



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**

Diplomová práce

Optimalizace ohřevu teplé vody pomocí tepelného čerpadla dle venkovní teploty z energetického hlediska

Bc. Dušan Stěhule

Květen 2021

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stěhule** Jméno: **Dušan** Osobní číslo: **457225**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace ohřevu teplé vody pomocí tepelného čerpadla dle venkovní teploty z energetického hlediska

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of hot water heating using a heat pump according to the outdoor temperatures from an energy point of view

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se principem a matematickým popisem tepelného čerpadla a akumulární nádrže.
2. Pro stratifikovanou i promíchávanou akumulární nádrž vytvořte modelu přípravy teplé vody pomocí tepelného čerpadla.
3. Pro zadaný průběh teplot venkovního vzduchu a typické odběrové diagramy optimalizujte potřebu energie a provozní náklady na přípravu teplé vody
4. Uvažované systémy stručně ekonomicky zhodnotte.

Seznam doporučené literatury:

Tepelná čerpadla. TZB-info [online]. [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla>
DUFKA, Jaroslav. Ohrev vody, aneb příprava teplé vody, III. díl. TZB-info [online]. 20.8.2018 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/pripravateple-vody/17781-ohrev-vody-aneb-priprava-teple-vody-iii-dil>
Přehled distribučních sazeb. SKUPINA CEZ [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/vsechny-clanky/prehled-distribucnich-sazebelektriny-93426>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Jan Kyncl, katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **03.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

doc. Dr. Ing. Jan Kyncl
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

Poděkování / Prohlášení

Rád bych tímto velice poděkoval vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za cenné rady a vstřícný přátelský přístup při vypracovávání této práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za cenné rady ekonomického směru. V neposlední řadě patří velké poděkování i mé přítelkyni, přátelům a rodině za zázemí a podporu.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 19.5.2021

.....

Abstrakt / Abstract

V této diplomové práci je nejprve uvedený stručný přehled základních typů tepelných čerpadel, včetně jejich konstrukce a principu fungování. Kapitola o tepelných čerpadlech dále popisuje ukazatele, kterými lze vyjádřit jejich účinnost (COP a SCOP) a také vliv na životní prostředí (ODP a GWP).

Následující kapitola podává přehled o základním dělení přípravy teplé vody, přičemž u každého způsobu je i jeho stručný popis a diskuze výhod a nevýhod. Jsou zde představeny dva způsoby skladování teplé vody, a sice homogenní a stratifikační zásobník. V závěru rešeršní části je uveden přehled aktuálně platných distribučních tarifů elektřiny.

V praktické části jsou podrobně popsány vytvořené modely přípravy teplé vody pro homogenní i stratifikační zásobník, včetně čtyřech různých variant ohřevu. Tři z nich simulují běžné nastavení zásobníku, u čtvrté varianty je vyvinutý algoritmus pro nalezení časového intervalu, kdy je ohřev vody daný den nejefektivnější.

Poslední část práce má za úkol popsat a zhodnotit dosažené výsledky. Byly provedeny simulace, které pro každou variantu ohřevu, s využitím reálných parametrů konkrétního tepelného čerpadla a zásobníku, reálných venkovních teplot a dvou různých diagramů odběru, vyčíslily spotřebu elektrické energie za daný kalendářní rok. V rámci vstupních předpokladů jsou zde uvedeny přibližné investiční a servisní náklady pro zařízení k ohřevu a skladování teplé vody. Na základě těchto údajů jsou v práci pomocí ekonomického ukazatele NPV vypočteny celkové náklady a vyjádřena možná finanční úspora při použití optimalizované varianty ohřevu.

Klíčová slova: tepelné čerpadlo, stratifikační zásobník, homogenní zásobník, ohřev vody, optimalizace

The following thesis begins with a brief introduction to basic Heat pump types, including constructional specifications and functional principles. The chapter about Heat pumps further describes the economic indicators, with which it is possible to express their efficiency (COP and SCOP) and the effect they have on the environment (ODP and GWP).

The following chapter gives a look into the basic categorization of warm water preparation. Two ways of storing are introduced, homogeneous and stratificational units. To conclude the research part, there is an overview of current rate of electricity distribution.

The practical part gives a thorough description of models for warm water preparation for both homogeneous and stratificational units made, including four various ways of heating, where three simulate the usual unit settings, the fourth works using a developed algorithm for finding time slots, where the water heating is the most effective that day.

