

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**KOOPERACE TEPELNÉHO ČERPADLA
S PASIVNÍM SOLÁRNÍM SYSTÉMEM**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH BOHŮN

BRNO 2008

ZADÁNÍ PRÁCE-VEVÁZAT DOKUMENT!

1. Popis pasivního solárního systému
2. Rozdělení a princip tepelných čerpadel - volba TČ pro spolupráci s pasivním solárním systémem
3. Podmínky spolupráce TČ s pasivním solárním systémem
4. Návrh zapojení kombinovaného systému TČ + pasivní solární systém
5. Energetické a ekonomické hodnocení systému

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Vojtěch Bohůn

Bytem: Svahová 9, Brno, 623 00

Narozen (datum a místo): 12.1.1986 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

disertační práce

diplomová práce

bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Kooperace tepelného čerpadla s pasivním solárním systémem
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. Petr Mastný, PhD.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	16.6. 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- X tištěné formě – počet exemplářů
- X elektronické formě – počet exemplářů

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
 2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
 3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
X ihned po uzavření této smlouvy
- 1 rok po uzavření této smlouvy
- 3 roky po uzavření této smlouvy
- 5 let po uzavření této smlouvy
- 10 let po uzavření této smlouvy
- (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

Autor

* hodící se zaškrtněte

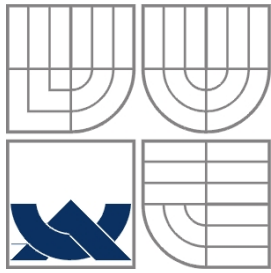
Bibliografická citace práce:

BOHŮN, V. Kooperace tepelného čerpadla s pasivním solárním systémem. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2007, 57 stran.

Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu semestrální práce Ing. Petru Mastnému, PhD. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

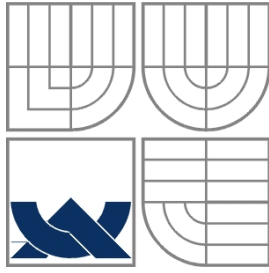
Kooperace tepelného čerpadla s pasivním solárním systémem

Vojtěch Bohún

vedoucí: Ing. Petr Mastný, PhD.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Cooperation of heat pump and passive solar system

by

Vojtěch Bohún

Supervisor: Ing. Petr Mastný, PhD.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá alternativními zdroji tepelné energie – solárním systémem a tepelným čerpadlem, jejichž provoz je energeticky výhodný a je možné je účelně spojovat do jednoho systému. Cílem práce je jednak poskytnout přehled o druzích, funkci, vlastnostech, konstrukčních prvcích a obvyklých uspořádání aktivních a pasivních solárních systémů a tepelných čerpadel v souvislosti s vytápěním budov, jednak navrhnout zapojení kombinovaného otopného systému s tepelným čerpadlem a pasivním solárním systémem a zhodnotit jej po stránce energetické a ekonomické. Nejprve je uvedena základní teorie pro výpočet množství solární energie pohlcené plochou. Poté je představeno rozdělení a konstrukce aktivních a pasivních solárních systémů. Dále jsou popsány výhody a nevýhody jednotlivých solárních systémů a základní výpočtové vztahy pro určení tepelného zisku a rozměrů pasivního systému. Následuje rozbor funkce tepelného čerpadla, rozdělení jeho druhů podle příslušných kritérií a popis jeho základních funkčních prvků, typických vlastností a způsobů možného využití. Na základě získaných poznatků jsou shrnuty a zdůvodněny podmínky spolupráce tepelného čerpadla s pasivním solárním systémem. Podle těchto podmínek a konstrukce objektu, pro který je kombinovaný systém navrhován, je vytvořeno zapojení systému s tepelným čerpadlem vzduch / voda, tepelným zásobníkem a rekuperační jednotkou. Navazující výpočty hodnotí energetické potřeby objektu a tepelné zisky pasivního solárního systému. Slouží jako podklad pro návrh zdroje tepla a pro určení energetické bilance. Celková roční potřeba tepla činí 13914,7 kWh. Tato spotřeba byla srovnána s případem, kdy by objekt byl vybaven okny standardní velikosti. Z komparace vyplývá, že pasivní solární systém může uspořit asi třetinu celkové roční spotřeby tepla. Z měření na objektu je určeno, kdy je schopen pasivní solární systém dodávat teplo tepelnému čerpadlu. Navržený systém je poté zhodnocen z hlediska ekonomického, a to porovnáním s jinými možnostmi tepelných zdrojů metodou čisté současné hodnoty. Lze konstatovat, že ekonomicky výhodnější než použití tepelného čerpadla je topení tuhými palivy i zemním plynem. Příčinou jsou zejména vysoké počáteční náklady, v případě topení dřevem i jeho nízká cena. V závěru jsou shrnuty získané výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA: Energie záření; aktivní solární systém; pasivní solární systém, zásady návrhu; tepelný zisk; tepelné čerpadlo; teplovzdušné vytápění; návrh zapojení systému; energetická bilance; porovnání nákladů

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with alternative energy sources – a solar system and a heat pump. Their operation is energy-advantageous and they can be efficiently connected in one system. The focus of this thesis is firstly to give an overview of kinds, function, properties, constructional elements and usual arrangements of active and passive solar systems and heat pumps in connection with heating of buildings, secondly to suggest a connection of a combined heating system with a heat pump and of a passive solar system and to evaluate it from an energetic and economic point of view. Firstly, a basic theory for calculation of quantity of electrical energy absorbed by a surface is introduced. Then, a categorization and construction of active and passive systems are presented. Hereafter, advantages and disadvantages of single solar systems are described and basic calculation relations for determination of a heat gain and of proportions of passive solar systems are showed. Subsequently, the function of a heat pump is analyzed, the categorization of its kinds according to the relevant criteria is given and its basic functional elements, typical properties and means of possible use are described. On the basis of gained knowledge, conditions of cooperation of a heat pump with a passive solar system are summarized and substantiated. According to these conditions and to the construction of an object, a combined system is designed for, a connection of a system with a heat pump air / water, a heat accumulator and a recuperative unit is constructed. Consequential calculations evaluate energetic needs of an object and heat gains of a passive solar system. They serve as a basis for a concept of heat source and for determination of an energy balance. A total annual heat need is 13914,7 kWh. It was compared with the case when the object was equipped with standard-size windows. The comparison shows that a passive solar system can spare roughly one third of total annual heat consumption. From the measurement on the object is determined, when a passive solar system is able to supply a heat pump with heat. After that, the suggested system is evaluated from an economic point of view: it is compared with other possible heat sources by the method of net present value. It can be said that solid fuel firing and gas firing are economically more advantageous than the use of a heat pump. The reasons are particularly high initial costs and in case of wood firing also its low price. In conclusion, the gained results are summarized.

KEY WORDS:

Radiation energy; aktiv solar system; passiv solar system; design principle; heat gain; heat pump; air heating; heating system design; energy budget; cost comparison

OBSAH

SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM ZNAČEK A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	13
2 ENERGIE SLUNCE	14
2.1 INTENZITA ZÁŘENÍ.....	14
2.2 ENERGIE ZÁŘENÍ.....	16
3 SOLÁRNÍ SYSTÉMY	17
3.1 AKTIVNÍ SYSTÉMY	17
3.1.1 DRUHY AKTIVNÍCH SYSTÉMŮ	17
3.1.2 KAPALINOVÉ SYSTÉMY	17
3.1.3 VZDUCHOVÉ SYSTÉMY	19
3.2 PASIVNÍ SYSTÉMY	20
3.2.1 ZÁSADY NÁVRHU STAVEB	20
3.2.2 ROZDĚLENÍ PASIVNÍCH SYSTÉMŮ [15].....	20
3.2.3 ZÁKLADNÍ TYPY PASIVNÍCH SYSTÉMŮ	20
3.2.4 DALŠÍ TYPY PASIVNÍCH SYSTÉMŮ	22
3.2.5 OCHRANA PROTI PŘEHŘÍVÁNÍ.....	22
3.2.6 TEPELNÝ ZISK	23
3.2.7 VÝPOČET PRVKŮ.....	24
4 TEPELNÁ ČERPADLA.....	25
4.1 PRINCIP A ENERGETICKÉ ZHODNOCENÍ TEPELNÉHO ČERPADLA	25
4.2 ZDROJE TEPLA	27
4.3 KOMPRESORY.....	28
4.4 PODMÍNKY TOPNÉHO SYSTÉMU	29
4.5 DRUHY TEPELNÝCH ČERPADEL.....	30
4.5.1 ZAŘÍZENÍ PODLE ZDROJE A SPOTŘEBY TEPLA.....	30
4.5.2 ZAŘÍZENÍ PODLE TRANSPORTU CHLADIVA	30
4.5.3 TEPELNÉ ČERPADLO PRO SPOLUPRÁCI S PASIVNÍM SOLÁRNÍM SYSTÉMEM.....	30
5 PODMÍNKY SPOLUPRÁCE TČ S PASIVNÍM SOLÁRNÍM SYSTÉMEM.....	32
6 ZAPOJENÍ KOMBINOVANÉHO SYSTÉMU TČ A PSS	33
6.1 POPIS OBJEKTU	33
6.2 NÁVRH OTOPNÉHO SYSTÉMU	33
6.3 VÝPOČET POTŘEBY TEPLA	36
6.3.1 VÝPOČET POTŘEBY TEPLA NA VYTÁPĚNÍ	36

6.3.2 VÝPOČET POTŘEBY TEPLA NA OHŘEV UŽITKOVÉ VODY	37
6.3.3 TEPELNÝ ZISK PSS.....	38
6.3.4 BILANCE PRO JEDNOTLIVÉ MĚSÍCE V ROCE	39
6.3.5 ZÁVĚRY BILANCE.....	41
6.4 VOLBA TČ	41
6.5 MĚŘENÍ.....	42
7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NÁVRHU	45
7.1 HODNOCENÍ NÁVRHU.....	45
8 ZÁVĚR.....	47
POUŽITÁ LITERATURA	49
PŘÍLOHA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Parametry polohy slunce [4]</i>	15
<i>Obr. 2-2 Průběh intenzity záření za jasného dne[15]</i>	16
<i>Obr. 3-1 a) Uzavřený primární okruh [4]</i>	18
<i>Obr. 3-1 b) Otevřený primární okruh [4]</i>	18
<i>Obr. 3-2 Trivalentní systém [4]</i>	18
<i>Obr. 3-3 a) Vytápění energetickou fasádou, podle [4]</i>	19
<i>Obr. 3-3 b) Chlazení a větrání energetickou fasádou, podle [4]</i>	19
<i>Obr. 3-4 Trombeho stěna</i>	21
<i>Obr. 3-5 Funkce vodorovné stříšky</i>	23
<i>Obr. 4-1 Schéma tepelného čerpadla</i>	25
<i>Obr. 4-2 a) Ideální Carnotův děj</i>	26
<i>Obr. 4-2 b) Reálný Clausiův - Rankinův děj [16]</i>	26
<i>Obr. 4-3 Diagram log p - i [20]</i>	26
<i>Obr. 4-4 Spirálový kompresor [13]</i>	29
<i>Obr. 4-5 Vzduch ohřátý energetickou fasádou jako zdroj tepla pro TČ</i>	31
<i>Obr. 6-1 Pohled na dům od jihozápadu</i>	33
<i>Obr. 6-2 Schéma zapojení otopného systému</i>	34
<i>Obr. 6-3 Schematické uspořádání otopné soustavy v objektu</i>	35
<i>Obr. 6-4 Graf tepelné bilance slunečního okna a celé soustavy (objektu) v roce</i>	41
<i>Obr. 6-5 a) Průběh teplot, přízemí objektu</i>	43
<i>Obr. 6-5 b) Průběh teplot, podkroví objektu</i>	43
<i>Obr. 6-6 Průběh teplot během dne 21.4., měřeno v podkroví</i>	44

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 6-1 a) Spotřeba tepla na vytápění v jednotlivých měsících.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6-1 b) Teplo získané slunečním oknem v jednotlivých měsících a bilance</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6-2 Parametry tepelného čerpadla AEG, typ TTL 10 I.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 7-1 Pořizovací náklady navrhované soustavy.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7-2 Porovnání ročních nákladů u různých energetických zdrojů</i>	<i>46</i>
<i>Naměřené teploty (°C); T1, T2 –vnitřní a vnější vzduch; Te,Ti – vnější a vnitřní povrch PSS.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulkové hodnoty solárních parametrů [4]</i>	<i>57</i>

SEZNAM ZNAČEK A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotky
a	azimut	stupeň (°)
d	počet vytápěcích dní	1
h	výška slunce nad obzorem	stupeň (°)
i	měrná entalpie	J.kg ⁻¹
k	součinitel prostupu tepla	W.m ⁻² .K ⁻¹
n	počet dní	1
p	tlak propustnost	Pa 1
q	tepelný faktor budovy	W.m ⁻² .K ⁻¹
r	součinitel odrazivosti	1
s	měrná entropie	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
D	počet denostupňů	K, °C
E	energie elektrická energie	J J
I	intenzita záření	W.m ⁻²
P	výkon	W
Q	teplo	J
S	plocha	m ²
U	měrná tepelná ztráta	W.m ⁻² .K ⁻¹
V	objem	m ³
W	mechanická práce	J
Z	činitel znečištění atmosféry	1
γ	úhel	stupeň (°)
δ	zeměpisná šířka	stupeň (°)
ε	topný faktor součinitel	1 1
η	účinnost	1
τ	časový úhel poměrná doba čas	stupeň (°) 1 s, hod

φ	zeměpisná šířka	stupeň (°)
Δt	rozdíl teplot	K, °C

Zkratky:

NPV – čistá současná hodnota

PSS – pasivní solární systém

TČ - tepelné čerpadlo

TF - topný faktor

TUV – teplá užitková voda

1 ÚVOD

V důsledku rozvoje moderní společnosti se neustále zvyšuje spotřeba energií. Přitom se většinový podíl energií získává ze zdrojů, jejichž zásoby se zmenšují a je tedy nutné hledat a intenzivně využívat nové náhradní možnosti. Jednou z nich jsou obnovitelné zdroje energií, k nimž patří např. vítr, slunce nebo biomasa. V menších měřítkách jsou využívány již dnes, ať už kvůli nezávislosti na tradičních zdrojích či jejich nedostupnosti. S ohledem na rostoucí význam těchto zdrojů je semestrální práce zaměřena na dva netradiční zdroje energie – solární systémy a tepelné čerpadlo, jejichž provoz je energeticky výhodný a je možné je účelně spojit do jednoho systému.

Semestrální práce si klade za cíl shrnout poznatky týkající se principu, konstrukce a praktického využití solárních systémů (se zaměřením na systémy pasivní) a tepelného čerpadla. Získané výsledky budou základem pro bakalářskou práci, která se bude zabývat určením podmínek spolupráce těchto dvou energetických zdrojů, návrhu jejich kombinovaného systému a energetickým i ekonomickým zhodnocením.

Při zpracování semestrální práce byly použity obecné metody vědecké práce, zejména analýza, syntéza, komparace a deskripce.

Podkladem pro zpracování semestrální práce byly informace získané jednak z odborných publikací, jednak z aktuálních internetových zdrojů.

Semestrální práce je formálně rozdělena do pěti kapitol s obsahem, seznamem obrázků a seznamem použité literatury. Druhá kapitola je věnována energetickému působení Slunce na Zemi, oblasti využití slunečního záření a základním výpočtovým vztahům pro určení energie přivedené záření na zemský povrch. Třetí kapitola vymezuje rozdělení solárních systémů na druh aktivní a pasivní, základní principy těchto systémů a jejich rozčlenění podle požadovaných funkcí. V této souvislosti jsou zmíněny základní součásti těchto systémů, jejich možná provedení a příklady využití celých systémů v praxi. Poté je uveden způsob výpočtu tepelného zisku a plochy transparentní vrstvy pasivního prvku. Čtvrtá kapitola pojednává o principu činnosti tepelných čerpadel, jejich druzích určených podle zvolených teplotních médií a základních prvcích jako jsou např. možné zdroje tepla a kompresory a o využití čerpadel. Jsou v nich zhodnocena pozitiva a negativa charakteristická pro jednotlivé druhy tepelných čerpadel a z nich vyplývající vhodnost použití té které konstrukce v jednotlivých případech. Ve čtvrté kapitole je navržena volba tepelného čerpadla pro spolupráci s pasivním solárním systémem při vytápění objektu. Pátá kapitola se zabývá shrnutím podmínek, za kterých může účelně spolupracovat tepelné čerpadlo a pasivní solární systém. V šesté kapitole je představen vzorový objekt, pro který je návrh určen, je zde navržen otopný systém a jsou provedeny základní výpočty k určení tepelné bilance soustavy i samotného pasivního systému. Předposlední kapitola hodnotí celý návrh ekonomicky, porovnává různé varianty vytápění a určuje, která z nich je ekonomicky nejvýhodnější. V závěru jsou shrnuty získané poznatky. Příloha obsahuje tabulku teplot naměřených na vzorovém objektu a tabulkové hodnoty k výpočtu zisků solárního systému.

2 ENERGIE SLUNCE

Na Slunci probíhají neustálé termonukleární reakce, které jsou zdrojem jeho veškeré energie. Slunce vyzařuje do prostoru energii o všech vlnových délkách, především 0,2 až 3,0 μm , tedy ultrafialové záření, světlo a infračervené záření. Z celkové vyzářené energie se největší část rozptýlí v kosmickém prostoru a jen malý zbytek připadne na pohlcení okolními planetami.

Na okraj zemské atmosféry dopadá záření o intenzitě $I_0 = 1353 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (tzv. sluneční konstanta). Atmosféra obklopující zemskou sluneční záření částečně odráží (asi 30 %) a částečně pohlcuje [24]. Kratší části ultrafialového záření zachytí ozonoféra ve výšce 25 - 35 km nad povrchem Země, rentgenové a další vlnové délky ultrafialového záření pohltní ionosféra přibližně v 60 km nad povrchem. Ze zbylého množství slunečního záření se 19 % zachytí v atmosféře, 34 % se odráží od mraků a na zemský povrch dopadá zbylých 47 %. Tuto energii můžeme vhodnými způsoby přeměňovat na užitečnou energii tepelnou, mechanickou a elektrickou [27].

Nejjednodušší variantou je přeměna na energii tepelnou, a to pomocí kolektorů. Plochými kolektory lze získat teplo o poměrně nízkých teplotách. Hodí se tak především pro ohřev užitkové vody, topení v budovách, sušení zemědělských produktů apod. Koncentrující kolektory shromažďují záření do středu paraboloidu, čímž se dosahuje vysoké intenzity a tím i vysoké teploty (až 4000°C) [4]. Tyto vysokopotenciálové systémy se využívají jako vařiče, destilační přístroje nebo pece.

Přímá přeměna záření v mechanickou energii je možná, ale málo účinná. Na principu přímé přeměny pracují mechanické měřiče intenzity osvětlení: Na otočnou ve vakuu umístěnou soustavu čtyř slídových destiček z jedné strany začerněných dopadají fotony a roztáčejí celou soustavu otáčkami úměrnými intenzitě svitu.

Přeměnu záření na elektrickou energii umožňuje fotovoltaický jev, kdy při dopadu fotonů na spoj dvou různých materiálů vzniká mezi jejich volnými konci napětí. Solární fotovoltaické panely jsou dnes známé jako nejmenší zdroje pro kalkulačky a náramkové hodinky, dále jako individuální zdroje elektrické energie v rekreačních objektech nebo v sídlech vzdálených od elektrické sítě a nakonec v kosmické technice pro napájení družic, vesmírných stanic atp. Zatím je cena takovýchto zdrojů poměrně velká a tudíž nejsou rozšířené ve větší míře v běžném životě. Druhou možností výroby elektřiny ze slunečního záření je nepřímý způsob. Koncentrující solární kolektor vyrábí vodní páru, která pak pohání turbínu tak jako v tepelné elektrárně.

