.

Nejdříve jsem určil potřebné množství tepla pro vytápění a ohřev TUV. Postup výpočtu je popsán níže. Po určení celkové roční spotřeby energie na vytápění a ohřev TUV jsem provedl srovnání z hlediska vynaložených nákladů na vytápění podle druhu použitého paliva.

Na základě výše uvedených výpočtů jsem určil celkové roční náklady potřebné na vytápění a ohřev TUV.

Celkové ekonomické hodnocení pro uvažovaný objekt jsem provedl z hlediska investičních nákladů, celkových provozních nákladů (fixní, variabilní) a výpočtu doby návratnosti investice do uvažovaného systému s tepelným čerpadlem, případně kombinovaným systémem.

#### 4.1.1 Konstrukční popis objektu

Jako vzorový objekt, na kterém ukážu vhodnost spolupráce tepelného čerpadla se solárním systémem, jsem zvolil novostavbu rodinného domku, který je situován v okolí města Brna. Jedná se o dvoupodlažní objekt projektovaný jako nízkoenergetický dům se zastavěnou plochou  $79\text{ m}^2$ .

V 1. NP se nachází obývací pokoj, jídelna, kuchyň, sociální zařízení a technická místnost (pro jednotky větrání, vytápění a ohřevu TUV). V 2. NP se nachází ložnice, dva pokoje a koupelna.

Svou polohou je objekt situován tak, že hlavní vstup do objektu je orientován na severní stranu. Prosklené části domu jsou situovány převážně na jižní stranu. Ve svém návrhu dále uvažuji o umístění solárního systému právě na jižní stranu. Solární systém bude součástí jednoho z porovnávaných koncepčních řešení.

V tabulce 4 uvádím výchozí parametry pro výpočet potřeby tepla pro uvažovaný objekt. V objektu je uvažuji s nízkoteplotní otopnou soustavou, realizovanou s využitím nízkoteplotního podlahového vytápění.

lokality	$t_e$ °C	$t_{em}$ °C	$d$ dny	$t_{es}$ °C	$Q_C$ kW	$t_{is}$ °C
Brno	-12	13	224	4,4	8,4	19

tabulka 4 Parametry objektu pro výpočet potřeby energie

Pro výpočet potřeby tepla na vytápění objektu jsem využil normu ČSN EN 832 „Tepelné chování budov – Výpočet potřeby energie na vytápění – Obytné budovy“ a vyhlášku MPO č. 291/2001 Sb „Stanovení podrobností užití energie při spotřebě tepla v budovách“.

Z hodnot uvedených v tabulce 4 a s využitím rovnice (5.1) jsem určil tzv. vytápěcí denostupně  $D$ .

$$D = d \cdot (t_{is} - t_{es}) \quad (\text{K.dny}). \quad (4.1)$$

Na základě určených denostupňů jsem pomocí rovnice (5.2) určil potřebné množství tepla potřebného pro vytápění objektu.

$$Q_{VYT,r} = \frac{e}{\eta_0 \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_C \cdot D}{(t_{is} - t_e)} \quad (\text{Wh.rok}^{-1}). \quad (4.2)$$

Pro uvažovaný objekt jsem pomocí rovnic (5.3) a (5.4) určil potřebné množství tepla pro ohřev TUV. Rovnice (5.3) určuje denní potřebu tepla pro ohřev TUV a rovnice (5.4) roční potřebu tepla pro ohřev TUV.

$$Q_{TUV,d} = (1+z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \quad (\text{Wh}). \quad (4.3)$$

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \frac{t_2 - t_{svl}}{t_2 - t_{svz}} \cdot (N - d) \quad (\text{Wh.rok}^{-1}). \quad (4.4)$$

Celkové potřebné množství tepelné energie pro uvažovaný objekt s tepelnou ztrátou  $Q_c = 8,4 \text{ kW}$  na vytápění a ohřev TUV jsem určil jako součet potřebné tepelné energie na vytápění a ohřev TUV (rovnice (5.5)), určené pomocí rovnic (5.1) až (5.4).

$$Q_r = Q_{VYT,r} + Q_{TUV,r} \quad (\text{Wh.rok}^{-1}). \quad (4.5)$$

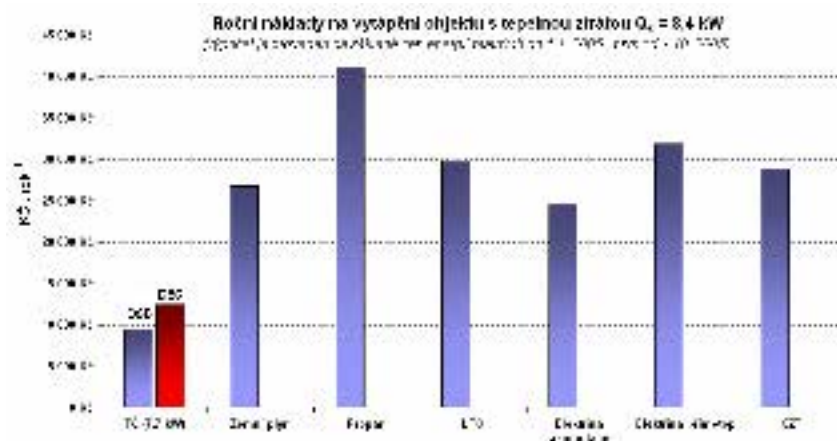
D	$Q_{VYT,r}$		$Q_{TUV,d}$	$Q_{TUV,r}$		e	$\eta_o$	$\eta_r$	$t_1$	$t_2$	$V_{2p}$	z
K.dny	$\text{MWh.rok}^{-1}$	$\text{GJ.rok}^{-1}$	kWh	$\text{MWh.rok}^{-1}$	$\text{GJ.rok}^{-1}$	-	-	-	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{m}^3.\text{den}^{-1}$	-
3270	17,0	61,2	17,4	5,4	19,6	0,72	0,95	0,95	10	50	0,25	0,5

tabulka 5 Souhrnná tabulka potřeb tepelné energie pro uvažovaný objekt

Celková roční spotřeba energie na vytápění a ohřev TUV je:

$$Q_r = 22,4 \text{ (MWh} \cdot \text{rok}^{-1}) = 80,7 \text{ (GJ} \cdot \text{rok}^{-1})$$

Porovnání nákladů na vytápění jsem provedl na základě cen plynu a elektrické energie platných od 1. ledna 2005 (plyn od 1. 10. 2005). Jak bylo uvedeno výše, výpočtová potřeba tepla pro uvažovaný objekt je  $Q_r = 80,7 \text{ GJ}$ . Na obrázku 5.1 jsou porovnány celkové roční náklady na vytápění pro různé druhy paliva, které je dosažitelné v oblasti uvažované pro stavbu objektu [10].



Obrázek 4.1 Porovnání ročních nákladů na vytápění pro zvolený objekt

## 4.2 NÁVRH ENERGETICKÉHO SYSTÉMU PRO VZOROVÝ OBJEKT

### 4.2.1 Tepelné čerpadlo v bivalentním zapojení – varianta „A“

Pro první variantu jsem zvolil tepelné čerpadlo vzduch-voda TCLM 7.7 P v bivalentním zapojení. Tento tepelný zdroj kryje tepelné potřeby objektu z 98% [2]. Pro úplné pokrytí tepelných potřeb objektu jsem ještě přiřadil klimatizační jednotku (tepelné čerpadlo vzduch-vzduch) TCLV 300.

Spolupráce těchto dvou zdrojů zaručuje plné pokrytí tepelných ztrát objektu. Pro možnost využití systému s tepelným čerpadlem je v domě realizována nízkoteplotní podlahová otopná soustava, což zlepšuje parametry celého vytápěcího systému.

