

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY
A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH ŘÍZENÍ PRŮTOKU TEPLOVODNÍM VÝMĚNÍKEM SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

DESIGN OF FLOWRATE CONTROL OF SOLAR SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR POPOV

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2008

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou ohřevu užitkové vody solární energií. V rámci této práce byl vytvořen zmenšený model solárního systému. Na tomto modelu se uskutečnila měření a na základě naměřených teplot, byly identifikovány parametry výpočtového modelu. Dalším úkolem bylo vytvoření výpočtového modelu solárního systému, k ověření jeho správnosti došlo na základě porovnání ustálených tepelných stavů s experimentálním modelem. Cílem této práce je návrh algoritmu řízení průtoku teplotné kapaliny solárním systémem, s cílem dosáhnout maximální účinnosti systému. Simulace jednotlivých algoritmů jsou provedeny v prostředí MATLAB SIMULINK.

Annotation

Problems of heating of supply water by solar energy are described in this paper. In term of these works was designed and realized attenuate prototype of solar system. There was realized measurements of the temperatures on this prototype and on the basis of these measurements was identified system parameters. Creation of compute simulation of solar system was the further step of this paper. The compute simulation was verified on the basis of comparing of final temperatures with experimental prototype. The design of control algorithm of flow of liquid through the solar system to reach the maximum effect of system is programme of this paper. Simulations of control algorithms are make in environment of MATLAB SIMULINK.

Klíčová slova

Solární systém, regulace, výměník tepla, solární kolektor

Keywords

Solar system, regulation, heat exchanger, solar collector

Bibliografická citace

POPOV, P. *Návrh řízení průtoku teplovodním výměníkem solárního systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69 s. Vedoucí diplomové práce
Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Čestné prohlášení o původnosti práce

Čestně prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Návrh řízení průtoku teplovodním výměníkem solárního systému“ jsem vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury, kterou jsem všechnu citoval v seznamu literatury.

V Brně dne 23.5. 2008

.....

Bc. Petr Popov

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za jeho vedení, cenné rady a připomínky během zpracování diplomové práce.

Obsah

1	ÚVOD	9
1.1	VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE	9
1.2	VYTÁPĚNÍ SLUNEČNÍ ENERGÍÍ.....	9
2	FORMULACE PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ.....	11
3	SOLÁRNÍ SOUSTAVY	12
3.1	HLAVNÍ ČÁSTI SOLÁRNÍCH SOUSTAV	14
3.1.1	<i>Kolektory.....</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Zásobníky TUV.....</i>	<i>16</i>
4	TEORIE TEPELNÉHO MODELU	17
4.1	VEDENÍ TEPLA TUHÝMI TĚLESY	18
4.2	KONVEKCE	19
4.3	SÁLÁNÍ	20
4.4	TEPELNÁ ENERGIE PROUDU CHLADIVA	21
4.5	AKUMULACE TEPLA.....	21
4.6	VÝMĚNÍK TEPLA	22
5	NÁVRH VÝPOČTOVÉHO MODELU SOLÁRNÍHO SYSTÉMU.....	25
6	NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU	30
6.1	POSTUP ZHOTOVENÍ A SOUČÁSTI	30
6.2	NÁVRH MĚŘICÍHO STANOVIŠTĚ	33
6.2.1	<i>Termočlánek typu K</i>	<i>34</i>
6.2.2	<i>Analogový senzor teploty DS60.....</i>	<i>36</i>
6.2.3	<i>Snímač tepelného toku HFS-4</i>	<i>37</i>
6.2.4	<i>Systém sběru dat OMEGA OMK-AD812.....</i>	<i>38</i>
7	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	39
8	IDENTIFIKACE PARAMETRŮ VÝPOČTOVÉHO MODELU	43
9	REGULACE SOLÁRNÍHO SYSTÉMU	48
9.1	TYPY REGULACÍ.....	48
10	ANALÝZA VÝSLEDKŮ	56

11 ZÁVĚR	58
LITERATURA	60
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ A SYMBOLŮ	61
SEZNAM PŘÍLOH	63

1 ÚVOD

1.1 Využití solární energie

Sluneční energie je v současné době využívána v několika oblastech vědy a techniky jako zdroj tepelné a elektrické energie. Znáмым, ale stále málo používaným způsobem, je použití fotovoltaických článků k přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Použití těchto článků je omezeno především z důvodu finanční náročnosti.

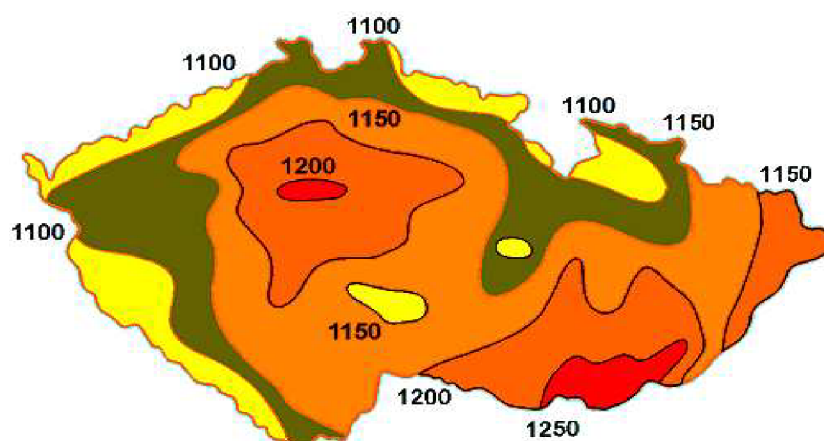
Sluneční energie je také využívána k sušení materiálu nebo plodin v zemědělství. Takto lze ušetřit velké množství tepelné energie, kterou bychom museli získat spalováním paliva, elektrické energie, plynu nebo jiným způsobem.

Sluneční energie se momentálně využívá nejčastěji k ohřevu vody pomocí solárního systému. Tato naakumulovaná tepelná energie pak může být využita k vytápění objektu, dále jako teplá užitková voda nebo také pro ohřev domovních i veřejných bazénů.

Tento směr využití sluneční energie, i přesto, že je nejčastější, je v rámci naší republiky stále málo využíván. Ekologicky čisté získávání této energie a potenciál pro její finanční nenáročnost (při získávání energie), jsou hlavními důvody pro vytvoření této práce.

1.2 Vytápění sluneční energií

Teplota na povrchu slunce se uvádí přibližně 6000 °C. Slunce neustále vyzařuje do kosmu obrovské množství energie, která dopadá i na naši planetu. Velikost této energie, se v České republice uvádí 1100 až 1250 kWh na 1 m² za rok. Dále se uvádí, že v našich klimatických podmínkách je doba slunečního svitu přibližně 1700 hodin za rok. Na (obr. 1) jsou znázorněny nejvhodnější lokality, v rámci České republiky, pro využití sluneční energie a tedy i slunečních kolektorů pro ohřev vody, těmito lokalitami jsou Polabská nížina a jižní Morava. Paradoxem je, že se tato energie využívá velmi málo i v těchto vhodných oblastech, a proto se tato práce, mimo jiné, zabývá zjištěním příčin malého využití solárních systémů, které používají sluneční energii jako zdroj tepla. Více o vytápění sluneční energií je popsáno v [10].



Obr. 1: Množství slunečního záření v kWh/m² za rok

2 FORMULACE PROBLÉMŮ A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ

Za dva hlavní důvody, proč si pořídit solární systém, lze označit ekologický provoz a úsporu nákladů na vytápění. V prvním případě je velmi důležité slovo „provoz“, poněvadž jen z tohoto pohledu lze na solární systémy nahlížet jako na ekologická zařízení. Vezmeme-li v potaz, že solární systémy v současné době jsou doplněny o další zdroj tepla (např. plynový kotel, který ve většině případů je schopen pracovat samostatně, bez solárního systému), je z ekologického hlediska nutné zamyslet se nad otázkou, kolik energie se spotřebovalo na výrobu takového solárního systému, který ve své podstatě je něčím navíc, a dále, za jak dlouho se nám tato energie vrátí, budeme-li tento systém používat. V druhém případě výrobci uvádějí návratnost okolo 7-10 let, uvážíme-li ovšem neustálé zvyšování cen energií, a také globální oteplování (lepší využití solárních systémů), lze se domnívat, že návratnost investice bude za pár let podstatně rychlejší.

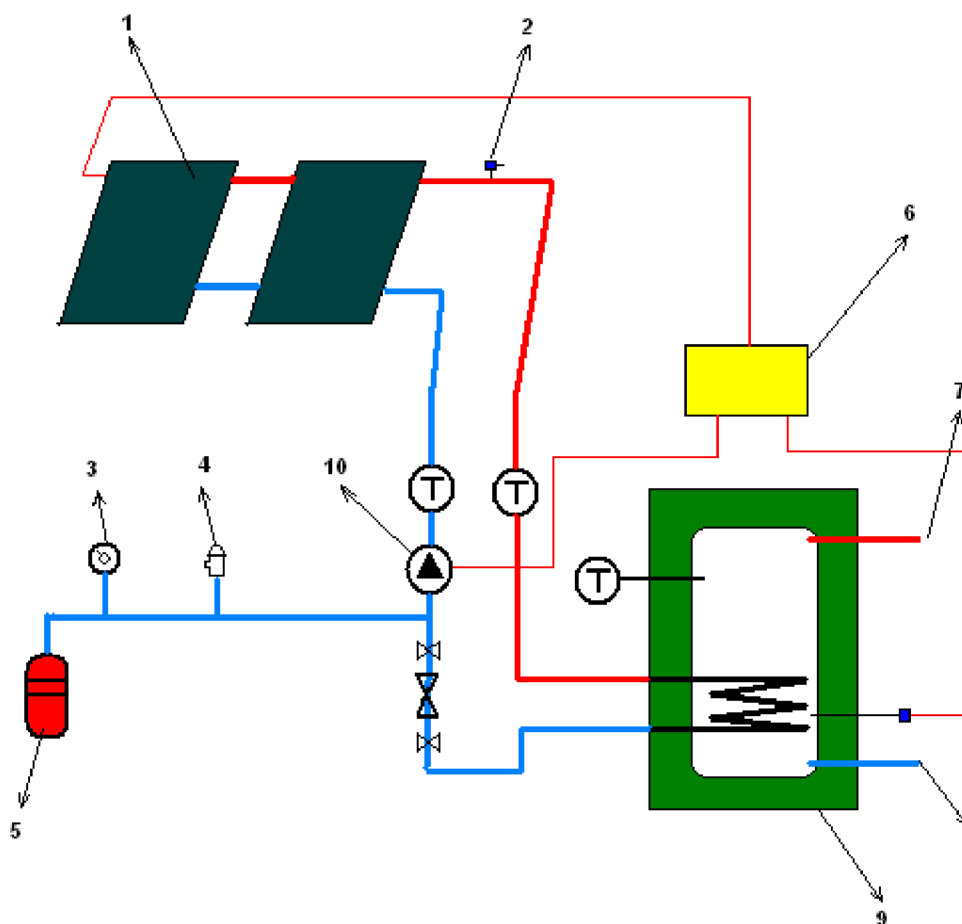
Cílem této práce je stanovení tepelných poměrů v solárním systému pro ohřev teplé užitkové vody. Na základě výpočtu, práce poukáže na popis chování solárního systému. Dále na experimentálním modelu se toto chování ověří a z naměřených hodnot se provede identifikace parametrů výpočtového modelu. Dalším cílem této práce je návrh řízení průtoku teplotnosné kapaliny solárním systémem za účelem zvýšení jeho účinnosti.

Dílčí cíle byly stanoveny následovně:

- a) Prozkoumat literaturu v oblasti solárních systémů a modelování tepelných poměrů.
- b) Navrhnout výpočtový model solárního systému.
- c) Vytvořit experimentální model solárního systému pro testování vlivu různých intenzit záření a různých hodnot průtoků teplotnosné kapaliny.
- d) Identifikovat parametry solárního systému na základě výsledků měření.
- e) Navrhnout řízení průtoku teplotvodním výměníkem solárního systému za účelem zvýšení jeho účinnosti.

3 SOLÁRNÍ SOUSTAVY

V této kapitole jsou uvedeny základní informace, týkající se solárních soustav a to především z čeho se tyto soustavy skládají, jak je rozdělujeme a princip jejich činnosti.



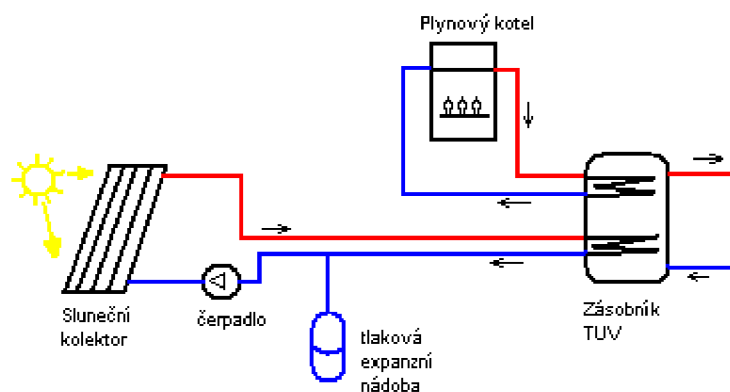
Obr. 2: Solární soustava – Hlavní části: 1 – sluneční kolektory, 2 – odvzdušňovací ventil, 3 – manometr, 4 – pojistný ventil, 5 – expanzní nádoba, 6 – regulátor, 7 – výstup teplé vody, 8 – vstup studené vody, 9 – zásobník teplé užitkové vody (TUV), 10 – čerpadlo

Solární soustava je tvořena kolektorovým okruhem, který je dále tvořen slunečními kolektory, potrubím, zabezpečovacím zařízením, armaturami atd. V době velké zimy se tímto okruhem nezíská dostatek tepla, proto je kolektorový okruh doplněn dalším zdrojem tepla,

čož je např. kotel. Hlavní úlohou kolektorového okruhu je dodávat teplo do akumulční nádrže, kde dochází k tepelné výměně mezi teplotnosnou kapalinou a užitkovou vodou.

Solární soustavy se rozdělují podle mnoha hledisek. Mezi ty nejdůležitější patří rozdělení solárních soustav na kapalinové (nemrznoucí směs) nebo vzduchové (vzduch), uzavřené nebo otevřené (podle zapojení kolektorového okruhu), soustavy s přirozeným nebo nuceným oběhem a na monovalentní a bivalentní (jedná se o možnost propojení s dalším zdrojem tepla).

Nejpoužívanější způsob, podle výše uvedeného, pro ohřev teplé užitkové vody (TUV) je: ohřev TUV v kombinaci zapojení s kotlem, jako teplotnosná látka je nejčastěji použita nemrznoucí směs v kolektorovém okruhu. K zajištění lepší pružnosti soustavy se používá nucený oběh s čerpadlem. Tato soustava je schematicky znázorněna na (obr. 3).



Obr. 3: Solární ohřev TUV ve spojení s kotlem

Hlavní funkcí solárních soustav je zachycení slunečního záření jímací plochou kolektoru, kde se přeměňuje na teplo, kterým se ohřívá kapalina (nejčastěji) v měděných trubkách. Ohřátá kapalina proudí přes potrubí do zásobníku tepla, kde dochází k tepelné výměně mezi teplotnosnou kapalinou a TUV. V případě, že v zásobníku není voda dostatečně teplá, přehřívá se druhým zdrojem tepla, kterým je nejčastěji kotel.

Voda ohřátá pomocí solárního zařízení se může používat jako užitková, nebo se může také použít k přehřívání vody v bazénu a vytápění budov. Solárním ohřevem vody se ušetří přibližně 1/3 nákladů na vytápění a kolem 65% na ohřev TUV. Životnost kolektorů se v současné době pohybuje kolem 25-30 let. Solární zařízení je využito především v létě, kdy

se netopí, což je jeho nevýhodou. Pokud by v létě nedocházelo k odběru tepla získaného v kolektorech, mohlo by dojít k přehřívání kapaliny v kolektorovém okruhu, v důsledku čehož by se v nejteplejších letních dnech mohla teplota v kolektorech přiblížit až ke 100 °C. Materiál kolektorů by byl velmi namáhán a snížila by se jeho životnost. Proto je nutné kolektory používat i v létě.

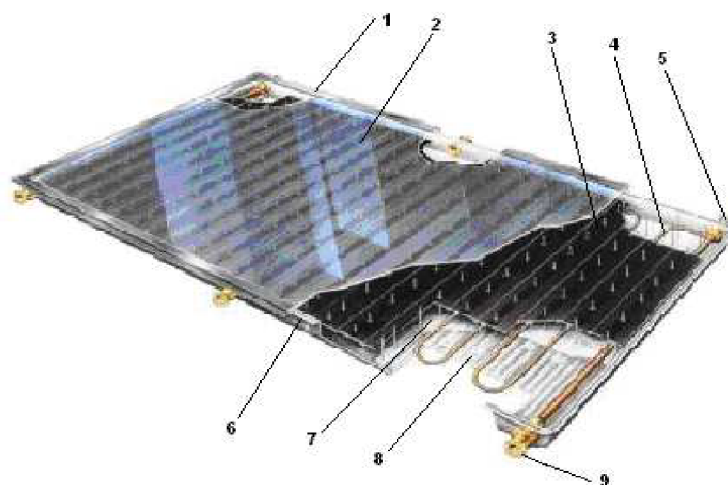
Energetický zisk, jeden z hlavních technických parametrů kolektorů, představuje množství energie, kterou je možno získat za 1 rok provozu z plochy 1 m² kolektoru. Pohybuje se v rozmezí 450-650 kWh/m².rok.