2.1 Intenzita záření

Množství energie dodané zářením je závislé na jeho intenzitě, která se mění podle postavení slunce na obloze a orientaci ozařované plochy vzhledem k němu. Poloha slunce je v každém okamžiku dána výškou nad obzorem h a azimutem a (Obr. 2-1). Azimut se měří od jižního směru ve smyslu otáčení hodinových ruček jako kladný, proti smyslu jako záporný. Pro výpočty těchto parametrů platí vztahy podle [4]:

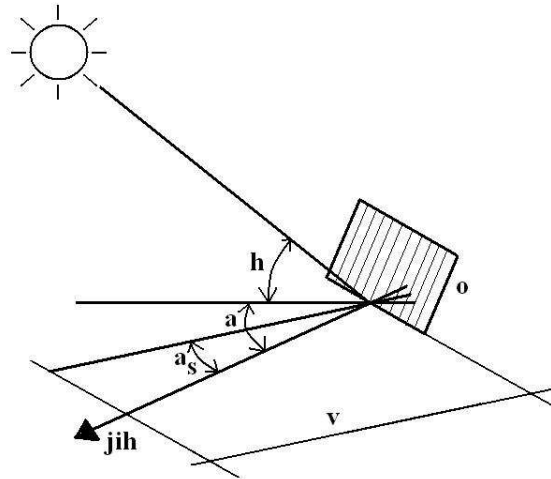
$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \tau \quad (^\circ; ^\circ, ^\circ, ^\circ, ^\circ, ^\circ) \quad (2.1)$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta}{\cos h} \sin \tau \quad (^\circ; ^\circ, ^\circ, ^\circ, ^\circ, ^\circ) \quad (2.2)$$

δ – zeměpisná šířka, kde v daný den je v poledne slunce kolmo na obloze

φ – zeměpisná šířka místa

τ – čas měřený od poledne, 1 hodině odpovídá 15°



Obr. 2-1 Parametry polohy slunce [4]

a – azimut slunce; a_s – azimut osluněné plochy; h – výška slunce nad obzorem; o – osluněná plocha; v – vodorovná plocha

Intenzita vypočtená pomocí δ pro charakteristický den v měsíci se bere za střední hodnotu pro daný měsíc. Celková intenzita je součtem intenzit přímého a difúzního záření $I = I_P + I_D$. Ve většině případů je osluněná plocha od paprsků odkloněna o jistý úhel γ , skutečná intenzita I_P je potom:

$$I_P = I_0 \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \cos \gamma \quad (\text{W.m}^{-2}; \text{W.m}^{-2}; 1, 1, ^\circ) \quad (2.3)$$

kde I_0 – sluneční konstanta,

Z – součinitel znečištění atmosféry,

ε – součinitel respektující nadmořskou výšku místa a výšku slunce nad obzorem.

Difúzní záření vzniká rozptýlením a odražením přímého záření. Při zatažené obloze dopadá na povrch Země pouze tato složka s intenzitou I_D :

$$I_D = 0,5(1 + \cos \alpha)I_{Dh} + 0,5r(1 - \cos \alpha)(I_{Ph} + I_{Dh}) \quad (\text{W.m}^{-2}; ^\circ, 1, \text{W.m}^{-2}, 1, ^\circ, \text{W.m}^{-2}, \text{W.m}^{-2}) \quad (2.4)$$

kde α – úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny ($\alpha = 0^\circ$ pro vodorovnou polohu)

r – součinitel určující schopnost okolních ploch odrážet paprsky

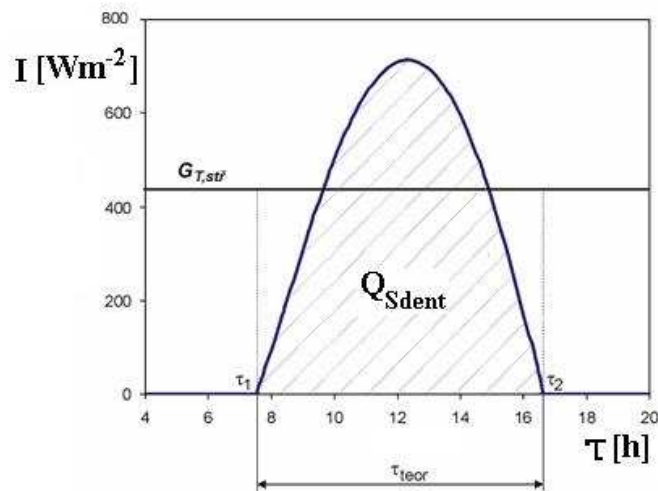
I_{Ph} – intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu

I_{Dh} – intenzita difúzního záření na vodorovnou plochu

2.2 Energie záření

Teoretické (maximální možné) množství energie dodané během jasného dne se udává jako integrál funkce intenzity záření v čase od východu slunce (τ_1) do západu (τ_2). Průběh intenzity za jasného dne je graficky znázorněn na obr. 2-2.

$$Q_{Sdent} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I d\tau \quad (\text{J; W.m}^{-2}) \quad (2.5)$$



Obr. 2-2 Průběh intenzity záření za jasného dne [15]

Při střídavé oblačnosti pak na plochu dopadá skutečné množství energie:

$$Q_{Sden} = \tau Q_{Sdent} + (1 - \tau) Q_{Dden} \quad (\text{J; 1, J, 1, J}) \quad (2.6)$$

kde τ - je poměrná doba svitu daná podílem skutečné doby (jasná obloha) ku době teoretické (od východu do západu slunce)

Q_{Sdent} - teoretické množství energie za den

Q_{Dden} - energie difúzního záření za den

V zimě se teoretická doba svitu zkracuje vlivem nízkého slunce nad obzorem a tím kratšího dne. Skutečná doba svitu je také kratší, zatažená obloha je v zimě častější než v létě. Pramen [5] uvádí dlouhodobé měsíční doby svitu zjištěné v Brně - Tuřanech: Leden 43,5 hod, březen 121,5 hod, maximum v červenci 234,9 hod. Celková roční doba (dlouhodobý průměr mezi lety 1961 a 1990) činí 1677,4 hod.

3 SOLÁRNÍ SYSTÉMY

Jak bylo uvedeno výše, sluneční tepelné záření je možné s výhodou využívat k ohřevu užitkové vody, přitápění budov, vyhřívání bazénů nebo k sušení sypkých materiálů. Zařízení, která k tomu slouží, se nazývají solární (sluneční) systémy. Podle principu se rozeznávají systémy aktivní a pasivní.

3.1 Aktivní systémy

Aktivní systémy zachycují záření kolektory a vzniklou tepelnou energii vážou na teplotonosnou látku, která je odváděna do výměníku. Na výměník je připojena přímo topná soustava nebo tepelný akumulátor, který má energii zadržet pro dobu, kdy bude její dodávka omezena či zastavena. Z toho vyplývá, že aktivní systémy jsou samostatná technická zařízení. Naproti tomu systémy pasivní jsou součástí samotné stavby a přímo nevyžadují pomocné přístroje.

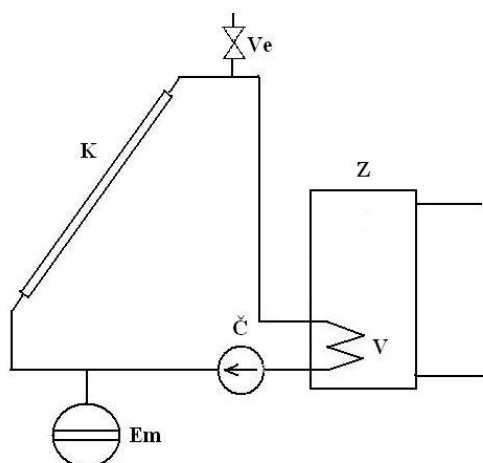
3.1.1 Druhy aktivních systémů

Primárním okruhem systému (kolektorem) proudí teplotonosná látka, podle níž dělíme systémy na kapalinové nebo vzduchové. Kapalinové systémy jsou podstatně rozšířenější, protože kapaliny mají větší měrnou tepelnou kapacitu než vzduch, tudíž je stejné množství tepelné energie možné přenést menším objemem látky. Průřezy potrubí jsou výrazně menší, proto jsou na celé zařízení nižší náklady. Vhodnou kapalinou je voda, neboť je jí dostatek a je levná. Pokud je zařízení v provozu celoročně, přidává se do vody nemrznoucí směs nebo se používá syntetická kapalina s nízkou teplotou tuhnutí a vysokou teplotou varu [5].

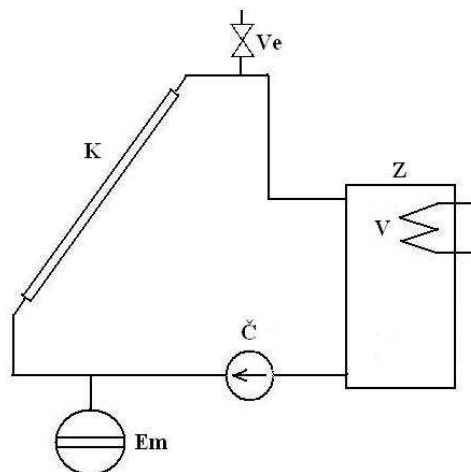
3.1.2 Kapalinové systémy

Do primárního okruhu patří kolektory, výměník se zásobníkem tepla, potrubí, čerpadlo a pojistné zařízení (pojišťovací ventil, expanzní nádoba). Oběhové čerpadlo je možné vynechat, pokud je systém navržen se samotížným provozem. Tehdy je nutné, aby kolektory byly níže než výměník se zásobníkem, aby teplá voda o nižší hustotě samovolně stoupala. Výhoda spočívá ve zjednodušení soustavy, samočinné regulaci oběhu a úspoře za pořízení čerpadla i jeho pohon, je ovšem nutné volit větší průřezy potrubí. Ve většině případů je ale naopak kolektor umístěn v nejvyšším bodě soustavy, na střeše, a ostatní prvky jsou uloženy pod ním v budově. Expanzní nádoby slouží k vyrovnání tlaků při změně teploty kapaliny. Otevřené expanzní nádoby se používají u nejmenších zařízení, častější jsou uzavřené nádoby s membránou.

Připojení výměníku se zásobníkem může mít dvojí podobu. Kolektorový okruh může být napojen na výměník, takže voda se nemíchá s vodou v zásobníku. Jedná se o méně používané systémy uzavřené (Obr. 3-1 a), které se uplatňují nejčastěji při ohřívání vody v bazénech. Druhou možností jsou systémy otevřené (Obr. 3-1 b), kdy je okruh kolektorů připojen na zásobník a topný systém na výměník.



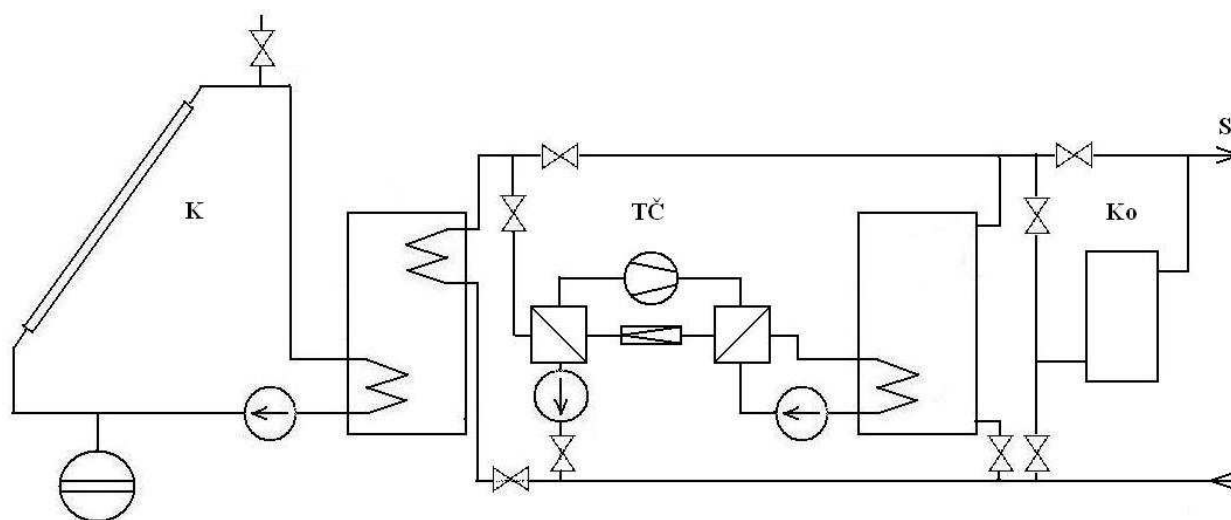
Obr. 3-1 a) Uzavřený primární okruh [4]



Obr. 3-1 b) Otevřený primární okruh [4]

Č - čerpadlo; Em - expanzní nádoba s membránou; K - kolektor; V - výměník; Ve - pojišťovací ventil; Z - tepelný zásobník

Podle počtu zdrojů tepla v soustavě rozlišujeme systémy jednoduché a kombinované. V letním období bývá slunečního záření nadbytek, v zimě naopak nedostatek. Pokud je soustava navržena pouze pro letní provoz, např. pro ohřívání vody v rekreačním domku nebo ohřev vody pro koupaliště, je jediným zdrojem kolektor a jedná se o systém jednoduchý. Má-li systém pracovat celoročně, je nutné kolektor zálohovat jiným zdrojem tepla pro zimní období. Může to být kotel na plyn či pevná paliva nebo tepelné čerpadlo (TČ) (bivalentní systém), případně oba zdroje zároveň (trivalentní systém). U trivalentních systémů kryje spotřebu tepla při vyšších teplotách kolektor, při teplotách kolem 0 °C TČ a při větších mrazech kotel. Zdrojem tepla pro TČ je nejčastěji zásobník tepla [4].



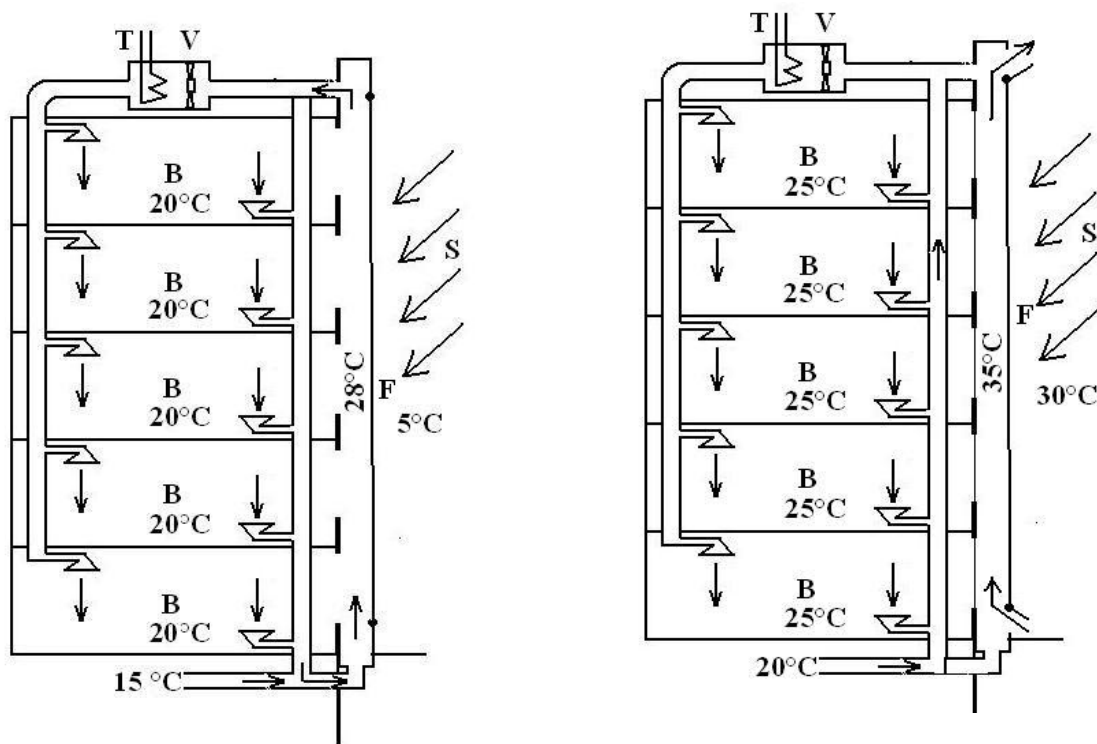
Obr. 3-2 Trivalentní systém [4]

K - okruh kolektorů; Ko - okruh spalovacího kotle; S - odvod tepla ke spotřebičům; TČ - okruh tepelného čerpadla

3.1.3 Vzduchové systémy

Velkou výhodou vzduchových systémů je jednoduchost provedení i provozu, nízká cena a dlouhá životnost. Teplonosným médiem je vzduch, takže opotřebení korozí je minimální a nehrozí zamrznutí; systém nemá uzavřený okruh a není pod tlakem, takže není potřeba žádná expanzní nádoba ani pojišťovací ventil; hmotnost vzduchových kolektorů je menší než kapalinových, čímž se snižuje riziko nadměrného zatížení nosné konstrukce (střechy); regulace je snadná ovládáním klapky v potrubí. Nevýhodou je malé množství přeneseného tepla v jednotce objemu látky kvůli malé měrné tepelné kapacitě. Tato zařízení nachází využití především v zemědělství. Dají se použít pro sušení ovoce, dřeva a jiných vlhkých materiálů, dále k vytápění hospodářských a technických budov, skleníků. [11]

K vytápění obytných budov se využívají jiné prvky - energetická fasáda (Obr. 3-3) a energetická střecha. Energetická fasáda je jednoduchý vzduchový kolektor vzniklý umístěním skleněné plochy před průčelí na osluněné straně domu. Vznikne vzduchová dutina, do jejíž spodní části se přivádí chladný vzduch, ten stoupá komínovým efektem vzhůru, slunečním zářením se ohřívá a nahore proudí do rozvodu. Do potrubí je zařazen ještě ventilátor a přídavné topné těleso, např. elektrická spirála pro přehřívání v době, kdy fasáda nedodává dostatek energie. Energetická fasáda navíc umožňuje i chlazení domu v horkých měsících: Průchod vzduchu z fasády do rozvodu se uzavře a otevřou se větrací klapky v dolní a horní části fasády. Do rozvodu se ventilátorem nasává chladnější vzduch z přízemních pater, může být zapojeno chladicí zařízení.



Obr. 3-3 a) Vytápění energetickou fasádou, Obr. 3-3 b) Chlazení a větrání energetickou fasádou, podle [4]

B - byty; F - sklo energetické fasády; S - sluneční záření; T - topná spirála; V - ventilátor

Energetická střecha se podobá energetické fasádě s tím rozdílem, že není ve svislé, ale v šikmé poloze. Na krovu jsou položeny skleněné tašky nebo jiná průhledná krycí vrstva, pod ní je umístěn černý plech jako absorbér záření. Pod plechem je vzduchová dutina ze spodní strany tepelně izolovaná. Dutinou proudí směrem ke hřebeni střechy vzduch a ohřívá se.

3.2 Pasivní systémy

Výše popsaná aktivní solární zařízení mají velkou nevýhodu v požadavku na dodávku další energie (elektrina na pohon čerpadel). To mohou omezit či vyloučit solární systémy pasivní. Energie slunečního záření, kterou využívají, se mění v energii tepelnou a dále se transportuje na místo spotřeby bez použití přídatných technických zařízení. Celý systém tvoří samotná stavba, která je účelně přizpůsobena tak, aby sluneční energii vhodně využívala. Znamená to především snahu o zachycení co největšího množství energie v zimním období a naopak zabránění přístupu tepla v létě. Tato opatření umožňují podstatné snížení nákladů na vytápění při přiměřených investicích.

3.2.1 Zásady návrhu staveb

Budovy mají být umístěné na jižním svahu, ze severní a západní strany chráněné před větrem (buď pokračujícím svahem nebo větrolamem, lesem atd.). Z jižní strany má být prostor otevřený a nezastíněný. Je možné zde vysadit listnaté stromy, které v létě mírní sluneční svit a v zimě bez listů nestíní. Místnosti v domě mají být rozmístěny podle jejich využití - obývané místnosti se situují na jih či jihozápad, kuchyně využívaná především dopoledne na východ, jihovýchod a technické místnosti na západ, sever. Na sluneční straně se umísťují velká okna, malá nebo pokud možno žádná na severní stranu. V budově mají být odpovídající jádra pro akumulaci tepla. Vnitřní členění budovy má být minimální. Stavba musí být co nejlépe tepelně izolována. Pro nejchladnější měsíce je nutné instalovat doplňkové vytápění [4] [15].