## Investiční náklady – varianta „A“

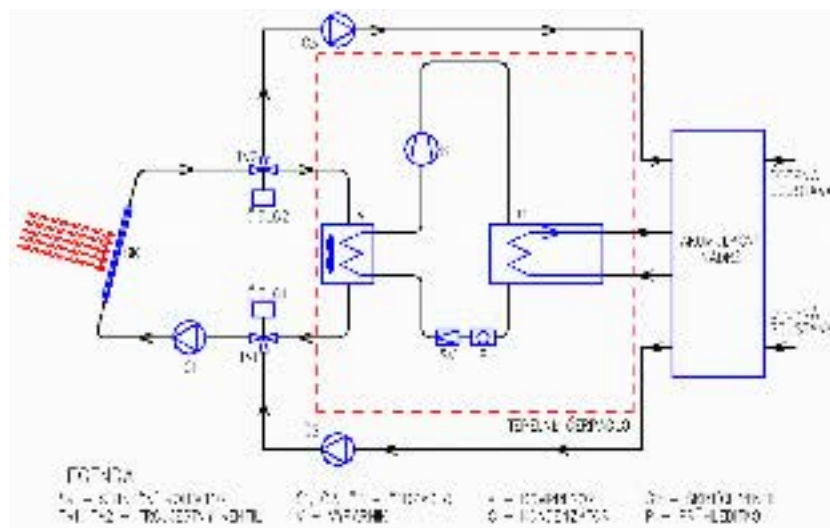
Cenu systému jsem určil na základě cenové nabídky z října 2005 firmy PZP Komplet a.s.

tepelné čerpadlo TCLM 7.7 P a TCLV 300	
cena TČ 7.7 P	205.000,-
cena TČ TCLV	90.000,-
montáž	30.000,-
akumulační nádrž	17.600,-
celkem	352.600,-

tabulka 6 Investiční náklady pro TČ TCLM 7.7 P – varianta „A“

## 4.2.2 Tepelné čerpadlo ve spojení se solárním systémem – varianta „B“

V této variantě počítám se spojením tepelného čerpadla se vzduchovým solárním systémem. Solární systém využívám jako bivalentní zdroj k tepelnému čerpadlu s tím, že jeho hlavním úkolem je zvyšovat teplotu vstupního média do tepelného čerpadla. Tento systém zapojení lze prezentovat jako „paralelně – bivalentní zapojení“. Tepelné čerpadlo je v tomto případě využito po celou topnou sezónu, a to i v době, kdy jeho tepelný výkon nestačí na plné pokrytí tepelných ztrát objektu. Společně s tepelným čerpadlem je v období nedostatečného tepelného výkonu v provozu i solární systém a oba tepelné zdroje pracují současně [11].



Obrázek 4.2 Technologické řešení varianty „B“, kombinovaného systému

Zvolil jsem tepelné čerpadlo vzduch-voda TCLM komplet 5.3 (bez elektrokotle) – tepelné čerpadlo získává teplo ze vzduchu a přečerpává ho na vyšší energetickou hladinu. Tepelné čerpadlo je umístěno v technické místnosti vzorového objektu a skládá se pouze z jedné části.

Typ tepelného čerpadla jsem navrhl tak, že poměr výkonu tepelného čerpadla ku tepelným ztrátám objektu je 63%, což odpovídá 90% ( $15,3 \text{ MWh.rok}^{-1}$ ) tepelné energie dodané tepelným čerpadlem na vytápění objektu [2, 6]. Zbývající část tepelné energie ( $7,1 \text{ MWh.rok}^{-1}$ ) potřebná pro zajištění veškerých tepelných potřeb objektu bude dodána spoluprací tepelného čerpadla se vzduchovým solárním systémem. Pro spolupráci s tepelným čerpadlem vzduch-voda jsem zvolil teplovzdušný kombinovaný solární kolektor MISTRAL DUO, určený pro teplovzdušné vytápění a ohřev vody.

## Investiční náklady – varianta „B“

tepelné čerpadlo TCLM komplet 5.3 bez elektrokotle	
cena TČ	189.300,-
montáž	18.000,-
akumulační nádrž	17.600,-
celkem	224.900,-

tabulka 7 Investiční náklady pro TČ TCLM komplet 5.3 – varianta „B“

teplotvzdušný solární kolektor MISTRAL DUO	
cena panelu (2 m <sup>2</sup> )	17. 999,-
příslušenství	dle počtu kolektorů
montáž	dle počtu kolektorů

**tabulka 8 Investiční náklady pro teplotvzdušný solární kolektor – varianta „B“**

K ceně teplotvzdušného solárního kolektoru je nutno připočítat cenu regulace a montáže tohoto systému. Tyto náklady se odvíjí od velikosti kolektorového systému.

Celkové náklady pro variantu „B“ jsem podle podkladů výrobců a dodavatelů TČ vyčíslil na cenu **224.900,- Kč** zvýšenou o náklady na pořízení odpovídající plochy solárního systému. Výši investičních nákladů na kombinovaný systém TČ + solární systém pro různé plochy přiřazeného solárního systému uvádím v tabulce 9.

systém	cena bez dotace	cena s dotací <sup>1</sup>
	Kč	Kč
TČ +2m <sup>2</sup>	255.499,-	172.730,-
TČ +4m <sup>2</sup>	275.798,-	182.879,-
TČ +6m <sup>2</sup>	296.679,-	193.329,-
TČ +8m <sup>2</sup>	316.496,-	203.228,-
TČ +10m <sup>2</sup>	337.295,-	213.628,-
TČ +12m <sup>2</sup>	361.894,-	225.927,-
TČ +14m <sup>2</sup>	382.033,-	244.563,-
TČ +16m <sup>2</sup>	402.372,-	264.902,-
TČ +18m <sup>2</sup>	422.811,-	285.341,-
TČ +20m <sup>2</sup>	443.650,-	306.180,-
TČ +22m <sup>2</sup>	464.989,-	327.519,-
TČ +24m <sup>2</sup>	484.388,-	346.918,-

**tabulka 9 Investiční náklady na kombinovaný systém TČ + solární systém**

### 4.2.3 Výpočet prosté návratnosti projektu

Prostou dobu návratnosti pro obě varianty jsem určil bez ohledu na možnou výši získané dotace. Změnu doby návratnosti pro tuto investici v případě získání dotačních prostředků uvedu až v závěru výpočtu [8, 11].

Prostá doba návratnosti  $T_s$  se určí jako

$$T_s = \frac{IN}{CF} \quad (\text{rok}). \quad (4.6)$$

kde

IN – investiční výdaje

CF – roční přínosy projektu (cash flow, změna peněžních toků po realizaci projektu)

V následující tabulce uvádím dobu návratnosti v porovnání pro různé druhy paliva vypočítanou pro variantu „A“. Pro výpočet jsem použil rovnici (5.6) bez započítání indexu růstu příjmů a výdajů (roční změna výnosu).

<sup>1</sup> uvažuji se získáním státní dotace v maximální výši dle podmínek uvedených v podkladech [12] pro poskytnutí státní dotace programů 1.A a 4.A

TČ v porovnání s	návratnost (D 55) (roky)	návratnost (D 56) (roky)	Roční úspora nákladů na vytápění při využití TČ (D 55) (Kč)	Roční úspora nákladů na vytápění při využití TČ (D 56) (Kč)
Zemní plyn	20,5	24,6	17.240,-	14.311,-
Propan	11,2	12,3	31.511,-	28.582,-
LTO	17,4	20,3	20.266,-	17.337,-
Elektřina akumulace	23,2	28,8	15.176,-	12.247,-
Elektřina přímotop	15,8	18,2	22.353,-	19.424,-
CZT	18,3	21,5	19.294,-	16.365,-

**tabulka 10 Prostá doba návratnosti (v letech) systému s TČ – varianta „A“**

Pro kombinovaný systém (varianta „B“) vychází určení prosté doby návratnosti na velikosti přiřazeného solárního systému. Jak jsem již uvedl výše, tato varianta vytápění předpokládá spojení tepelného čerpadla se solárním systémem. Z technických parametrů navrženého tepelného čerpadla vyplývá, že oproti výparníku, který jsem použil u sestaveného modelu TČ je u navrženého tepelného čerpadla průtok média větší ( $q_v = 1420 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), tudíž musím počítat s vyšším průtokem média solárním systémem, čímž se zvětší plocha kolektorů odpovídající požadovanému oteplení vstupního média do tepelného čerpadla. Plochu kolektorů odpovídající požadovanému oteplení vstupního média a zároveň možné procentuální zvýšení topného faktoru tepelného čerpadla ( $\Delta\text{COP}$ ) uvádím v tabulce 11. Hodnoty procentuálního zvýšení topného faktoru COP vychází z měření, která jsem realizoval na modelu tepelného čerpadla a na solárním systému.