3.1 Hlavní části solárních soustav

Nejdůležitější součástí solární soustavy jsou sluneční kolektory, výměníky (zásobníky TUV), dále to jsou pro zajištění bezpečnosti a prodloužení životnosti zabezpečovací zařízení, jako je např. expanzní nádoba, vzduchový ventil atd. K přenosu tepla (teplonosné kapaliny) slouží potrubí a armatury. Nedílnou součástí je oběhové čerpadlo, které zajišťuje oběh teplonosné kapaliny v tomto potrubí.

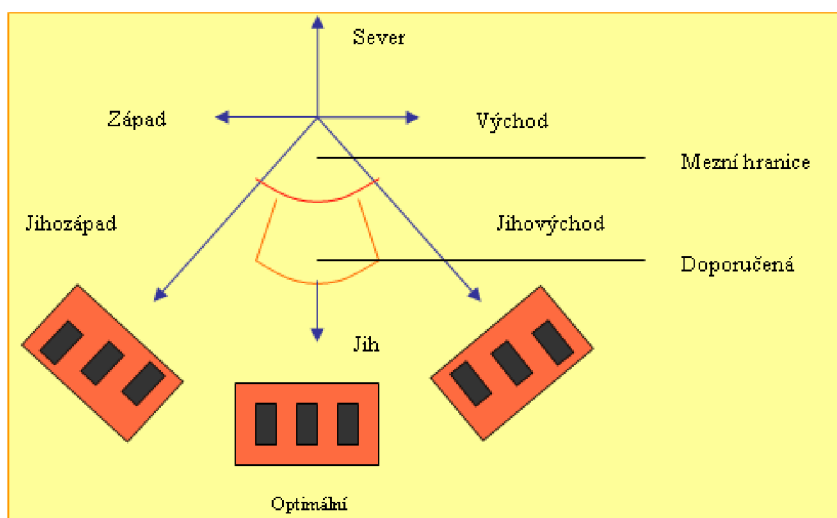
3.1.1 Kolektory

Hlavní funkcí kolektoru je přeměna energie slunečního záření na energii tepelnou. Kolektory se rozdělují podle teplonosného média na vzduchové a kapalinové, a také podle tvaru plochy na ploché a trubicové. Výkon kolektorů (množství vody, které je kolektor schopen ohřát za určitý čas) je dán hlavně velikostí jejich absorpční plochy, ale také druhem absorpčního materiálu.



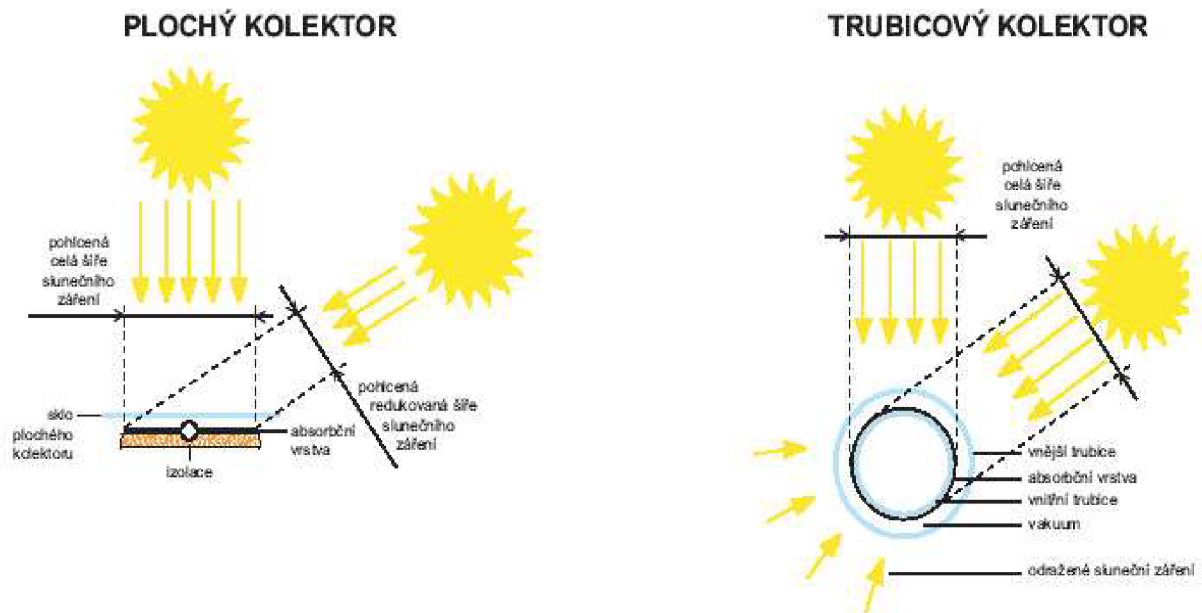
Obr. 4: *Ploché kapalinový kolektor: Hlavní části: 1 - nosný rám, 2 – speciální kalené sklo, 3 – hliníkové absorpční lamely, 4 – had z měděných trubek, 5 – odvod ohřáté teplotné nemrznoucí kapaliny, 6 – těsnění, 7 – tepelná izolace, 8 – průchodka, 9 – přívod teplotné nemrznoucí kapaliny*

Sklon kolektorů by měl být takový, aby paprsky směřovaly kolmo na plochu kolektorů. Protože slunce svítí každou denní i roční dobu na zemi pod jiným úhlem, bylo by ideální, kdyby se kolektory mohly natáčet. K natáčení kolektorů pro kolmý dopad slunečních paprsků je zapotřebí drahý systém, proto se téměř vůbec nepoužívá. Nejvhodnější nastavení kolektorů je znázorněno na (obr. 5):



Obr. 5: *Nejvhodnější nastavení kolektorů*

Trubicové kolektory mají velkou výhodu oproti plochým v tom, že využívají pohlcenou celou šíři slunečního záření bez ohledu na úhel dopadu slunečních paprsků, jak je znázorněno na (obr. 6).



Obr. 6: Sluneční paprsky dopadající pod úhlem na sluneční kolektor plochý a trubicový

3.1.2 Zásobníky TUV

Zásobníky TUV (obr. 2), nebo také akumulční nádrže, či výměníky tepla, jsou nezbytnou součástí solárního zařízení. Zajišťují hospodárnost provozu a předcházejí problémům vzniklým nárazovým odběrem tepla (vyrovnávají nepravidelný přísun a odběr tepla). Slouží k ukládání energie ze slunečních kolektorů, kterou do nich dle jejich kapacity ukládáme v době, kdy je energie z obnovitelného zdroje dostatek (přebytek), a naopak ji z nich odebíráme v době, kdy ji potřebujeme. Důležitým parametrem je plocha trubek v zásobníku (zajišťující tepelnou výměnu mezi TUV a teplotonosnou kapalinou), která určuje účinnost zásobníku.

Všeobecné poznatky o solárních soustavách byly čerpány z [10] [11].

4 TEORIE TEPELNÉHO MODELU

Ke zkoumání tepelných procesů v solárních systémech je vhodné sestavit jejich tepelný model. Při sestavování tepelného modelu se vychází ze zákonů termomechaniky, která se zabývá přeměnou tepelné energie v jiné druhy energií, změnou vlastností látek přívodem nebo odvodem tepla a sdílením tepla. Vše v této kapitole je čerpáno z literatury [4] a [6].

Základní veličinou termomechaniky je teplo E , které představuje zvláštní druh energie. Citace vztahující se ke vztahu (1) zní podle [6] takto: „Množství tepla, které přivedeme nebo odvedeme látce o hmotnosti m a měrné tepelné kapacitě c při rozdílu teplot ΔT , je určeno vztahem:“

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Měrnou tepelnou kapacitu c lze chápat, jako množství tepla, které je zapotřebí přivést látce o hmotnosti 1 kg, aby se ohřála o 1 teplotní stupeň ($^{\circ}\text{C}$ nebo K). Měrná tepelná kapacita s teplotou roste, proto se v technických výpočtech používá tzv. střední měrná tepelná kapacita v daném intervalu.

První termodynamický zákon je základním zákonem termomechaniky. Je formulován jako zvláštní případ zákona zachování energie pro uzavřenou termomechanickou soustavu, kde nedochází k výměně hmotnosti s okolím. Jelikož zákon platí v každém časovém okamžiku, je možno jej vyjádřit pomocí toků energie, kdy mezi jednotlivými toky musí v každém okamžiku platit rovnováha.

$$\phi_{in} + \phi_g - \phi_{out} = \phi_{ak} = \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

kde: Φ_{in} – je tok energie vstupující

Φ_{out} – představuje tok energie vystupující

Φ_g – generovaný výkon (tepelný tok)

Φ_{ak} – akumulovaná energie

Při řešení tepelných procesů jsou důležité především vztahy popisující sdílení tepla. Ke sdílení tepla může docházet těmito způsoby:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- sáláním (zářením, radiací)

4.1 Vedení tepla tuhými tělesy

Vedení tepla je vyjádřeno tzv. Fourierovým vztahem:

$$\frac{dE}{dt} = \phi_v = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

kde: Φ_v – je tepelný tok vedením

λ – měrná tepelná vodivost

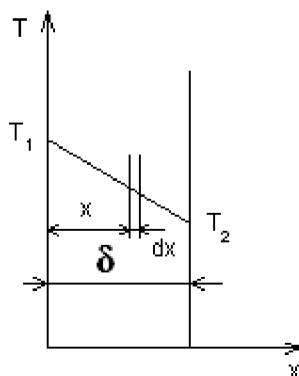
S – plocha kolmá ke směru tepelného toku

$-dT/dx$ – teplotní gradient

Znaménko mínus se zde vyskytuje, protože směr proudění tepla je opačný teplotnímu spádu. Předchozí vztah lze vyjádřit zjednodušeně (pro jednoduchou rovinou stěnu konstantního průřezu S):

$$\phi_v = \frac{\lambda}{\delta} \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

kde δ představuje tloušťku stěny.



Obr. 7: Vedení tepla rovinnou stěnou

4.2 Konvekce

Jde o přestup tepla ze stěny (tělesa) do chladiva (kapalina, plyn) nebo naopak. Tepelný tok konvekcí lze vyjádřit vztahem:

$$\phi_k = \alpha_k \cdot S \cdot (T - T_0) \quad (5)$$

kde α_k je součinitel přestupu tepla a v tomto případě představuje intenzitu sdílení tepla z plochy stěny S o teplotě T do chladiva o teplotě T_0 .

Prostup tepla rovinou stěnou složenou z několika vrstev, je možno vyjádřit pomocí součinitele prostupu tepla k_s :

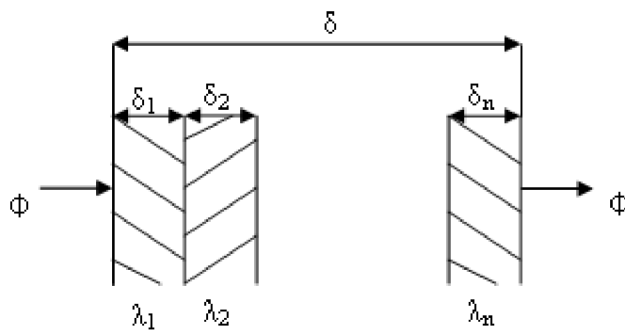
$$\phi_k = k_s \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (6)$$

kde pro součinitel prostupu tepla platí:

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7)$$

Ze vztahu (6) se navíc dá vyjádřit vztah pro tepelnou vodivost:

$$a = k_s \cdot S \quad (8)$$



Obr.: 8 Rovinná stěna tvořena více vrstvami

V závislosti na povaze proudění, může být konvekce označována jako přirozená nebo nucená. Pro přirozenou konvekci vyplývá z teoretického rozboru i měření, že střední součinitel přestupu tepla může být vyjádřen vztahem:

$$\alpha_k = C_K \cdot \sqrt[4]{T - T_o} \quad (9)$$

4.3 Sálání

Nebo-li též tepelné záření, nám říká, že každé těleso, které má konečnou teplotu, vyzařuje do svého okolí energii. Na rozdíl od přenosu tepla vedením a konvekcí je sálání proces, který se může uskutečňovat i ve vakuu. Pro tepelný tok, který může být z tělesa o ploše S vyzařován, platí tzv. Stefan-Boltzmannův vztah:

$$\phi_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_o^4) \quad (10)$$

kde: ε – je poměrná zářivost (emisivita)

$\sigma = 5,67e-8$ je Stefan-Boltzmannova konstanta

T – absolutní teplota povrchu tělesa

T_o – absolutní teplota okolí

Emisivita je závislá na kvalitě povrchu (drsnot, opracování), barvě, teplotě atd. a představuje schopnost povrchu tělesa vyzařovat teplo.

4.4 Tepelná energie proudu chladiva

Tepelný tok proudu chladiva lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$\phi_Q = \rho \cdot c \cdot Q \cdot T \quad (11)$$

kde: ρ – je hustota

Q – objemový průtok

T – absolutní teplota proudu chladiva

Pro tepelnou vodivost proudu chladiva platí:

$$a_Q = \rho \cdot c \cdot Q \quad (12)$$

4.5 Akumulace tepla

Akumulace tepla nastává při změně tepelného stavu látek. Následující vztah tento jev popisuje:

$$\phi = \rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (13)$$

kde Φ představuje množství akumulované energie za jednotku času a V je objem látky.

Vztah (13) je možno použít i k vyjádření dynamiky tepelných procesů. Ta nám vyjadřuje rychlost změny teploty tělesa, která je úměrná celkovému množství tepla přivedeného do tělesa konvekcí, vedením nebo sáláním.

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = \phi_k + \phi_v + \phi_s \quad (14)$$

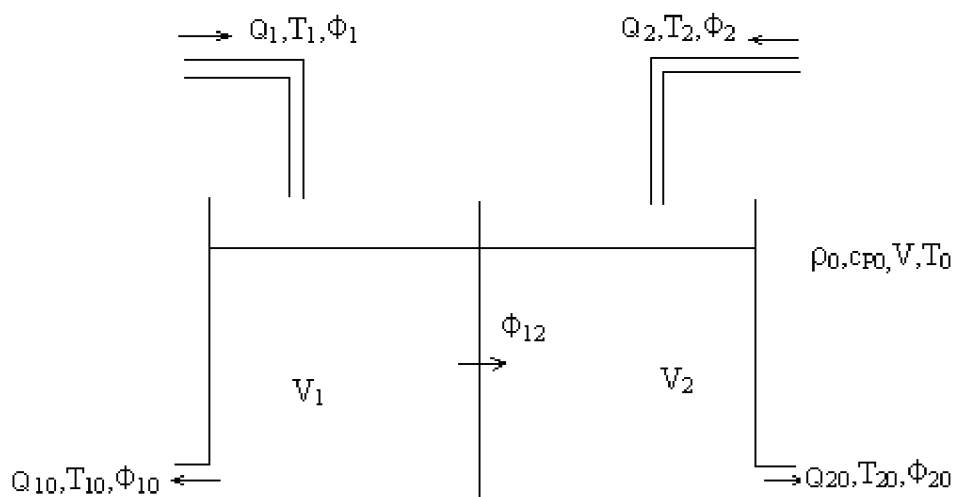
Tepelnou kapacitu látky o objemu V je možno vyjádřit z levé strany vztahu (14).

$$C = \rho \cdot c \cdot V \quad (15)$$

4.6 Výměník tepla

Jako výměník tepla označujeme takové zařízení, ve kterém látka teplejší předává teplo látce chladnější, přes teplosměnnou stěnu. Na (obr.9) je takovýto výměník znázorněn.