3.2.2 Rozdělení pasivních systémů [15]

a) podle způsobu využití sluneční energie:

- přímé - sluneční záření prochází přes transparentní vrstvu přímo do místnosti
- nepřímé - teplo se do místnosti dostává sáláním nebo prouděním
- hybridní - kombinace předchozích dvou případů

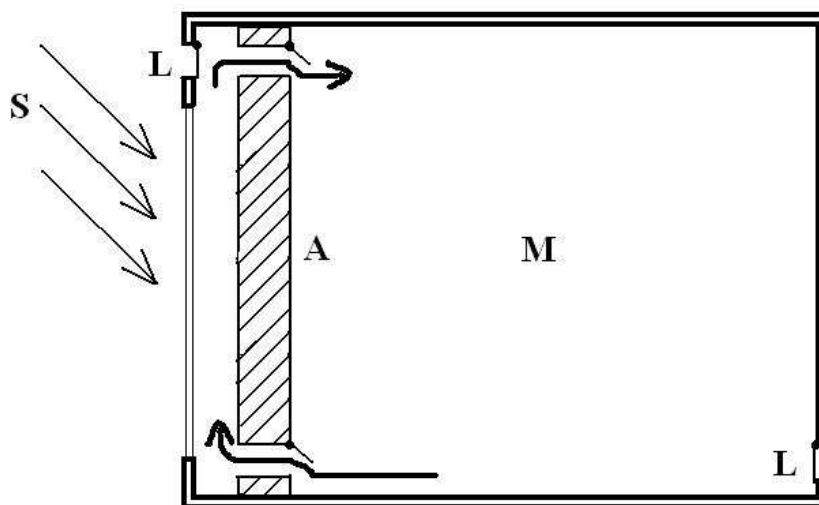
b) podle umístění:

- prvky umístěné na osluněné straně
- prvky umístěné na střeše
- přídatné prvky

3.2.3 Základní typy pasivních systémů

Jedná se o velké zasklené plochy umístěné pokud možno na jižní straně stavby pro zachycení maxima záření. Nejvýhodnější jsou z hlediska pasivního vytápění i konstrukce a provozu strmé nebo zcela svislé stěny. V zimním období, kdy slunce prochází nízko nad obzorem, dopadá na plochu více svitu pod menším úhlem než v létě. Vliv odrazu je v zimě menší (úhel mezi směrem paprsků a normálou osluněné plochy je malý) a do místnosti proniká větší část záření než v létě.

Svislá poloha stěny tak omezuje přehřívání během léta. Velikost plochy zasklení má být volena tak, aby v nejchladnějším období propustila energii dostačující k vytápění



Obr. 3-4 Trombeho stěna

A - akumulční stěna; M - místnost; S - sluneční záření; klapky L se při větrání otevřou a uzavře se horní klapka v akumulční stěně

Rozlišujeme tři základní typy pasivních systémů:

- a) **Sluneční akumulční stěna** - Trombeho stěna, opět nepřímý systém tvořený masivní stěnou s předsunutou transparentní vrstvou a vzduchovou mezerou. Tepelná kapacita stěny má být tak velká, aby byla schopna absorbovat teplo přivedené za slunečný den v okrajovém měsíci topné sezóny (duben nebo říjen). Stěny se staví keramické nebo vodní. Záření prochází vrstvou a dopadá na stěnu, ve které se energie přeměňuje v teplo akumuluje. Při poklesu teploty se teplo dále šíří buďto sáláním stěny do místnosti nebo prouděním teplého vzduchu. Otvorem nad podlahou vniká chladný vzduch z místnosti do mezery akumulční stěny, ohřívá se a otvorem u stropu proudí zpět do místnosti. Otvory jsou opatřené klapkami pro regulaci vytápění. Při větrání v létě se do místnosti přivádí čerstvý vzduch ze severní strany domu a nechá se procházet otvorem v akumulční stěně ven. Vzduch se pohybuje samotříž bez ventilátoru.
- b) **Sluneční okno** - je to systém přímý, je součástí pláště budovy a jeho tepelná ztráta je zahrnuta ve ztrátě celého domu. Účinnost slunečního okna ovlivňuje jeho propustnost, tedy počet skel a znečištění. Okna jednoduše zasklená mají účinnost 80 - 85 %, dvojitě zasklená 70 - 75 % a trojitě zasklená 60 - 65 %. Více skel ovlivňuje nazpět tepelnou ztrátu, která je při větším počtu skel menší. Je tedy nutné najít optimální kompromis.
- c) **Sluneční skleník** - nepřímý systém, samostatný prostor bez dalšího zdroje tepla. Teplo se ze skleníku do dalších místností šíří buď sáláním společné stěny nebo prouděním teplého vzduchu. Účinnost skleníku je nízká, podle vzájemné polohy domu a skleníku se pohybuje od 15 do 35 %, proto se ho příliš nevyužívá.

3.2.4 Další typy pasivních systémů

- a) **Energetická fasáda** - v malé vzdálenosti před fasádou je umístěna plocha z tmavého matného plechu, který pohlcuje záření. Sáláním se ohřívá vzduch mezi plechem a fasádou, stoupá vzhůru a přitom se otvory v plechu nasává nový vzduch. Ohřátý vzduch se potrubím rozvádí na místa potřeby za pomoci ventilátoru. Energetická fasáda se umísťuje na jižní stěny bez oken (často tovární haly, sklady), hodí se tam, kde je potřeba výměna velkého objemu vzduchu [4].
- b) **Energetická střecha** - funguje jako vzduchový solární kolektor, který zároveň tvoří střechu. Podrobněji viz kapitola 3.1.3.
- c) **Transparentní tepelná izolace** - spojuje dvě základní žádané vlastnosti - propustnost pro sluneční záření a malou tepelnou ztrátu. Dům opatřený transparentní izolací je tedy obklopen jakýmsi „skleníkem“. Tyto izolace se vyrábí ze skla nebo plastů. Sklo je trvanlivější, levnější, odolné vůči ultrafialové záření i vysokým teplotám. Plasty mají oproti tomu nižší hmotnost (nižší nároky na nosnou konstrukci) a umožňují vyrobít tabuli se vzduchovými dutinami jako kompaktní člen.

Podle geometrie dutin rozlišujeme izolace:

- s rovnoběžnými buňkami,
- s kolmými buňkami,
- izolace z akrylátové pěny,
- aerogelové izolace [18].

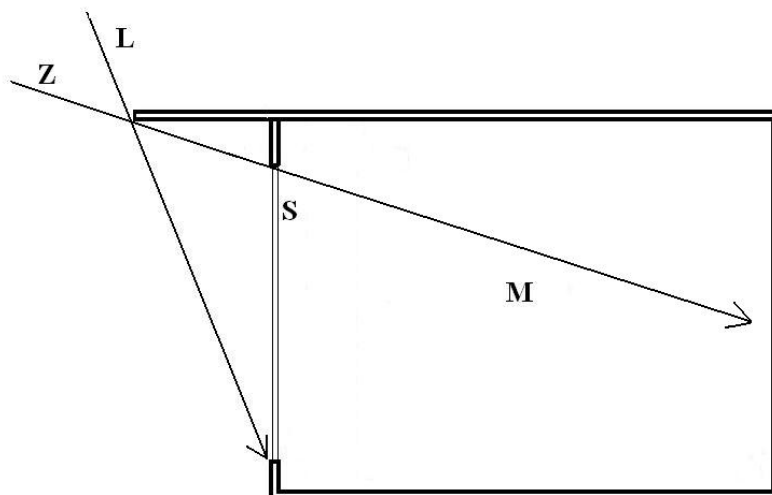
- d) **Fasádní masivní stěna s transparentní izolací** - před masivní stěnou je umístěna transparentní izolace, která umožňuje procházet slunečnímu záření na stěnu, ale díky svému vysokému tepelnému odporu omezuje přenos tepla zpět - vzduchové dutiny v izolaci snižují přestup na minimum a tepelná energie se šíří masivní stěnou dále do interiéru s časovým zpožděním, odpovídajícím tepelně akumulacím vlastnostem stěny. Účinnost stěny roste s vyšším tepelným odporem transparentní izolace a s vyšší tepelnou vodivostí akumulacím stěny [18].

3.2.5 Ochrana proti přehřívání

Zatímco v chladné části roku je třeba využít energie slunečního svitu co nejvíce, v létě, kdy intenzita záření roste a zároveň se nevyužívá vytápění, je nutné účinnost solárních systémů snižovat. Dosahuje se toho clonami, a to buď pevnými nebo pohyblivými, které mají v létě co nejvíce stínit a naopak v zimě umožnit přísun tepla k systému. Využívá se přitom proměnlivá výška slunce nad obzorem během dne i během celého roku.

a) **Pevné clony** - mohou to být stříšky nad okny, rošty, lamely nebo boční zástěny vedle oken. Konstrukce je volena s ohledem na celkový vzhled objektu. Tomu odpovídá i zvolený materiál - lehký kovový rošt, předsunutá betonová deska, dřevěné desky. Clonu může představovat i sama hmota domu, např. předsunuté horní podlaží, balkon či přesah střechy. Jako přírodní clona mohou sloužit patřičně rozmístěné listnaté stromy či porost na stěnách budovy. Funkce vodorovné stříšky nad oknem je znázorněna na obr. 3-5. Stříška se konstruuje tak, aby její stín v poledne v den letního slunovratu (kdy je slunce nejvýše na obloze a intenzita záření je největší) sahal těsně pod spodní okraj okna. Paprsky se do místnosti nedostanou přímo, pouze

odrazy. Zároveň nesmí stříška zastiňovat okno, když je slunce během roku nejnižší (za zimního slunovratu).



Obr. 3-5 Funkce vodorovné stříšky

L - sluneční paprsky v letním slunovratu 21.6.; S - sluneční okno; M - místnost; Z - sluneční paprsky v zimním slunovratu 22.12.;

b) Pohyblivé clony - obvyklé prostředky jako stahovací rolety a vyklápěcí žaluzie jsou rozšířeny o samočinně se nastavující clony, které vyhodnocují polohu slunce na obloze a přizpůsobují tomu svoji polohu. Mimo přístupu tepla clony omezují i osvětlení místností. Žaluzie s oblými lamelami lze nastavit tak, aby záření nevstupovalo dovnitř přímo, ale částečně se odrazilo do exteriéru a částečně do interiéru. Osvětlení je pak zajištěno difúzním zářením. Clony se umísťují vně nebo uvnitř. Vnější clony mají podstatnou výhodu v tom, že zachytí a odrazí paprsky ještě před vstupem do systému a jsou tím účinnější. Nevýhodou je neustálé vystavení povětrnosti a často nesnadná údržba, což vyžaduje jednoduchou, spolehlivou a masivní konstrukci.

3.2.6 Tepelný zisk

Na zasklenou plochu dopadá během dne energie podle vztahu (2.6), část se ale odrazí zpět a pohlcená energie je podle [4]:

$$Q_{Aden} = p Q_{Sden} \quad (\text{W.h.m}^{-2}; 1, \text{W.h.m}^{-2}) \quad (3.1)$$

p – propustnost zasklené plochy, $p = 1 - r$

Propustnost plochy závisí na počtu průsvitných vrstev a na jejich znečištění. Pro jednoduché zasklení je $p = 0,85$, při dvojitém $0,75$ a trojitým $0,65$ za běžného znečištění. Ztrátu energie lze vypočítat jako:

$$Q_{Zden} = 0,024 k \Delta t \quad (\text{W.h.m}^{-2}; \text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (3.2)$$

kde k – součinitel prostupu tepla

Δt – rozdíl vnitřní a vnější teploty [1]

Celková získaná energie je rozdíl mezi energií absorbovanou a ztrátovou podle [3]:

$$\Delta Q_{den} = Q_{A_{den}} - Q_{Z_{den}} \text{ (J; J, J)} \quad (3.3)$$

3.2.7 Výpočet prvků

Výpočet spočívá v určení velikosti zasklené plochy, která má propouštět dostatek energie v zimním období. Není ale možné pokrýt vždy celou spotřebu energie, protože v zimě jsou dny spíše oblačné než jasné. Pasivní prvek musí být doplněn dalším rezervním zdrojem tepla. Pro zasklené plochy udává [4] vztah:

$$Q_{S_{dent}} \frac{S_x}{S_n} \eta_x = 24 q \Delta t \text{ (W.h.m}^{-2}, \text{ m}^{-2}, \text{ m}^{-2}, \text{ 1; h, W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ K)} \quad (3.4)$$

$Q_{S_{dent}}$ – teoretické množství energie za den

S_x – zasklená plocha

S_n – půdorysná plocha vytápěných prostor

η_x – účinnost prvku

q – tepelný faktor budovy

Δt – rozdíl vnitřní a vnější teploty

Sluneční akumulární stěna může pojmout tolik tepla, kolik ho absorbuje okno, účinnosti stěny a okna se rovnají. Podle [4] se volí plocha akumulární stěny rovná ploše okna.

S ohledem na kapitolu 3.2.3 a) lze pro sluneční okno psát po úpravě (3.4) vztah pro poměrnou plochu (násobek půdorysné plochy S_n):

$$\frac{S_o}{S_n} = \frac{24 q \Delta t}{\eta_x Q_{S_{dent}}} \text{ (m}^{-2}, \text{ m}^{-2}; \text{ h, W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ K, 1, J, m}^{-2} \text{)} \quad (3.5)$$

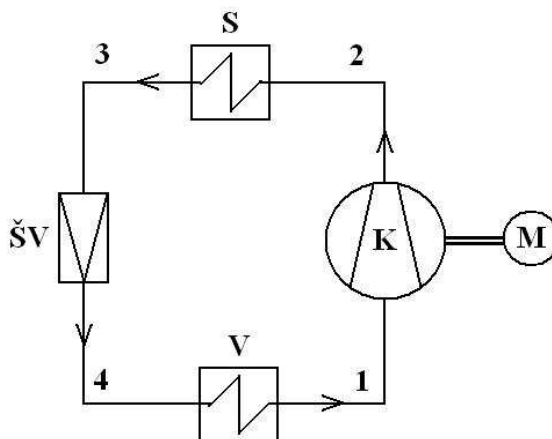
Plocha zasklení je tedy určena násobkem půdorysné plochy prostoru, do kterého má být přiváděno teplo získané oknem.

4 TEPELNÁ ČERPADLA

Tepelné čerpadlo (TČ) je stroj, který umožňuje získávat teplo z látky o poměrně nízké teplotě a přečerpá je na vyšší teplotní hladinu. Používá se k vytápění objektů, ohřívání vody, k odpařování látek apod. TČ sestává z vnější a vnitřní části: Vnější část odebírá teplo zvolenému prostředí (voda, země, vzduch) a přenáší je k vnitřní části, která zajišťuje zvýšení teploty a účelné využití získaného tepla [9].

4.1 Princip a energetické zhodnocení tepelného čerpadla

Konstrukce i funkce TČ se podobá chladicímu zařízení s uzavřeným oběhem pracovní látky (chladiva). Princip znázorňuje obr. 4-1. Výparník V odebírá zdroji teplo o nízké teplotě. Získané teplo se váže na pracovní látku, která se tím odpařuje. Páry stlačuje kompresor K na vysoký tlak (a tím je ohřívá), páry v srážníku (kondenzátoru) S kapalní a odevzdávají do okolí teplo s vyšší teplotou. Z kondenzátoru je kapalina vedena do škrťacího ventilu ŠV, kde škrćením sníží svůj tlak, a vrací se zpět do výparníku.



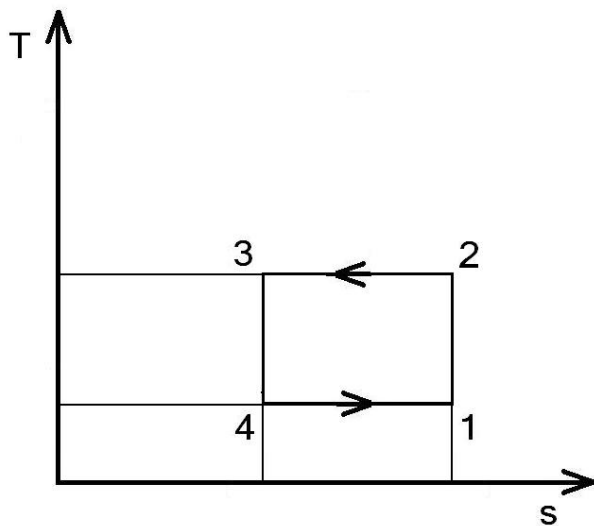
Obr. 4-1 Schéma tepelného čerpadla

K - kompresor; M - pohon kompresoru; S - srážník (kondenzátor); ŠV - škrťací ventil; V – výparník

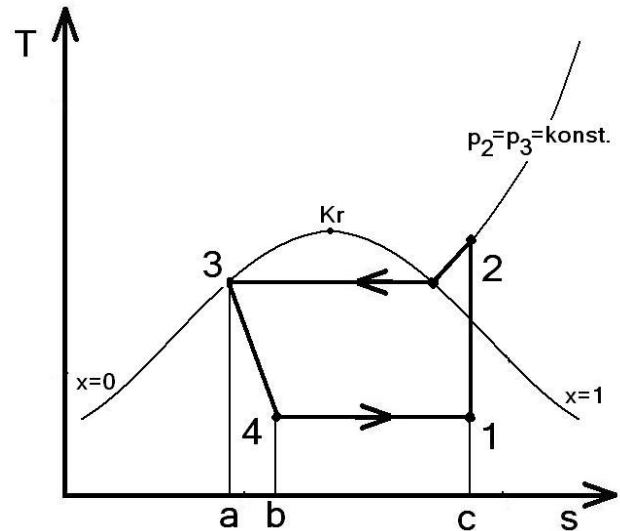
Tlak chladiva na výstupu z kompresoru musí být takový, aby teplota chladiva byla vyšší než látky v druhém okruhu výměníku.

Práce tepelného čerpadla se přirovnává k ideálnímu Carnotovu oběhu, který lze výhodně vynést do T-s diagramu (obr. 4-2 a). Chladivo se ve výparníku vypařuje za stálého tlaku (změna 4 - 1), izoentropicky se stlačí (1 - 2), izobaricky kondenzuje a odevzdává užitečné teplo (2 - 3), dále ve škrťacím ventilu izoentropicky expanduje (3 - 4) a je schopno znovu přijmout teplo a odpařit se. Reálný termodynamický děj v tepelném čerpadle probíhá s reálným plynem a odpovídá Clausiovu - Rankinovu oběhu (obr. 4-2 b). Procesy mezi jednotlivými stavy se shodují s Carnotovým dějem.

Měrné výparné teplo odebrané zdroji tepla je v Carnotově oběhu plocha pod úsečkou 4 - 1, v Clausiově - Rankinově oběhu plocha 4 - 1 - c - b - 4. Měrné teplo získané po přečerpání je v obou případech plocha pod křivkou 2 - 3. Rozdílem těchto tepel je energie (nejčastěji elektrická) dodaná pro pohon kompresoru [20].

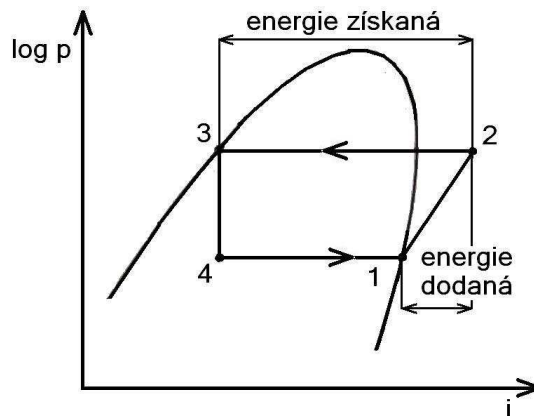


Obr. 4-2 a) Ideální Carnotův děj



Obr. 4-2 b) Reálný Clausiův - Rankinův děj [16]

Z diagramu $\log p - i$ oběhu čerpadla je zřejmé, že získaná užitečná energie je větší než energie dodaná k pohonu kompresoru. Označení procesů mezi jednotlivými stavy je shodné s předchozími diagramy.

Obr 4-3 Diagram $\log p - i$ [20]

V tepelném oběhu platí, že součet tepla odvedeného pracovní látky (Q_o) a přivedené mechanické práce (W) je roven přivedenému teple (Q_p).

$$Q_o + W = Q_p \quad (\text{J; J; J}) \quad (7.1)$$

Přitom pro levotočivý oběh je:

$$Q_o = -Q'_p \quad (\text{J; J}) \quad (7.2)$$

$$Q_p = -Q'_o \quad (\text{J; J}) \quad (7.3)$$

$$W = -W' \quad (\text{J; J}) \quad (7.4)$$

Po úpravě získáme:

$$Q'_p + W' = Q'_o \quad (J, J; J) \quad (7.5)$$

Dokonalost cyklu vyjadřuje topný faktor. Jeho teoretická hodnota je dána jako podíl přivedeného tepla ku přivedené mechanické práci:

$$\varepsilon_{teor} = \frac{Q'_o}{W'} = \frac{Q_p}{W} = \frac{1}{\eta_{to}} \quad (1; J, J, 1) \quad (7.6)$$

Skutečný TF se udává jako podíl výstupní energie čerpadla (teplo dodané čerpadlem do vytápění) Q a spotřeby elektrické energie E [21]:

$$\varepsilon = \frac{Q}{E} \quad (1; J, J) \quad (7.7)$$

Spotřebou E se rozumí spotřeba kompresoru a všech pomocných zařízení TČ jako ventilátory nebo oběhová čerpadla v primárním i sekundárním okruhu.