	$\Delta t = 4,5^\circ\text{C}$ (S = 10 m <sup>2</sup> )	$\Delta t = 6^\circ\text{C}$ (S = 14 m <sup>2</sup> )	$\Delta t = 8^\circ\text{C}$ (S = 20 m <sup>2</sup> )	$\Delta t = 10^\circ\text{C}$ (S = 24 m <sup>2</sup> )
$\Delta\text{COP}$				
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	20,9	28,0	47,5	62,1
	18,1	25,0	44,1	58,4
	17,3	24,2	43,1	57,3
	14,4	21,1	39,6	53,4
	13,5	20,1	38,4	52,2
	10,1	16,6	34,3	47,7
	9,4	15,8	33,4	46,6
	8,9	15,2	32,8	46,0
	10,9	17,4	35,3	48,7
	16,5	23,3	42,1	56,2
	16,9	23,7	42,5	56,7
	19,2	26,2	45,4	59,8
$\Delta\text{COP}_{\text{stř}} (\%)$	14,7	21,4	39,9	53,8

**tabulka 11 Procentuální nárůst COP po přiřazení odpovídající plochy kolektorů určený na základě provedených výpočtů a měření (varianta „B“)**

Hodnoty dodané energie pomocí solárního systému uvedené v tabulce 12 prezentují dva pohledy na solární systém:

- V prvním sloupci ( $Q_{r(71)}$ ) jsou uvedeny hodnoty odpovídající množství dodané energie solárním systémem v průběhu topné sezóny (září + duben), platné pro zvýšení teploty na vstupu tepelného čerpadla v rozmezí  $\Delta t = (5-10^\circ\text{C})$  při průtoku média solárními kolektory  $q_v = 1420 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Tomuto oteplení odpovídá střední účinnost solárního systému  $\eta = 71\%$ .
- Druhý sloupec ( $Q_{r(35)}$ ) prezentuje množství dodané energie solárním systémem při uvažované střední účinnosti  $\eta = 35\%$ , a to celoročně. Těto účinnosti odpovídá oteplení média v kolektoru  $\Delta t = (21-42^\circ\text{C})$ , dle příslušného měsíce a hodnoty intenzity slunečního záření. Tyto hodnoty oteplení vstupního média odpovídají parametrům požadovaných pro otopnou soustavu.

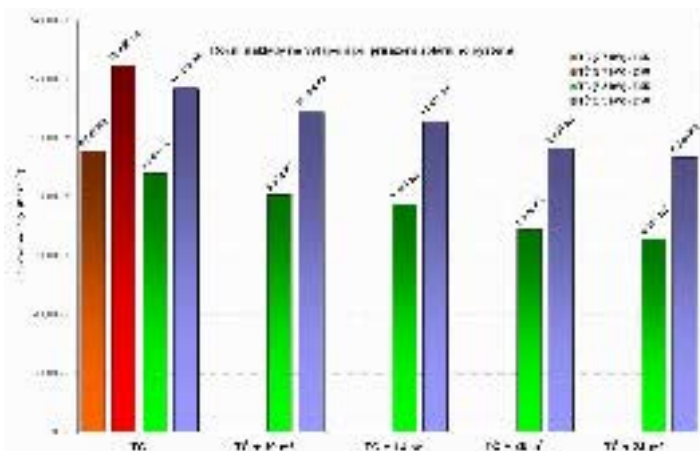


S	$Q_{r(71)}$	$Q_{r(35)}$
m <sup>2</sup>	MW.h.rok <sup>-1</sup>	MW.h.rok <sup>-1</sup>
2	1,25	1,49
4	2,50	2,97
6	3,75	4,46
8	5,00	5,94
10	6,24	7,43
12	7,49	8,91
14	8,74	10,40
16	9,99	11,88
18	11,24	13,37
20	12,49	14,85
22	13,74	16,34
24	14,99	17,82
	oteplení $\Delta t$ (5–10°C) - zří + duben -	oteplení $\Delta t$ (21– 42°C) - celoročně -

**tabulka 12** Roční dodávky tepelné energie pomocí solárního systému

V následujících výpočtech uvažuji se středními hodnotami nárůstu topného faktoru ( $\Delta COP_{stř}$ ) tepelného čerpadla při odpovídající velikosti plochy solárního systému přiřazeného dle technických parametrů tepelného čerpadla.

Pro výpočet prosté doby návratnosti jsem nejdříve určil celkové roční náklady na vytápění pro uvažovanou variantu. Na obrázku 5.3 jsem porovnal výši ročních nákladů na vytápění. Srovnání jsem provedl na základě dvou sazeb za elektrickou energii, které platily v roce 2005, a to pro sazbu D55 a D56. Obrázek jasně ukazuje, že roční náklady na vytápění při přiřazení solárního systému k tepelnému čerpadlu klesají. Zajímavé bude, jak se tato skutečnost projeví na prosté době návratnosti u varianty „B“. Abych mohl určit prostou dobu návratnosti, musel jsem nejdříve vyčíslit peněžní toky (úsporu nákladů) pro uvažovaný systém [7].



**Obrázek 4.3** Porovnání ročních nákladů na vytápění pro varianty „A“ a „B“ s přiřazeným solárním systémem (sazba D55 a D56)

Na základě peněžních toků jsem určil prostou dobu návratnosti systému s tepelným čerpadlem s přiřazeným solárním systémem. Výpočet jsem provedl pro velikosti kolektorového pole 10, 14, 20 a 24 m<sup>2</sup>. Jednotlivé doby návratnosti těchto systémů jsou uvedeny v tabulce 13 (pro sazbu D55) a v tabulce 14 (pro sazbu D56).

zdroj tepla	TČ + 10m <sup>2</sup>	TČ + 14m <sup>2</sup>	TČ + 20m <sup>2</sup>	TČ + 24m <sup>2</sup>
	(roky)	(roky)	(roky)	(roky)
Zemní plyn	18,0	20,1	22,3	24,0
Propan	10,2	11,5	13,0	14,1
LTO	15,5	17,3	19,4	20,9
Elektrina akumulace	20,3	22,5	24,9	26,7
Elektrina přímotop	14,2	15,8	17,7	19,1
CZT	16,2	18,1	20,2	21,8

**tabulka 13** Prostá návratnost pro variantu „B“ bez vlivu roční změny výnosu (sazba D55)

zdroj tepla	TČ + 10m <sup>2</sup>	TČ + 14m <sup>2</sup>	TČ + 20m <sup>2</sup>	TČ + 24m <sup>2</sup>
	(roky)	(roky)	(roky)	(roky)
Zemní plyn	21,3	23,6	25,9	27,8
Propan	11,2	12,5	14,1	15,3
LTO	17,9	19,9	22,0	23,7
Elektřina akumulace	24,4	27,0	29,5	31,5
Elektřina přímotop	16,1	17,9	20,0	21,5
CZT	18,8	20,9	23,1	24,9

**tabulka 14 Prostá návratnost pro variantu „B“ bez vlivu roční změny výnosu (sazba D56)**

Porovnáním prosté doby návratnosti u varianty „A“ s variantou „B“ jsem došel k závěru, že varianta „B“ je z tohoto hlediska výhodnější. Prostá doba návratnosti u této varianty je příznivější než u varianty obsahující jen tepelné čerpadlo s klimatizační jednotkou. Při ploše přiřazeného solárního systému o velikosti 14 m<sup>2</sup> je prostá doba návratnosti projektu „B“ srovnatelná s prostou dobou návratnosti u projektu „A“. Prostá doba návratnosti však není kritériem, které má velkou vypovídací hodnotu, jelikož zde není zohledněna doba životnosti zařízení, časová hodnota peněz a současná hodnota budoucích příjmů. Jedná se proto pouze o orientační kritérium. V následující části práce uvedu porovnání obou variant z hlediska peněžních toků a vnitřní výnosové míry projektu.