Uvažujeme případ kdy: $T_1 > T_2, T_{10} > T_{20}$



Obr. 9: Výměník tepla

Vztahy popisující teploty vytékajících látek T_{10}, T_{20} , vyplývají z prvního termodynamického zákona a vypadají následovně:

$$\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot V_1 \cdot \frac{dT_{10}}{dt} = \Phi_1 - \Phi_{10} - \Phi_{12} \quad (16)$$

$$\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot V_2 \cdot \frac{dT_{20}}{dt} = \Phi_2 - \Phi_{20} + \Phi_{12} \quad (17)$$

kde: Φ_{12} - je tepelný tok prostupu tepla přepážkou

T_1, T_2 - jsou teploty vstupujících kapalin

T_{10}, T_{20} - jsou teploty vystupujících kapalin

Q_1, Q_2, Q_{10}, Q_{20} - značí jednotlivé průtoky

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_{10}, \Phi_{20}$ - jsou tepelné toky příslušející danému toku kapaliny

V_1, V_2 - jsou objemy nádrží

Po dosazení za jednotlivé tepelné toky, podle teorie pro sdílení tepla, obdržíme:

$$\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot V_1 \cdot \frac{dT_{10}}{dt} = \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot T_1 \cdot Q_1 - \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot T_{10} \cdot Q_{10} - k_s \cdot S \cdot \left(\frac{(T_1 - T_2) - (T_{10} - T_{20})}{\ln \frac{T_1 - T_2}{(T_{10} - T_{20})}} \right) \quad (18)$$

$$\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot V_2 \cdot \frac{dT_{20}}{dt} = \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot T_2 \cdot Q_2 - \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot T_{20} \cdot Q_{20} + k_s \cdot S \cdot \left(\frac{(T_1 - T_2) - (T_{10} - T_{20})}{\ln \frac{T_1 - T_2}{(T_{10} - T_{20})}} \right) \quad (19)$$

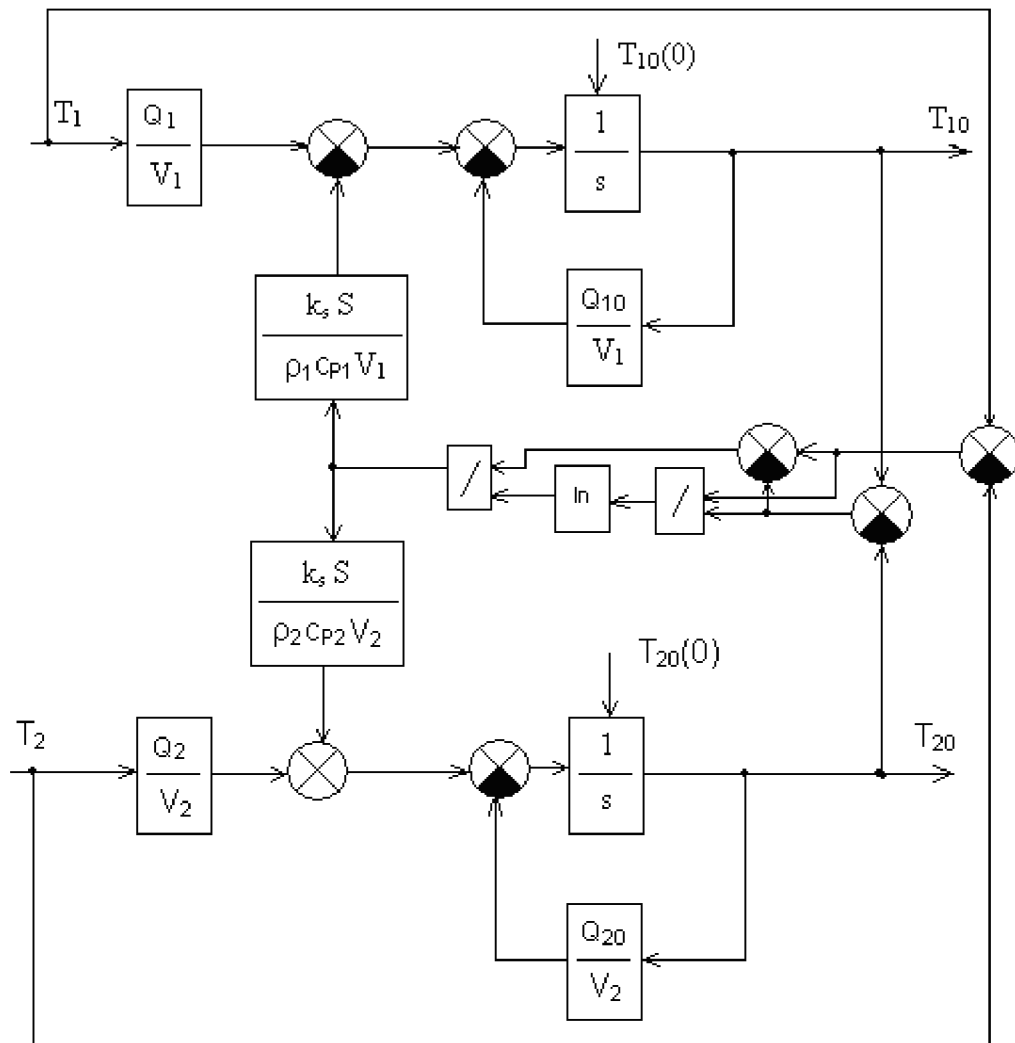
Teplotní diference mezi kapalinami je v tomto případě vyjádřena tzv. středním logaritmickým teplotním spádem, protože teploty obou kapalin se mění s polohou.

Za účelem kreslení blokového schématu (obr. 10) se rovnice dále upravují na tvar:

$$\frac{dT_{10}}{dt} = \frac{Q_1}{V_1} T_1 - \frac{Q_{10}}{V_1} T_{10} - \frac{k_s \cdot S}{\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot V_1} \cdot \left(\frac{(T_1 - T_2) - (T_{10} - T_{20})}{\ln \frac{T_1 - T_2}{(T_{10} - T_{20})}} \right) \quad (20)$$

$$\frac{dT_{20}}{dt} = \frac{Q_2}{V_2} T_2 - \frac{Q_{20}}{V_2} T_{20} + \frac{k_s \cdot S}{\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot V_2} \cdot \left(\frac{(T_1 - T_2) - (T_{10} - T_{20})}{\ln \frac{T_1 - T_2}{(T_{10} - T_{20})}} \right) \quad (21)$$

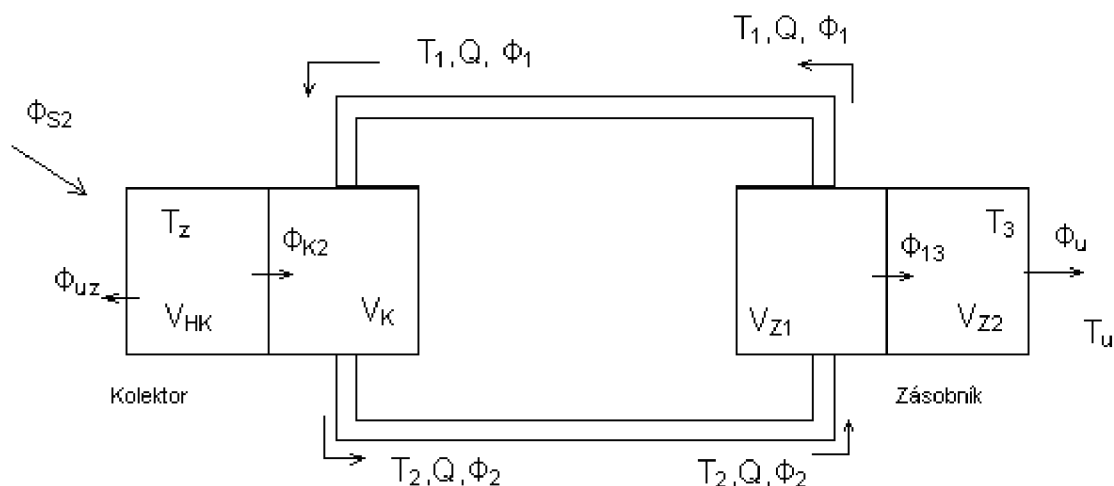
Více o výměnících tepla a o jejich modelování je uvedeno v literatuře [4].



Obr. 10: Blokové schéma nepřímého výměníku tepla

5 NÁVRH VÝPOČTOVÉHO MODELU SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

Při návrhu výpočtového modelu solárního systému se vycházelo z teorie pro výměník tepla. Zpočátku bylo nutné navrhnout schéma, které popisuje solární systém, a z něj pak sestavit soustavu diferenciálních rovnic. Rovnice popisující solární systém jsou diferenciální, protože se jedná o řešení neustáleného tepelného stavu, a jejich počet odpovídá počtu neznámých (hledaných) teplot. V případě ustáleného tepelného stavu by tyto rovnice byly lineární. Schéma solárního systému je znázorněno na (obr. 11).



Obr. 11: Schéma solárního systému

Značení jednotlivých veličin v (obr. 11) je následující:

Φ_{S2} – Tepelný tok (v reálném případě ze slunce, v našem případě ze zářiče)

T_Z – Teplota kolektoru (zdroje)

V_{HK} – Objem absorpční hmoty kolektoru

Φ_{K2} – Tepelný tok z hmoty kolektoru do teplotnosné kapaliny v kolektoru

V_K – Objem teplotnosné kapaliny v potrubí kolektoru

T_1 – Teplota na vstupu do kolektoru a zároveň z důvodu zanedbání tepelných ztrát ve spojovacím potrubí se jedná o teplotu na výstupu ze zásobníku

T_2 – Teplota na výstupu z kolektoru a zároveň teplota na vstupu do zásobníku

Q – Průtok teplotnosné kapaliny

Φ_1 – Tepelný tok toku kapaliny o teplotě T_1

Φ_2 – Tepelný tok toku kapaliny o teplotě T_2

V_{Z1} – Objem teplotnosné kapaliny v potrubí v zásobníku

V_{Z2} – Objem vody v zásobníku

T_3 – Teplota vody v zásobníku

T_u – Teplota okolí

Φ_u – Tepelný tok ze zásobníku do okolí

Φ_{uz} – Tepelný tok z kolektoru do okolí

V návaznosti na teoretickou část, vztahy popisující solární systém v neustáleném tepelném stavu vypadají následovně:

$$\rho_Z \cdot c_Z \cdot V_{HK} \cdot \frac{dT_Z}{dt} = \Phi_{S2} - \Phi_{K2} - \Phi_{uz} \quad (22)$$

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot V_K \cdot \frac{dT_2}{dt} = \Phi_{K2} + \Phi_1 - \Phi_2 \quad (23)$$

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot V_{Z1} \cdot \frac{dT_1}{dt} = \Phi_2 - \Phi_1 - \Phi_{13} \quad (24)$$

$$\rho_3 \cdot c_3 \cdot V_{Z2} \cdot \frac{dT_3}{dt} = \Phi_{13} - \Phi_u \quad (25)$$

Po dosazení a upravení na tvar vhodný pro kreslení blokových schémat, vztahy vypadají takto:

$$\frac{dT_Z}{dt} = \frac{1}{\rho_Z \cdot c_Z \cdot V_{HK}} \cdot \left(\Phi_{S2} - a_1 \cdot \left(\frac{(T_Z - T_1) - (T_Z - T_2)}{\ln \frac{(T_Z - T_1)}{(T_Z - T_2)}} \right) - \alpha \cdot S \cdot (T_Z - T_U) \right) \quad (26)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{a_1}{\rho_2 \cdot c_2 \cdot V_K} \cdot \left(\frac{(T_Z - T_1) - (T_Z - T_2)}{\ln \frac{(T_Z - T_1)}{(T_Z - T_2)}} \right) + \frac{Q}{V_K} \cdot T_1 - \frac{Q}{V_K} \cdot T_2 \quad (27)$$

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{Q}{V_{Z1}} \cdot T_2 - \frac{Q}{V_{Z1}} \cdot T_1 - \frac{a_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot V_{Z1}} \cdot \left(\frac{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_3)}{\ln \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_3)}} \right) \quad (28)$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{\rho_3 \cdot c_3 \cdot V_{Z2}} \cdot \left(a_2 \cdot \left(\frac{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_3)}{\ln \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_3)}} \right) - a_u \cdot (T_3 - T_u) \right) \quad (29)$$

Ve vztahu (26) je S teplosměnná plocha kolektoru ($0,26 \text{ m}^2$) a α_{sk} je celkový součinitel přestupu tepla pro sálání a konvekci, který je podle [6] vyjádřen následovně:

$$\alpha_{sk} = \alpha_k \cdot \left(1 + 8,4 \cdot \left(\frac{A_s}{A_k} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot \sigma}{C_k} \right) \cdot T_u^{2,75} \right) \quad (30)$$

kde: α_k – je součinitel přestupu tepla pro konvekci

A_s – plocha kolektoru pro sálání

A_k – plocha kolektoru pro konvekci

ε – emisivita

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta

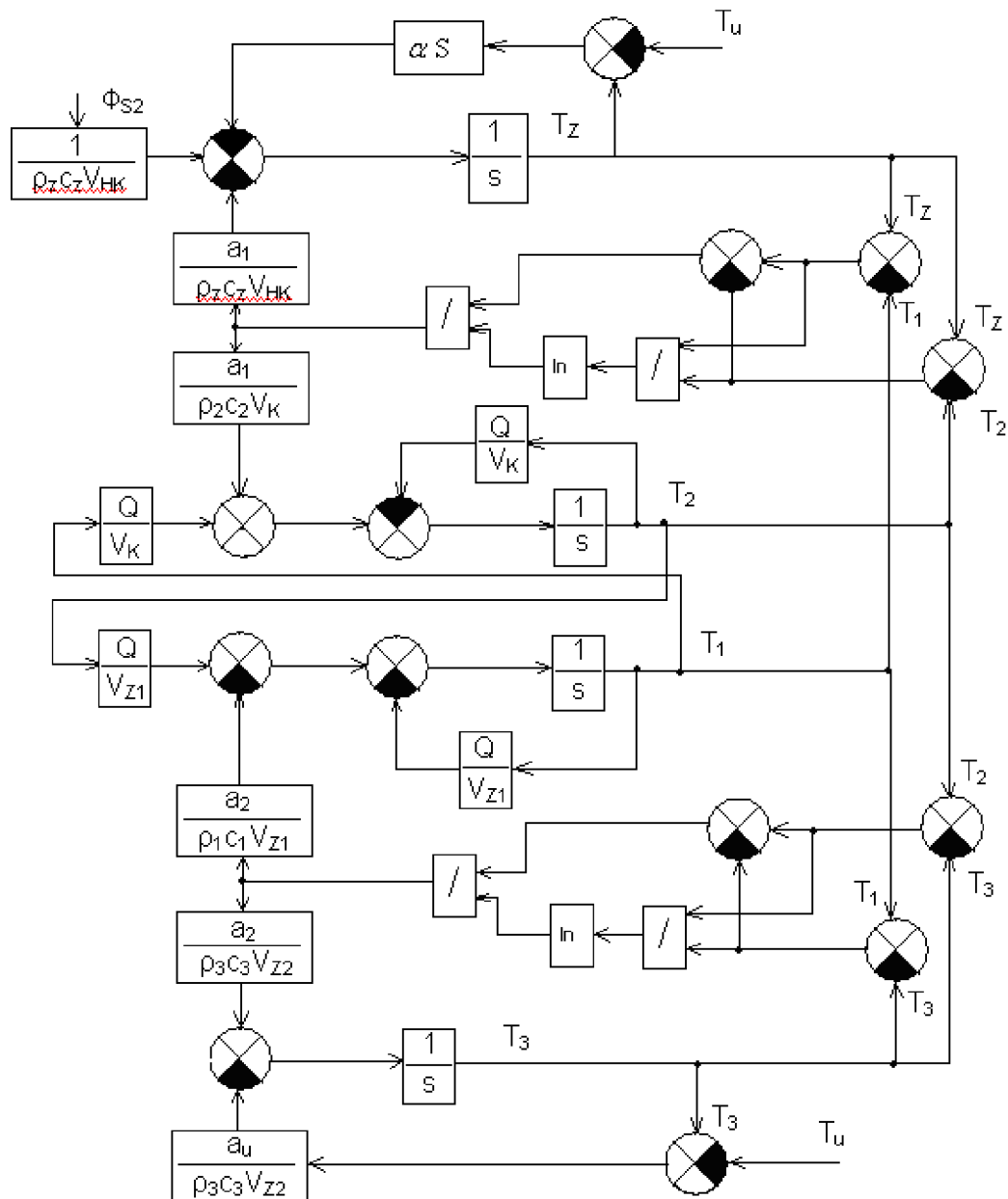
C_k – součinitel konvekce (tvaru)

Pro výpočet celkového součinitele přestupu tepla byla uvažována teplota na kolektoru $80 \text{ }^\circ\text{C}$, teplota okolí $25 \text{ }^\circ\text{C}$, výsledná hodnota součinitele po dosazení pak vyšla takto:

$$\alpha_k = C_K \cdot \sqrt[4]{T_Z - T_u} = 1,78 \cdot \sqrt[4]{(80 + 273,15) - (25 + 273,15)} = 4,9 \frac{W}{m^2 K}$$

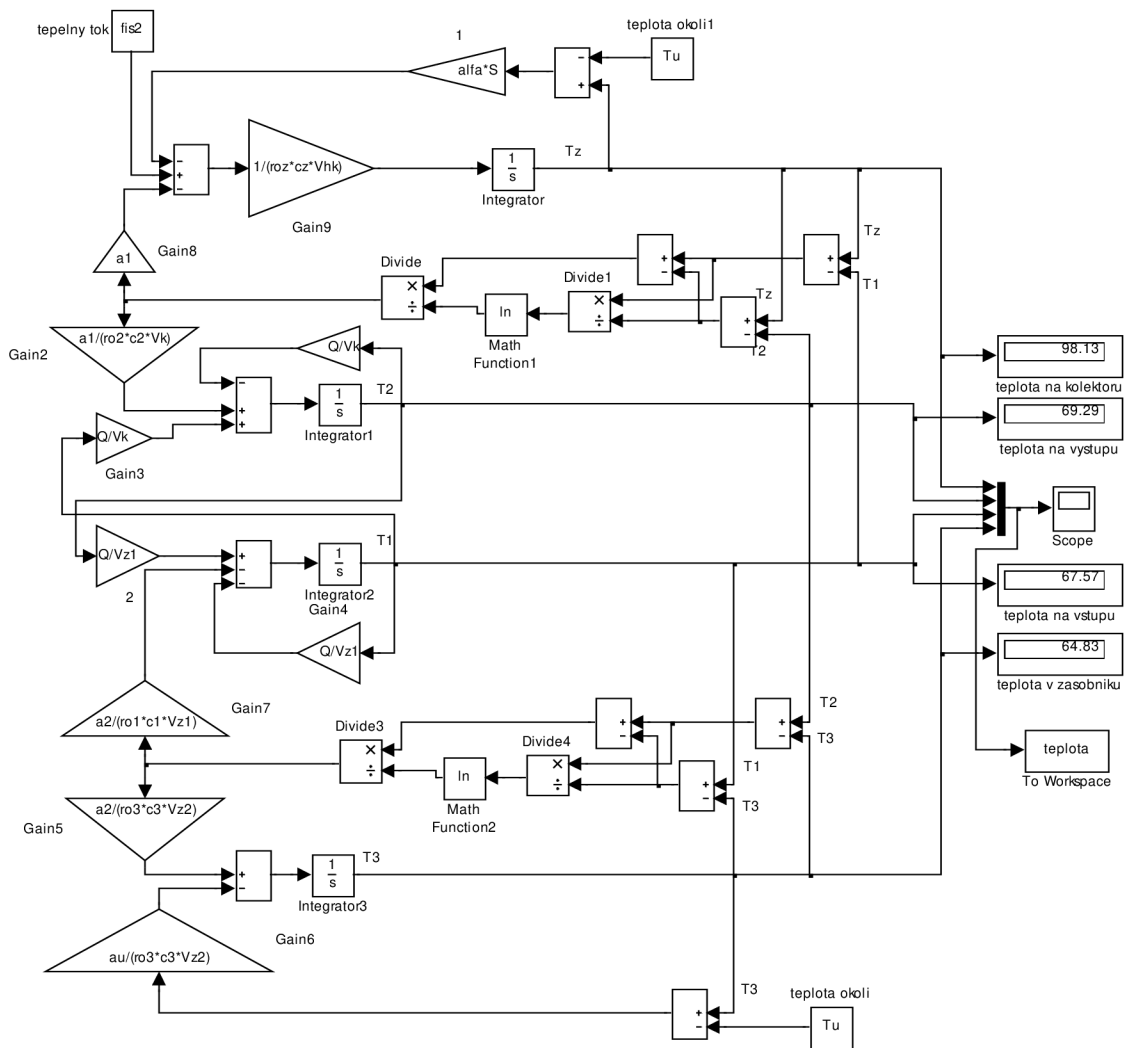
$$\alpha_{sk} = 4,85 \cdot \left(1 + 8,4 \cdot \left(\frac{0,26}{0,26} \right) \cdot \left(\frac{0,98 \cdot 5,67e - 8}{1,78} \right) (25 + 273,15)^{2,75} \right) = 12,96 \cong 13 \frac{W}{m^2 K}$$

Odpovídající blokové schéma je na (obr. 12).