Topný faktor se mění s okamžitými podmínkami, proto se určuje jeho průměrná hodnota. Okamžitými podmínkami se myslí především proměnlivá teplota přiváděného tepla jako reakce na počasí. Velikost topného faktoru ovlivňuje teplota zdroje tepla, teplota výstupního tepla, energie dodávaná kompresoru, vlastnosti pracovní látky a konstrukce celého systému. Vysoké hodnoty TF lze dosáhnout vysokou teplotou zdroje tepla a nízkou teplotou látky v sekundárním topném okruhu. Současná tepelná čerpadla mají běžně $\varepsilon > 3$ [14].

4.2 Zdroje tepla

Zdrojem tepla může být odpadní nebo přírodní teplo vázané ve vodě nebo vzduchu, případně v zemi. Mezi prvně uvedené patří látky na výstupech výrobních procesů s teplotou vyšší než má okolí. Látky s vyššími teplotami se využívají nejprve k rekuperaci tepla a až po ochlazení jsou využity tepelným čerpadlem. Dálkový rozvod těchto látek by nebyl příliš ekonomický, proto se čerpadla pracující s odpadním teplem s výhodou staví přímo pro vytápění továrních a výrobních objektů. Přírodní zdroje jsou dostupné v každé oblasti, jsou obnovitelné, jejich využití může dočasně změnit mikroklima (promrzání půdy, ochlazení vodního toku). Rozlišujeme následující zdroje tepla:

a) Podloží a povrchové vrstvy půdy - energie žhavého jádra Země prostupuje k povrchu s průměrným tepelným tokem asi $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ [21], v geotermálních oblastech i více. Na tepelný tok má podstatný vliv tepelná vodivost dané horniny. Teplo lze získávat hlubinnými vrty nebo povrchovými kolektory. Provádí se jeden nebo více hlubinných vrtů do hloubky 50 až 150 m podle výkonu a topného faktoru čerpadla. Paralelní vrty mají být vzdáleny nejméně 10 m, aby se neomezovalo množství tepla přivedeného ze země. Do vrtu se spouští spirála s nemrznoucí směsí, která dále ve výměníku předává teplo pracovní látce. Vrty mají tu výhodu, že jsou nezávislé na výkyvech počasí a dodávají stálé množství tepla o stálé teplotě. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

Povrchové kolektory se pokládají na volný, nejlépe osluněný pozemek asi 1,5 m pod povrch. V této hloubce se změny venkovní teploty ještě projevují, takže výkon čerpadla kolísá. Odnímání tepla způsobuje trvalé snížení teploty v okolí výměníku a tím dlouhodobé snížení tepelného

faktoru. Přísun tepla může zhoršit námraza půdní vlhkosti na kolektorech. Možný odběr tepla výrazně klesá na začátku topného období, v druhé polovině (leden - březen) se již nemění. Výhodou půdních kolektorů je snazší stavba než u vrtu, nevýhodou je potřeba velké plochy, kterou nelze dále nijak zastavět, promrzání půdy a závislost na vnějších podmínkách.

b) Povrchové vody - využitelné jsou pouze nezamrzající vody s dostatečným průtokem, např. větší řeka nebo řeka pod přehradou (vypouštěná voda pochází ode dna, kde je stabilní teplota kolem $+ 4^{\circ}\text{C}$). Voda se buďto přivádí přímo do výparníku TČ nebo se do koryta pokládá výměník. Znečištěná říční voda zanáší výparník a hrozí nebezpečí úniku chladiva do životního prostředí při porušení výparníku. Výměník tyto nevýhody odstraňuje, ale při jeho použití je nutné zapojit vodní čerpadlo a zvyšují se ztráty při výměně voda - teplotonosná látka a teplotonosná látka - chladivo.

c) Spodní voda - významnou vlastností je její stálá teplota. Voda se odebírá ze zdrojové studny a po přečerpání se vypouští do studny vsakovací. Spotřeba vody je značná, proto je potřeba ověřit dlouhodobou čerpací zkouškou vydatnost pramene. Podle [9] se uvažuje spotřeba asi $0,02$ až $0,03$ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ vody na 1 kW topného výkonu. Dlouhodobý zvýšený průtok může způsobit zanesení a omezení vydatnosti studny. Zvláštním případem spodních vod jsou geotermální vody. Při teplotě nad 40°C je lepší přímé využití a TČ napájet až ochlazenou vodou.

d) Sluneční záření - teplo získané slunečními kolektory může po větší část roku pokrýt spotřebu. Pro zajištění celoročního provozu se vytváří bivalentní systémy, kdy je kolektor doplněn TČ. Teplo z kolektoru se vede od akumulátoru, odkud je podle potřeby odebíráno do výparníku TČ. Kombinace TČ a slunečního systému zlevňuje provoz a prodlužuje dobu provozu [9], rostou ale pořizovací náklady.

e) Venkovní vzduch - z ekologického hlediska je považováno [9] za nejvhodnější tepelný zdroj, protože teplo odebrané vnějšímu prostředí se opět vrací formou tepelných ztrát vytápěného objektu. Měrná tepelná kapacita vzduchu a nízký součinitel přestupu tepla mezi vzduchem a výměníkem vyžaduje velké průtočné objemy vzduchu výparníkem. Přívod vzduchu se zajišťuje ventilátorem, jehož příkon je nutné uvažovat v tepelném faktoru. Protože výkon TČ klesá s teplotou přiváděného tepla, je potřeba pro období mrazu systém doplnit přídatným topidlem (vzniká bivalentní systém), např. plynovým kotlem, elektrokotlem nebo nezávislými kamny. Při mrazu může na výměníku vznikat námraza, která zmenšuje přístup vzduchu a tepelnou výměnu a je nutné se jí zbavovat. Odstranit jej lze zpětným chodem TČ, topný faktor se ale dále zhoršuje.

f) Vnitřní vzduch - doplňkovým zdrojem může být odpadní vzduch z ventilace vytápěného objektu, pokud není možné jej přímo rekuperovat. Odpadního vzduchu bývá k dispozici omezené množství a zařízení tak nevystačí pouze s tímto zdrojem.

4.3 Kompresory

Pro použití v TČ musí kompresor správně pracovat v celém rozsahu provozních teplot (řádově $0 - 100^{\circ}\text{C}$) a tlaků ($1 - 3$ MPa). S ohledem na TF má mít nízkou spotřebu energie při plném výkonu, z hlediska provozu má být maximálně spolehlivý, vyžadovat minimální obsluhu a údržbu a mít nízké pořizovací náklady. U starších TČ se používaly pístové a šroubové kompresory, moderní jednotky pracují se spirálovými kompresory.

a) Pístový kompresor - stlačovaná látka je nasáta přes sací ventil pístem do válce, ventil se uzavře, píst látku stlačí, načež se otevře výfukový ventil, látka se vypustí z válce ven a cyklus se

opakuje. Dnes se tento typ kompresoru používá pro levnější TČ, nevýhodou je hlučnost, malá účinnost (nižší TF) a kratší životnost (do 15 let).

b) Spirálový - sestává z pevné a pohyblivé spirály, které jsou v sobě excentricky zasunuté, takže mezi nimi vznikají oddělené prostory. Látka je nasáta na okraji spirál do prostoru, vzájemným pohybem spirál se prostor pohybuje ke středu spirál a zmenšuje se, čímž zvyšuje tlak látky v něm. Jedná se v současnosti o nejpoužívanější typ, cena je vyšší, ale TČ s tímto kompresorem mají dobrý topný faktor, dlouhou životnost (20 let) a nejsou hlučná [21].



c) Šroubový - látka je nejprve šroubem nasáta a oddělena od sacího prostoru. Působením šroubu a rozety se zvyšuje tlak látky a je tlačena k výstupu. Mezi výhody patří nízká hmotnost a malé rozměry, spolehlivost a dlouhá životnost a možnost použití běžných materiálů kvůli malému namáhání. Nevýhodou je nutnost odlučování oleje, který se do kompresoru vstříkuje kvůli utěsnění vůlí a mazání šroubu, dalším negativem je zvýšená hlučnost. Používají se pro střední a vyšší výkony, jsou dražší a proto se používají zřídka.

Obr. 4-4 Spirálový kompresor [13]

4.4 Podmínky topného systému

Vytápěcí systém musí být řešen jako nízkoteplotní s pracovním rozdílem teplot 50/45 °C pro otopnou soustavu s radiátory a 40/35 °C pro podlahové a stěnové vytápění (nižší teplotní úroveň přináší větší energetický efekt - topný faktor se zvyšuje).

Vzhledem k tomu, že používaný pracovní rozdíl teplot topného média je podstatně menší než ve vytápěcím systému s klasickým zdrojem, musí být pro přenesení určitého topného výkonu použit větší, zpravidla více než dvojnásobný průtok topného média. K tomu se musí přihlídnout při návrhu cirkulačních čerpadel, rozvodů i otopné soustavy.

Aby se předešlo nežádoucímu překračování mezní teploty topného média v tepelném čerpadle při změnách průtoku v otopné soustavě, musí být průtok tepelným čerpadlem konstantní a nezávislý na průtoku v otopné soustavě. Tuto podmínku zajišťuje termohydraulický rozdělovač nebo akumulární nádrž ve funkci termohydraulického rozdělovače zařazená do vytápěcího systému.

Aby se předešlo nežádoucímu poklesu teploty při přerušovaném provozu (při blokování provozu vytápění signálem Hromadného Dálkového Ovládání), ale i z dalších důvodů, musí mít vytápěcí systém určitou akumulární schopnost.

Vzhledem k tomu, že při teplotách blízkých teplotě bivalence (venkovní teplota, při které jediný zdroj nepokryje celou energetickou spotřebu a systém začíná pracovat bivalentně) a pod ní nemá tepelné čerpadlo žádnou výkonovou rezervu, musí se za těchto podmínek vytápěcí systém provozovat bez teplotních útlumů [19].

4.5 Druhy tepelných čerpadel

4.5.1 Zařízení podle zdroje a spotřeby tepla

Obvykle se zařízení označují podle látky, které se teplo odebírá a které se teplo předává. Nejčastější kombinace jsou vzduch / voda, vzduch / vzduch, voda / voda, země / voda. Volba záleží na tom, k čemu má čerpadlo sloužit (vytápění teplovodní nebo teplovzdušné, sezónní ohřev užitkové vody, doplňující zdroj tepla v bivalentním systému), na místních podmínkách (podloží nevhodné pro vrt, blízkost nezamrzajícího vodního toku, možnost umístění půdního kolektoru na jinak nevyužitelný pozemek) a samozřejmě na finančních možnostech stavitele. Rozeznáváme čtyři typy TČ [21]:

- a) **Vzduch / voda** - používá se pro ústřední teplovodní vytápění, ohřev užitkové vody, vyhřívání bazénů, nevyžaduje žádný kolektor, TF je více ovlivněn venkovní teplotou než při odebírání tepla vodě či půdě, TF je nižší kvůli nezanedbatelné spotřebě ventilátoru.
- b) **Vzduch / vzduch** - pro teplovzdušné vytápění, klimatizaci, jinak má vlastnosti shodné s předchozím druhem.
- c) **Voda / voda** - pro ústřední teplovodní vytápění, ohřev užitkové vody, vyhřívání bazénů, vyžaduje výměník nebo přívod zdrojové vody, může využívat odpadní teplo, TF se mění pouze v průběhu roku.
- d) **Země / voda** – vlastnostmi shodný s předchozím druhem, potřebuje nákladný vrt nebo půdní výměník, TF je stálý během dne i roku.

4.5.2 Zařízení podle transportu chladiva

Podle způsobu transportu pracovní látky rozeznáváme dva druhy TČ:

a) **Kompresorová** – pracují podle principu popsaného v kapitole 4.1, jsou dnes velmi rozšířená, především jednotky se spirálovými kompresory, které dosahují dobrých výkonů i životnosti.

b) **Sorpční TČ** – nemají kompresor, chladivo se vstřebává do jiné látky, která je může uvolňovat za přestupu tepla. Poháněcí energií je teplo o vyšší teplotě než je na výstupu TČ. Tento druh vykazuje nižší účinnost, v současnosti se téměř nepoužívají [21].

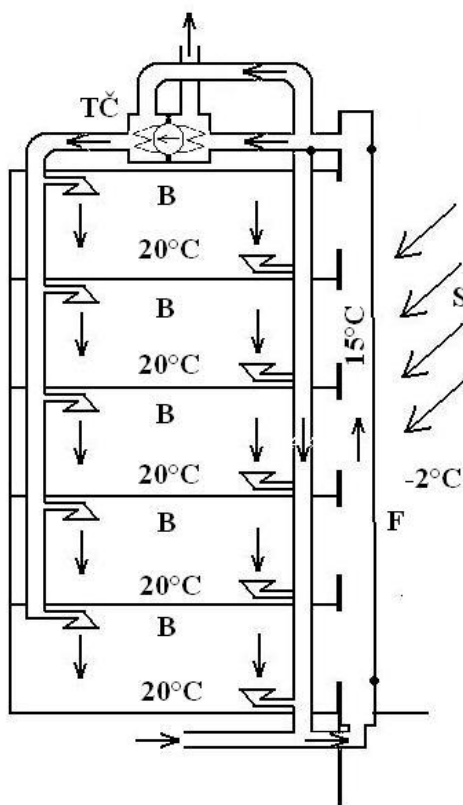
4.5.3 Tepelné čerpadlo pro spolupráci s pasivním solárním systémem

Pasivní solární systémy dosahují v topném období velmi malých tepelných zisků, dostávají se i do ztrát. Z tohoto pohledu by mohlo vytápění doplňovat TČ se stabilním tepelným výkonem. Jak je uvedeno v kapitolách 4.2 a 4.5, má takové vlastnosti TČ odebírající teplo vodě (za studny nebo velké vodoteče) nebo zemi (hlubinný vrt). Mezi TČ a solárním systémem by nebyla přímá vazba, provoz TČ by se řídil velikostí požadované teploty v objektu.

Kombinovaný provoz vytápěcího systému může také zajišťovat pasivní solární systém, na nějž bude navázán primární okruh tepelného čerpadla. Při dobrých slunečních podmínkách dodává solární systém dostatek tepla o teplotě potřebné na pokrytí veškeré spotřeby. Tepelné čerpadlo je odpojeno a do provozu se zařadí až tehdy, kdy solární systém sice dodává teplo, ale o nízké teplotě. Toto teplo se stane zdrojovým pro TČ, které je dále přečerpá na teplo o vyšší teplotě a dodá otopné soustavě. Takový systém by měl být zajištěn třetím nezávislým zdrojem

tepla pro případ velkých mrazů nebo oblačnosti a chladu, kdy by zisk sluneční energie byl nepatrný.

Výhodné by bylo použití čerpadla typu vzduch / vzduch. Vzduch ohříváný při průchodu např. energetickou střechou nebo energetickou fasádou by byl veden přímo k TČ a po ochlazení vypouštěn mimo objekt. Nevznikaly by ztráty při výměně tepla mezi vzduchem a kapalinou (vodou) jako teplonosnou látkou. Vzduch na výstupu z TČ by byl veden průduchy tak jako teplý vzduch z energetické stěny za běžného provozu. Vzduch z fasády by byl přiváděn i do sání sekundárního (topného) vzduchu. Pro ohřev užitkové vody by sloužil tepelný výměník pracující se vzduchem jako látkou ohřívací a užitkovou vodou jako látkou ohřívanou. Výměník by představoval akumulční nádrž s dostatečným objemem. Ten by měl zajistit uchování teplé vody i během doby, kdy by se využíval pouze solární systém (v létě), ale právě by nepracoval (po setmění, při zatažené obloze apod.). Návrh uspořádání je na obr. 4-5, provoz bez TČ je znázorněn na obr. 3-3 a).



Obr. 4-5 Vzduch ohřátý energetickou fasádou jako zdroj tepla pro TČ

B – byty; F – energetická fasáda; S – sluneční záření; TČ – tepelné čerpadlo

5 PODMÍNKY SPOLUPRÁCE TČ S PASIVNÍM SOLÁRNÍM SYSTÉMEM

Základním úkolem TČ a solárního systému je pokrytí energetických potřeb stavby, tedy dodávka energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody. Požaduje se přitom maximální využití energie sluneční. Znamená to použít k vytápění především pasivní solární systém (PSS), v případě modelového objektu jsou to sluneční okna. Teprve při nižších vnějších teplotách (při vyšší potřebě tepla) by se začalo na vytápění podílet TČ. Přebytku tepelných zisků PSS se má využít pro ohřívání užitkové vody. Spolupráce obou zdrojů tepla závisí především na průběhu dodávky tepla solárním systémem a spotřeby tepla na vytápění a ohřev vody během roku.

PSS přeměňují v teplo přímé i difúzní sluneční záření, přičemž přímé záření má vyšší podíl. Zisk systému se proto bude měnit během dne i během roku. Teplo dodané systémem ovlivňuje vzájemná poloha systému a slunce, poměrná doba slunečního svitu (viz kapitola 2.2) a také konstrukční provedení (izolace, druh zasklení apod.). Poměrná doba slunečního svitu respektuje čas, během kterého může slunce teoreticky svítit, ale cloní je mraky. Tato doba se většinou udává pro celé měsíce. Zisk systému během roku mění výška slunce nad obzorem v jednotlivých měsících. Při dvojitým zasklení je zhruba od poloviny listopadu do poloviny února měrná tepelná ztráta vyšší než zisk. Tento rozdíl zvětšený o ztráty budovy a energii vynaloženou na přípravu teplé vody musí uhradit jiný zdroj, tedy TČ nebo elektrický ohřev.

Jak je patrné z kapitoly 3., PSS ohřívá vzduch v místnostech nebo vzduch, který se do místností rozvádí. Aby bylo možné efektivně využít přebytečný ohřátý vzduch, který by jinak působil přehřívání místnosti, lze jej například přivádět na vstup TČ typu vzduch / voda. Pokud přebytek teplého vzduchu není, TČ bere teplo vnějším kolektorem okolnímu vzduchu. Přebytek teplého vzduchu zavedený na vstup zvýší tepelný faktor čerpadla a tím úsporu elektrické energie k pohonu kompresoru a pomocných zařízení (ventilátory). TČ musí být ovšem dimenzováno bez ohledu na PSS pro případ zatažené oblohy. V zimě často nastává zatažené počasí s mrazy (např. při inverzi, která je vzhledem k umístění modelového objektu v údolí pravděpodobná). Tehdy nemusí stačit ani výkon TČ, zálohu může tvořit elektrická spirála v tepelném vodním zásobníku nebo elektrokotel, který dnes již bývá součástí jednotky TČ. K určení potřebného výkonu TČ a elektrického ohřevu se stanoví tepelná bilance objektu, tj. roční potřeba tepla k vytápění a k přípravě TUV a dále rozdíl energie spotřebované objektem a energie dodané objektu slunečními okny. Nedostatek tepla rozhodne o dimenzování TČ. Efektivně navržené tepelné čerpadlo má být dimenzováno na výkon odpovídající 2/3 maximální tepelné ztráty včetně tepelného výkonu na TUV, neboť dimenzování na celou tepelnou ztrátu by bylo neekonomické. Doba, po kterou by byl plný výkon TČ využit, je velmi krátká (řádově dny za rok). Zvýšenou spotřebu tepla po tuto dobu proto kryje další zdroj, např. zmiňovaný elektroohřev.