Zbývá ještě určit velikost kolektorového pole tak, aby byly ve spolupráci s tepelným čerpadlem pokryty veškeré energetické potřeby pro vzorový objekt. Navržené tepelné čerpadlo s tepelným výkonem 5,3 kW pokrývá potřeby domu na vytápění z 90%. Zbýlých 10% a energii potřebnou na ohřev TUV musí být dodány za pomoci solárního systému.

Jak jsem uvedl výše potřeba tepla na vytápění je pro vzorový objekt 17,0 MWh.rok<sup>-1</sup> a potřeba tepla na ohřev TUV 5,4 MWh.rok<sup>-1</sup>. Tepelné čerpadlo kryje potřebu tepla pro vytápění z 90%, což odpovídá 15,3 MWh.rok<sup>-1</sup>. Pro zabezpečení celé potřeby tepla pro vytápění a ohřev TUV je ještě potřeba dodat 7,1 MWh.rok<sup>-1</sup> tepelné energie, a to pomocí solárního systému.

Předběžnou potřebnou velikost solárního systému jsem indikoval na základě dvou hlavních kritérií:

- zabezpečení dodávky tepelné energie
- dosažení požadovaného oteplení  $\Delta t$  na vstupu do TČ ( $5 \div 10^\circ\text{C}$ )

Tyto dvě podmínky budou splněny při přiřazení solárního systému o velikosti kolektorového pole nad 12 m<sup>2</sup> (tabulka 12). Plochu kolektoru jsem určil na základě výše uvedených kritérií a technických parametrů systému u varianty „B“ a na základě naměřených středních hodnot intenzity slunečního záření pro oblast Brna. Tuto velikost přiřazeného kolektorového pole je potřeba chápat jako prvotní odhad. Přesné vymezení plochy kolektorového pole uvedu níže. Výpočet bude proveden na základě tepelných potřeb objektu a ekonomických hledisek souvisejících s realizací projektu.

### 4.3 POROVNÁNÍ INVESTICE Z HLEDISKA PENĚŽNÍCH TOKŮ A VNITŘNÍ VÝNOSOVÉ MÍRY PROJEKTU

Pro porovnání výhodnosti či nevýhodnosti projektu je přesnější použít *čistou současnou hodnotu* NPV nebo *vnitřní výnosovou míru* IRR.

Porovnání navrhovaného systému z těchto dvou hledisek provedu vůči zdroji tepla využívajícího jako palivo zemní plyn. Tuto variantu jsem zvolil z důvodu snadné dostupnosti tohoto paliva v regionu kde je situovaný vzorový objekt (Jižní Morava). Tabulka 15 ukazuje vnitřní výnosovou míru systému sestávajícího z TČ s tepelným výkonem 7,7kW a klimatizační jednotky TCLV 300.

	TČ TCLM 7.7 P	
	D55	D56
Investice (Kč)	352.600,-	
Diskontní míra	3%	
Index růstu příjmů a výdajů	4%	
Životnost (roky)	25	
Roční úspory (Kč)	17.240,-	14.311,-
NPV (Kč)	118.400,-	38.400,-
IRR	5%	4%

**tabulka 15 Vnitřní výnosová míra systému s TČ TCLM 7.7 P – varianta „A“**

Tabulky 16 a 17 ukazují vnitřní výnosovou míru kombinovaného systému tepelného čerpadla spolu se solárním systémem. Výpočet IRR byl proveden pro velikost přiřazeného kolektorového pole 10 – 24m<sup>2</sup>. Výsledky byly zpracovány v grafické podobě a jsou uvedeny níže.

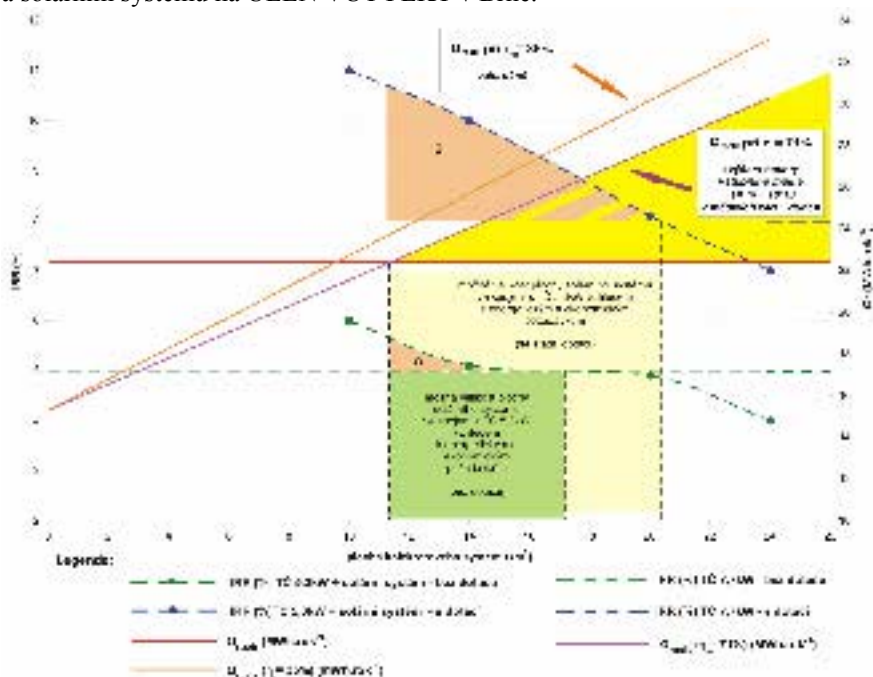
	TČ TCLM 5.3 + 10m <sup>2</sup>		TČ TCLM 5.3 + 14m <sup>2</sup>	
	D55	D56	D55	D56
Investice (Kč)	337.300,-		382.000,-	
Diskontní míra	3%		3%	
Index růstu příjmů a výdajů	4%		4%	
Životnost (roky)	25		25	
Roční úspory (Kč)	18.713,-	15.869,-	19.023,-	16.196,-
NPV (Kč)	174.000,-	96.300,-	137.700,-	60.500,-
IRR	6%	5%	5%	4%

tabulka 16 Vnitřní výnosová míra pro TČ TCLM komplet 5.3 se solární systém – varianta „B“