Obr. 12: Blokové schéma solárního systému

Za účelem provedení simulace průběhu teplot kapaliny v jednotlivých místech solárního systému, bylo využito programové prostředí Matlab SIMULINK. Vstupní data byla určena na základě identifikace parametrů výpočtového modelu, viz. kapitola 8. Výpočtový model solárního systému v prostředí SIMULINK je znázorněn na (obr. 13).



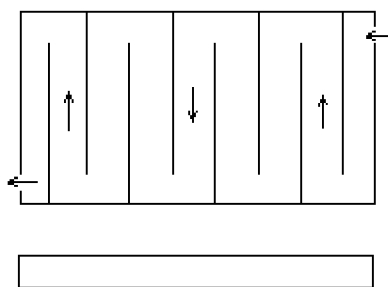
Obr. 13: Výpočtový model v prostředí SIMULINK

6 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU

6.1 Postup zhotovení a součásti

Při výrobě experimentálního modelu se vycházelo ze schématu solárního systému pro výpočtový model. Snaha byla co nejvíce toto schéma vystihnout, zároveň se však usilovalo o to, aby tento model byl co nejlevnější, a proto některé prvky tohoto modelu tomu odpovídají.

Prvním úkolem bylo vytvoření zmenšené kopie solárního kolektoru. Zprvu se uvažovalo, že by mohl být tvořen dvěma plechy, které by byly k sobě přivařeny a mezi nimiž by byl určitý prostor, ve kterém by mohla protékat teplonosná kapalina. Uvažovalo se i o žebrování mezi těmito plechy z důvodu prodloužení dráhy průchodu teplonosné kapaliny kolektorem, čímž by došlo ke zlepšení tepelné výměny mezi plechem a teplonosnou kapalinou. Průřez takovýmto kolektorem, při pohledu zhora, můžete vidět na náčrtu (obr. 14).



Obr. 14: Náčrt solárního kolektoru

Nakonec se dospělo k závěru, že kolektor může představovat vhodně konstruovaný radiátor. Jeho funkce je sice opačná, to znamená, že teplo nepřijímá, ale naopak vydává. Nicméně po vhodně zvolených úpravách lze dosáhnout funkce kolektoru, který teplo přijímá. Výhodou tohoto řešení je hlavně jednoduchost zhotovení, odpadá zde totiž složité svařování, které by dále mohlo způsobit nežádoucí netěsnosti. V návaznosti na tuto myšlenku byl zvolen starý hliníkový radiátor, jemuž byly z jedné strany odstraněny teplosměnné plochy, aby nedocházelo k úniku tepla. Takto upravenému radiátoru byla odstraněna původní bílá barva, která byla nahrazena matnou černou barvou, z důvodu zlepšení sálavosti. Nakonec byl

radiátor, pro ještě menší tepelné ztráty, po stranách a ze zadu zaizolován, vložen do bednění a zasklen. Výsledný model kolektoru je znázorněn na (obr. 15).



Obr. 15: Model solárního kolektoru

Další součástí solárního systému, kterou bylo zapotřebí zhotovit byl zásobník (výměník) TUV. V tomto případě byla použita plastová nádoba, která byla omotána izolací. Nutnou podmínkou bylo, aby zásobník zároveň plnil i funkci tepelného výměníku. Řešením bylo použití nerezové topenářské trubky, která byla v tomto zásobníku smotána (obr. 16) a připevněna ke spojovacímu potrubí. Vnější pohled na zásobník je zobrazen na (obr. 17)



Obr. 16: Pohled na výměník TUV



Obr. 17: Model zásobníku

Jelikož experimentální měření probíhalo v zimním období, nebylo možné se spolehnout na slunce, jako na zdroj tepelného toku. Z tohoto důvodu byl použit halogenový zářič, který pro měření představoval ideální zdroj tepelného toku. Zářič je zobrazen na (obr. 18), jeho výhodou bylo, že měl 3 stupně intenzity záření (výrobce udávaný výkon 400-1200W).



Obr. 18: Halogenový zářič jako zdroj tepelného toku

Jako spojovací potrubí posloužila obyčejná zahradní hadice, jejíž součástí bylo oběhové čerpadlo, průtokoměr, plnicí a zároveň odvzdušňovací část a další spojovací a redukční prvky. Oběhové čerpadlo mělo 3 stupně průtoků a jeho výrobcem udávané parametry jsou uvedeny v (tab. 1).

Stupeň	N (min ⁻¹)	P (W)	I (A)
I.	1315	39	0,17
II.	1723	60	0,26
III.	2456	69	0,30

Tabulka 1: Parametry oběhového čerpadla

Celkový pohled na model solárního systému je vidět na (obr. 19).



Obr. 19: Experimentální model solárního systému

V prvotní fázi, kdy model nebyl ještě opatřen oběhovým čerpadlem, byl prokázán přirozený oběh. K přirozenému oběhu dochází vlivem rozdílu teplot v horní a dolní části kolektorového potrubí, kdy teplá kapalina stoupá vzhůru a v případě uzavřeného okruhu, tak dochází k samovolnému proudění.

Jelikož byl model vybaven pouze jedním otvorem pro napuštění, docházelo zde k problému s odvzdušněním celého systému. Toto se bohužel nepodařilo úplně vyřešit, a proto bych pro příště doporučoval volit alespoň dva otvory, přičemž do jednoho by se kapalina nalévala a druhý by sloužil k vypouštění přebytečného vzduchu.

6.2 Návrh měřicího stanoviště

Jedním z mnoha úkolů této práce byl návrh měřicího stanoviště, které by umožňovalo analyzovat signály z teplotních čidel a zaznamenávat je v počítači. Celkem byly použity 4 teplotní čidla, z nichž 3 byly termočlánky typu K a 1 analogové čidlo teploty DS60. Dále byl použit 1 snímač tepelného toku HFS-4. Pro zobrazení a uložení naměřených dat, bylo využito

systému sběru dat OMEGA OMK-AD812, který lze připojit na paralelní port počítače. Zpracování naměřených dat do podoby grafů, proběhlo v programu EXCEL a MATLAB.

Pro měření teploty slouží celá řada senzorů, které lze rozdělit na senzory pro dotykové měření teploty a bezdotykové měření teploty. Pro jednotlivé oblasti měření senzory dále dělíme následovně:

Senzory pro dotykové měření teploty

- Elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN přechodem, termoelektrické, krystalové)
- Dilatační (kapalinové, plynové, parní a bimetalové)
- Speciální (akustické, šumové, magnetické, tekuté krystaly, teploměrné barvy aj)

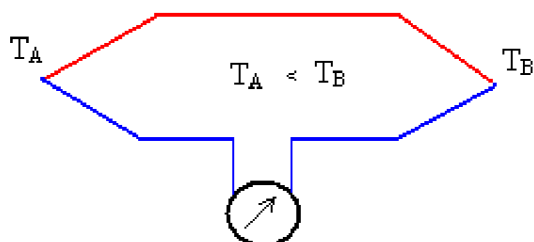
Senzory pro bezdotykové měření teploty:

- Tepelné
- Kvantové

Více o měření teploty a dalším dělení senzorů lze najít v [1].

6.2.1 Termočlánek typu K

Termočláanky využívají Seebeckova jevu, který je založen na přeměně tepelné energie na energii elektrickou. Základem tohoto jevu je vznik termoelektrické síly v uzavřeném okruhu dvou vodičů z různých materiálů, jejichž konce mají různé teploty T_A a T_B , viz. (obr. 20). Rozpojíme-li tento okruh v jakémkoliv místě, bude na vzniklých svorkách elektrické napětí, které se pohybuje řádově v milivoltech. Lze tedy říct, že termočlánek je diferenčním senzorem, protože získaná hodnota termoelektrického napětí (po převodu hodnota teploty) je dána rozdílem teplot na měřeném konci B a na srovnávacím konci A.



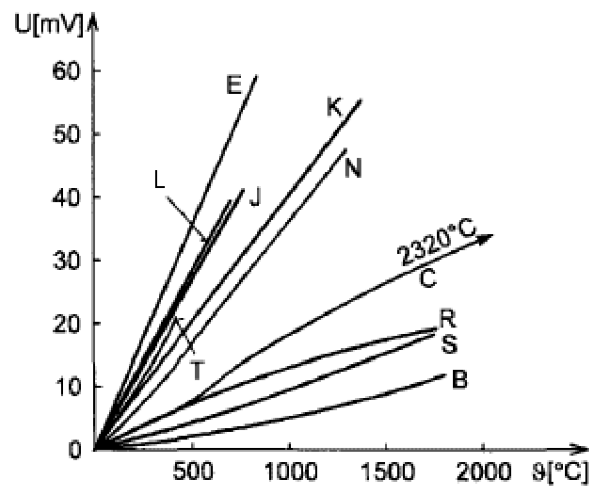
Obr. 20: Termočlánek – Seebeckův jev

Vzhledem k tomu, že termočlánky jsou používány v různých prostředích a pro různé rozsahy teplot, bylo nutné zavést normalizaci párů materiálů (tj. termoelektrických článků). Označení dle doporučení mezinárodní elektrotechnické komise (IEC) se provádí velkými písmeny, viz (tab. 2).

Termočlánek	Typ	Max. teplota [°C]
NiCr-Ni	K	1200
Fe-Ko	L	700
Fe-CuNi	J	700
Cu-CuNi	T	400
Pt10Rh-Pt	S	1600
Pt13Rh-Pt	R	1600
Pt30Rh-Pt6Rh	B	1800
WRe5-WRe26	C	2320
NiCrSi-NiSi	N	1100
NiCr-CuNi	E	800

Tabulka 2: Rozdělení termočlánků

Na (obr. 21) jsou znázorněny statické charakteristiky vybraných typů termočlánků, které popisují závislost elektrického napětí na měřené teplotě.



Obr. 21: Statické charakteristiky vybraných typů termoelektrických článků

Při měření teploty za pomoci termočlánků jsou na měřící obvody kladeny požadavky typu – minimalizace vlivu kolísání srovnávacích teplot, minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru a potlačení rušivých signálů. Více o těchto požadavcích je popsáno v [1].

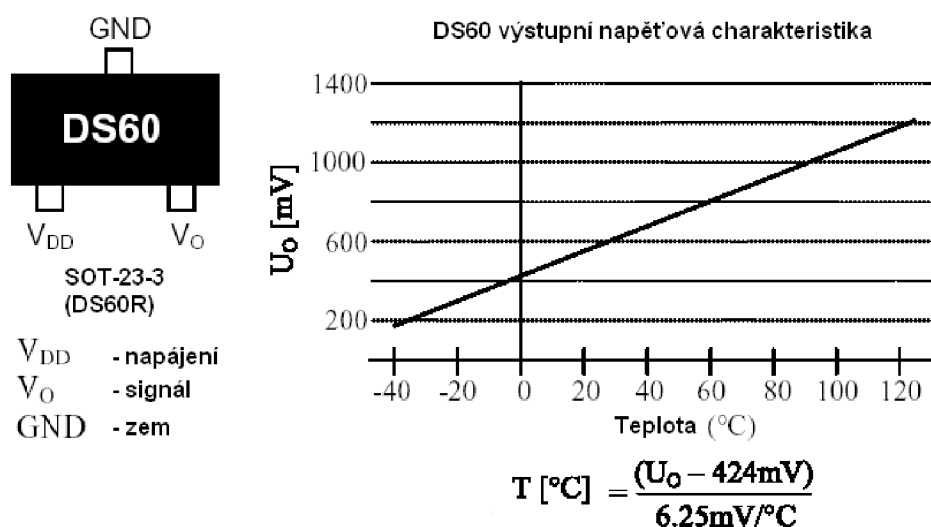
V diplomové práci byly termočlánky použity k určení teploty na výstupu z kolektoru, dále na vstupu do kolektoru a také ke snímání teploty na povrchu kolektoru.

6.2.2 Analogový senzor teploty DS60

Analogový senzor teploty měří svoji vlastní teplotu a její velikost udává formou výstupního napětí, které je úměrné teplotě, viz. (obr. 22). Senzor je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí a v případě této práce sloužil k měření teploty v zásobníku TUV. Vše o analogovém čidlu je čerpáno z [9].

Udávané vlastnosti senzoru DS60 dle výrobce jsou:

- citlivost $+6,25 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ s 424 mV DC offsetem při 0°C
- měřící rozsah -40°C až $+125^\circ\text{C}$
- přesnost $\pm 2^\circ\text{C}$ v rozsahu 0°C až 85°C (jinak $\pm 3^\circ\text{C}$)
- ultra-nízký napájecí proud max. $125 \mu\text{A DC}$
- napájení $+2,5 \text{ V} < \text{VDD} < +5,5 \text{ V DC}$



Obr. 22: Teplotní senzor DS60 a jeho výstupní napěťová charakteristika

6.2.3 Snímač tepelného toku HFS-4

Snímač tepelného toku OMEGA HFS-4 slouží pro měření tepelného toku skrze libovolný materiál, což v případě diplomové práce odpovídá materiálu kolektoru. Díky jeho úzkému profilu jej lze použít jak na rovném, tak na zakřiveném povrchu. Součástí snímače je termočlánek pro diskrétní teplotní měření.

Snímač generuje přirozený napěťový signál, který je měřitelný běžnými voltmetry s mikrovoltovým rozsahem.

Výstupní signál ze senzoru se generuje následovně:

aby stejný tepelný tok procházel skrze senzor a plochu, musí být senzor v kontaktu s plochou, pro kterou se tepelný tok zjišťuje. Teplotní gradient se pak tvoří vlivem teplotní bariéry. Platí přímá úměra mezi gradientem a tepelným tokem. Jednotlivé termočlánky měří velikost gradientu a na základě jeho velikosti produkují napěťový signál.

Specifikace:

- maximální provozní teplota: 149 °C

- počet termočlánků: více než 50
- základní materiál: polyamidový film (Kapton)
- odpor senzoru: přibližně 160 Ω
- citlivost: 1,79 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
- časová odezva: 0,7 s
- tepelná kapacita: 1000 $\text{Ws}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- tepelný odpor: 0,004 $^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$

Více o snímači tepelného toku HFS-4 lze nalézt v [2].

6.2.4 Systém sběru dat OMEGA OMK-AD812

Jedná se o jednoduchý systém sběru dat, který lze připojit na paralelní port počítače. OMK-AD812 má osm analogových vstupů, rozlišení 1 mV a analogový vstupní rozsah 0 – 4.096 V. Dále je opatřen přídatným modulem úpravy signálu, který umožňuje přijímat teplotní a milivoltové signály. Tato úprava signálu je podporována softwarem, který je součástí OMK-AD812. Lze jej propojit s OMK-USC, který zkonvertuje osm analogových vstupů na čtyři vstupy pro termočlánky typu J, K nebo T, kromě toho může měřit jednu okolní teplotu, jednu frekvenci a má 5 napěťových vstupů.

K zobrazení a zachování naměřených dat slouží program OMEGA, který data ukládá v předem stanovených časových intervalech. Zobrazení všech naměřených dat lze provést převodem např. do tabulkového programu EXCEL, do programu MATLAB atd.

Více o zařízení je uvedeno v [2]. Připojení na paralelní port počítače je zobrazeno na (obr. 23).



Obr. 23: Propojení OMK-AD812 s OMK-USC a počítačem

7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Experimentální měření bylo provedeno za účelem posouzení vlivu některých vstupních parametrů, jako je průtok solárním systémem a intenzita tepelného toku, na chování solárního systému. Dále na základě naměřených dat byla provedena identifikace parametrů výpočtového modelu.

Vzhledem k tomu, že na oběhovém čerpadlu šlo nastavit tři stupně průtočného množství a na halogenovém zářiči tři stupně intenzity záření (tepelného toku), tak se uskutečnilo celkem devět měření. Délka jednoho měření odpovídala době kdy došlo k ustálení teplot, tudíž kdy změna teplot nepřekročila hodnotu 2 °C za 1 hodinu. V průměru se doba každého měření pohybovala okolo 5,5 hodin (doba vychladnutí celého systému pak trvala zhruba 15 hodin). Plán měření je popsán v (tab. 3).