6 ZAPOJENÍ KOMBINOVANÉHO SYSTÉMU TČ A PSS

6.1 Popis objektu

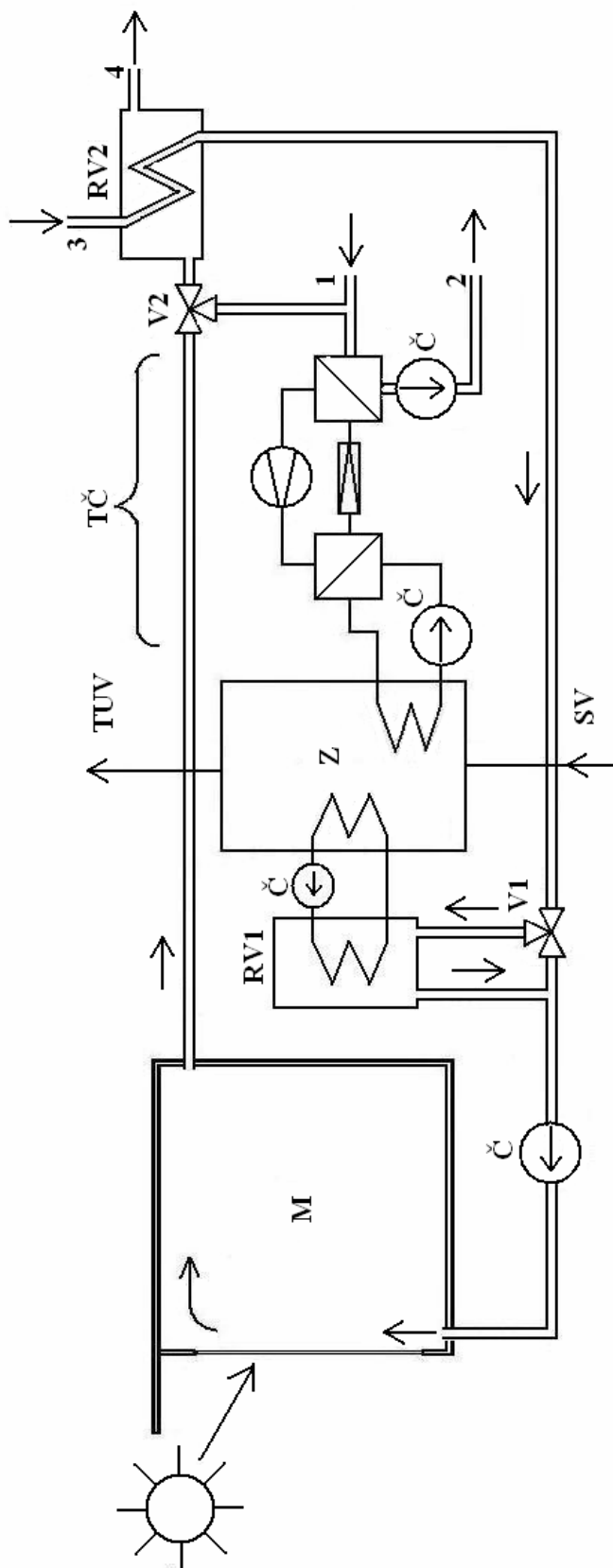
Otopný systém bude navržen a energeticky i ekonomicky zhodnocen pro konkrétní dům. Jedná se o typizovanou montovanou dřevostavbu s přízemím a podkrovím, pultovou střechou (Obr. 6-1). Dům je umístěn na brněnském výstavišti. Obdélníkový půdorys je orientován delší stranou k jihu. V přízemí se nachází předsíň, WC, technická místnost a dále prostor spojující kuchyň, jídelnu a obývací část (Obr. 6-3). Točité schodiště vystupuje do podkroví s ložnicí, dvěma pokoji, koupelnou a balkonem. Obytné místnosti v domě přiléhají k jižní stěně, zázemí pak k severní a východní. Vytápění je teplovzdušné s rekuperací. Půdorysné rozměry jsou 7,62 m a 11,56 m, celková zastavěná plocha činí 99,67 m². Podlahová plocha přízemí je 75,61 m², plocha podkroví 74,28 m². Trámová konstrukce je vyplněna izolačním materiálem a celý dům je obložen polystyrénovou izolací. Součinitel prostupu tepla stěnami dosahuje 0,23 Wm⁻²K⁻¹. Pasivní solární systém je tvořen v každém podlaží vždy osmi slunečními okny (Obr. 6-1) s prosklenou plochou (0,64 x 1,8) m², dohromady 9,216 m² v každém podlaží. Měrná tepelná ztráta slunečního okna je 1,3 Wm⁻².K⁻¹.



Obr 6-1 Pohled na dům od jihozápadu

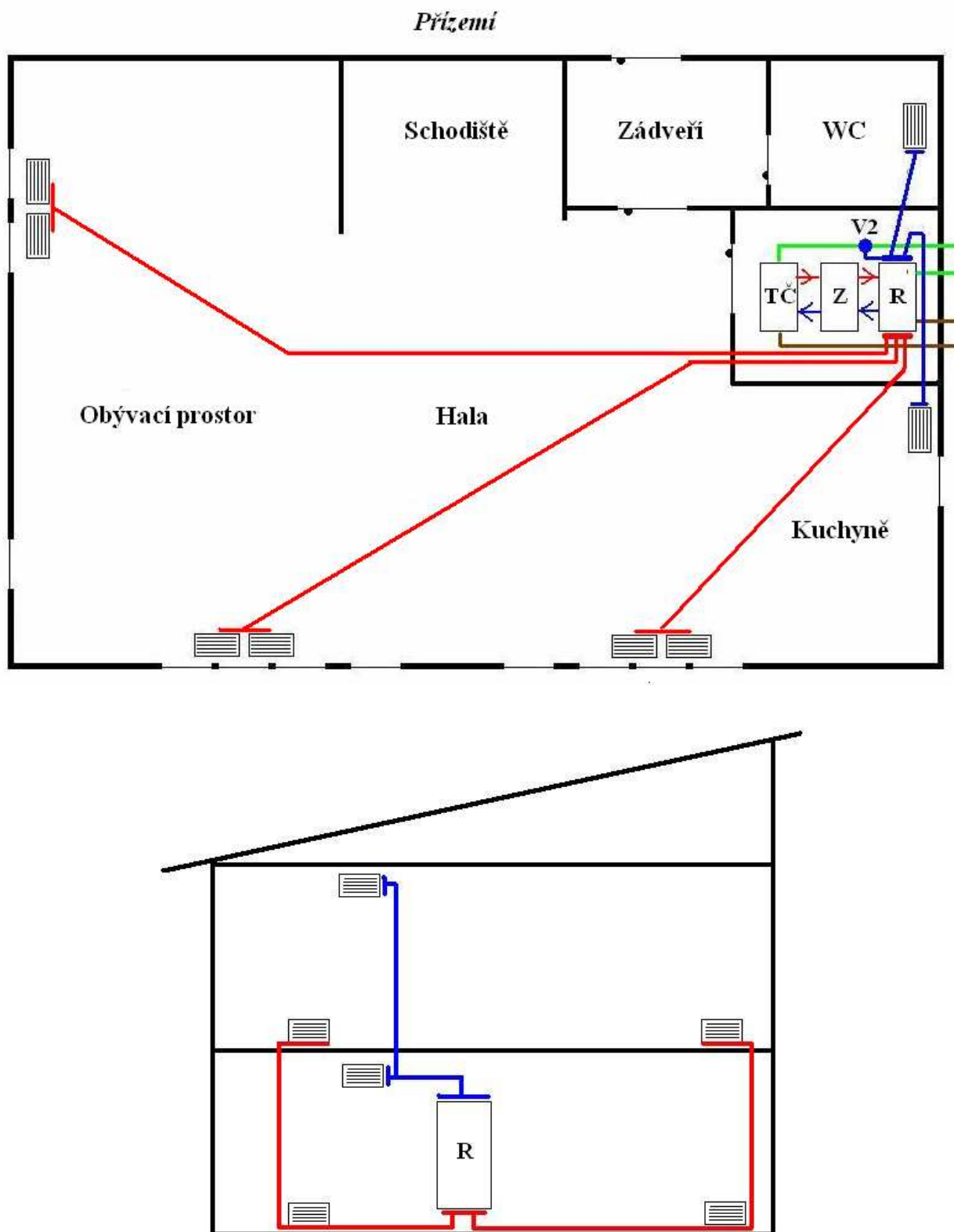
6.2 Návrh otopného systému

Návrh vychází z výše popsaných základních požadavků – co nejvíce využít energii dodanou solárním systémem a druhořadě využívat TČ – a z provedení daného objektu, tj. použití teplovzdušného vytápění a využití konkrétních slunečních oken. Za běžného provozu stačí PSS



Obr. 6-2 Schéma zapojení otopného systému

1, 2 – sání, výfuk zdrojového vzduchu; 3, 4 – sání, výfuk otopného vzduchu; Č – čerpadlo, ventilátor; M – místnost; RV1,2 – rekuperační výměník, ohřívač vzduchu; SV – přívod studené vody; TČ – tepelné čerpadlo; TUV – odvod užitkové vody; V1, V2 – trojcestné ventily; Z – zásobník s výměníky



Obr. 6-3 Schematické uspořádání otopné soustavy v objektu

TČ – tepelné čerpadlo; R – rekuperační jednotka; Z – tepelný zásobník; červená – čerstvý topný vzduch; modrá – odpadový topný vzduch; zelená – sání čerstvého vnějšího vzduchu; hnědá – výfuk odpadního vzduchu. Pozn. Není znázorněn přívod studené vody a odvod TUV do zásobníku

vytápět prostory sám o sobě. Pokud jeho výkon nestačí, odebírá se teplo ze zásobníku, kam je dodává TČ. Teplo ze zásobníku se malým vodním okruhem přenáší do výměníku voda – vzduch, který ohřívá čerstvý vzduch předeřhřátý rekuperací. Jako doplňkový a záložní zdroj tepla slouží elektrický ohřev vestavěný v TČ. Schéma navrhovaného otopného systému znázorňuje Obr. 6-2.

Za teplého počasí, kdy PSS dodává více tepla, než je k vytápění nutné, budou přebytečné tepelné zisky odváděny přes ventil V2 na vstup tepelného čerpadla, kde se smísí se vzduchem nasávaným zvenku a zvýší jeho teplotu. Průchod topného vzduchu přes tepelný zásobník Z je nežádoucí a proto proudí ventilem V1 přímo do vytápěné místnosti M. Teplo vyrobené TČ se využívá pouze na přípravu TUV v tepelném zásobníku Z.

Za studeného počasí TČ nasává vzduch pouze zvenku a vyrobené teplo ukládá do tepelného zásobníku. Čerstvý topný vzduch je nasáván přes rekuperační výměník RV, kde je ohřát odpadním topným vzduchem. Ohřátý čerstvý vzduch postupuje do výměníku v zásobníku Z a dále do místnosti M. Teplo uložené v tepelném zásobníku se využívá k topení a k přípravě TUV.

Oběhy topného vzduchu a vody zajišťují ventilátory a čerpadla Č, přepínání okruhů se děje ventily V1, V2. Ventil V1 a výměníky RV1 a RV2 jsou součástí rekuperační jednotky. Uspořádání soustavy v objektu ukazuje Obr. 6-3. Na horním obrázku je zapojení rozvodů v přízemí, na spodním obrázku je znázorněno propojení průduchů mezi patry (prosmyčkování). Tepelné čerpadlo, rekuperační jednotka a tepelný zásobník jsou umístěné v technické místnosti v přízemí. Čerstvý topný vzduch se rozvádí kanály uloženými v podlaze a ve stěnách k průduchům umístěným pod okny v obývacích částech domu. Odpadní topný vzduch se odsává z prostor s vyšším předpokládaným znečištěním vzduchu (kuchyně, WC, koupelna), aby se zabránilo šíření pachů do ostatních částí objektu. K proudění vzduchu mezi místnostmi se využívají otvory pode dveřmi [3].

6.3 Výpočet potřeby tepla

Roční potřeba objektu sestává z potřeby tepla na vytápění a potřeby na ohřev užitkové vody. Výpočet množství těchto tepel uvádí ČSN 06 0210. Pro vyhodnocení tepelné bilance objektu, slunečního okna a přípravy TUV během roku se stanoví i tepelné potřeby v jednotlivých měsících.

6.3.1 Výpočet potřeby tepla na vytápění

Při výpočtu spotřeby tepla za rok se vychází z celkové tepelné ztráty objektu, denostupňů, vnitřních a vnějších teplot a výsledek se koriguje opravným součinitelem. Dle [7] platí

$$Q_{v,r} = \frac{24Q_c \varepsilon D}{T_i - T_{e \min}} \quad (\text{kW rok}^{-1}; \text{h, kW, } ^\circ\text{C, } ^\circ\text{C}) \quad (6.1)$$

kde Q_c – celková tepelná ztráta objektu,

ε – opravný součinitel,

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_d}{\eta_o \eta_r} \quad (-; -, -, -, -, -) \quad (6.2)$$

ε_i - součinitel vlivu infiltrace,

ε_e – součinitel vlivu snížení teploty v místnosti během dne či noci,

ε_d – součinitel zkrácení doby vytápění pro budovy s přestávkami v provozu (např. provoz pěti dní v týdnu),

η_o – účinnost rozvodů,

η_r – účinnost regulace soustavy

D – počet denostupňů, tj. součin dnů otopného období a rozdílu průměrné vnější teploty T_{es} v otopném období a výpočtové vnější teploty T_e ;

$$D = d \cdot (T_{es} - T_{e \min}) \quad (6.3)$$

T_i , $T_{e \min}$ – průměrná vnitřní a výpočtová vnější teplota; vnitřní teplota se stanovuje podle účelu objektu (obytný, sklad apod.), vnější teplota se určuje z tabulek podle zeměpisné oblasti,

d – počet dnů otopného období.

Hodnoty pro návrh jsou:

$$Q_c = 6,7 \text{ kW}$$

$$\varepsilon_i = 0,9, \varepsilon_e = 0,8, \varepsilon_d = 1,0, \eta_o = 0,95, \eta_r = 0,95$$

$$T_i = 19 \text{ }^\circ\text{C}, T_{e \min} = -12 \text{ }^\circ\text{C} [7], T_{es} = 3,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$d = 222 \text{ dní [7]}$$

Po dosazení do (6.1), (6.2) a (6.3)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_e \cdot \varepsilon_d}{\eta_o \cdot \eta_r} = \frac{0,9 \cdot 0,8 \cdot 1,0}{0,95 \cdot 0,95} = 0,80$$

$$D = d \cdot (T_{es} - T_{e \min}) = 222(3,6 - (-12))^\circ\text{C} = 3463^\circ\text{C}$$

$$Q_{v,r} = \frac{24 Q_c \varepsilon D}{T_i - T_e} = \frac{24 \cdot 6,7 \text{ kW} \cdot 0,8 \cdot 3463^\circ\text{C}}{(19 - (-12))^\circ\text{C}} = \underline{\underline{14,73 \text{ MWh.rok}^{-1}}} = \underline{\underline{53,028 \text{ GJ.rok}^{-1}}}$$

Spotřeba tepla na vytápění za jednotlivé měsíce topného období se určí z poměrné hodnoty skutečného rozdílu vnější a vnitřní teploty a rozdílu maximálního (výpočtového):

$$Q_{vmém} = 24 n Q_c \frac{T_i - T_e}{T_i - T_{e \min}} \quad (\text{kWh.měs}^{-1}; \text{h, -, kW, }^\circ\text{C}) \quad (6.4)$$

6.3.2 Výpočet potřeby tepla na ohřev užitkové vody

Výchozími hodnotami výpočtu je denní potřeba tepla, délka otopného období a teploty studené vody v létě a v zimě. Denní potřeba tepla se vypočte dle [7] jako

$$Q_{t,d} = \rho c V_{2p} \frac{t_2 - t_1}{3600} \quad (\text{kWh}; \text{kgm}^{-3}, \text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}, \text{m}^3, \text{ }^\circ\text{C}) \quad (6.5)$$

kde ρ – hustota vody,

c – měrná tepelná kapacita vody,

V_{2p} – celková potřeba TUV během jedné periody (dne); podle Vyhlášky č. 428/2001 Sb. se počítá 56 m³ studené vody na osobu a rok. Teplá voda představuje 30 % objemu studené vody, tj. 16,8 m³ TUV na osobu a rok. [1]. Pro čtyřčlennou rodinu bude $V_{2p} = 0,18 \text{ m}^{-3}$.

t_1, t_2 – teplota studené a teplé užitkové vody.

Roční potřeba tepla na přípravu TUV se potom podle [7] stanoví jako

$$Q_{t,r} = Q_{t,d} \cdot d + 0,8 Q_{t,d} \frac{55 - t_{svl}}{55 - t_{svz}} (350 - d) \quad (\text{kWh.rok}^{-1}; \text{kWh}, -, \text{kWh}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, -) \quad (6.6)$$

kde $Q_{t,d}$ – denní potřeba tepla,

t_{svl}, t_{svz} – teplota studené vody v létě, v zimě,

d – počet dní otopné sezóny.

Hodnoty pro návrh jsou:

$$\rho = 1000 \text{ kgm}^{-3}$$

$$c = 4,182 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$V_{2p} = 0,18 \text{ m}^{-3}$$

$$t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t_{svl} = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t_{svz} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$d = 222 \text{ dní}$$

Dosazením do (6.4) a (6.5) se získá roční potřeba tepla pro ohřev užitkové vody

$$Q_{t,d} = \rho c V_{2p} \frac{t_2 - t_1}{3600} = 1000 \text{ kgm}^{-3} \cdot 4,182 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1} \cdot 0,18 \text{ m}^{-3} \frac{55^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}}{3600} = 9,41 \text{ kWh}$$

$$\begin{aligned} Q_{t,r} &= Q_{t,d} \cdot d + 0,8 Q_{t,d} \frac{55 - t_{svl}}{55 - t_{svz}} (350 - d) = 9,41 \text{ kWh} \cdot 222 + 0,8 \cdot 9,41 \text{ kWh} \frac{55^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}}{55^\circ\text{C} - 7^\circ\text{C}} (350 - 222) = \\ &= \underline{\underline{2,89 \text{ MWh.rok}^{-1} = 10,4 \text{ GJ.rok}^{-1}}} \end{aligned}$$

Teplu spotřebované na přípravu TUV za měsíc se pak vypočte jako násobek tepla spotřebovaného za den a počtu dní v příslušném měsíci

$$Q_{tm\acute{e}m} = Q_{t,d} n \quad (\text{kWh.m\acute{e}s}^{-1}; \text{kWh.den}^{-1}, -, -) \quad (6.7)$$

6.3.3 Tepelný zisk PSS

Čistý tepelný zisk obnáší zjištění rozdílu mezi teplem absorbovaným slunečním oknem $Q_{Am\acute{e}s}$ a vyzářeným zpět $Q_{Zm\acute{e}s}$ během měsíce.

$$Q_{Am\acute{e}m} = S_{ok} \eta_{ok} n (\tau Q_{S\text{ den}} + (1 - \tau) Q_{D\text{ den}}) \quad (\text{kWh}; \text{m}^2, -, -, -, \text{kWh}, -, \text{kWh}) \quad (6.8)$$

kde S_{ok} – zasklená plocha okna, zde $S_{ok} = 18,432 \text{ m}^2$,

η_{ok} – účinnost slunečního okna, [4] uvádí účinnost pro sluneční okna s dvojitým zasklením 0,7,

n – počet dní v měsíci,

τ – poměrná doba slunečního svitu,

Q_{Sdent} – energie dopadající na sluneční okno během jasného den,

Q_{Dden} - energie difúzního záření.

Tabulkové hodnoty Q_{Sdent} a Q_{Dden} použité při výpočtech uvádí [3].

$$Q_{Změm} = 0,024 n U \Delta t S_{ok} \quad (\text{kWh}; \text{h} \cdot 10^{-3}, -, \text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}, \text{m}^2) \quad (6.9)$$

U – měrná tepelná ztráta systému, na měřených slunečních oknech je $U = 1,3 \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Δt – rozdíl měsíční průměrné teploty vnitřní a vnější $t_i - t_e$.

6.3.4 Bilance pro jednotlivé měsíce v roce

Bilance tepelné energie dává představu, jak se během roku budou na vytápění podílet TČ a PSS. Tab. 6-1 a) zahrnuje potřebu tepla domu a tomu odpovídající tepelný výkon v jednotlivých měsících. Uvádí i celkovou potřebu tepla za rok bez uvažování příspěvků slunečních oken. Tab. 6-1 b) obsahuje tepelný zisk PSS jako rozdíl energie absorbované a ztrátové a spolu s výsledky Tab. 6-1 a) udává celkovou měsíční a roční bilanci potřeby tepla, tedy teplo, které bude nutné dodat tepelným čerpadlem.