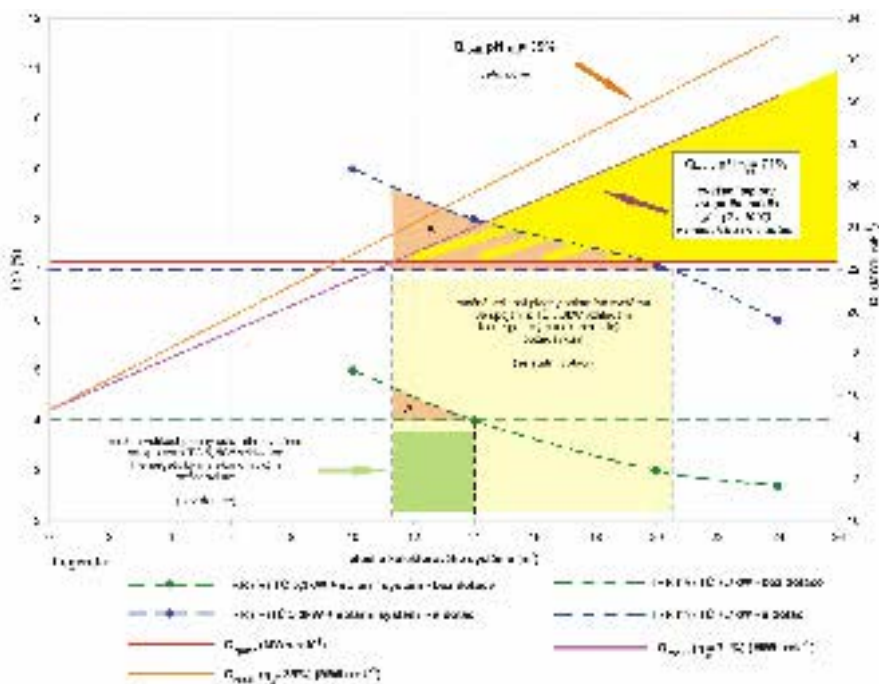
	TČ TCLM 5.3 + 20m <sup>2</sup>		TČ TCLM 5.3 + 24m <sup>2</sup>	
	D55	D56	D55	D56
Investice (Kč)	443.700,-		484.400,-	
Diskontní míra	3%		3%	
Index růstu příjmů a výdajů	4%		4%	
Životnost (roky)	25		25	
Roční úspory (Kč)	19.889,-	17.113,-	20.184,-	17.423,-
NPV (Kč)	99.800,-	23.900,-	67.100,-	13.200,-
IRR	5%	3%	4%	< 3%

tabulka 17 Vnitřní výnosové procento pro TČ TCLM komplet 5.3 se solární systém – varianta „B“

Výsledky zobrazené na obrázku 5.4 a 5.5 jasně vymezují možnosti a oblast energetického a ekonomického využití solárního systému ve spojení s tepelným čerpadlem pro uvažovaný objekt s tepelnou ztrátou  $Q_c = 8,4 \text{ kW}$ , určené na základě průměrných měsíčních hodnot intenzity slunečního záření, měřených v laboratořích Nekonvenčních přeměn UEEN VUT FEKT v Brně. Grafy dávají odpověď na otázku vhodnosti spolupráce tepelného čerpadla se solárním systémem a také na volbu optimální velikosti solárního systému pro tuto spolupráci. Je nutno říci, že analýza byla provedena pro určitý typový příklad, ale je podložena množstvím praktických měření na modelu tepelného čerpadla a solárního systému na UEEN VUT FEKT v Brně.



Obrázek 4.4 Velikost plochy solárních kolektorů pracujících s TČ 5.3 kW v sazbě D55



**Obrázek 4.5 Velikost plochy solárních kolektorů pracujících s TČ 5.3 kW v sazbě D56**

Potřebné množství tepelné energie pro objekt je v grafech vyznačeno červenou přímkou. Množství potřebné energie je  $Q_r = 22,4 \text{ MW.rok}^{-1}$  a to včetně energie potřebné pro ohřev TUV. Z grafů je vidět, že od velikosti kolektorového pole  $S = 11,4 \text{ m}^2$  je kombinovaný systém tepelného čerpadla a solárních panelů schopen pokrýt energetické nároky objektu na potřebu tepelné energie (v grafu je tato skutečnost vyznačena žlutou plochou). Tato plocha je shora ohraničena křivkou, která odpovídá energii dodané kombinovaným systémem, za předpokladu, že solární systém je využíván v období září ÷ duben (topná sezóna) a je využíván pro zvýšení vstupní teploty vzduchu do tepelného čerpadla v rozmezí  $\Delta t = (5 \div 10^\circ\text{C})$ , což má pozitivní vliv na velikost topného faktoru tepelného čerpadla, které díky této skutečnosti zabezpečí potřebnou dodávku tepelné energie. Množství dodané energie solárním systémem je určeno na základě stanoveného nutného minimálního množství (průtoku) vzduchu dodávaného solárními kolektory na vstup tepelného čerpadla a pro požadované oteplení  $\Delta t$  vstupního média.

Zelená plocha v grafech vymezuje možnou velikost plochy přiřazeného solárního systému vzhledem k energetickým a ekonomickým požadavkům bez získání státní dotace:

- energetické požadavky na systém jsou v grafu vymezeny žlutou plochou (viz. výše)
- z hlediska ekonomických požadavků je kombinovaný systém porovnáván se systémem, v němž je jako zdroj použito samostatně pracující tepelné čerpadlo. Zelené křivky v grafu představují vnitřní výnosovou míru (IRR) obou porovnávaných projektů, a to bez možnosti poskytnutí státní dotace na realizaci projektu. Naopak křivky modré barvy prezentují stejnou skutečnost, ale s tím rozdílem, že do financování je započítána i možná maximální výše státní dotace. Plochy označené jako „A“ a „B“ prezentují v grafech oblast, ve které je projekt kombinovaného systému z hlediska vnitřní výnosové míry a peněžních toků výhodnější než původní projekt s tepelným čerpadlem.

Jak je vidět, plochy „A“ a „B“ se liší pro variantu bez dotace a variantu s dotací, a také v závislosti na tom, do jaké sazby za elektrickou energii navržený systém spadá:

- pro sazbu za elektrickou energii D55 vypadá situace následovně:
  - při nezapočítání možné státní dotace se IRR pohybuje nad hodnotou  $5\%^2$  pro plochy solárního systému o velikosti od  $11,4 \div 17 \text{ m}^2$  pro případ, že navržený systém splňuje energetické potřeby objektu. Pro přiřazené plochy, které by byly větší než jsou uvedené, je z ekonomického hlediska projekt kombinovaného systému pro investora nevýhodný. Na obrázku je vidět, že hodnota IRR kombinovaného systému se v rozmezí  $14 \div 20 \text{ m}^2$  pohybuje kolem hodnoty  $5\%$ . Pro určení maximální možné plochy solárního systému je v tomto případě

<sup>2</sup> hodnota vnitřního výnosového procenta (IRR) pro projekt, ve kterém je jako zdroj tepla uvažováno jen tepelné čerpadlo v bivalentním zapojení spolu s elektrokotlem a klimatizační jednotkou

rozhodující *čistá současná hodnota* projektu (NPV). Tento ukazatel je u projektu s kombinovaným systémem výhodnější právě do velikosti  $S = 17 \text{ m}^2$ .

- při započítané dotaci je hodnota IRR projektu jen s tepelným čerpadlem rovna 8%. Pro tento případ je vyhovující velikost solárních kolektorů v rozmezí  $11,4 \div 20,3 \text{ m}^2$  (obrázek 5.4). Z toho je patrné, že v případě získání dotace na realizovaný systém je výhodnější varianta kombinovaného systému.
- pro sazbu za elektrickou energii D56 vypadá situace takto:
  - pro projekt s tepelným čerpadlem v bivalentním zapojení je hodnota vnitřní výnosové míry 4% (obrázek 5.5). Hodnota IRR u kombinovaného systému klesá pod tuto hodnotu při velikosti přiřazeného solárního systému  $S = 14 \text{ m}^2$ . Vhodná velikost plochy solárního systému je v rozmezí od  $11,4 \div 14 \text{ m}^2$ .
  - při započítané dotaci je hodnota IRR projektu se samostatně pracujícím tepelným čerpadlem rovna 7%. Oproti situaci, která nastala u sazby D55 je zde volba plochy solárního systému při získání státní dotace v rozmezí od  $11,4 \div 20,5 \text{ m}^2$ . Strmost křivky, která udává vnitřní výnosovou míru projektu kombinovaného systému, ukazuje na výhodnější podmínky z ekonomického hlediska než tomu je v případě nezískání státní dotace.