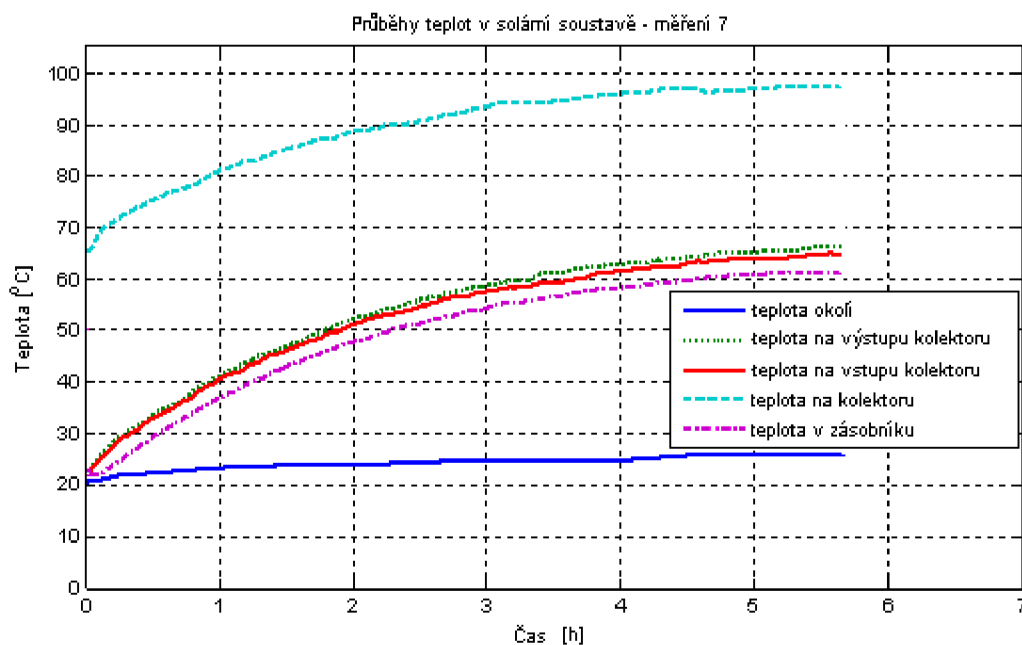
Číslo měření	Stupeň zářiče	Odhadovaná intenzita tepelného toku Φ_{S2} [W]	Stupeň čerpadla	Průtok Q[l/s]
1	I	600	I	0,108
2			II	0,145
3			III	0,163
4	II	800	I	0,108
5			II	0,145
6			III	0,163
7	III	1050	I	0,108
8			II	0,145
9			III	0,163

Tabulka 3: Plán měření

K měření teploty v zásobníku byl použit analogový teplotní senzor DS60. Protože senzor nesměl přijít do styku s vodou, bylo zapotřebí jej zaizolovat (v tomto případě tavnou pistolí).

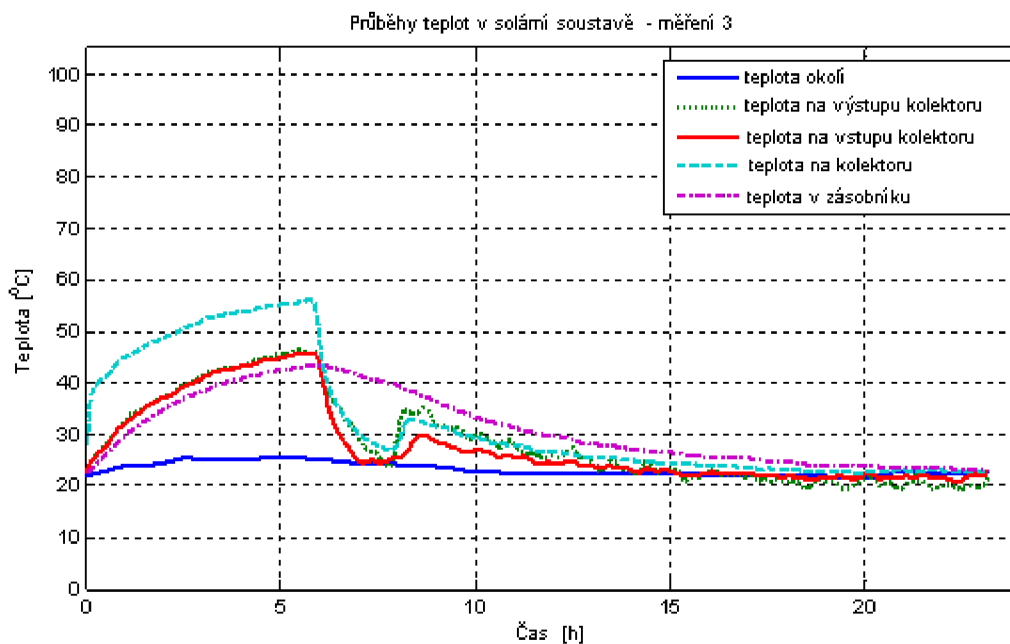
Ukládání naměřených teplot probíhalo v intervalu 10 s, který vyplýval z možnosti uložení 4000 hodnot. Pro vykreslení průběhů teplot v závislosti na čase byl v programovém

prostředí MATLAB vytvořen algoritmus, který je uveden v příloze [1]. Příklad grafu je znázorněn na (obr. 24), jedná se o měření číslo sedm.



Obr. 24: Průběh teplot v solární soustavě v závislosti na čase – měření číslo sedm

Z experimentálních důvodů proběhlo také měření ochlazování solární soustavy. Z grafu (obr.25) vyplývá, že zhruba po dvou hodinách od vypnutí zářiče a oběhového čerpadla, došlo k samovolnému rozběhu teploty v solární soustavě. To bylo způsobeno vlivem rozdílu teplot v horní a dolní části kolektoru i zásobníku.



Obr. 25: Průběh teplot v solární soustavě – měření číslo tři

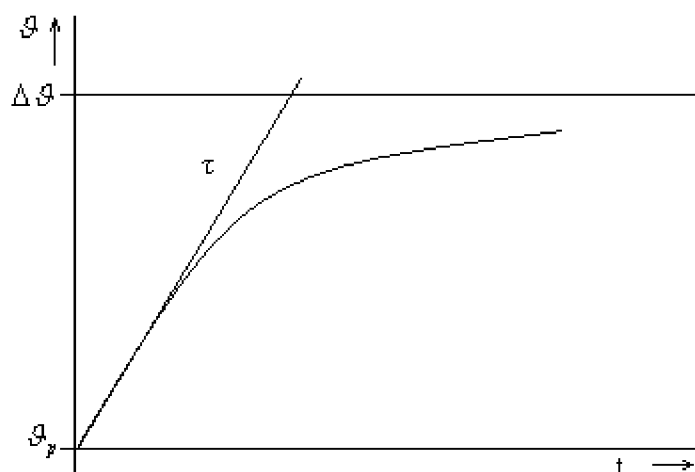
Průběhy teplot všech uskutečněných měření jsou obsaženy v příloze [2].

Pro určování parametrů výpočtového modelu bylo potřebné znát hodnoty ustálených teplot. Ustálené teplotní stavy se určily z oteplovací křivky pomocí programového prostředí MATLAB a to konkrétně nástrojem „Curve Fitting“. Postupovalo se tak, že po načtení naměřených dat, se tyto data proložily exponenciální křivkou, která vystihuje křivku oteplovací. Vztah popisující oteplovací křivku je:

$$\vartheta = \Delta\vartheta \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right) + \vartheta_p \quad (31)$$

Následovně byly programem vypočteny hodnoty $\Delta\vartheta$, τ , ϑ_p kde $\Delta\vartheta$ je teplotní rozdíl mezi počáteční a ustálenou teplotou, τ popisuje lineární část nárůstu oteplovací křivky, což odpovídá časové konstantě a ϑ_p je počáteční hodnota teploty.

Na (obr. 26) je znázorněna oteplovací křivka i s popisem jednotlivých veličin.



Obr. 26: Oteplovací křivka

Z předchozího plyne, že ustálené teplotní stavy jsou dány součtem teplotního rozdílu ΔT a počáteční teploty T_p . Výsledné ustálené teploty v různých částech solárního systému pro jednotlivá měření jsou uvedeny v (tab. 4).

Číslo měření	ϑ_z - Teplota na kolektoru [°C]	ϑ_2 - Teplota na výstupu kolektoru [°C]	ϑ_1 - Teplota na vstupu kolektoru [°C]	ϑ_3 - Teplota v zásobníku [°C]
1	55,36	45,96	45,29	43,89
2	55,87	45,92	45,13	44,48
3	56,46	47,21	46,74	45,85
4	71,62	59,62	58,52	55,37
5	70,64	60,61	58,94	56,43
6	69,79	59,97	58,81	56,39
7	98,14	69,27	67,59	64,84
8	99,7	70,53	69,62	66,7
9	98,4	70,63	70,13	67,54

Tabulka 4: Ustálené tepelné stavy

8 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ VÝPOČTOVÉHO MODELU

Identifikovat parametry výpočtového modelu na základě naměřených hodnot, bylo nezbytné z hlediska ověření jeho správnosti, a také z důvodu následného návrhu regulace systému.

Prvním zjišťovaným parametrem byla tepelná vodivost proudu teplonosné kapaliny a_Q . Určovala se jako první, protože k jejímu určení byly k dispozici všechny ostatní veličiny a její hodnota byla důležitá pro stanovení tepelného toku ze zdroje, který byl potřebný k definování všech zbývajících parametrů. Její výpočet vycházel ze vztahu:

$$a_Q = \rho \cdot c \cdot Q \quad (32)$$

kde: ρ – hustota vody

c – měrná tepelná kapacita vody

Q – průtok

Výsledné hodnoty tepelných vodivostí pro jednotlivé průtoky, tedy pro 3 stupně otáček oběhového čerpadla, jsou uvedeny v (tab. 5).

Průtok Q [m ³ /s]	a_Q [W/K]
0,000108	451,44
0,000145	606,1
0,000163	681,34

Tabulka 5: Hodnoty tepelných vodivostí

Dalším určovaným parametrem byl tepelný tok ze zdroje. Při jeho určování se vycházelo z tohoto vztahu:

$$\Phi_{s_2} = \rho \cdot c \cdot Q \cdot (T_2 - T_1) + \alpha \cdot S \cdot (T_z - T_u) = a_Q \cdot (T_2 - T_1) + \alpha \cdot S \cdot (T_z - T_u) \quad (33)$$

Jeho vypočítané hodnoty jsou uvedeny v příloze [3]. Pro představu hodnota tepelného toku příslušející měření číslo sedm (zářič – plný výkon, čerpadlo – nejnižší otáčky) je 1005,6 W.

K určení tepelných vodivostí v jednotlivých částech solárního systému, se vycházelo z výpočtového modelu pro ustálený tepelný stav, tedy nebylo počítáno s tepelnými kapacitami, jejich hodnota se rovnala nule. Na základě jednoduchých matematických operací byly z původního výpočtového modelu vyjádřeny následující vztahy pro tepelné vodivosti:

$$a_1 = \frac{\phi_{s2} - \alpha \cdot S \cdot (T_z - T_u)}{\frac{(T_z - T_1) - (T_z - T_2)}{\ln \frac{(T_z - T_1)}{(T_z - T_2)}}} \quad (34)$$

$$a_2 = \frac{a_Q \cdot (T_2 - T_1)}{\frac{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_3)}{\ln \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_3)}}} \quad (35)$$

$$a_u = \frac{a_2 \cdot \left(\frac{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_3)}{\ln \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_3)}} \right)}{(T_3 - T_u)} \quad (36)$$

Tabulka všech tepelných vodivostí pro jednotlivá měření je uvedena v příloze [4], jen pro představu jsou zde uvedeny hodnoty opět pro měření číslo sedm, viz. (tab. 6).

Tepelné vodivosti	Velikost v [W/K]
a_1	25,53
a_2	215,25
a_u	19,04

Tabulka 6: Hodnoty tepelných vodivostí pro měření číslo sedm

Další hledanou neznámou byla tepelná kapacita jednotlivých částí solárního systému. Následující postup popisuje výpočet tepelné kapacity zásobníku C_3 . Je známo, že měrná tepelná kapacita vody je $c = 4180 \text{ Ws/kgK}$, hustota vody je $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ a objem vody v zásobníku je $V = 12 \text{ dm}^3$. Pak výpočet celkové tepelné kapacity vody v zásobníku je dán vztahem:

$$C_3 = \rho \cdot c \cdot V_{z2} = 998 \cdot 4180 \cdot 0,012 = 50059,68 \cong 50060 \text{ Ws / K} \quad (37)$$

Stejný vztah platí i pro výpočet všech zbývajících tepelných kapacit, které jsou uvedeny v (tab. 7). Jejich výpočet vychází z následujících veličin. Měrná tepelná kapacita hmoty kolektoru (hliníku) $c_z = 896 \text{ Ws/kgK}$, hustota hliníku $\rho_z = 2700 \text{ kg/m}^3$ a objem hmoty kolektoru se odhaduje na $V_{hk} = 1 \text{ dm}^3$. Objem kapaliny v kolektoru se odhaduje na $V_k = 0,5 \text{ dm}^3$, objem kapaliny v potrubí v zásobníku je odhadován na $V_{z1} = 1,7 \text{ dm}^3$ a jelikož je jako kapalina ve všech místech solárního systému použita voda, tak měrné tepelné kapacity a hustoty jsou všude stejné.

C_z -Tepelná kapacita kolektoru [Ws/K]	C_2 -Tepelná kapacita vody v kolektoru [Ws/K]	C_1 -Tepelná kapacita vody v potrubí zásobníku [Ws/K]	C_3 -Tepelná kapacita vody zásobníku [Ws/K]
2419	2085	7091	50060

Tabulka 7: Hodnoty tepelných kapacit

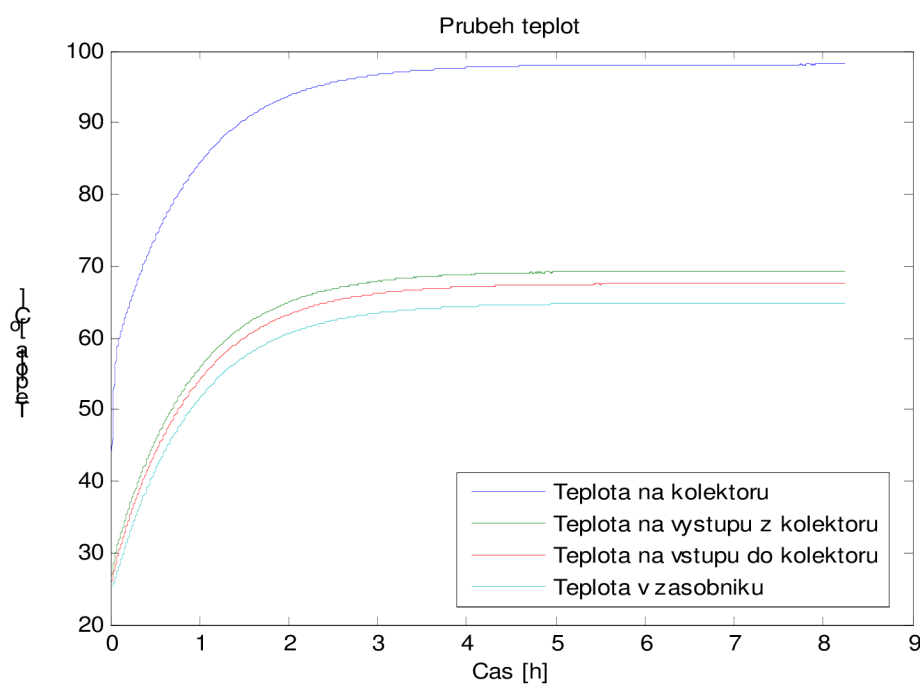
Jak již bylo uvedeno výše, tak identifikace parametrů se prováděla za účelem ověření správnosti výpočtového modelu v SIMULINKU. Tedy v návaznosti na kapitolu 5, se identifikované parametry dosadí do výpočtového modelu a provede se simulace výpočtu teplot. Jako identifikované parametry byly použity hodnoty tepelných vodivostí, tepelných kapacit a tepelného toku zjištěné z měření číslo sedm.

Porovnání ustálených tepelných stavů výpočtového modelu a experimentálního modelu je uvedeno v (tab. 8):

	ϑ_z -Teplota na kolektoru [°C]	ϑ_2 -Teplota na výstupu kolektoru [°C]	ϑ_1 -Teplota na vstupu kolektoru [°C]	ϑ_3 -Teplota v zásobníku [°C]
experimentální model	98,14	69,27	67,59	64,84
výpočtový model	98,14	69,27	67,58	64,83

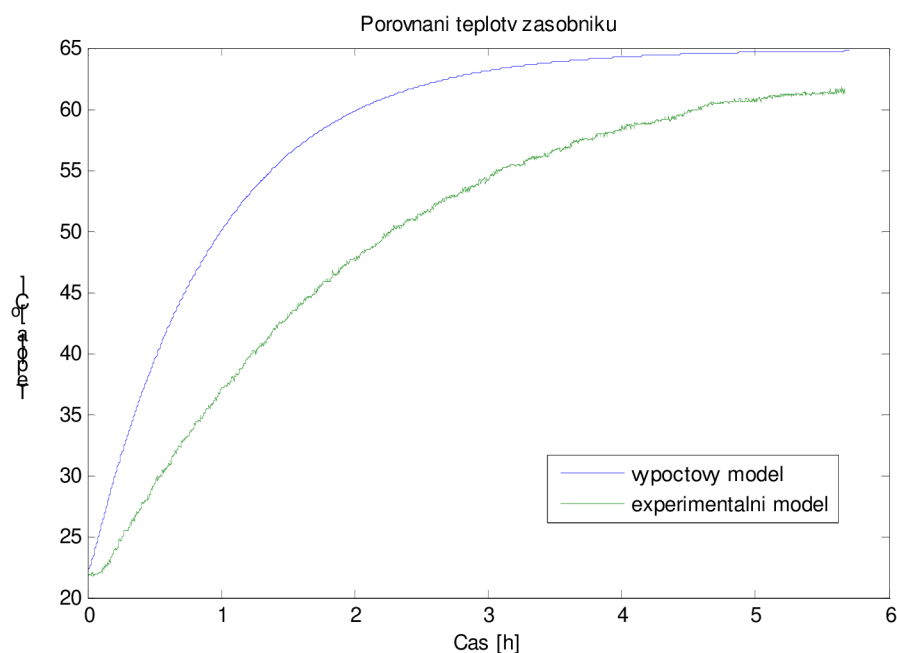
Tabulka 8: Porovnání ustálených tepelných stavů

Průběh jednotlivých teplot v závislosti na čase ve výpočtovém modelu je znázorněn na (obr. 27).