Tab. 6-1 a) Spotřeba tepla na vytápění v jednotlivých měsících

Měsíc	t_e (°C)	Δt (°C)	Potřeba tepla			Tepelný výkon		
			$Q_{vměs}$ (kWh)	$Q_{tměs}$ (kWh)	Q_1 (kWh)	$P_{vměs}$ (kW)	$P_{tměs}$ (kW)	P_1 (kW)
Leden	-2,5	21,5	3457,2	291,7	3748,9	4,65	0,39	5,04
Únor	-0,3	19,3	2803,1	263,5	3066,6	4,17	0,39	4,56
Březen	3,8	15,2	2444,2	291,7	2735,9	3,29	0,39	3,68
Duben	9,0	10,0	1556,1	282,3	1838,4	2,16	0,39	2,55
Květen	13,9	5,1	820,1	291,7	1111,8	1,10	0,39	1,49
Červen	17,0	2,0	311,2	282,3	593,5	0,43	0,39	0,82
Červenec	18,5	0,5	80,4	291,7	372,1	0,11	0,39	0,50
Srpen	18,1	0,9	144,7	291,7	436,4	0,19	0,39	0,58
Září	14,3	4,7	731,4	282,3	1013,7	1,02	0,39	1,41
Říjen	9,1	9,9	1591,9	291,7	1883,6	2,14	0,39	2,53
Listopad	3,5	15,5	2412,0	282,3	2694,3	3,35	0,39	3,74
Prosinec	-0,6	19,6	3151,7	291,7	3443,4	4,24	0,39	4,63
Celková potřeba tepla za rok					22938,6			

Vysvětlivky k Tab. 6-1 a) :

t_e - průměrná vnější teplota podle [6],

Q_1 – součet tepla na vytápění $Q_{vměs}$ a na přípravu TUV $Q_{tměs}$; $Q_{vměs}$ se určí podle (6.4), $Q_{tměs}$ podle (6.7),

tepelný výkon P je vždy příslušné teplo dělené počtem hodin v měsíci.

Tab. 6-1 b) Teplo získané slunečním oknem v jednotlivých měsících a bilance

Měsíc	Δt (°C)	Tepelný zisk				Bilance		
		$Q_{Aměs}$ (kWh)	$Q_{Změs}$ (kWh)	Q_2 (kWh)	P_2 (kW)	ΔQ (kWh)	ΔP (kW)	p (-)
Leden	21,5	419,57	383,29	36,28	0,048	-3712,62	-4,990	0,098
Únor	19,3	719,495	310,77	408,72	0,608	-2657,88	-3,955	0,133
Březen	15,2	1083,12	270,98	812,14	1,092	-1923,76	-2,586	0,297
Duben	10,0	1087,63	172,52	915,11	1,271	-923,29	-1,282	0,498
Květen	5,1	1178,16	90,92	1087,24	1,461	-24,56	-0,033	0,978
Červen	2,0	1178,90	34,50	1144,40	1,589	550,9	0,765	1,928
Červenec	0,5	1273,18	8,91	1264,27	1,699	892,17	0,199	3,397
Srpen	0,9	1342,71	16,04	1326,67	1,783	890,27	1,196	3,040
Září	4,7	1261,81	81,09	1180,72	1,640	167,02	0,232	1,164
Říjen	9,9	901,22	176,49	724,73	0,974	-1158,87	-1,557	0,384
Listopad	15,5	475,00	267,41	207,59	0,288	-2486,71	-3,453	0,077
Prosinec	19,6	265,41	349,42	-84,01	-0,113	-3527,41	-4,741	-0,024
Celkový rozdíl za rok						-13914,7		

Vysvětlivky k Tab. 6-1 b):

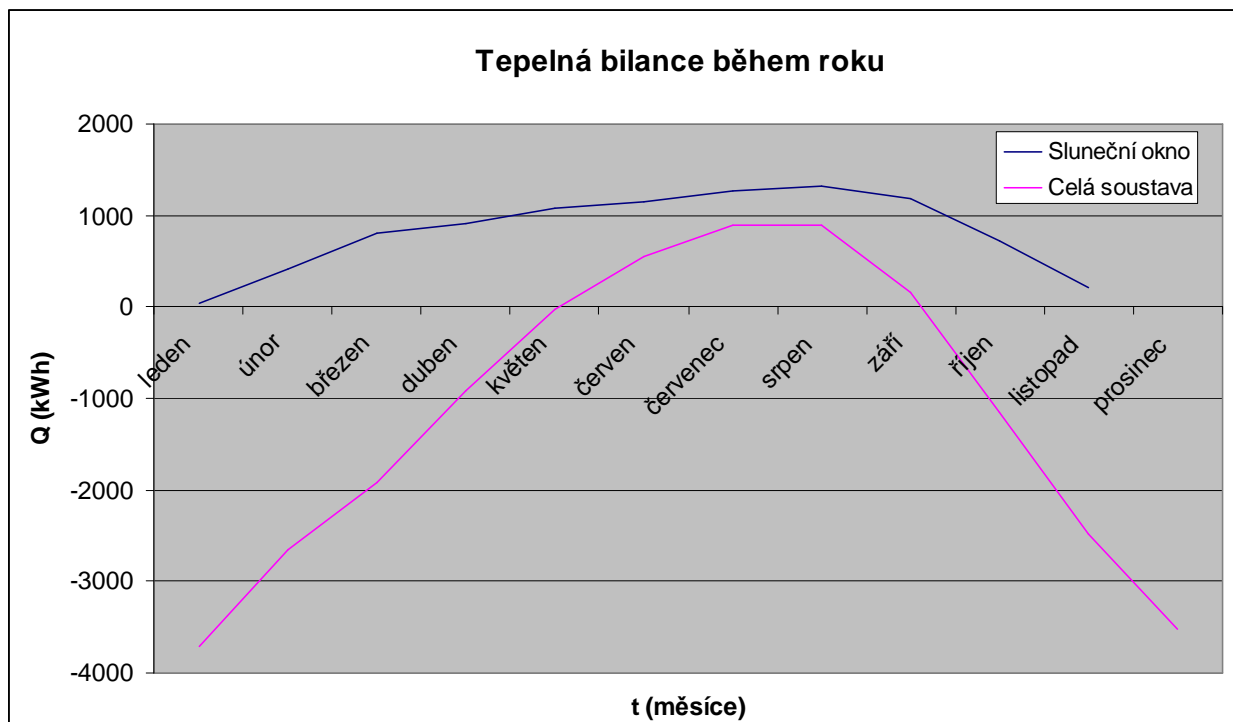
Q_2 – rozdíl mezi teplem absorbovaným slunečním oknem $Q_{Aměs}$ a jeho teplem ztrátovým $Q_{Změs}$, $Q_2 = Q_{Aměs} - Q_{Změs}$; $Q_{Aměs}$ se určí podle (6.8), $Q_{Změs}$ podle (6.9),

ΔQ – rozdíl teplem dodaným slunečním oknem Q_2 a mezi teplem spotřebovaným objektem Q_1 (Q_1 z Tab. 6-1a), $\Delta Q = Q_2 - Q_1$, záporná hodnota znamená nedostatek tepla,

p – podíl tepla dodaného slunečními okny na celkové spotřebě tepla, $p = Q_2 / Q_1$, záporná hodnota znamená krytí tepelné ztráty okna jiným zdrojem tepla, podíl vyšší než 1 znamená přebytek tepla.

Aby bylo možné porovnat vliv PSS na úsporu tepla, lze výpočet provést i pro menší zasklenou plochu, která by odpovídala velikosti běžných oken. Při zvolené ploše činicí $\frac{1}{4}$ plochy slunečních oken by celková roční potřeba energie byla **20682,6 kWh**. Srovnáním s celkovou

potřebou tepla při použití PSS je představuje tato spotřeba 148,6 % spotřeby s PSS. Obráceně lze říci, že PSS tvoří roční úsporu 32,7 % tepelné energie.



Obr. 6-4 Graf tepelné bilance slunečního okna a celé soustavy (objektu) v roce

6.3.5 Závěry bilance

Z Tab.6.1 b) vyplývá, že sluneční okno se pohybuje ve ztrátě pouze v prosinci. Z celkové bilance je dále vidět, že celá soustava je ve ztrátě od října do května, během kterého se na dodávce tepla podílí sluneční okno nejvýše 38,4 % a nejméně -9,8 % (je nutné krýt ztráty slunečního okna). V červnu, červenci, srpnu a září vykazuje systém přebytek tepla, kdy sluneční okno dodává i více než trojnásobek potřebného tepla. Přebytečné teplo ze slunečních oken nedovede TČ využít stoprocentně. Na konci tabulky je zapsán celkový rozdíl za rok, který vyjadřuje teplo, které je nutné do objektu přivést TČ. Je to také výchozí hodnota pro vypočtení ročních nákladů na dodanou energii. Průběhy bilancí uvádí graf na Obr. 6-4.

6.4 Volba TČ

Volba TČ představuje určení tepelných parametrů odpovídajících tepelné bilanci. Efektivně navržené tepelné čerpadlo má být dimenzováno na 2/3 maximální tepelné ztráty objektu zvětšené o tepelný výkon na přípravu TUV. Podle tabulky 6-1a je průměrný výkon potřebný na přípravu TUV 0,39 kW, celkový tepelný výkon je potom $6,7 + 0,39 = 7,09$ kW. Jmenovitý výkon TČ by potom měl být 4,8 kW. Pro návrh zapojení je uvažováno TČ vzduch / voda, typ AEG, TTL 10 I. Jedná se o přístroj vnitřního provedení vybavený zabudovaným elektrokotlem s postupným spínáním výkonových stupňů 2,6 – 6,2 – 8,8 kW. Vybrané parametry jednotky uvádí podle [2] Tab. 6-2.

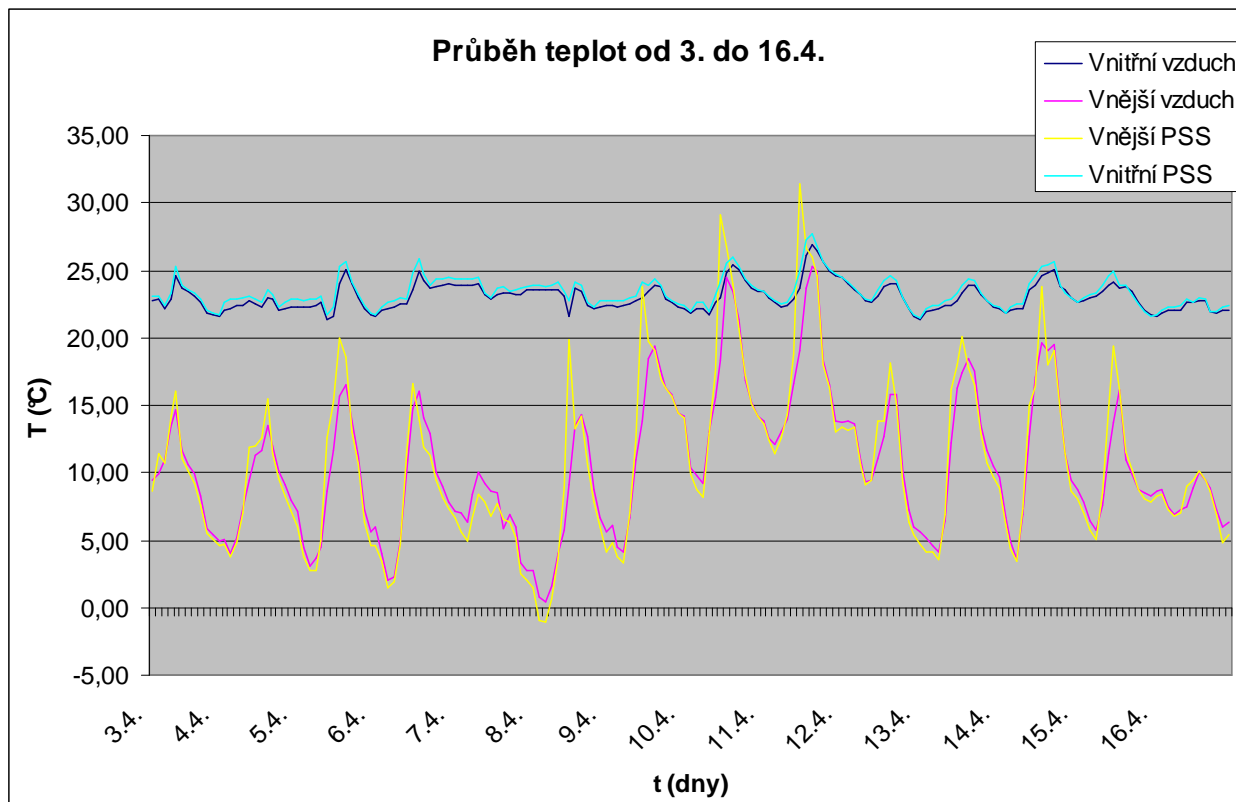
K rekuperaci tepla a ohřívání vzduchu slouží dva výměníky obsažené v rekuperační jednotce Atrea Duplex RK 2 730/370. Jednotka je konstruována na průtok $730 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ cirkulačního a 370 větracího vzduchu. umožňuje cirkulační a větrací oběh vzduchu [3].

Tab. 6-2 Parametry tepelného čerpadla AEG, typ TTL 10 I

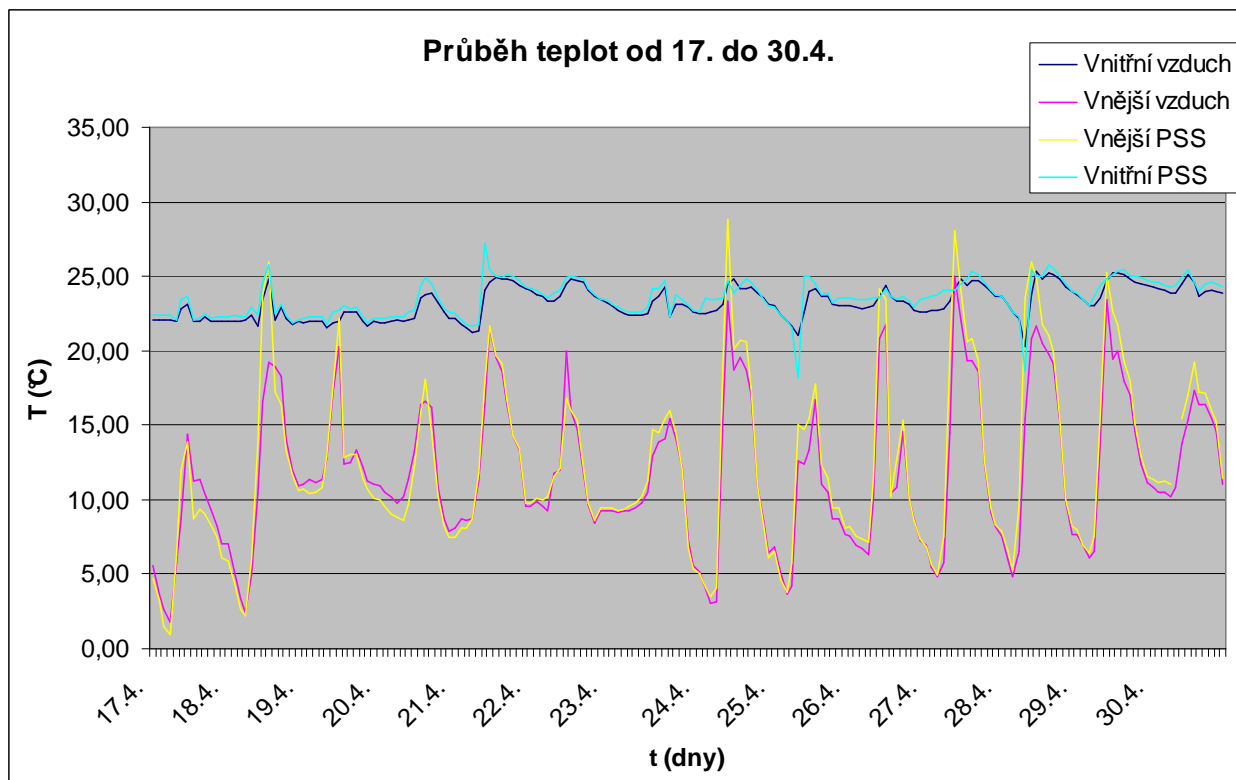
Teplota vnějšího vzduchu (°C)	+10	+2	-7	-15
Teplota výstupní vody (°C)	+50			
Topný výkon (kW)	8,0	5,8	4,1	2,8
El. příkon (kW)	2,6	2,3	1,9	1,5
Top. faktor (-)	3,1	2,5	2,1	1,8
Možná teplota vnějšího vzduchu (°C)	-20 až +30			
Průtok vzduchu ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1200			
Max. teplota výstupní vody (°C)	60			
Rozběhový proud (A)	25			
Chladivo	R407 C			

6.5 Měření

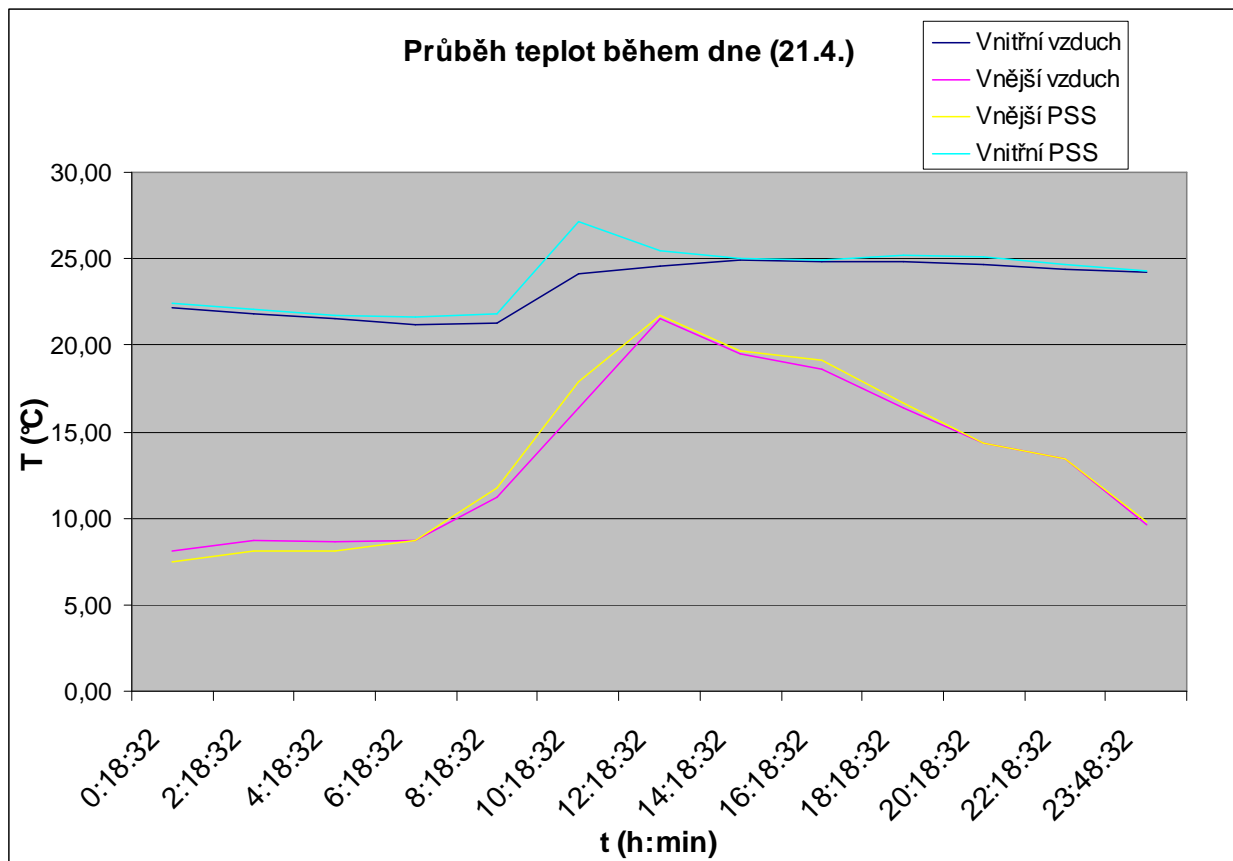
Na vzorovém objektu probíhalo od počátku dubna do poloviny května kontinuální měření teploty vnějšího a vnitřního vzduchu a teploty vnějšího a vnitřního povrchu skel PSS. Od 3.4. do 16.4. byla čidla instalována v přízemí, poté v podkroví. Grafy na Obr. 6-5 a), b) znázorňují průběh všech čtyř teplot v čase. Je z nich patrné, jak teplota vnitřního vzduchu kopíruje s časovým zpožděním teplotu na vnitřní straně PSS. Teplota interiéru je poměrně stálá, na změny venkovní teploty reaguje díky nízkému součiniteli prostupu tepla objektu velmi pomalu a kolísá v rozmezí asi $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Protože nás systém zajímá i jako případný špičkový tepla pro TČ, můžeme na ilustračním příkladě průběhu teplot v jediném dni (Obr. 6-6) sledovat, kdy je to teoreticky možné. Krátce po rozednění nastává rychlé zvyšování teploty, které trvá celé dopoledne a vrcholí kolem 16. hodiny. Právě v této době může především v létě nastat přehřívání interiéru (vzhledem k výsledkům bilance to připadá v úvahu od června do září). Po západu slunce nastává podstatně pozvolnější ochlazování interiéru. Přebytek tepla odvedený do TČ se ale vhodně využije na přípravu TUV na večer, kdy je její spotřeba z celého dne největší (mytí, sprchování). Náhodné krátkodobé teplotní špičky (např. když slunce krátce odkryjí mraky) nepůsobí okamžitě přehřívání místnosti, ale jsou tepelnou kapacitou místnosti vyrovnávány.