S ohledem na výsledky uvedené v grafech na obrázcích výše mohu napsat, že spolupráce tepelného čerpadla v kombinaci se solárním systémem pro situaci, že solární systém je v průběhu topné sezóny využíván pro předehřev vstupního média do tepelného čerpadla možná, a z ekonomického hlediska i energetického hlediska výhodná. Pro situaci, kterou jsem uvažoval při realizaci kombinovaného systému je optimální velikost přiřazeného solárního systému k tepelnému čerpadlu  $S = 12 \div 14 \text{ m}^2$ . Provedený výzkum těchto aplikací alternativních zdrojů navíc potvrdil skutečnost, že pro spolupráci těchto zdrojů je velmi důležitým bodem nejenom energetické hodnocení systému, ale v neposlední řadě ekonomická analýza jejich provozu a oblast jejich realizace.

## 5 ZÁVĚR

### 5.1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V posledních několika letech se stále více hovoří o možnostech využití netradiční energetiky. Do popředí se dostává zájem o využívání nízkopotenciálních zdrojů tepla a to zejména s využitím tepelných čerpadel. Evropská energetická politika je velmi příznivě nakloněna myšlence využívání obnovitelných zdrojů. Tepelná čerpadla se do podvědomí lidí dostala již před několika desítkami let, ale až v současné době se dostávají do popředí zájmu. V posledních několika letech šel vývoj v oblasti tepelných čerpadel rychle kupředu. Objevily se nové typy kompresorů (SCROLL), které posunuly možnosti využití tepelných čerpadel. S využitím tohoto typu kompresoru se rozšířilo množství instalací tepelných čerpadel typu vzduch-voda a vzduch-vzduch.

V současné době jsou vytápěcí systémy s tepelnými čerpadly navrhovány tak, že tepelné čerpadlo pracuje v bivalentním zapojení spolu s pomocným zdrojem (např. elektrokotel). Tepelné potřeby objektu jsou ze 60% kryty tepelným čerpadlem, zbylých 40% pokrývá bivalentní (pomocný) zdroj.

S rozvojem tepelných čerpadel se objevily i realizace ve spojení s jinými alternativními zdroji. V posledních letech se problém tepelného čerpadla, využívajícího teplo vyrobené aktivním solárním systémem, stal často diskutovaným tématem. Výhoda tepelného čerpadla je v tom, že dovede získat prakticky využitelné teplo o vyšším potenciálu z okolního prostředí, ve kterém je o nižším potenciálu obsaženo přirozeným způsobem tj. pro nás s vynaložením minimálních nákladů. Solární systém využitý pro předehřev vstupního média do tepelného čerpadla je lepším řešením než odběr tepla z okolního prostředí, zároveň je ale dodavatelem tepla nestabilním, přerušovaným. Svým způsobem má společný prvek s tepelným čerpadlem. Také dovede přeměnit nízkopotenciální teplo slunečního záření na teplo o vyšším využitelném potenciálu. Nectností je však roční rozložení zisku tepla a úměrně i jeho teploty. To totiž věrně celoročně "kopíruje" počet hodin přímého slunečního svitu i průběhy teplot venkovního vzduchu.

Instalace tepelného čerpadla v kombinaci se solárním systémem byly v drtivé většině případů realizovány tak, jak je schématicky uvedeno na obrázku 3.1. Podle tohoto zapojení oba systémy pracují nezávisle. To znamená, že mají společnou akumulaci nádrží a solární systém „pouze“ zvyšuje teplotu topného média v akumulaci nádrži, čímž se zvedne účinnost celého systému, a také topný faktor tepelného čerpadla. Pro efektivnost takového zapojení je nutné správně zvolit plochu solárních kolektorů a dimenzovat průtok média kolektorem tak, aby jeho vliv na topné médium v akumulaci nádrži byl patrný.

Nevýhodou takového spojení těchto dvou systémů je, že solární systém musí topné médium ohřívat na teplotu, která je využitelná v otopném systému, tj. dle typu otopné soustavy. Z toho je patrné, že solární systém bude pracovat s nízkou účinností a v zimních měsících bude nevyužitelný.

Rozhodujícím faktorem při takovém spojení těchto dvou systémů je ekonomická otázka. Z tohoto hlediska je takto sestavený systém nevýhodný. Teplo dodané tímto systémem je dražší, než kdybychom použili jen tepelné čerpadlo v bivalentním zapojení. Tato skutečnost je dána tím, že solární systém je po určitou část roku nevyužitelný, jelikož intenzita slunečního záření nedosahuje potřebných hodnot pro ohřev média na teplotu požadovanou v otopném systému.

Na základě těchto poznatků je možné konstatovat, že součinnost tepelného čerpadla v kombinaci se solárním systémem v tomto zapojení, kdy solární systém přihřívá topné médium na výstupu tepelného čerpadla, je technicky proveditelná, ale ekonomicky nevýhodná.

### 5.2 SHRNUÍ VĚDECKÝCH POZNATKŮ A PŘÍNOSU PRÁCE

Cílem disertační práce bylo ukázat, zda je možné najít nějakou možnost spojení tepelného čerpadla se solárním systémem tak, aby jak po energetické tak také po ekonomické stránce měl daný projekt své opodstatnění. Koncepce navrhovaného spojení těchto dvou systémů vycházela z předpokladu, že solární systém v tomto kombinovaném systému bude v průběhu topné sezóny využíván převážně k předehřevu vstupního média do tepelného čerpadla. Návrh reálného kombinovaného systému je na obrázku 5.2. Systém jsem sestavil na základě zkušeností z měření na modelu tepelného čerpadla vzduch-vzduch, které je umístěno v laboratořích Nekonenčních přeměn energie Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně a na solárním systému. Model tepelného čerpadla jsem sestavil za grantové podpory Fondu rozvoje vysokých škol - *Využití Stirlingova termodynamického cyklu v systémech využití tepla* (IS421850) a *Využití Stirlingova termodynamického cyklu v solárních systémech* (IS432170). Na modelu tepelného čerpadla byly dlouhodobě měřeny jeho provozní hodnoty, jako je vstupní a výstupní teplota na výparníku, vstupní a výstupní teplota chladiva v kondenzátoru, teplota vstupního a výstupního vzduchu do kondenzátoru, vstupní a výstupní tlak chladiva před a za kompresorem.

Na základě dlouhodobých měření jsem vyhodnotil průměrný roční topný faktor modelu tepelného čerpadla ( $COP_{stř} = 1,4$ ;  $\varepsilon_{stř} = 5,1$ ). Pro možnost určení topného faktoru tepelného čerpadla bylo nutné určit průtoky média (v daném případě vzduchu) na primární a sekundární straně tepelného čerpadla. K tomuto účelu jsem využil Prandtlovy trubice, sestavené dle ČSN ISO 3966 (25 7722) *Měření průtoku tekutin v uzavřených prostorech – metoda měření rychlostního pole pomocí Prandtlových trubic*. Při určení průtoku vzduchu jsem využil Logaritmicko – Čebyševovu metodu. Dále jsem v rámci výzkumu monitoroval hodnoty intenzity slunečního záření pro oblast Brna. V návaznosti na vyhodnocení těchto statistických údajů jsem hledal optimální nastavení spolupráce solárního systému spolu s tepelným čerpadlem.

Na základě provedených měření na modelu tepelného čerpadla a na solárním systému, jež jsou součástí laboratoře Nekonenčních přeměn UEEN VUT FEKT v Brně, jsem provedl energetickou a ekonomickou analýzu spolupráce těchto dvou alternativních systémů. Energetickou analýzu provedl pro reálný objekt nízkoenergetického domu s tepelnou ztrátou  $Q_c = 8,4$  kW a s celkovou roční potřebou energie na vytápění a ohřev TUV  $Q_r = 22,4$  MWh.rok<sup>-1</sup> (80,7 GJ.rok<sup>-1</sup>).