Obr. 27: Průběh teplot ve výpočtovém modelu

Na (obr. 28) je zobrazeno porovnání průběhu teplot v zásobníku naměřených na experimentálním modelu a vypočtených výpočtovým modelem.



Obr.: 28 Porovnání teplot v zásobníku pro experimentální a výpočtový model

Na základě srovnání ustálených tepelných stavů jsou patrné jen velmi malé odchylky (0,01 °C), to může být způsobeno zaokrouhlováním identifikovaných parametrů, popřípadě nepřesným odhadnutím velikostí objemů jednotlivých částí solárního systému. Z průběhu teplot v zásobníku je zřejmé, že u výpočtového modelu dojde k rychlejšímu náběhu na ustálenou teplotu. Příčinou tohoto rozdílu je, že ve výpočtovém modelu nejsou zahrnuty ztráty ze spojovacího potrubí do okolí, jako je tomu u experimentálního modelu a také, že výpočtový model má konstantní tepelné kapacity (ty jsou ve skutečnosti závislé na teplotě).

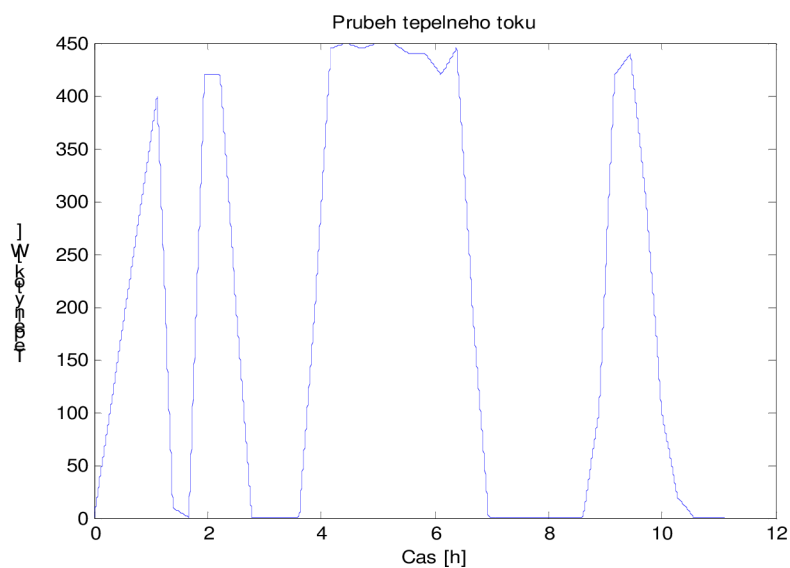
9 REGULACE SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

Jedním z hlavních důvodů proč se zavádí regulace solárního systému je, že sluneční energie je proměnlivá v závislosti na ročním období a hlavně na počasí. Dalším z mnoha důvodů je bezpečnost, v tomto případě může teplotnosná kapalina v extrémních případech dosáhnout tak vysokých (popřípadě nízkých) teplot, že by mohlo dojít k ohrožení celého zařízení. Mimo jiné se regulace zavádí také z důvodu proměnlivé spotřeby TUV. Celkově lze tedy říci, že regulace solárního systému zajišťuje hospodárny provoz, zabraňuje jeho přehřívání a zlepšuje účinnost systému.

9.1 Typy regulací

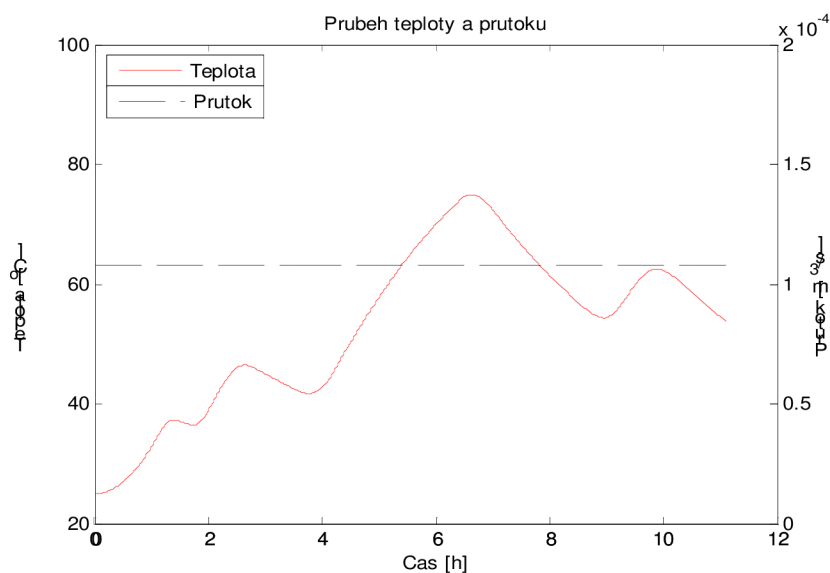
Regulovat solární systém lze mnoha způsoby, ale nejčastějšími přístupy jsou regulace systému na základě snímaných teplot a regulace podle intenzity slunečního záření. V této práci je uvedeno několik typů, jejich součástí jsou i grafy, pro lepší pochopení funkce dané regulace. Za účelem posouzení jednotlivých druhů regulací se definoval stejný průběh tepelného toku, viz. (obr. 29). Při návrhu průběhu tepelného toku se uvažoval běžný letní den s téměř jasnou oblohou, až na čtyři případy kdy bylo simulováno zastínění mrakem (viz. obr. 29 – 1,5h, 3h, 7h a 10h). V návaznosti na první kapitolu, lze říct, že průměrný tepelný tok dopadající na zemský povrch, za ideálních podmínek, se pohybuje okolo 650-700 W. Od tohoto toku je zapotřebí odečíst ztráty při odrazu na krycím skle, ztráty vznikající v důsledku zaprášenosti povrchu kolektoru, ztráty tepelného toku, které vycházejí ze zadní strany kolektoru atd., proto se odhaduje snížení původního tepelného toku na hodnotu okolo 450-500W. Výsledný průběh odhadovaného tepelného toku je znázorněn na (obr. 29).

Srovnávacím parametrem je výsledná teplota v zásobníku na konci simulace a čas za který bylo dosaženo teploty 60 °C. Simulace jednotlivých regulací se prováděla v prostředí MATLAB Simulink.



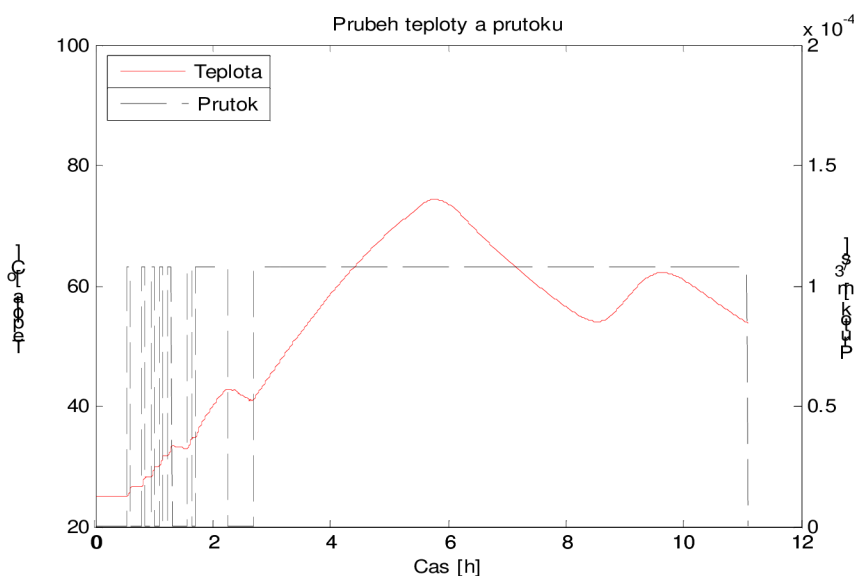
Obr. 29: Průběh tepelného toku v závislosti na čase

- I. **Solární systém bez regulace** – tento bod je zde uveden, aby bylo zřejmé jaký je průběh teploty v zásobníku solárního systému bez regulace. Průtok teplotné kapaliny solárním systémem je v tomto případě nastaven na konstantní hodnotu $Q = 0,108$ l/s. Výsledná teplota v zásobníku na konci měření měla hodnotu $53,82$ °C a teplota dosáhla 60 °C v čase 18 568 s.



Obr. 30: Průběh teploty a průtoku v systému bez regulace

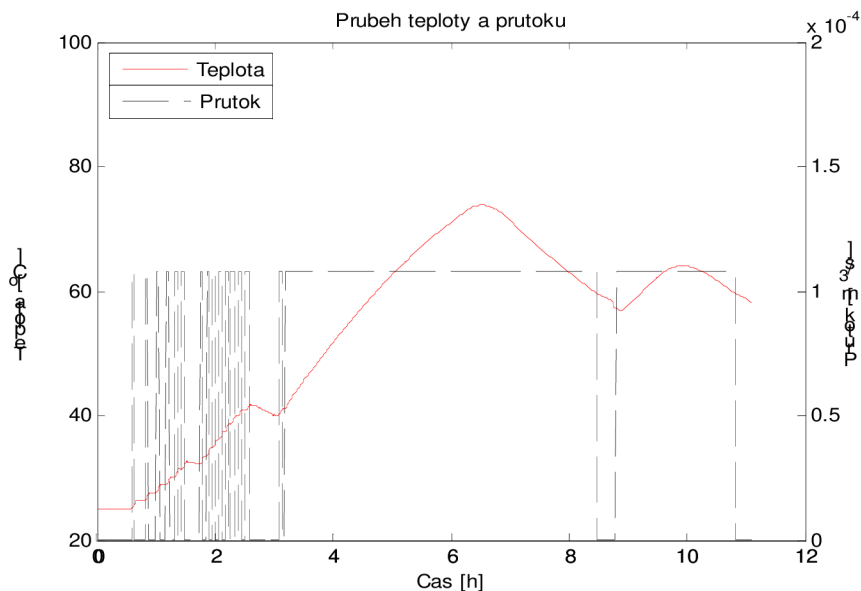
- II. On/off regulace na základě teploty na kolektoru s hysterezí 10 °C** – rozhodujícím faktorem této regulace byla teplota na kolektoru, podle jejíž velikosti docházelo ke spínání, popřípadě vypínání oběhového čerpadla, tedy průtok byl buď 0 anebo 0,108 l/s. Teplota sloužící pro spuštění byla stanovena na hodnotu 60 °C a jelikož hystereze měla být 10 °C, tak teplota, při které došlo k vypnutí oběhu měla hodnotu 50 °C. V případě zvýšení těchto teplot v určitých mezích by došlo ke zvýšení výsledné teploty v zásobníku. Nicméně neuváženě vysoce nastavené hodnoty těchto teplot by mohly způsobit, že např. v zimním období, kdy na zásobníku budou měřitelné pouze nízké teploty, které jsou však dostačující pro ohřev vody, by nedocházelo ke spuštění oběhu. Výsledná teplota v zásobníku na konci měření měla hodnotu 53,81 °C a 60 °C dosáhne v čase 18 796 s.



Obr: 31: Průběh teploty a průtoku v systému s on/off regulací podle T_z s hysterezí 10 °C

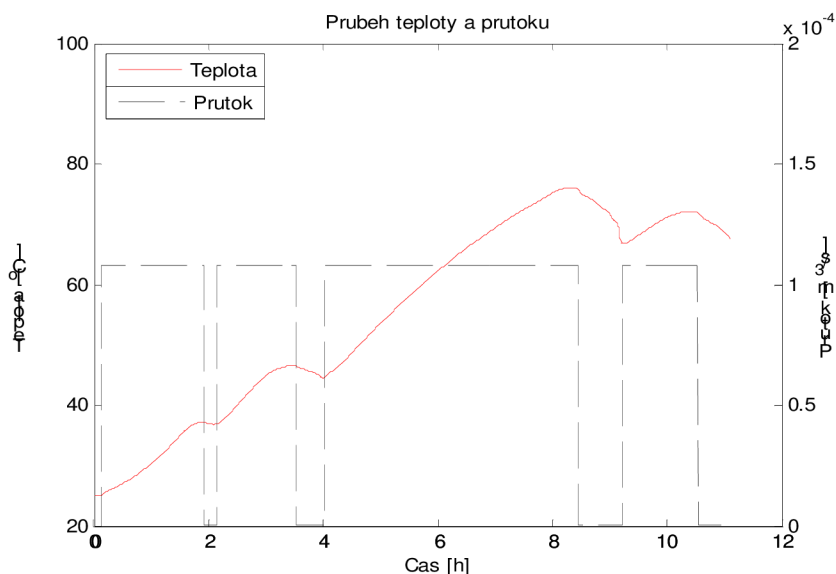
- III. On/off regulace na základě teploty na kolektoru s hysterezí 5 °C** – princip regulace je stejný jako v předchozím případě, dochází zde pouze ke změně hystereze, která je v tomto případě 5 °C. S tím souvisí i teplota

vypnutí oběhu, ta má nyní hodnotu 55 °C. Výsledná teplota v zásobníku má hodnotu 58,15 °C a teploty 60 °C dosáhne za čas 18 982 s.



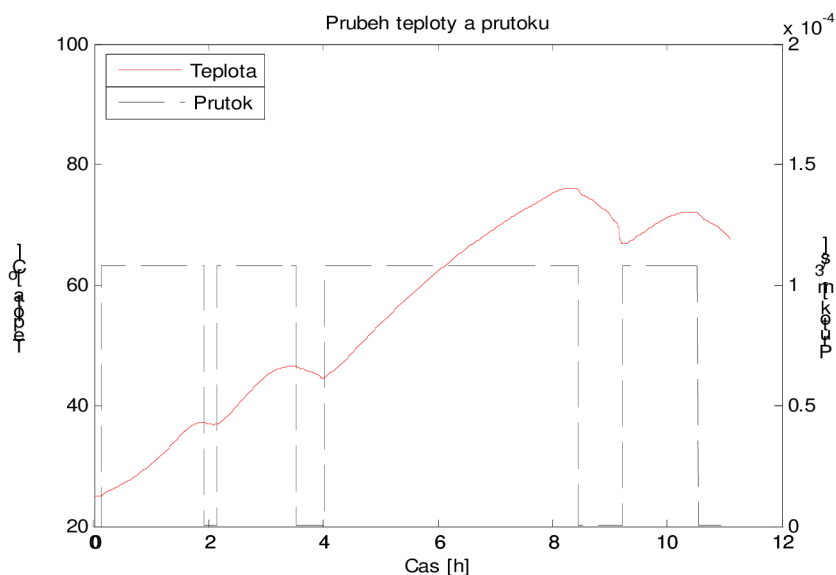
Obr. 32: Průběh teploty a průtoku v systému s on/off regulací podle T_z s hysterezí 5 °C

- IV. On/off regulace na základě rozdílu teplot na kolektoru a v zásobníku s hysterezí 10 °C** – v tomto případě je rozhodujícím hlediskem pro spuštění oběhu rozdíl teplot $T_z - T_3$, který musí být větší než 10 °C, a v případě vypnutí je tento rozdíl 0 °C. Ve srovnání s předchozím typem on/off regulace zde odpadá problém s optimálním nastavením rozhodující úrovně teploty na kolektoru, protože tato regulace není závislá na teplotě, ale na rozdílu dvou sledovaných teplot. Tímto řešením dochází k zamezení ztrát, které by v bodě II a III eventuálně mohly vznikat. Výsledná teplota v zásobníku byla 67,56 °C a teplota dosáhne 60 °C za 18 133 s.



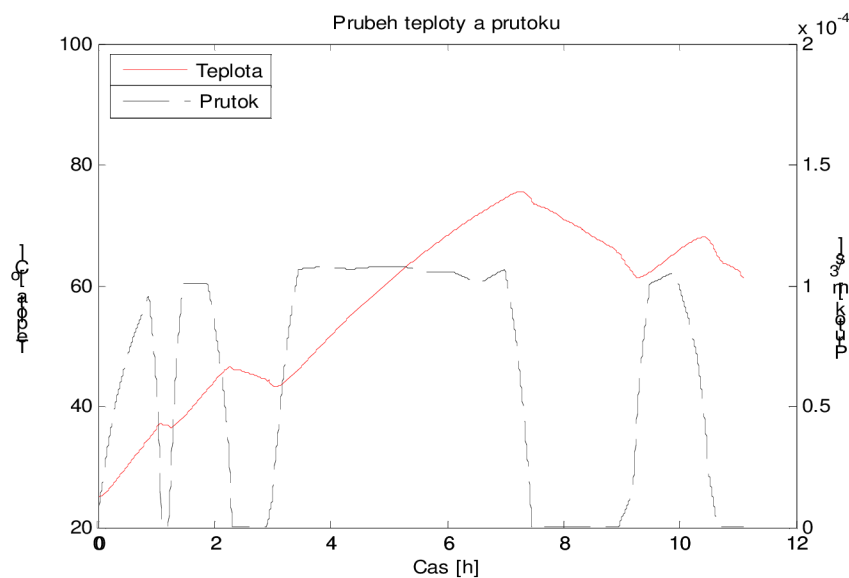
Obr. 33: Průběh teploty a průtoku s on/off regulací na základě rozdílu teplot s hysterezí 10 °C

- V. **On/off regulace na základě rozdílu teplot na kolektoru a v zásobníku s hysterezí 5 °C** – tento způsob regulace je podobný jako IV, s tím rozdílem, že ke spuštění oběhu dochází již při $T_Z - T_3 > 5 \text{ °C}$. Vypnutí nastává opět v případě nulového rozdílu teplot. Výsledná teplota v zásobníku má hodnotu 67,77 °C a 60 °C dosáhne v čase 18 131 s.