Obr. 6-5 a) Průběh teplot, přízemí objektu



Obr. 6-5 b) Průběh teplot, podkroví objektu



Obr. 6-6 Průběh teplot během dne 21.4., měřeno v podkroví

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NÁVRHU

Důležitým krokem v návrhu otopné soustavy je ekonomické zhodnocení projektu. Někdy může nízká pořizovací cena vyvolat mylný dojem úspory, když nejsou brány do úvahy provozní náklady, které mohou naopak být zbytečně i neúnosně vysoké a v dlouhodobém pohledu celou investici značně prodražit. Ekonomické zhodnocení v našem případě spočívá v porovnání více možných tepelných zdrojů a rozhodnutí, zda je volba tepelného čerpadla výhodná, nevýhodná či neutrální vzhledem k ostatním zdrojům zahrnutým do hodnocení. K těm budou patřit samozřejmě pouze zdroje, jejichž provoz je v lokalitě reálný (nemá např. smysl uvažovat o topení biomasou, bylo-li by nutné ji zdaleka nákladně dovážet). Porovnání se provede jak s uvažováním příspěvků slunečních oken, tak bez nich, což určí jejich ekonomický přínos.

7.1 Hodnocení návrhu

Pro posouzení byly vybrány následující varianty: Tepelné čerpadlo, kotel na zemní plyn, elektrokotel, kotle na tuhá paliva spalující černé uhlí nebo dřevo. Uvažuje se, že otopný systém zůstane stejný (tepelný zásobník, rekuperační jednotka) a měnit se budou pouze zdroje tepla – kotle. Na ekonomickou výhodnost té které varianty má vliv výše počáteční investice, roční náklady na provoz a změna ročních nákladů (která vyjadřuje změnu ceny paliva či energie). Výsledek je určen tzv. čistou současnou hodnotou (NPV). Výhodnější je ta varianta, která má NPV vyšší. Tab. 7-1 rozepisuje počáteční investice pro zřízení navrhované soustavy. Pasivní solární systém je součástí stavby, do hodnocení otopné soustavy se nezahrnuje.

Tab. 7-1 Pořizovací náklady navrhované soustavy

Tepelné čerpadlo AEG TTL 10I	209 400 Kč
Akumulační zásobník	18 800 Kč
Rekuperační výměník Duplex RB	53 800 Kč
Montáž	30 000 Kč
Celkem	312 000 Kč

V Tab. 7-2 se porovnávají zdroje tepla na základě uvedených parametrů. Sloupec A značí náklady a NPV bez uvažování příspěvků PSS, sloupec B příspěvky PSS uvažuje. Rozdíl ročních nákladů na vytápění je uveden v kolonce „Úspora“. Tepelné čerpadlo je zde uvedeno jednak jako pořízené bez státní dotace, jednak podpořené státní dotací, která může obnášet až 30 % pořizovacích nákladů, avšak nejvíce 60 000 Kč [22]. Zde bude kvůli krajním podmínkám uvažována maximální možná dotace. Sazba za elektrickou energii pro TČ je D56d, jistič 3x 25 A; sazba za topení elektrinou D26d, jistič 3x25 A distributor E-ON. Rozdíly v počátečních investicích jsou dány rozdílnými cenami vlastních zdrojů, ceny příslušenství (rekuperační, tepelný zásobník) uvažujeme neměnné. Výpočet NPV je proveden pomocí [23]. Uvažovaná roční potřeba energie činí 13914,7 kWh při uvažování příspěvků PSS, 20682,6 kWh bez uvažování příspěvků PSS.

Tab. 7-2 Porovnání ročních nákladů u různých energetických zdrojů

Zdroj	Počáteční investice (Kč)	Cena za kWh	Změna ročního nákladu (%)	Roční náklady (Kč)			NPV (Kč)	
				A	B	Úspora	A	B
TČ bez státní dotace	312 000	0,84	3	13 914	17 373	3 459	-582175	-649340
TČ se státní dotací	250 500	0,84	3	13 914	17 373	3 459	-520675	-587840
Zemní plyn	124 500	1,29	3	17 950	26 680	11 602	-473044	-642558
Elektřina, akumulace	120 000	1,94	3	26 995	40 123	13 128	-643398	-899087
Černé uhlí	120 000	1,11	3	15 445	22 957	7 512	-419903	-565767
Dřevo	120 000	0,62	3	8 627	12 823	4 196	-287515	-368990

Pozn.: Údaje o počátečních investicích pro další tepelné zdroje dle [24], údaje o cenách za kWh dle [21]. Životnost se uvažuje vždy 20 let.

Orientační ceny zdrojů a příslušenství [7, 9]:

Plynový kotel Dagas 02 24 RK, 21 900 Kč

Kotel na tuhá paliva DOR 12, 16 898 Kč

Elektrokotel Daline PTE S-8M, 17731 Kč

Tepelný zásobník OKCE 200 NTRR, 18800 Kč

Rekuperační výměník Duplex RB, 53 800 Kč

Montáž, 30 000 Kč

Do ročních nákladů při topení tuhými palivy se připočítávají náklady na dopravu uhlí a dřeva. Při sazbě 15 Kč km⁻¹ se uvažují 1000 Kč ročně.

Z tabulky je patrné, že zcela extrémní je vytápění elektřinou. Tepelné čerpadlo pořízené bez dotace představuje druhou nejhorší možnost. Získání maximální dotace od Státního fondu životního prostředí by ekonomickou efektivitu zlepšilo, ale stále nemůže konkurovat tradičnímu spalovacímu kotli. Je to dáno vyšší vstupní investicí i vyššími provozními náklady než u tuhých paliv. Porovnáním nákladů na vytápění ve sloupcích A a B vychází vlivem tepelných příspěvků PSS úspora ročních nákladů až 33 %. Tato úspora ale samozřejmě v reálu kolísá, tak jak se bude lišit počasí od dlouhodobých průměrů.

8 ZÁVĚR

Většina energie vyzařované Sluncem se rozptyluje v kosmickém prostoru a na Zemi dopadá nepatrný zlomek. Tuto přivedenou energii světla lze přeměňovat na jiné účelně využitelné formy. Množství energie dodané jednotce plochy je závislé na poloze slunce na obloze a na poloze plochy vůči slunci.

Zařízení pro přeměnu slunečního záření na tepelnou energii a pro její další využití se nazývají solární systémy. Aktivní solární systémy tvoří samostatný technický celek, které rozvádí získané teplo vázané na teplotou látku na místa spotřeby. Kapalinové systémy disponují vyšší efektivitou provozu, jsou ale náročnější na technické vybavení než systémy vzduchové. Vzduchové systémy se používají v jednodušších provedeních a především sezónně. Solární systémy zajišťující vytápění objektů a přípravu teplé vody jsou doplňovány dalšími zdroji tepla. Vznikají tak kombinované systémy bivalentní či trivalentní.

Pasivní solární systémy jsou součástí vlastní budovy a doplňují ji funkčně i esteticky. Energie slunečního záření, kterou využívají, se mění v energii tepelnou a dále je transportována na místo spotřeby bez nutného použití přídatných technických zařízení. Teplo může do prostor vstupovat přímo přeměnou záření nebo nepřímo prouděním či sáláním z akumulčního jádra. Základními prvky jsou sluneční okno, akumulční stěna, energetická fasáda a energetická střecha.

K vytápění objektů, ohřívání vody a odpařování látek se používá i tepelné čerpadlo - stroj, který umožňuje získávat teplo z látky o poměrně nízké teplotě a přečerpá je na vyšší teplotní hladinu. Konstrukce i funkce se podobá chladicímu zařízení s uzavřeným oběhem pracovní látky. Dokonalost cyklu vyjadřuje skutečný topný faktor jako podíl tepla dodaného čerpadlem do vytápění a spotřeby elektrické energie. Teplo lze odebírat vnějšímu vzduchu, vodě nebo ze země, výstupní teplo se váže na vodu nebo vzduch.

Podmínky spolupráce tepelného čerpadla a pasivního solárního systému se řídí účelem spolupráce. Vytápění kombinovanou otopnou soustavou s tepelným čerpadlem a solárním systémem má podporovat efektivní hospodaření s energií. Základní podmínkou je získat co nejvíce tepelné energie solárním systémem a teprve druhotně ji získávat tepelným čerpadlem nebo pomocným elektrokotlem. Z povahy pasivního solárního systému vyplývá i způsob propojení s tepelným čerpadlem k plnému využití získané energie. Přebytečné teplo z místností lze přivádět na vstup tepelného čerpadla a příznivě zvyšovat výkon při současném snížení provozních nákladů. Poslední podmínkou je dimenzování výkonu tepelného čerpadla, který musí odpovídat potřebám energie bez příspěvků solárního systému.

V úvodu práce byl vytyčen cíl navrhnout kombinované vytápění solárním systémem a tepelným čerpadlem. Na základě předchozích poznatků bylo navrženo takové vytápění, kde jsou na sebe zdroje tepla přímo vázané. Návrh otopné soustavy vychází ze stanovených podmínek spolupráce a z konstrukce budovy, pro kterou je návrh určen. Solární systém je tvořen slunečními okny na jižní stěně domu, vytápění je teplovzdušné s rekuperací. Tepelné čerpadlo typu vzduch / voda odebírá energii vnějšímu vzduchu. Po přečerpání ji ukládá do tepelného zásobníku, odkud je odebírána pro vytápění a pro přípravu teplé užitkové vody. Při extrémních mrazech dodává do zásobníku energii pomocný elektrokotel, který je součástí jednotky tepelného čerpadla. Pokud se slunečními okny získává více energie, než je k vytápění nutné, mísí se odpadní topný vzduch s vázanou přebytečnou energií s vzduchem nasávaným tepelným čerpadlem. Zvyšuje se tím teplota tohoto vzduchu, což zlepšuje výkon tepelného čerpadla. Tepelné čerpadlo, rekuperační jednotka a tepelný zásobník jsou umístěny v technické místnosti v přízemí. Čerstvý topný vzduch

se v objektu rozvádí kanály uloženými v podlaze a ve stěnách. V přízemí jsou vedeny trasy od zdroje tepla k jednotlivým průduchům v přízemí a odsud jsou napájeny průduchy v podkroví. Odpadní vzduch se odsává z prostoru kuchyně, WC a koupelny, aby se zabránilo šíření pachů do ostatních částí objektu.

Tepelné čerpadlo pro navrženou otopnou soustavu bylo vybráno podle nejvyšší potřeby energie. Při tepelné ztrátě domu 6,7 kW a výkonu potřebném na přípravu teplé užitkové vody 0,39 kW by měl být výkon zdroje 4,8 kW. Byla zvolena vnitřní jednotka tepelného čerpadla AEG, typ TTL 10 I o výkonu 5,8 kW při teplotě vnějšího vzduchu 2 °C a výstupní vody 50 °C. Tento typ je schopen při teplotě vnějšího vzduchu -7 °C dodávat výkon 4,1 kW tepelným čerpadlem a zbytek elektrokotlem se třemi výkonovými stupni. Stále čerstvé klima v objektu zajišťuje větrání pomocí rekuperační jednotky Duplex RB. Celkové investiční náklady činí 312 000 Kč.

Výpočtem energetické bilance byla zjištěna roční spotřeba 13914,7 kWh. Pokud by v objektu nebyla sluneční okna, ale pouze okna standardní velikost (při výpočtu se uvažovala ¼ velikost oproti slunečním oknům), činila by spotřeba za rok 20682,6 kWh. Sluneční okna snižují roční spotřebu a náklady až asi o 33 %. Při topení tuhými palivy je úspora nákladů nižší (asi 31 %) vzhledem k přídatným nákladům na dopravu paliva. Měření teplot na objektu dalo představu o tepelném chování a době, kdy by teoreticky bylo možné využívat přebytečné teplo slunečních oken v tepelném čerpadle. Ze získaných průběhů by přehřívání nastávalo v odpoledních hodinách, takže by se energie vhodně využila k přípravě teplé vody na večer, kdy je její spotřeba nejvyšší. Ekonomické hodnocení porovnává variantu s tepelným čerpadlem s jinými v místě dostupnými zdroji tepla pomocí metody čisté současné hodnoty. Přitom se uvažuje stejné zapojení otopné soustavy, mění se jen tepelné zdroje. Jako zcela nejvýhodnější se ukázalo vytápění kotlem na tuhá paliva a topení dřevem nebo uhlím. Teprve za nimi stojí zařízení s tepelným čerpadlem, jehož pořízení bylo dotováno nejvyšším možným státním příspěvkem. Naprosto nejméně výhodné se ukazuje vytápění elektřinou. Z uvedeného plyne, že stavba otopného systému s tepelným čerpadlem neznamená ekonomicky příliš výhodnou možnost. Na druhé straně však poskytuje komfort díky absenci spalin, odpadu, zápachu, nepořádku, složité obsluhy (přikládání) a nutnosti dopravovat a skladovat palivo. Z práce je dále patrné, že přítomnost pasivního solárního systému v budově je velmi účelná a to tím spíše, že nevyžaduje provozní náklady a jeho životnost je srovnatelná s životností budovy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ADAMOVSKÝ D., KABELE, K., KABRHEL M., MUSIL, M., URBAN, M., Praktická aplikace metodiky hodnocení energetické náročnosti budov (II), 2007, [cit. 2008-4-20]
<http://stavba.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4517>
- [2] AEG, Firemní katalog tepelného čerpadla TTL 10
- [3] ATREA, výroba součástí teplovzdušného vytápění, [cit. 2008-5-15] www.atrea.cz
- [4] CIHELKA, J., Solární tepelná technika, Nakladatelství T. Malina, Praha, 1994, 208 stran, ISBN 80-900759-5-9
- [5] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, odbor klimatologie, [cit. 2007-12-7],
<http://www.chmi.cz/meteo/ok/okdata12.html#trvsls>
- [6] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, odbor klimatologie, dlouhodobé normály z let 1961 až 1990, údaje naměřené v Brně – Tuřanech, [cit. 2008-5-10]
<http://www.chmu.cz/meteo/ok/okdata12.html>
- [7] ČVUT V PRAZE – Fakulta stavební, Katedra TZB, Výpočet tepelných ztrát budov dle ČSN 06 0210:1994, [cit. 2008-4-10] <http://tzb.fsv.cvut.cz/?page=podklady/vyt/tepztr/zraty>
- [8] DAKON, A.S., výroba kotlů, [cit. 2008-5-21] www.dakon.cz
- [9] DVOŘÁK, Z., KLAZAR, L., PETRÁK, J., Tepelná čerpadla, SNTL, Praha 1987, 340 stran
- [10] DZ DRAŽICE, ohřívače vody, [cit. 2008-5-21] <http://www.dzd.cz>
- [11] EKOENERGIE, Energetické poradenstvo, [cit. 2007-11-11]
www.ekoenergie.sk/files/solarna_energia.doc
- [12] EKOLOGICKÉ VYTÁPĚNÍ, S.R.O., Porovnání návratností, [cit. 2008-5-21]
<http://www.ekologicke-vytapeni.cz/navratnost.php>
- [13] HOBZA, O., [cit.2007-11-28], http://www.svet-bydleni.cz/bydleni/stavime/art_23584/predstavujeme-tepelna-cerpadla-4-dil-kompresor-srdce-tepelneho-cerpadla.aspx
- [14] HOŘEŠÍ, M., Tepelná čerpadla pro každého (III), [cit.2007-11-24],
<http://vytapeni.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=969>
- [15] KLÍMOVÁ, S., ŠEVČÍKOVÁ, L., Pasivní solární systémy, [cit. 2007-11-11]
http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/01_Pozemni%20stavitelstvi/1_03_Prostredi%20v%20budovach/Sevcikova_Lenka.pdf
- [16] KUSALA, J., Solární energie, 2006, [cit. 2007-11-11]
[HTTP://WWW.CEZ.CZ/PRESENTATION/STATIC/SOLARNI/K32.HTM](http://www.cez.cz/presentation/static/solarni/k32.htm)
- [17] MATUŠKA, T., Dimenzování solárních soustav (I), [cit. 2007-12-7],
<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4214&h=13&pl=49>
- [18] MATUŠKA, T., Transparentní tepelné izolace a jejich využití v solární technice, [cit. 2007-11-16], www.fsid.cvut.cz/cz/U216/matuska.htm
- [19] PZP KOMPLET, A.S., firemní informace, [cit. 2007-11-27],
<http://www.pzp.cz/html/main.php?s1=1&s2=2&s3=1&s4=5&lng=12&PHPSESSID=82230764f31a2b734d2ecdcf6648f3c7>
- [20] RAČEK, J.: Technická mechanika. Mechanika tekutin a termomechanika. Nakladatelství Novotný, Brno 2006
- [21] SRDEČNÝ, K., TRUXA, J., Tepelná čerpadla, ERA, Brno 2005, ISBN 80-7366-031-8

-
- [22] STÁTNI FOND ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, Příloha II ke Směrnici Ministerstva životního prostředí o poskytování finančních prostředků ze Státního fondu životního prostředí ČR“, [cit. 2008-5-21] www.sfzp.cz
- [23] TZB INFO, Ekonomická efektivnost investic, výpočetní pomůcka, [cit. 2008-5-25] <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2770> ..<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=110&h=38>
- [24] TZB INFO, Porovnání nákladů na vytápění podle druhu paliva, [cit. 2008-5-17] <http://vytapani.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=269&h=38&obor=5>
- [25] VÁŇA, J., Skripta předmětu Ekologie a ekotechnika, IX. přednáška, [cit. 2007-11-6] <http://www.stary.biom.cz/clen/jv/pr9.html>
- [26] VAVERKA J. A KOL., STAVEBNÍ TEPELNÁ TECHNIKA A ENERGETIKA BUDOV, VUTIUM, BRNO 2006, ISBN 80-214-2910-0
- [27] WIKIPEDIE, internetová encyklopedie, [cit. 2007-11-6] http://cs.wikipedia.org/wiki/Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie

PŘÍLOHA

Naměřené teploty ($^{\circ}\text{C}$); $T1$, $T2$ – vnitřní a vnější vzduch; T_e , T_i – vnější a vnitřní povrch PSS

3.4.2008	T1	T2	T_e	T_i
8:48:29	22,80	9,40	8,67	23,14
10:48:32	22,90	9,90	11,44	23,14
12:48:32	22,20	10,90	10,73	22,44
14:48:32	22,90	13,50	14,23	23,34
16:48:32	24,60	14,70	16,04	25,26
18:48:32	23,70	11,70	11,04	23,88
19:18:32	23,40	10,60	10,17	23,55
19:48:32	23,10	9,90	9,23	23,28
20:48:32	22,60	8,30	7,65	22,82
22:48:32	21,80	5,90	5,57	22,04
23:48:32	21,70	5,40	5,01	21,82
4.4.2008				
0:18:32	21,60	4,90	4,58	21,68
2:18:32	22,10	5,10	4,66	22,63
4:18:32	22,20	4,00	3,78	22,86
6:18:32	22,40	5,20	4,85	22,82
8:18:32	22,40	7,40	7,02	22,94
10:18:32	22,70	9,40	11,93	23,12
12:18:32	22,50	11,30	11,97	22,86
14:18:32	22,30	11,70	12,55	22,64
16:18:32	23,00	13,50	15,41	23,50
18:18:32	22,90	12,00	11,47	23,17
20:18:32	22,00	10,10	9,58	22,23
22:18:32	22,20	9,10	8,24	22,61
23:48:32	22,30	7,90	7,19	22,82
5.4.2008				
0:18:32	22,30	7,10	5,94	22,81
2:18:32	22,30	4,50	3,73	22,76
4:18:32	22,30	3,10	2,70	22,81
6:18:32	22,40	3,70	2,71	22,87
8:18:32	22,60	4,50	5,08	23,15
10:18:32	21,40	8,60	12,60	21,65
12:18:32	21,60	11,70	15,20	22,32