Celou analýzu jsem provedl na principu srovnání dvou projektů. V prvním případě jsem navrhl variantu s tepelným čerpadlem pracujícím v bivalentním zapojení s přídatnou vzduchovou jednotkou. Výkon tepelného čerpadla a spolupracujících zdrojů jsem navrhl na základě vypočtených tepelných ztrát objektu a to tak, aby byly pokryty energetické nároky v průběhu celého roku.

Druhou (srovnávací) variantu jsem navrhl jako kombinovaný systém sestávající z tepelného čerpadla a solárního systému. V návrhu je solární systém využíván jako „doplňkový“ zdroj energie. V průběhu topné sezóny (září ÷ duben) je solární systém použit pro zvýšení teploty vstupního média na vstupu tepelného čerpadla. Toto řešení umožňuje zvýšení topného faktoru tepelného čerpadla, a tím efektivnější provoz navrženého systému oproti systému pracujícího jen s tepelným čerpadlem, a také oproti kombinovanému systému „tepelné čerpadlo – solární systém“ jak je uveden na obrázku 3.1, tj. systému kde solární systém pracuje s teplotou otopné soustavy.

Celou disertační práci jsem zpracoval dle předem stanovených cílů, které lze shrnout do několika bodů:

1. vymezení oblasti použití tepelných čerpadel
2. stanovení rozsahu pracovních parametrů tepelných čerpadel s ohledem na možné zdroje energie
3. sestavení modelu tepelného čerpadla
4. sestavení kombinovaného systému tepelného čerpadla spolupracujícího se solárním systémem
5. zhodnocení energetické bilance sestaveného systému
6. ekonomické zhodnocení provozu sestaveného systému

Jednotlivé body jsem v rámci disertační práce zpracoval takto:

- body 1 a 2 jsem zpracoval v kapitolách 2 a 3. V této části práce podrobně popisují princip funkce tepelných čerpadel a možné zdroje energie pro jejich provozování. Nastínil jsem zde také možnosti jenž skýtá spolupráce tepelných čerpadel se solárními systémy, a to jak pasivními tak aktivními systémy. Tato část práce poskytuje potřebný teoretický základ pro další zpracování dané problematiky.
- bod 3 jsem zpracoval v kapitole 4. Na základě teoretických poznatků z předešlých kapitol jsem sestavil model tepelného čerpadla systému vzduch-vzduch, které jsem dále využil pro získání potřebných dat pro úspěšné řešení problematiky spolupráce tepelných čerpadel a solárních systémů. Model tepelného čerpadla jsem sestavil za grantové podpory Fondu rozvoje vysokých škol v rámci projektů Využití Stirlingova termodynamického cyklu v systémech využití tepla (2002) a Využití Stirlingova termodynamického cyklu v solárních systémech (2003). V další fázi měření na modelu tepelného čerpadla byl k modelu přiřazen solární systém.
- v kapitole 5 disertační práce jsem provedl analýzu naměřených dat na modelu tepelného čerpadla. Na základě této analýzy jsem provedl návrh vzduchového solárního systému. Tomuto návrhu jsem věnoval kapitolu 6 disertační práce.
- body 4 ÷ 6 jsem zpracoval v kapitolách 7 a 8. Prvotní analýzu spolupráce tepelného čerpadla se solárním systémem jsem provedl na základě měření na modelu tepelného čerpadla. Výsledky této analýzy jsem dále použil jako podklad pro návrh reálného kombinovaného systému tepelného čerpadla s aktivním solárním systémem, jehož podstatou je využitelnost solárního systému pro předehřev vstupního média do tepelného čerpadla v obdobích, kdy je teplota vstupního média nedostačující pro provoz tepelného čerpadla. Pro sestavený kombinovaný systém jsem provedl energetické a ekonomické hodnocení, které potvrdilo mou prvotní myšlenku spolupráce těchto zdrojů a vytvořilo potřebný podklad pro návrh kombinovaných systémů v technické praxi.

Přínos práce lze spatřovat především v novém pohledu na možnosti spolupráce tepelných čerpadel se solárními systémy. Disertační práce je významným podkladem pro dimenzování kombinovaných systémů a poskytuje prostředky pro energeticko-ekonomické hodnocení těchto systémů. Výsledky disertační práce jsou využívány pro návrhy kombinovaných systémů v nízkoenergetických domech. Veškeré uvedené výsledky jsou podloženy dlouhodobým sledováním a měřeními na modelu tepelného čerpadla a solárním systémem, s důrazem na zvýšení efektivnosti provozu tepelných čerpadel v kombinovaných tepelných systémech.

### 5.3 MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU

Výzkum v oblasti využitelnosti tepelných čerpadel v kombinovaných systémech je na svém počátku. Samotná tepelná čerpadla jsou u nás stále považována za okrajový zdroj tepelné energie. V posledních několika letech již ale začíná stoupat zájem o aplikace tepelných čerpadel. Příčinou vzestupu zájmu o alternativní zdroje energie vůbec jsou skutečnosti jako náš vstup do Evropské unie (a z toho plynoucí závazky), ale také změna stavebních technologií a nový pohled obyvatelstva na problematiku ekologie a potřeb energie.

V průběhu řešení této disertační práce jsem navázal spolupráci s firmou RD Rýmařov s.r.o., která patří mezi významné firmy ve výstavbě nízkoenergetických rodinných domů. Tepelné ztráty rodinných domů postavených touto firmou se pohybují v rozmezí  $Q_c = (7 \div 9)$  kW. Konečný návrh kombinovaného systému jsem provedl pro typový dům této firmy.

V rámci dalšího výzkumu a vývoje navrženého kombinovaného systému by měly být dále posuzovány okolnosti spolupráce těchto zdrojů energie a měly by se zvážít další možné kombinace těchto zdrojů, např. tepelná čerpadla ve spolupráci s kogenerační jednotkou. V současné době jsem účastníkem výběrového řízení České grantové agentury pro rok 2007 s projektem *Výzkum technických, energetických a ekonomických aspektů součinnosti nekonvenčních zdrojů energie*.

Důležitým aspektem pro možnost spolupráce tepelných čerpadel se solárními systémy je v neposlední řadě vývoj cen energií. Tak jako doposud předpokládám i v dalších letech růst cen energií, a tím i změnu ekonomických podmínek pro provoz kombinovaných systémů, ale i alternativních zdrojů energie vůbec.

Možnosti využití alternativních zdrojů energie v podmínkách střední Evropy jsou v současné době velmi aktuálním tématem. Vývoj v této oblasti jde stále dopředu a právě praktické aplikace by měly být tím správným vyústěním výzkumu a vývoje, který je v současnosti realizován.