Obr.: 34: Průběh teploty a průtoku s on/off regulací na základě rozdílu teplot s hysterezí 5 °C

VI. Plynulá regulace vyplývající z lineární závislosti mezi průtokem Q a tepelným tokem Φ_{S2} – při návrhu této regulace bylo nutné nalézt konstantu, podle které by docházelo k regulaci průtoku na základě velikosti tepelného toku. Postupovalo se tak, že největšímu tepelnému toku ze zdroje odpovídal největší průtok solárním systémem, a z této závislosti byla odvozena hledaná konstanta $k = Q / \phi_{S2}$. Výsledná teplota v zásobníku dosáhla hodnoty 61,28 °C a teplota dosáhne 60 °C za dobu 18 283 s.

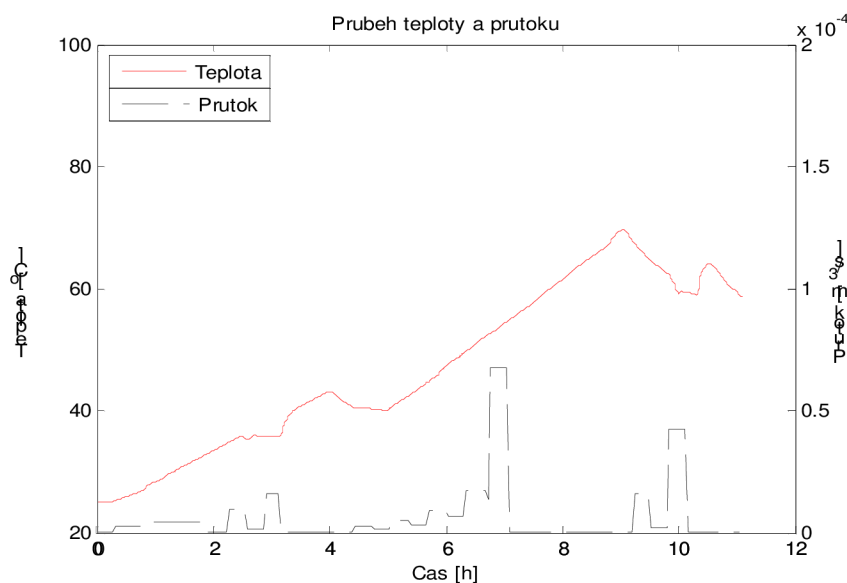


Obr. 35: Průběh teploty a průtoku pro plynulou regulaci podle velikosti tepelného toku

VII. Plynulá regulace průtoku vycházející z tepelné bilance mezi teplotou na vstupu do kolektoru, teplotou na výstupu z kolektoru a tepelným tokem – tepelná bilance vychází ze vztahu $Q = \frac{\phi_{S2} - \alpha \cdot S(T_Z - T_u)}{\rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1)}$. U

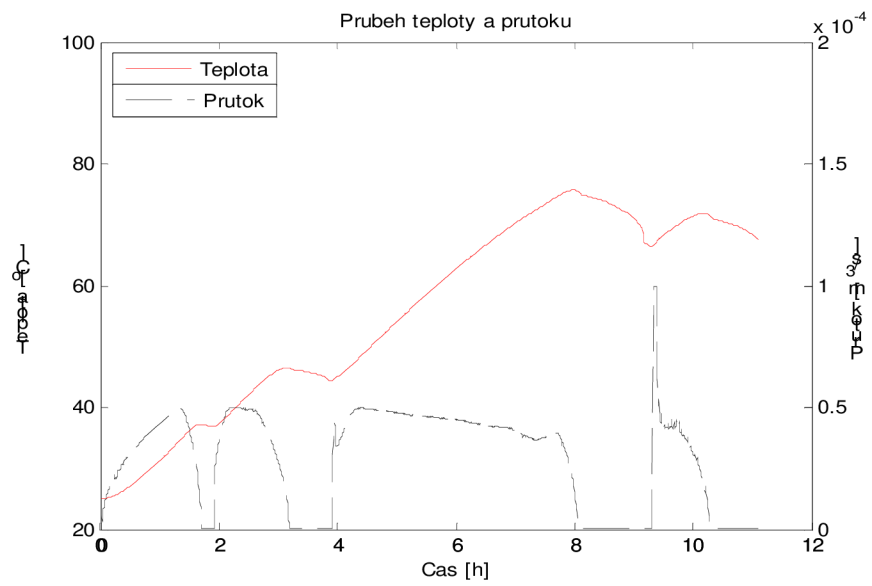
tohoto způsobu regulace nastával problém, který byl způsoben setrvačností mezi změnou velikosti tepelného toku a rozdílu teplot. Tento problém způsoboval nárůst průtoku do nekonečně vysokých hodnot, protože v případě zvýšení tepelného toku (rozdíl teplot z důvodu setrvačnosti zůstal pořád stejný) došlo ke zvýšení průtoku, který způsobil zmenšení rozdílu

teplot, čímž došlo opět k jeho zvýšení a tak to pokračovalo až do nekonečna. Z tohoto důvodu bylo zavedeno zpoždění podle tzv. vzorkovací periody, které daný problém vyřešilo. Jedná se tedy o skokovou změnu velikosti průtoku, viz (obr. 36). Výsledná teplota v zásobníku dosáhla teploty 58,77 °C a 60 °C bylo dosaženo za 20 553 s.



Obr. 36: Průběh teploty a průtoku pro skokovou regulaci

VIII. Plynulá regulace průtoku podle rozdílu teplot na výstupu kolektoru a v zásobníku – postup při návrhu této regulace byl takový, že se vypočítala konstanta určující poměr mezi průtokem a rozdílem teplot na výstupu kolektoru a v zásobníku. Musela se zde ještě navíc zavést podmínka, která v případě záporného rozdílu teplot zabraňovala obrácenému průtoku, a také podmínka stanovující maximální možný průtok. Výsledná teplota v zásobníku dosáhla hodnoty 67,8 °C a 60 °C bylo dosaženo v čase 18 125 s.



Obr. 37: Průběh teploty a průtoku pro plynulou regulaci podle rozdílu teplot

10 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

V této kapitole je pojednáno o výsledcích naměřených hodnot, o identifikaci parametrů výpočtového modelu a také je zde uvedeno srovnání algoritmů řízení průtoku teplotnosné kapaliny solárním systémem.

Je nutno připomenout, že všechna měření byla provedena na zmenšeném modelu solárního systému (viz. kapitola 6), a také, že všechna měření byla prováděna v laboratoři, tedy byla zde téměř konstantní teplota okolí, nedocházelo zde k odvětrávání a působení jiných vlivů vnějšího okolí. Porovnáním vlivu velikosti tepelného toku a průtoku na jednotlivé teploty v solární soustavě, je patrné, že se zvětšujícím se průtokem bude rozdíl mezi teplotami na výstupu z kolektoru (vstup do zásobníku) a na vstupu do kolektoru (výstup ze zásobníku) klesat a naopak, to je dáno tím, že teplotnosná kapalina proteče potrubím v zásobníku rychleji, tedy předá menší množství tepla TUV v zásobníku, a také v kolektoru dojde k menšímu oteplení teplotnosné kapaliny. Toto vyplývá pouze z měření sedm až devět. Co se týče měření jedna až šest, tak množství průtoku vůči velikosti tepelného toku bylo natolik velké, že rozdíl mezi teplotami na výstupu a vstupu do kolektoru se pohyboval v desetinách až setinách °C. Jelikož tak malé rozdíly teplot nešly změřit pomocí daného měřícího zařízení, nelze tato měření považovat za věrohodná, naopak za nejméně věrohodnější měření lze pokládat měření sedm, kdy průtok byl nejmenší a velikost tepelného toku byla největší, tudíž i rozdíl teplot byl největší. Proto při návrhu regulace se vycházelo z parametrů výpočtového modelu, které byly určeny na základě měření sedm.

Aby bylo možno porovnat výpočtový model s reálnou soustavou, musela se provést identifikace parametrů výpočtového modelu. Tyto parametry pak posloužily jako vstupní data pro výpočtový model a na základě srovnání ustálených tepelných stavů v soustavě a v modelu, a také průběhů teplot, lze říct, že výpočtový model byl sestaven správně (viz. kapitola 8).

Z důvodu porovnání jednotlivých typů řízení průtoku, byla stanovena srovnávací kritéria.

- a) Teplota v zásobníku na konci simulace

b) Čas za který dosáhne teplota v zásobníku hodnoty 60 °C

Také byl navržen stejný průběh tepelného toku pro všechny simulace.

V případě prvního typu on/off regulace s hysterezí 10 °C (zakládá se na velikosti teploty na kolektoru) je patrné, že ve srovnání se systémem bez regulace bylo dosaženo téměř stejné teploty na konci simulace, ale čas, za který bylo dosaženo 60 °C byl delší přibližně o 4 minuty. Řízení s hysterezí 5 °C vychází lépe než řízení s hysterezí 10 °C co se týče konečné teploty, ta je totiž o 4,3 °C vyšší, ale porovnávaný čas je o 3 minuty delší.

U druhé on/off regulace (využívá rozdíl teplot na kolektoru a v zásobníku) je výsledná teplota vyšší o téměř 14 °C a čas je o zhruba 7 minut kratší. Řízení s hysterezí 5 °C je ve všech ohledech lepší než řízení s hysterezí 10 °C, čas při kterém je dosaženo 60 °C v zásobníku je totiž o 2 s kratší a výsledná teplota na konci simulace je vyšší o 0,21 °C.

Plynulá regulace vyplývající z lineární závislosti mezi průtokem a tepelným tokem, dosahuje teploty na konci simulace o 7,46 °C vyšší než u systému bez regulace a doba, za kterou je dosaženo požadované teploty je o téměř 5 minut kratší.

Plynulá regulace průtoku vycházející z tepelné bilance mezi teplotou na vstupu do kolektoru, teplotou na výstupu z kolektoru a tepelným tokem má teplotu na konci simulace o takřka 5 °C vyšší, ale porovnávaný čas je o zhruba 30 minut delší.

Poslední typ plynulé regulace vyšel ze všech nejlépe. Ve srovnání se systémem bez regulace totiž dosáhl konečné teploty 67,8 °C a srovnávaný čas byl o více jak 7 minut kratší.

V (tab. 9) je znázorněno srovnání dosažených výsledků všech typů regulací

Pořadí	typ regulace	teplota na konci [°C]	Čas při 60 °C [s]
I	bez regulace	53,82	18 568
II	on/off 10	53,81	18 796
III	on/off 5	58,15	18 982
IV	2 on/off 10	67,56	18 133
V	2 on/off 5	67,77	18 131
VI	tepelný tok	61,28	18 283
VII	tep. bilance	58,77	20 533
VIII	rozdíl teplot	67,8	18 125

Tabulka 9: Porovnání jednotlivých typů regulací

11 ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů této práce bylo vytvoření výpočtového modelu solárního systému pro neustálený tepelný stav. Při jeho sestavování se vycházelo z teorie pro výměník tepla. Výsledný výpočtový model byl vytvořen v prostředí MATLAB SIMULINK, toto prostředí má výhodu v možnosti provádění dalších simulací na tomto modelu.

Aby bylo možno získat reálné parametry výpočtového modelu, bylo nutno sestavit zmenšený model solárního systému. Při jeho konstrukci byl kladen důraz na to, aby se co nejvíce podobal skutečným solárním systémům a zároveň byla snaha o co nejnižší cenu tohoto modelu. Na modelu solárního systému se provedlo celkem devět měření. Teploty se měřily pomocí termočlánků v různých částech solárního systému. Ze všech měření lze za věrohodné považovat pouze měření sedm až devět, protože u ostatních byl průtok natolik velký vůči tepelnému toku, že rozdíl v teplotě na výstupu z kolektoru a na vstupu do kolektoru nebyl téměř patrný.

Identifikace parametrů výpočtového modelu byla provedena na základě naměřených teplot. Aby bylo možno provést srovnání výpočtového modelu se solárním systémem, nadefinovaly se tyto parametry do výpočtového modelu a po skončení simulace se porovnal ustálené teplotní stavy a také průběhy nárůstu teplot v zásobníku. Na základě srovnání lze říct, že výpočtový model je použitelný pro simulace řízení průtoku solárním systémem.

Dalším z úkolů této práce byl návrh regulace průtoku teplotnosné kapaliny solárním systémem. Je důležité připomenout, že pro jednotlivé typy regulací byl definován stejný průběh tepelného toku. Jeho změna by měla podstatný vliv i na dosažené výsledky, a proto následující zhodnocení je zapotřebí brát s jistou rezervou. Z jednotlivých simulací se jako nejlepší typy regulace jeví on/off regulace s hysterezí 5 °C, která pracuje na základě rozdílu teplot na kolektoru a v zásobníku, a plynulá regulace pracující podle rozdílu teplot na výstupu z kolektoru a v zásobníku. Naopak nejhůř, co se týče porovnávaného času, vychází plynulá regulace průtoku vycházející z tepelné bilance mezi teplotou na vstupu do kolektoru, teplotou na výstupu z kolektoru a tepelným tokem. To je zřejmě způsobeno maximální hodnotou průtoku, protože ve srovnání se všemi ostatními typy řízení, kde byl maximální průtok

definován, tak v tomto případě se určuje z tepelné bilance a proto vychází menší. První typ on/off regulace s hysterezí 10 °C (pracuje na základě velikosti teploty na kolektoru), vyšel jako jediný v porovnání obou parametrů hůř než systém bez regulace. To je způsobeno zbytečnou časovou prodlevou, v důsledku čekání na požadovanou teplotu na kolektoru. Proto se tento typ regulace projevuje jako poměrně pomalý, co se týče porovnávaného času, ale v případě změny průběhu tepelného toku se domnívám, že by toto nemuselo platit. Všeobecně však lze říci, že nevýhodou on/off regulace je vliv hystereze, a také zbytečné ochlazování TUV, protože nelze vhodně zvolit ideální hodnotu teploty, signalizující spuštění popřípadě vypnutí oběhového čerpadla (toto částečně řeší druhá on/off regulace, která pracuje na základě rozdílu dvou teplot, není tedy nutné volit mezní hodnotu teploty). U plynulé regulace, fungující na základě velikosti tepelného toku, je nežádoucí okamžité spuštění oběhového čerpadla bez ohledu na velikost teploty na kolektoru. Vlivem setrvačnosti není teplota na kolektoru přímo úměrná tepelnému toku, proto v některých případech může být oběhové čerpadlo spuštěno i v případě kdy je teplota na kolektoru menší než v zásobníku, to může způsobovat zbytečné ochlazování TUV v zásobníku. Plynulá regulace průtoku vyplývající z tepelné bilance mezi teplotou na vstupu a výstupu z kolektoru a tepelným tokem se jeví jako nejsložitější co se týče návrhu, protože je zde nutno eliminovat vliv setrvačnosti při zahřívání popř. ochlazování, jak bylo zmíněno v kapitole 9.

Navázat na tuto práci lze v několika oblastech. Jako první bych doporučil provést měření na modelu solárního systému s ještě menším průtokem, než byl dosavadní, z důvodu dosažení přesnějších výsledků. Dále bych doporučil rozšířit výpočtový model o tepelné ztráty ze spojovacího potrubí do okolí. A v neposlední řadě by se dala regulace rozšířit o další možné metody.