The last part aims at describing and judging given results. Simulations of each variation of heating with the use of actual parameters were done, and together with real outside temperature ratings and two different consumption diagrams concluded the consumption of electrical energy of that specific calendar year. Regarding the initial presumptions made, an approximate investment and maintenance cost was formulated. Building on that data, final expenses were calculated according to the NPV, and a possibility of financial saving using an optimized warming variant was stated.

Keywords: heat pump, stratification tank, homogeneous tank, water heating, optimization

Title translation: Master thesis (Optimization of hot water heating using a heat pump according to the outdoor temperatures from an energy point of view)

Obsah /

| | |
|--|----|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Tepelná čerpadla | 2 |
| 2.1 Základní části tepelného čerpadla | 3 |
| 2.1.1 Výparník | 3 |
| 2.1.2 Kondenzátor | 3 |
| 2.1.3 Kompresor | 4 |
| 2.1.4 Expanzní ventil | 4 |
| 2.2 Typy tepelných čerpadel | 4 |
| 2.2.1 Vzduch-voda | 5 |
| 2.2.2 Země-voda | 5 |
| 2.2.3 Voda-voda | 6 |
| 2.3 Topný faktor COP | 7 |
| 2.4 Sezónní topný faktor SCOP | 7 |
| 2.5 Chladiva používaná v tepelných čerpadlech | 8 |
| 2.5.1 Vliv chladiva na životní prostředí | 8 |
| 2.5.2 Druhy chladiv | 9 |
| 2.6 Ecocute | 9 |
| 3 Příprava teplé vody | 10 |
| 3.1 Základní dělení přípravy teplé vody | 10 |
| 3.1.1 Dle způsobu předávání tepla: přímý, nepřímý | 10 |
| 3.1.2 Dle místa ohřevu: místní, centrální, dálkový | 10 |
| 3.1.3 Dle konstrukce zařízení: akumulární, průtočný | 11 |
| 3.1.4 Dle způsobu ohřevu: jednostupňový, více- stupňový | 11 |
| 3.1.5 Dle zdroje energie: elektrický, plynový, na tuhá paliva, s netradičními zdroji tepla | 11 |
| 3.2 Zásobník teplé vody | 12 |
| 3.2.1 Homogenní zásobník teplé vody | 12 |
| 3.2.2 Stratifikační zásobník teplé vody | 13 |
| 3.3 Distribuční sazby elektřiny | 14 |
| 4 Popis simulačního modelu | 15 |
| 4.1 Varianty ohřevu | 15 |
| 4.2 Struktura programu | 16 |
| 4.3 Zjednodušený princip programu | 16 |
| 4.4 Vrstvený zásobník - řešení rovnice přestupu tepla | 17 |
| 4.5 Vrstvený zásobník - odběr a ohřev vody | 18 |
| 4.6 Promíchávaný zásobník - řešení první věty termodynamické | 19 |
| 4.7 Výpočet ideálního času ohřevu | 20 |
| 4.8 Popis jednotlivých variant ohřevu | 21 |
| 4.8.1 Přímý ohřev pomocí topného tělesa, kdykoliv je to možné | 22 |
| 4.8.2 Ohřev pomocí TČ, kdykoliv je to možné | 23 |
| 4.8.3 Ohřev pomocí TČ, když hladina/teplota klesne pod danou úroveň | 23 |
| 4.8.4 Ohřev pomocí TČ, op- timalizovaný dle teploty .. | 24 |
| 4.9 Zjednodušující předpoklady ... | 25 |
| 4.10 Parametry tepelného čerpadla | 26 |
| 4.11 Výstup programu | 27 |
| 5 Stručné ekonomické zhodnocení | 28 |
| 5.1 Optimalizace ohřevu u promíchávaného zásobníku | 28 |
| 5.2 Porovnání bojleru a tepelného čerpadla | 28 |
| 5.3 Vstupní předpoklady | 29 |
| 5.3.1 Náklady na bojler | 30 |
| 5.3.2 Náklady na tepelné čerpadlo | 30 |
| 5.3.3 Distribuční sazby | 31 |
| 5.3.4 Diskont | 32 |
| 5.3.5 Eskalace cen | 32 |
| 5.4 Výsledky simulace | 33 |
| 5.5 Výpočty | 34 |
| 5.6 Citlivostní analýzy a výsledky .. | 35 |
| 5.6.1 Více denních odběrů | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 5.6.2 Jeden denní odběr | 37 |
| 6 Závěr | 38 |
| Literatura | 40 |
| A Použité zkratky, obsah přílo- | |
| ného CD | 43 |
| A.1 Zkratky | 43 |
| A.2 Obsah příloženého CD | 43 |
| B Graf spotřeby energie pro více | |
| denních odběrů | 44 |
| C Graf spotřeby energie pro je- | |
| den denní odběr | 45 |