## 6 LITERATURA

1. KLECZEK, J. *Sluneční energie – úvod do helioenergetiky*. Praha: SNTL - Polytechnická knihnice, svazek 117, 1981, 187 stran
2. DVOŘÁK, Z., KLAZAR, L., PETRÁK, J. *Tepelná čerpadla*. Praha: SNTL 1987, 340 stran
3. PETERKA, J. *Sluneční energie a tepelná čerpadla*. TZB-info: portál pro vytápění, vzduchotechniku, instalace, úspory energie, www.tzb-info.cz, 2004, 3 strany
4. KMINSKÝ J., VRTEK M., *Základy chladicí techniky*, učební texty FS VŠB TU Ostrava, Ostrava 2002, 16 s
5. PZP Komplet a.s., *Vytápění a ohřev vody – Tepelná čerpadla*, firemní materiály, PZP Komplet a.s., 2003, 2004, 2005
6. MEČÁRIK K., HAVELSKÝ V., FÜRI B., *Tepelná čerpadla*, 1. vyd., Bratislava, Alfa, 1988, 327 s.
7. MASTNÝ, P. Heat pumps at the systems utilization heat. In STUDENT EEICT 2003, vol. 3. Student EEICT 2003. VUT FEKT Brno: Ing. Zdeněk Novotný, CSc., Ondráčkova 105, Brno, 2003, s. 365 – 369, ISBN 80-214-2379-X.
8. MASTNÝ, P., ČAMBALA, P. Analysis operating properties of heat pumps. In Proceedings of the 10th Conference and Competition Student EEICT 2004, Volume 3. Student EEICT 2004, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky komunikačních technologií a Fakulta informačních technologií: Ing. Zdeněk Novotný, CSc., Ondráčkova 105, Brno, 2004, s. 488 – 492, ISBN 80-214-2636-5.
9. MASTNÝ, P. Provozní vlastnosti tepelných čerpadel. In Proceedings of International Scientific Conference Electric Power Engineering 2004, Electric Power Engineering 2004, Brno, Czech Republic, 2004 DEPE FEEC BUT: Lindovský & Psota, Brno 2004, s. 75 – 79, ISBN 80-214-2642-X
10. MASTNÝ, P. Use of solar energy connected to heat pump. Energyspectrum, ISSN 1214-7044, 2005, roč. 2005, č. 10, s. 1 – 2.
11. MASTNÝ, P., DRÁPELA, J. Possibilities of Alternative Sources cooperation. In Proceedings of the 7th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2006, 7th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2006, Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2006, s. 345 – 348, ISBN 80-214-3180-6.
12. Kolektiv autorů, *Státní program na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie*, směrnice Ministerstva životního prostředí – program 1.A. a 4.A., zákon č. 406/2000 Sb.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$v$	porovnávací účinnost (-)
$\xi$	stupeň využití poháněcí energie (-)
$\eta$	účinnost (-)
$\gamma$	úhel dopadu slunečních paprsků na osluněnou plochu ( $^{\circ}$ )
$\alpha$	úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny ( $^{\circ}$ )
C	kondenzátor
c	regresní koeficient (-)
COP	Coefficient of Performance (-)
$c_p$	měrná tepelná kapacita vzduchu ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$\dot{C}$	čerpadlo
d	regresní koeficient
d	regresní koeficient (-)
F	síla (N)
$G_{om}$	měsíční úhrn slunečního záření dopadajícího nad daným místem na jednotku horizontální plochy vnější hranice zemské atmosféry ( $J.m^{-2}$ )
I	intenzita slunečního záření ( $W.m^{-2}$ )
$I_{stř}$	střední hodnota intenzity slunečního záření ( $W.m^{-2}$ )
K	kompresor
$M, Q_m$	hmotnostní průtok ( $kg.s^{-1}$ )
$M_a$	Machovo číslo
p	poměrná propustnost transparentní vrstvy kolektoru (-)
P	tlak (Pa)
$P_{in}$	vstupní tlak (Pa)
$P_{out}$	výstupní tlak (Pa)
$P_p$	elektrický příkon (W)
$P_{te}$	tepelný výkon (W)
Q	teplo (W)
$Q_{ch}$	chladič výkon (W)
$Q_m, q_m$	hmotnostní průtok ( $kg.s^{-1}$ )
$Q_v, q_v$	objemový průtok ( $m^3.s^{-1}$ )
SK	solární kolektor
$S_{om}$	astronomicky možný měsíční úhrn slunečního svitu (h)
ŠV	škrtící ventil
t	teplota ( $^{\circ}C$ )
T	teplota (K)
$t_e$	venkovní výpočtová teplota ( $^{\circ}C$ )
$t_{em}$	střední denní venkovní teplota pro začátek a konec otopného období ( $^{\circ}C$ )
$t_{es}$	průměrná teplota během otopného období ( $^{\circ}C$ )
$t_{is}$	průměrná vnitřní výpočtová teplota ( $^{\circ}C$ )
TČ	tepelné čerpadlo
TEV	termostatický expanzní ventil
$t_{in}$	vstupní teplota do tepelného čerpadla ( $^{\circ}C$ )
$t_{out}$	výstupní teplota z tepelného čerpadla ( $^{\circ}C$ )
$t_{room}$	vstupní teplota vzduchu do kondenzátoru TČ ( $^{\circ}C$ )
$t_{stř}$	střední teplota ( $^{\circ}C$ )
TUV	teplá užitková voda
v	rychlost ( $m.s^{-1}$ )
V	výparník
VzA	vzduchový akumulátor
$\varepsilon$	topný faktor (-)
$T_s$	prostá doba návratnosti (rok)
IN	investiční výdaje (Kč)
CF	cash flow (Kč)
NPV	čistá současná hodnota (Kč)
IRR	

# CURRICULUM VITAE

**Ing. Petr Mastný**

narozen 3. prosince 1976 v Hodoníně

email: mastny@feec.vutbr.cz

tel.: 731 413 225

## Vzdělání

- 1991 – 1995 SPŠ Edvarda Beneše Břeclav, zaměření elektroenergetika
- 1995 – 2000 FEI VUT v Brně, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika, státní závěrečná zkouška složena 26.6.2000, téma diplomové práce:  
Využití odpadního tepla v EDU
- 2000 – 2006 FEKT VUT v Brně, postgraduální studium, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika (D-SEE), prezenční a kombinované (od 2005) studium

## Zaměstnání

- od 2005 a) technický pracovník, FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky (50%)  
b) technický pracovník, VUT v Brně, Centrum sportovních aktivit (50%)
- od 1.7. 2006 c) technický pracovník, FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky (100%)

## Vědecká činnost

- řešitel a spoluředitel grantů
  - » Využití Stirlingova termodynamického cyklu v systémech využití tepla (FRVŠ č. G1-1850/2002)
  - » Využití Stirlingova termodynamického cyklu v solárních systémech (FRVŠ č. G1-2172/2003)
- vedení bakalářských a diplomových prací
  - » Nízkoteplotní otopné soustavy – možné zdroje nízkopotenciální tepelné energie
  - » Aktivní solární systém spolupracující s tepelným čerpadlem
  - » Ekonomické hodnocení provozu alternativních zdrojů energie
  - » Nízkoenergetický dům – technicko-ekonomické hodnocení
  - » Možnosti zvýšení topného faktoru u tepelných čerpadel
  - » Pasivní solární systém ve spolupráci s tepelným čerpadlem
  - » Energetické a ekonomické aspekty využití netradiční energetiky v ČR

## Praxe

17.7. 2006 – 11.8. 2006 Odborná stáž v EHO Hodonín

## Jazyky

angličtina

## ABSTRACT

This doctoral thesis follows up the possibilities of the heat pump usage within combined systems. The aim of the thesis is the examination of whether the heat pump and active solar system cooperation is or is not suitable. The applicability of such cooperation is examined mainly from the energetic point of view but the economic parameters of the assembled system are mentioned as well. The results and conclusions of the doctoral thesis are based on the gauging of the air-air heat pump model and of the solar system constructed at the Department of Electrical Power Engineering, Brno University of Technology.

Based on the theoretical knowledge there was the heat pump model constructed together with the solar system. As for the cooperation, the solar system is used for increasing the heat pump input medium temperature during the period of insufficient input medium temperatures for optimal heat pump heat factor level.

The operating parameter (temperatures, pressures, coolant flow, wattage of each element, etc.) has been monitored in the long term on the heat pump model. Based on this operating parameters there was the energy heat factor defined (COP).

In connection with the hypothesis of the heat pump and solar system cooperation there was also the long term monitoring of the solar radiation intensity in Brno proceeded. Based on the measuring results the possible amount of the thermal energy supplied by the solar system was determined in this locality.

Combined energy system is designed for a low-energy building with the total heat loss of 8,4 kW – energetic and economic evaluation of combined system is performed for the cases where the detached heat pump is considered or for the cases where the heat pump cooperates with the solar system.