Literatura

- [1] Ďaďo, S., Kreidl, M. : Senzory a měřící obvody. Praha Česká republika 1999, vydavatelství ČVUT
- [2] OMEGA: <http://www.omegaeng.cz>
- [3] Modrlák, O. : Fuzzy řízení a regulace. Liberec 2004
- [4] Noskievič P. : Modelování a identifikace systémů. Ostrava 1999
- [5] Idelchik I.E. : Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, 1994, ISBN.: 1-56700-074-6
- [6] Vlach, R. : Termomechanika v mechatronických systémech
- [7] Dufka, J. : Vytápění netradičními zdroji tepla. Praha Česká republika 2003. ISBN.: 80-7300-079-2
- [8] Vlach, R. : Chlazení elektrických strojů. Brno 2004. ISBN.: 80-214-2848-1
- [9] MAXIM: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS60.pdf>
- [10] Dufka, J. : Vytápění netradičními zdroji tepla. Praha Česká republika 2003. ISBN.: 80-7300-079-2
- [11] Regulus: <http://www.regulus.cz>

Seznam použitých znaků a symbolů

λ	- měrná tepelná vodivost [W/mK]
δ	- tloušťka stěny [m]
k_s	- součinitel prostupu tepla [W/m ² K]
α	- součinitel přestupu tepla [W/m ² K]
a	- tepelná vodivost [W/K]
C	- tepelná kapacita [Ws/K]
Q	- průtok, proud chladiva [m ³ /s]
c	- měrná tepelná kapacita [Ws/m ³ K]
ΔT_v	- rozdíl koncového a počátečního oteplení chladiva [K]
T_{vk}	- koncové oteplení chladiva [K]
T_{vz}	- počáteční oteplení chladiva [K]
$T_{vstř}$	- střední oteplení chladiva [K]
r_Q	- tepelný odpor proudu chladiva [K/W]
a_Q	- tepelná vodivost proudu chladiva [W/K]
T_n	- střední oteplení chlazené části [K]
T_{vn}	- střední oteplení chladiva [K]
r_n	- tepelný odpor přestupu tepla do chladiva [K/W]
a_n	- tepelná vodivost přestupu tepla do chladiva [W/K]
T_{v0}	- počáteční (vstupní) oteplení chladiva [K]
Φ_i	- tepelné toky z objektu [W] $i = 1, 2, 3 \dots$
Φ_j	- vlastní ztráty [W] $j = a, b, c \dots$
T_{nk}	- koncové oteplení n-tého úseku [K]
T_{n-i}, T_{Si}	- střední oteplení jednotlivých úseků [K]
Φ_{S2}	- tepelný tok ze zdroje [W]
T_Z	- teplota kolektoru [K]
V_{HK}	- objem absorpční hmoty kolektoru [m ³]
Φ_{K2}	- tepelný tok z hmoty kolektoru do teplonosné kapaliny v kolektoru [W]
V_K	- objem teplonosné kapaliny v potrubí kolektoru [m ³]
T_1	- teplota na vstupu do kolektoru a zároveň jedná o teplotu na výstupu ze zásobníku [K]
T_2	- teplota na výstupu z kolektoru a zároveň teplota na vstupu do zásobníku [K]
Q	- průtok teplonosné kapaliny [m ³ /s]
Φ_1	- tepelný tok toku kapaliny o teplotě T_1 [W]

-
- Φ_2** – tepelný tok toku kapaliny o teplotě T_2 [W]
 V_{Z1} – objem teplotnosné kapaliny v potrubí v zásobníku [m^3]
 V_{Z2} – objem vody v zásobníku [m^3]
 T_3 – teplota vody v zásobníku [K]
 T_u – teplota okolí [K]
 Φ_u – tepelný tok ze zásobníku do okolí [W]
 ρ – hustota selektivní hmoty kolektoru [kg/m^3]
 a_1 - tepelná vodivost ve stěně kolektoru [W/K]
 a_2 - tepelná vodivost trubky v zásobníku [W/K]
 a_u - tepelná vodivost stěny zásobníku [W/K]
 v - teplota [$^{\circ}C$]
 v_p - počáteční teplota [$^{\circ}C$]
 τ - časová konstanta [s]
 ϵ - emisivita povrchu
 σ - Stefan-Boltzmannova konstanta [W/m^2K^4]
 C_k - součinitel konvekce
 α_k - součinitel přestupu tepla pro konvekci [W/m^2K]
TUV - teplá užitková voda
atd. - a tak dále
obr. - obrázek
tab. - tabulka
pozn. - poznámka
kap. - kapitola
FIS - inferenční systém fuzzy

Seznam příloh

Příloha 1 – M-file sloužící pro vykreslení grafu závislosti teplot na čase

Příloha 2 – Grafy naměřených teplot všech měření v závislosti na čase

Příloha 3 – Tabulka vypočteného tepelného toku

Příloha 4 – Tabulka tepelných vodivostí

Příloha 5 – M-file vstupních dat výpočtového modelu solárního systému

Přílohy uvedené na CD:

- Elektronická verze diplomové (Diplomova_prace_Popov.pdf)

- Adresář Výpočtový model

Příloha 1 – soubor identifikovane_parametry

Příloha 2 – soubor vypoctovy_model

- Adresář Regulace

Příloha 1 – soubor regulace_data

Příloha 2 – soubor RegulaceWorkspace

Příloha 3 – soubor system_bez_regulace

Příloha 4 – soubor regulace_smycka_10_rozdil_teplo

Příloha 5 – soubor regulace_smycka_10_teplo_kolektoru

Příloha 6 – soubor regulace_prutoku_tep_tokem

Příloha 7 – soubor regulace_prutoku_tep_bilance

Příloha 8 – soubor regulace_plynula_rozdil_tep

- Adresář Data – obsahuje data všech měření

Příloha 1

M-file sloužící pro vykreslení teplot:

```
s1 = smooth(teploty7,50,'rlowess'); %proloženi dat
C4=reshape(s1,2044,5);           %prekresleni
%tvorba grafu
figure1 = figure('PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...
'PaperSize',[20.98 29.68],'PaperType','a4letter');
axes1 = axes('Parent',figure1);
axis(axes1,[0 7 0 105]);
title(axes1,'Prubehy teplot v solarni soustave - mereni 7');
xlabel(axes1,'Cas [h]');
ylabel(axes1,'Teplota [°C]');
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
%vykresleni teplot v zavislosti na case
plot1=plot(cas7,C4),grid on;
set(plot1(1),'LineWidth',2);
set(plot1(2),'LineWidth',2);
set(plot1(3),'LineWidth',2);
set(plot1(4),'LineWidth',2);
set(plot1(5),'LineWidth',2);
%legenda
legend1 = legend(axes1,{'teplota okoli',...
'teplota na vystupu kolektoru','teplota na vstupu kolektoru',...
'teplota na kolektoru','teplota v zasobniku'});
```

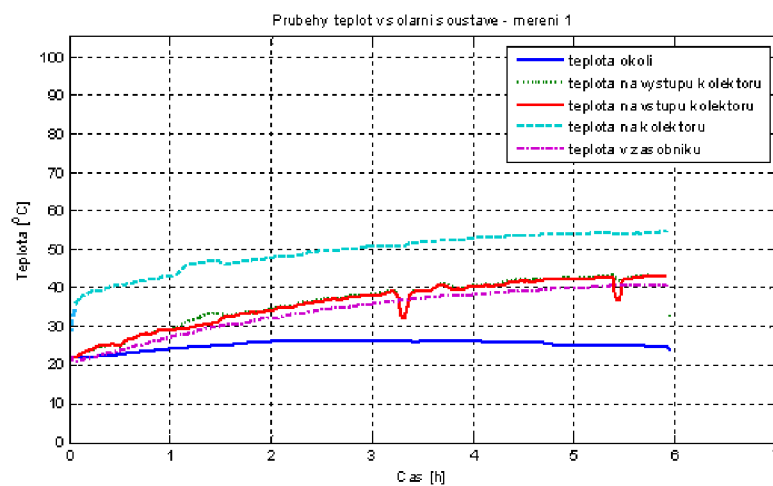
Příloha 2

Grafy naměřených teplot všech měření v závislosti na čase:

Měření číslo: 1

čerpadlo stupeň: I

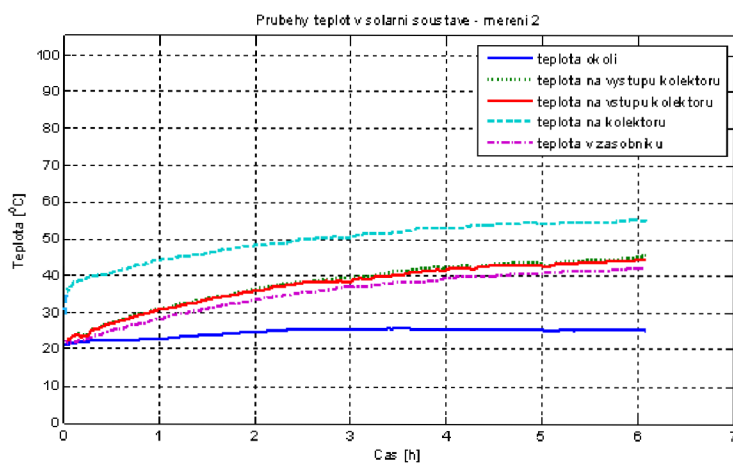
Záříč stupeň: I



Měření číslo: 2

čerpadlo stupeň: II

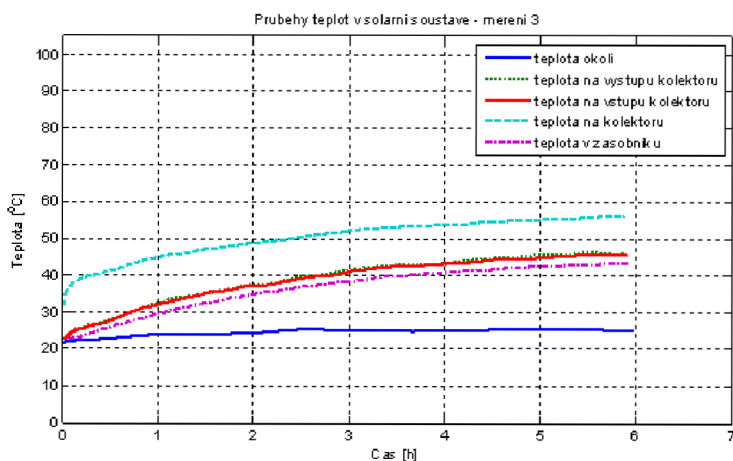
Záříč stupeň: I



Měření číslo: 3

čerpadlo stupeň: III

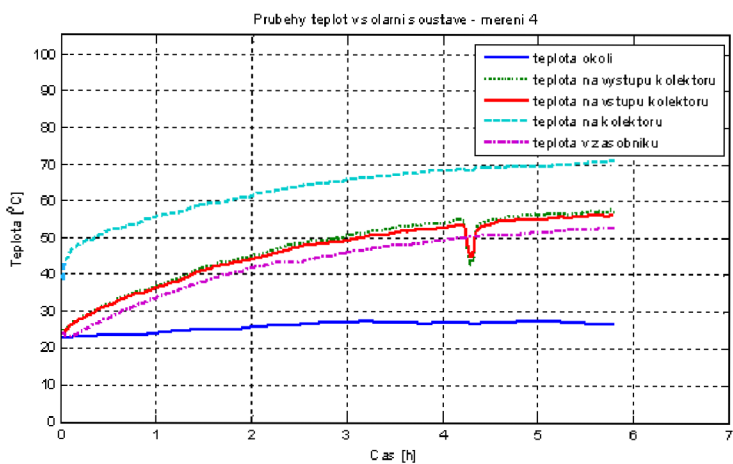
Záříč stupeň: I



Měření číslo: 4

čerpadlo stupeň: I

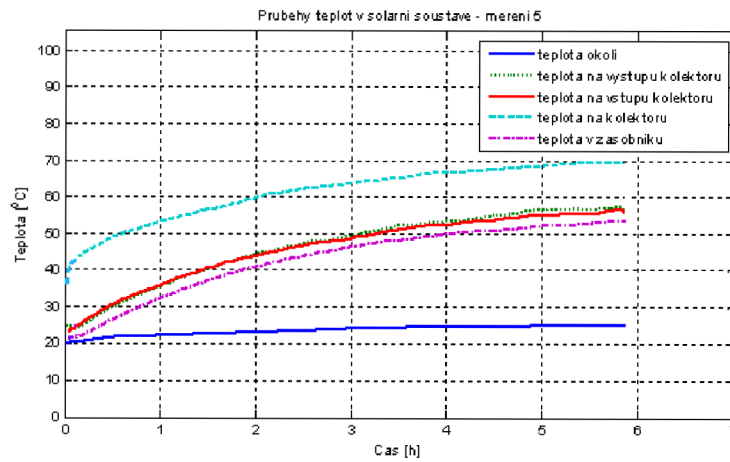
Záříč stupeň: II



Měření číslo: 5

čerpadlo stupeň: II

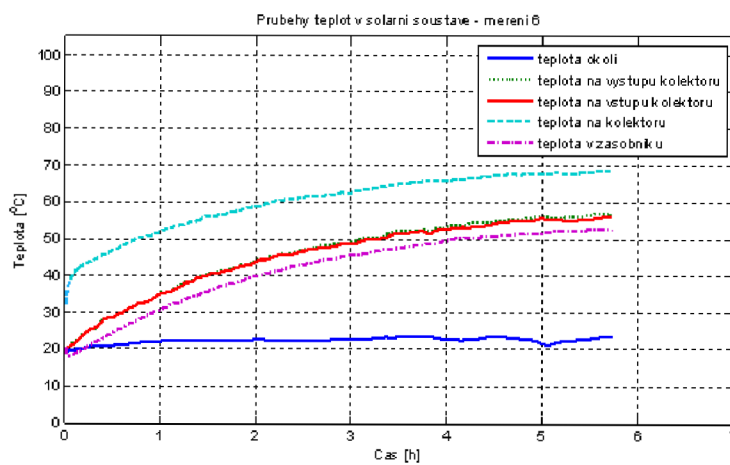
Záříč stupeň: II



Měření číslo: 6

čerpadlo stupeň: III

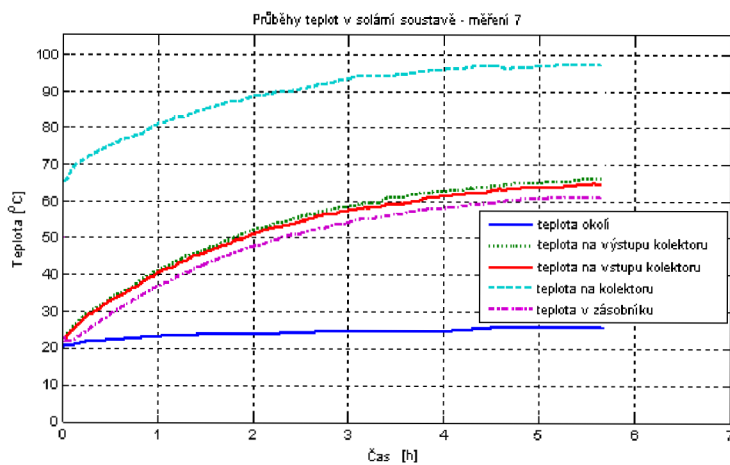
Záříč stupeň: II



Měření číslo: 7

čerpadlo stupeň: I

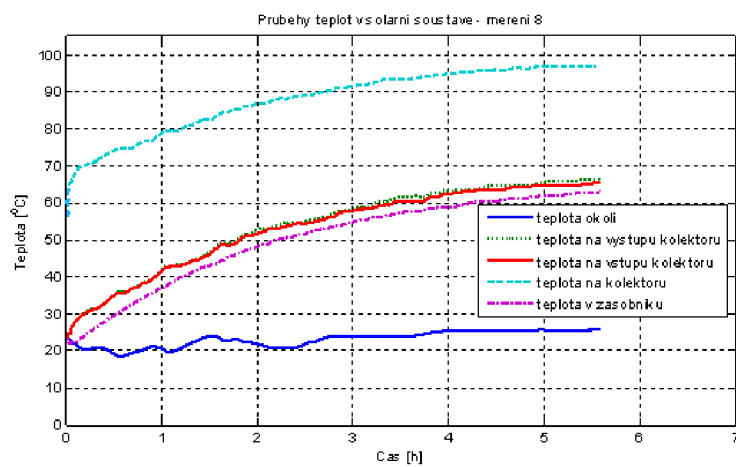
Záříč stupeň: III



Měření číslo: 8

čerpadlo stupeň: II

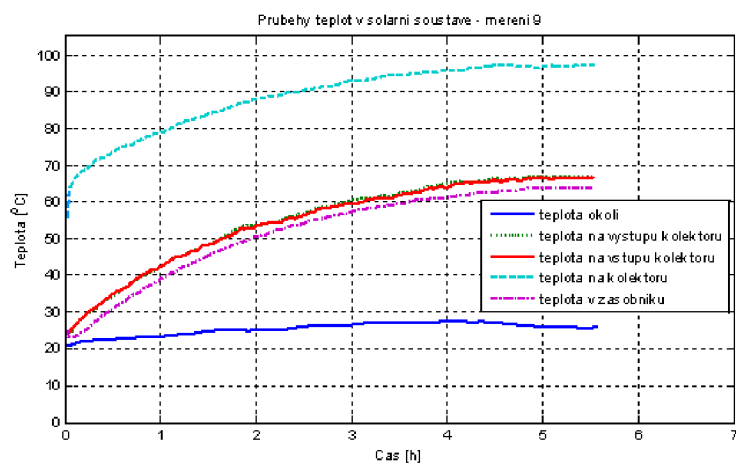
Záříč stupeň: III



Měření číslo: 9

čerpadlo stupeň: III

Záříč stupeň: III



Příloha 3

Tabulka vypočteného tepelného toku z naměřených hodnot:

Stupeň zářiče	Stupeň čerpadla	Číslo měření	Tepelný tok [W]
I	I	1	405,8
	II	2	583,2
	III	3	426,6
II	I	4	654,2
	II	5	1166,5
	III	6	948,5
III	I	7	1005,6
	II	8	804
	III	9	588,8

Příloha 4

Tabulka tepelných vodivostí:

Stupeň zářiče	Stupeň čerpadla	Číslo měření	a_1 -Tepelná vodivost ve stěně kolektoru [W/K]	a_Q -Tepelná vodivost proudu chladiva [W/K]	a_2 -Tepelná vodivost trubky v zásobníku [W/K]	a_U -Tepelná vodivost stěny zásobníku [W/K]
I	I	1	31,08	451,44	176,55	15,21
	II	2	46,31	606,1	482,11	24,58
	III	3	33,77	681,34	288,9	15,36
II	I	4	39,59	451,44	135,21	16,91
	II	5	93,34	606,1	309,13	32,21
	III	6	76,08	681,34	266,81	23,67
III	I	7	25,53	451,44	215,25	19,04
	II	8	18,62	606,1	164,42	13,22
	III	9	12,16	681,34	120,27	8,01

Příloha 5

M-file vstupních dat výpočtového modelu solárního systému

```

fis2=1005.6;      %[W]tepelný tok
a1=25.53;         %[W/K]tep. vodivost steny kolektoru
aq=451.44;       %[W/K]tep. vodivost proudu teplonosne kapaliny
a2=215.25;       %[W/K]tep. vodivost vymeniku v zasobniku
au=19.04;        %[W/K]tep. vodivost steny zasobniku
Q=0.000108;      %[m^3/s]prutok teplonosne kapaliny
Vhk=0.001;       %[m^3]objem hmoty kolektoru
roz=2700;        %[kg/m^3]hustota hliniku
cz=896;          %[Ws/kgK]merna tepelna kapacita hliniku
Vk=0.0005;       %[m^3]objem kapaliny v kolektoru
ro1=998;         %[kg/m^3]hustota vody
ro2=ro1;
ro3=ro1;
c1=4180;         %[Ws/kgK]merna tepelna kapacita vody
c2=c1;
c3=c1;
Vz1=0.0017;     %[m^3]objem kapaliny v trubce zasobniku
Vz2=0.012;      %[m^3]objem vody v zasobniku
Tu=25;          %[°C]teplota okolí
alfa=13;        %[W/m^K]celkovy soucinitel prestupu tepla
                (salani a konvekce)
S=0.26;         %[m^2]teplosmenna plocha kolektoru kolektoru
```