14:18:32	24,00	15,70	19,98	25,27
16:18:32	25,10	16,50	18,59	25,66
18:18:32	24,00	13,80	13,03	24,18
20:18:32	23,00	11,20	10,60	23,19
22:18:32	22,20	7,20	6,30	22,39
23:48:32	21,70	5,60	4,58	21,83
6.4.2008				
0:18:32	21,60	6,00	4,55	21,71
2:18:32	22,00	4,00	3,49	22,30
4:18:32	22,20	2,00	1,43	22,66
6:18:32	22,30	2,30	1,97	22,77
8:18:32	22,50	4,90	4,71	23,03
10:18:32	22,50	10,20	11,57	22,88
12:18:32	23,60	14,80	16,57	24,80
14:18:32	24,90	16,00	14,00	25,90
16:18:32	24,30	14,10	11,93	24,69
18:18:32	23,70	12,90	11,28	23,86
20:18:32	23,80	10,00	9,46	24,32
22:18:32	23,90	9,00	8,14	24,41
23:48:32	24,00	7,80	7,40	24,46
7.4.2008				
0:18:32	23,90	7,10	6,70	24,42
2:18:32	23,90	7,00	5,59	24,37
4:18:32	23,90	6,30	4,98	24,33
6:18:32	23,90	8,40	6,68	24,40
8:18:32	24,00	10,00	8,40	24,43
10:18:32	23,20	9,20	7,81	23,31
12:18:32	22,90	8,60	6,75	22,99
14:18:32	23,20	8,50	7,74	23,65
16:18:32	23,30	5,90	6,57	23,74
18:18:32	23,30	6,90	6,31	23,41
20:18:32	23,20	6,00	5,13	23,59
22:18:32	23,20	3,30	2,47	23,69
23:48:32	23,50	2,80	2,01	23,84

8.4.2008	T1	T2	Te	Ti
0:18:32	23,50	2,70	1,51	23,86
2:18:32	23,50	0,80	-0,96	23,85
4:18:32	23,50	0,40	-1,11	23,82
6:18:32	23,50	1,60	0,68	23,90
8:18:32	23,60	4,00	3,69	24,13
10:18:32	23,10	5,80	8,89	23,46
12:18:32	21,60	9,10	19,86	22,69
14:18:32	23,70	13,50	13,25	24,18
16:18:32	23,40	14,30	14,21	23,87
18:18:32	22,40	12,70	10,59	22,59
20:18:32	22,20	8,70	7,87	22,27
22:18:32	22,30	6,70	6,01	22,69
9.4.2008				
0:18:32	22,40	5,60	4,14	22,73
2:18:32	22,40	6,10	4,86	22,72
4:18:32	22,30	4,50	3,79	22,74
6:18:32	22,40	4,10	3,30	22,80
8:18:32	22,50	6,70	7,02	22,96
10:18:32	22,70	10,90	12,42	23,08
12:18:32	23,00	13,90	23,76	24,09
14:18:32	23,40	18,50	19,75	23,87
16:18:32	23,90	19,40	19,01	24,35
18:18:32	23,80	17,50	16,99	23,92
20:18:32	22,90	16,30	16,22	23,10
22:18:32	22,60	15,80	15,71	22,77
23:48:32	22,30	14,40	14,42	22,51
10.4.2008				
0:18:32	22,20	14,20	14,06	22,42
2:18:32	21,80	10,40	9,97	21,97
4:18:32	22,20	9,80	8,71	22,59
6:18:32	22,20	9,20	8,23	22,62
8:18:32	21,70	13,00	12,97	21,95
10:18:32	22,60	15,60	17,61	23,24
12:18:32	23,00	18,30	29,16	24,17

14:18:32	24,80	24,50	26,77	25,54
16:18:32	25,40	23,40	23,96	26,00
18:18:32	25,10	21,40	20,61	25,30
20:18:32	24,30	16,80	17,19	24,40
22:18:32	23,70	15,20	15,12	23,88
23:48:32	23,40	14,20	14,21	23,57
11.4.2008				
0:18:32	23,40	13,80	13,63	23,46
2:18:32	23,00	12,60	12,43	23,12
4:18:32	22,60	12,10	11,36	22,69
6:18:32	22,30	13,00	12,54	22,48
8:18:32	22,40	14,00	14,29	22,66
10:18:32	22,90	16,60	18,87	23,42
12:18:32	23,70	19,10	31,43	24,99
14:18:32	26,10	23,70	26,67	27,30
16:18:32	26,90	25,30	25,99	27,68
18:18:32	26,40	24,90	24,61	26,80
20:18:32	25,60	18,30	18,02	25,69
22:18:32	25,00	16,50	16,29	25,09
23:48:32	24,60	13,80	13,00	24,66
12.4.2008				
0:18:32	24,50	13,70	13,35	24,53
2:18:32	24,00	13,90	13,17	24,11
4:18:32	23,60	13,60	13,33	23,67
6:18:32	23,20	10,90	10,60	23,25
8:18:32	22,80	9,30	9,10	22,88
10:18:32	22,60	9,50	9,40	22,79
12:18:32	23,10	11,10	13,88	23,60
14:18:32	23,80	12,70	13,79	24,25
16:18:32	24,00	15,80	18,11	24,59
18:18:32	24,00	15,80	15,12	24,29
20:18:32	23,00	10,20	9,27	22,97
22:18:32	22,20	7,30	6,37	22,17
23:48:32	21,60	6,00	5,43	21,65

13.4.2008	T1	T2	Te	Ti
0:18:32	21,40	5,60	4,68	21,45
2:18:32	21,90	5,20	4,13	22,13
4:18:32	22,10	4,60	4,17	22,37
6:18:32	22,20	4,10	3,52	22,44
8:18:32	22,40	6,50	6,94	22,72
10:18:32	22,40	12,20	16,18	22,87
12:18:32	22,80	16,30	18,03	23,35
14:18:32	23,30	17,40	20,08	23,88
16:18:32	23,90	18,50	17,83	24,35
18:18:32	23,90	17,60	16,51	24,25
20:18:32	23,20	13,50	12,94	23,34
22:18:32	22,70	11,70	10,74	22,78
23:48:32	22,30	10,50	9,67	22,40
14.4.2008				
0:18:32	22,20	9,70	8,92	22,26
2:18:32	21,80	6,70	6,07	21,79
4:18:32	22,00	4,90	4,35	22,24
6:18:32	22,20	3,60	3,43	22,47
8:18:32	22,20	6,90	7,36	22,51
10:18:32	23,60	12,70	15,04	24,05
12:18:32	23,90	17,10	16,42	24,63
14:18:32	24,60	19,60	23,74	25,30
16:18:32	24,80	19,10	18,02	25,43
18:18:32	25,10	19,50	19,03	25,62
20:18:32	23,80	14,80	14,50	23,93
22:18:32	23,50	11,40	11,42	23,30
23:48:32	23,00	9,50	8,65	22,92

15.4.2008				
0:18:32	22,60	8,80	8,02	22,62
2:18:32	22,80	7,80	7,06	22,93
4:18:32	23,00	6,50	5,79	23,20
6:18:32	23,10	5,70	5,03	23,34
8:18:32	23,40	7,60	8,51	23,87
10:18:32	23,90	11,40	14,79	24,54
12:18:32	24,10	13,70	19,35	24,98
14:18:32	23,70	16,10	16,18	23,90
16:18:32	23,80	10,90	11,53	23,93
18:18:32	23,40	9,90	10,29	23,22
20:18:32	22,60	8,70	8,70	22,52
22:18:32	22,00	8,50	8,01	21,92
23:48:32	21,70	8,30	7,89	21,54
16.4.2008				
0:18:32	21,60	8,60	8,26	21,67
2:18:32	21,80	8,70	8,45	22,02
4:18:32	22,00	7,50	7,24	22,30
6:18:32	22,00	6,90	6,77	22,31
8:18:32	22,10	7,30	7,02	22,38
10:18:32	22,60	7,50	9,04	22,91
12:18:32	22,60	8,90	9,40	22,64
14:18:32	22,80	10,00	10,12	23,03
16:18:32	22,80	9,40	9,46	22,90
18:18:32	21,90	8,90	8,69	21,92
20:18:32	21,80	7,30	6,88	21,95
22:18:32	22,00	6,00	4,84	22,30
23:48:32	22,00	6,30	5,35	22,41

17.4.2008	T1	T2	Te	Ti
0:18:32	22,10	5,60	4,70	22,42
2:18:32	22,10	3,70	3,30	22,41
4:18:32	22,10	2,60	1,46	22,36
6:18:32	22,10	1,80	0,98	22,34
8:18:32	22,00	5,80	6,26	22,04
10:18:32	22,80	8,70	11,94	23,41
12:18:32	23,10	14,40	13,91	23,70
14:18:32	22,00	11,20	8,75	22,06
16:18:32	22,00	11,40	9,35	22,22
18:18:32	22,30	10,40	9,02	22,53
20:18:32	22,00	9,40	8,29	22,21
22:18:32	22,00	8,20	7,43	22,25
23:48:32	22,00	7,00	6,12	22,28
18.4.2008				
0:18:32	22,00	7,00	5,87	22,29
2:18:32	22,00	5,10	4,44	22,35
4:18:32	22,00	3,40	2,66	22,25
6:18:32	22,10	2,40	2,24	22,28
8:18:32	22,40	4,90	5,96	22,88
10:18:32	21,70	10,40	13,90	22,43
12:18:32	23,40	16,60	23,74	24,55
14:18:32	24,80	19,20	25,96	25,73
16:18:32	22,10	18,90	17,22	22,45
18:18:32	22,90	18,30	16,37	23,14
20:18:32	22,20	14,10	13,34	22,34
22:18:32	21,80	12,00	11,70	21,89
23:48:32	22,00	10,90	10,62	22,12
19.4.2008				
0:18:32	21,90	11,00	10,69	22,16
2:18:32	22,00	11,40	10,40	22,25
4:18:32	22,00	11,10	10,56	22,28
6:18:32	22,00	11,40	10,79	22,31
8:18:32	21,50	12,70	12,96	21,77
10:18:32	21,90	17,20	17,64	22,64

12:18:32	22,00	20,30	22,18	22,74
14:18:32	22,60	12,40	12,82	23,07
16:18:32	22,60	12,50	13,08	22,83
18:18:32	22,60	13,30	13,07	22,87
20:18:32	22,00	12,20	11,47	22,26
22:18:32	21,60	11,20	10,68	21,81
23:48:32	22,00	11,00	10,06	22,14
20.4.2008				
0:18:32	21,90	10,90	10,03	22,20
2:18:32	21,90	10,50	9,58	22,15
4:18:32	22,00	10,20	9,06	22,25
6:18:32	22,10	9,80	8,82	22,27
8:18:32	22,00	10,20	8,66	22,30
10:18:32	22,10	11,30	9,64	22,57
12:18:32	22,20	13,20	12,22	22,71
14:18:32	23,50	16,40	15,86	24,41
16:18:32	23,80	16,60	18,11	24,95
18:18:32	23,90	16,20	14,48	24,45
20:18:32	23,20	10,80	10,21	23,51
22:18:32	22,60	8,70	8,18	22,86
23:48:32	22,20	7,90	7,47	22,58
21.4.2008				
0:18:32	22,20	8,10	7,45	22,47
2:18:32	21,80	8,70	8,09	22,12
4:18:32	21,50	8,60	8,06	21,74
6:18:32	21,20	8,70	8,68	21,60
8:18:32	21,30	11,20	11,78	21,79
10:18:32	24,10	16,40	17,85	27,19
12:18:32	24,60	21,50	21,70	25,43
14:18:32	24,90	19,50	19,67	25,00
16:18:32	24,80	18,60	19,15	24,93
18:18:32	24,80	16,40	16,69	25,17
20:18:32	24,70	14,30	14,29	25,06
22:18:32	24,40	13,40	13,43	24,68
23:48:32	24,20	9,60	9,79	24,32

22.4.2008	T1	T2	Ti	Te
0:18:32	24,10	9,60	9,75	24,21
2:18:32	23,80	9,90	10,11	24,06
4:18:32	23,60	9,60	9,96	23,79
6:18:32	23,30	9,20	10,17	23,52
8:18:32	23,30	11,80	11,56	23,91
10:18:32	23,70	12,00	12,05	24,10
12:18:32	24,50	20,00	16,82	24,88
14:18:32	24,80	16,00	16,02	25,02
16:18:32	24,70	14,70	15,37	24,91
18:18:32	24,60	11,70	11,99	24,80
20:18:32	24,10	9,70	9,80	24,22
22:18:32	23,60	8,40	8,58	23,74
23:48:32	23,40	9,20	9,41	23,47
23.4.2008				
0:18:32	23,20	9,30	9,48	23,41
2:18:32	23,00	9,30	9,51	23,14
4:18:32	22,70	9,10	9,24	22,93
6:18:32	22,50	9,20	9,38	22,69
6:48:32	22,40	9,30	9,53	22,63
7:18:32	22,40	9,50	9,78	22,60
7:48:32	22,40	9,80	10,22	22,56
8:18:32	22,50	10,50	11,26	22,93
10:18:32	23,30	12,90	14,72	24,18
12:18:32	23,60	13,90	14,48	24,14
14:18:32	24,30	14,10	15,48	24,65
16:18:32	22,30	15,50	16,01	22,25
18:18:32	23,10	14,10	14,47	23,72
20:18:32	23,10	12,10	11,99	23,46
22:18:32	22,90	7,20	6,74	23,07
23:48:32	22,60	5,60	5,41	22,73
24.4.2008				
0:18:32	22,50	5,10	5,05	22,64
2:18:32	22,50	4,00	4,12	23,51
4:18:32	22,60	3,10	3,46	23,47
6:18:32	22,70	3,20	4,15	23,48
8:18:32	23,10	15,60	19,15	23,51

10:18:32	24,50	23,30	28,75	24,72
12:18:32	24,80	18,70	20,04	23,85
14:18:32	24,20	19,50	20,66	24,34
16:18:32	24,20	18,70	20,65	24,84
18:18:32	24,30	17,00	17,52	24,60
20:18:32	23,90	10,90	10,95	24,06
22:18:32	23,50	8,60	8,28	23,49
23:48:32	23,10	6,40	6,09	23,05
25.4.2008				
0:18:32	23,00	6,80	6,53	22,91
2:18:32	22,40	5,00	4,63	22,43
4:18:32	22,00	3,70	3,77	21,99
6:18:32	21,60	4,20	5,83	21,54
8:18:32	21,00	12,60	15,02	18,15
10:18:32	22,60	12,40	14,71	25,01
12:18:32	24,00	13,30	15,44	24,98
14:18:32	24,20	16,70	17,74	24,50
16:18:32	23,70	11,00	12,32	23,79
18:18:32	23,60	10,50	11,44	23,82
20:18:32	23,10	8,70	9,47	23,18
22:18:32	23,00	8,70	9,49	23,59
23:48:32	23,00	7,70	8,14	23,53
26.4.2008				
0:18:32	23,00	7,60	8,23	23,51
2:18:32	22,90	6,90	7,59	23,48
4:18:32	22,80	6,70	7,34	23,49
6:18:32	22,90	6,30	7,15	23,49
8:18:32	23,00	10,00	11,31	23,54
10:18:32	23,70	20,80	24,14	23,57
12:18:32	24,40	21,80	23,49	24,15
14:18:32	23,60	10,40	10,20	23,70
16:18:32	23,30	10,80	12,70	23,49
18:18:32	23,30	14,60	15,34	23,65
20:18:32	23,10	10,10	10,13	23,37
22:18:32	22,70	8,70	8,66	22,92
23:48:32	22,60	7,30	7,37	23,43

22.4.2008	T1	T2	Te	Ti
0:18:32	24,10	9,60	9,75	24,21
2:18:32	23,80	9,90	10,11	24,06
4:18:32	23,60	9,60	9,96	23,79
6:18:32	23,30	9,20	10,17	23,52
8:18:32	23,30	11,80	11,56	23,91
10:18:32	23,70	12,00	12,05	24,10
12:18:32	24,50	20,00	16,82	24,88
14:18:32	24,80	16,00	16,02	25,02
16:18:32	24,70	14,70	15,37	24,91
18:18:32	24,60	11,70	11,99	24,80
20:18:32	24,10	9,70	9,80	24,22
22:18:32	23,60	8,40	8,58	23,74
23:48:32	23,40	9,20	9,41	23,47
23.4.2008				
0:18:32	23,20	9,30	9,48	23,41
2:18:32	23,00	9,30	9,51	23,14
4:18:32	22,70	9,10	9,24	22,93
6:18:32	22,50	9,20	9,38	22,69
6:48:32	22,40	9,30	9,53	22,63
7:18:32	22,40	9,50	9,78	22,60
7:48:32	22,40	9,80	10,22	22,56
8:18:32	22,50	10,50	11,26	22,93
10:18:32	23,30	12,90	14,72	24,18
12:18:32	23,60	13,90	14,48	24,14
14:18:32	24,30	14,10	15,48	24,65
16:18:32	22,30	15,50	16,01	22,25
18:18:32	23,10	14,10	14,47	23,72
20:18:32	23,10	12,10	11,99	23,46
22:18:32	22,90	7,20	6,74	23,07
23:48:32	22,60	5,60	5,41	22,73
24.4.2008				
0:18:32	22,50	5,10	5,05	22,64
2:18:32	22,50	4,00	4,12	23,51
4:18:32	22,60	3,10	3,46	23,47
6:18:32	22,70	3,20	4,15	23,48
8:18:32	23,10	15,60	19,15	23,51

10:18:32	24,50	23,30	28,75	24,72
12:18:32	24,80	18,70	20,04	23,85
14:18:32	24,20	19,50	20,66	24,34
16:18:32	24,20	18,70	20,65	24,84
18:18:32	24,30	17,00	17,52	24,60
20:18:32	23,90	10,90	10,95	24,06
22:18:32	23,50	8,60	8,28	23,49
23:48:32	23,10	6,40	6,09	23,05
25.4.2008				
0:18:32	23,00	6,80	6,53	22,91
2:18:32	22,40	5,00	4,63	22,43
4:18:32	22,00	3,70	3,77	21,99
6:18:32	21,60	4,20	5,83	21,54
8:18:32	21,00	12,60	15,02	18,15
10:18:32	22,60	12,40	14,71	25,01
12:18:32	24,00	13,30	15,44	24,98
14:18:32	24,20	16,70	17,74	24,50
16:18:32	23,70	11,00	12,32	23,79
18:18:32	23,60	10,50	11,44	23,82
20:18:32	23,10	8,70	9,47	23,18
22:18:32	23,00	8,70	9,49	23,59
23:48:32	23,00	7,70	8,14	23,53
26.4.2008				
0:18:32	23,00	7,60	8,23	23,51
2:18:32	22,90	6,90	7,59	23,48
4:18:32	22,80	6,70	7,34	23,49
6:18:32	22,90	6,30	7,15	23,49
8:18:32	23,00	10,00	11,31	23,54
10:18:32	23,70	20,80	24,14	23,57
12:18:32	24,40	21,80	23,49	24,15
14:18:32	23,60	10,40	10,20	23,70
16:18:32	23,30	10,80	12,70	23,49
18:18:32	23,30	14,60	15,34	23,65
20:18:32	23,10	10,10	10,13	23,37
22:18:32	22,70	8,70	8,66	22,92
23:48:32	22,60	7,30	7,37	23,43

<i>Tabulkové hodnoty solárních parametrů [4]</i>			
Měsíc	Q_{Sdent} (Wh.m ⁻²)	Q_{Dden} (Wh.m ⁻²)	τ (-)
Leden	410	3960	0,18
Únor	640	5000	0,31
Březen	960	5560	0,38
Duben	1290	5190	0,39
Květen	1520	4490	0,48
Červen	1620	4310	0,53
Červenec	1520	4490	0,56
Srpen	1290	5190	0,53
Září	960	5560	0,50
Říjen	640	5000	0,37
Listopad	410	3960	0,23
Prosinec	330	3110	0,12