Tabulky / Obrázky

| | | | |
|--|----|--|----|
| 3.1. Distribuční sazby elektřiny | 14 | 2.1. Princip funkce TČ | 2 |
| 4.1. Použitá zjednodušení..... | 25 | 2.2. Zemní kolektor | 3 |
| 5.1. Parametry simulace | 29 | 2.3. Deskový výměník..... | 3 |
| 5.2. Ekonomické parametry | 29 | 2.4. Kompresor | 4 |
| 5.3. Přehled nákladů Bojler | 30 | 2.5. Expanzní ventil..... | 4 |
| 5.4. Přehled nákladů TČ | 31 | 2.6. TČ vzduch-voda..... | 5 |
| 5.5. Distribuční sazby..... | 31 | 2.7. TČ země-voda..... | 6 |
| 5.6. Roční spotřeba energie..... | 33 | 2.8. TČ voda-voda | 6 |
| 5.7. Příklad NPV pro více denních odběrů..... | 35 | 3.1. Homogenni zásobník TV..... | 13 |
| 5.8. Příklad NPV pro jeden denní odběr | 35 | 3.2. Stratifikační zásobník TV..... | 14 |
| | | 4.1. Příklad přestupu tepla | 17 |
| | | 4.2. Příklad posunu rozhraní | 19 |
| | | 4.3. 1. věta termodynamická | 20 |
| | | 4.4. Výpočet ideálního času | 21 |
| | | 4.5. Varianta ohřevu č. 1 | 23 |
| | | 4.6. Varianta ohřevu č. 2 | 23 |
| | | 4.7. Varianta ohřevu č. 3 | 24 |
| | | 4.8. Varianta ohřevu č. 4 | 25 |
| | | 4.9. Výkon TČ | 26 |
| | | 4.10. COP TČ | 27 |
| | | 4.11. Příklad výstupu programu..... | 27 |
| | | 5.1. Denní diagramy odběru..... | 33 |
| | | 5.2. NPV pro více odběrů | 36 |
| | | 5.3. Úspora pro více odběrů | 36 |
| | | 5.4. NPV pro jeden odběr | 37 |
| | | 5.5. Úspora pro jeden odběr..... | 37 |

Kapitola 1

Úvod

V současné době je kladen stále větší důraz na zateplení nových i stávajících objektů. Díky tomu klesly náklady na vytápění budov až o desítky procent. Dříve běžně platilo, že vzhledem k vysokým energetickým nárokům na vytápění, se tyto náklady pohybovaly na zhruba tří až čtyřnásobku oproti ohřevu teplé vody. To už však v dnešní době neplatí. U pasivních, ale i některých nízkoenergetických domů, může být potřeba tepelné energie pro ohřev teplé vody dokonce vyšší, než pro vytápění celého domu.

Náklady na vytápění a ohřev teplé vody v běžném objektu tvoří většinu nákladů na jeho provoz (vytápění, příprava teplé vody, osvětlení, větrání, úprava vlhkosti a chlazení). Zatímco u vytápění lze ušetřit tak, že se sníží potřeba dodané energie (zateplí se objekt, čímž se omezí tepelné ztráty), u přípravy teplé vody takováto možnost v nezanedbatelném měřítku není. Jistě, lze omezit tepelné ztráty zásobníku teplé vody, avšak ty už jsou dnes na tak nízké úrovni, že by jejich další snižování bylo vzhledem k výsledku neúměrně drahé.

Další možností, jak ušetřit při ohřevu teplé vody, je dodávat stále stejně tepelné energie, avšak pro její získání spotřebovat méně energie elektrické (nebo jakékoliv jiné). Na tomto principu pracuje tepelné čerpadlo, které je schopno dodat několikanásobek tepelné energie, než kolik spotřebuje elektřiny. Tento poměr se typicky pohybuje přibližně od dvou do pěti, přičemž záleží na teplotě prostředí, odkud je teplo odebíráno. Obecně platí, že s vyšší venkovní teplotou (prostředí, odkud se odebírá teplo) je i vyšší účinnost tepelného čerpadla. Dá se tedy říci, že pokud by se tepelné čerpadlo spouštělo pouze v časech, kdy je venkovní teplota nejvyšší, dosáhlo by se určité úspory oproti případům, kdy se bude tepelné čerpadlo spouštět v náhodnou dobu.

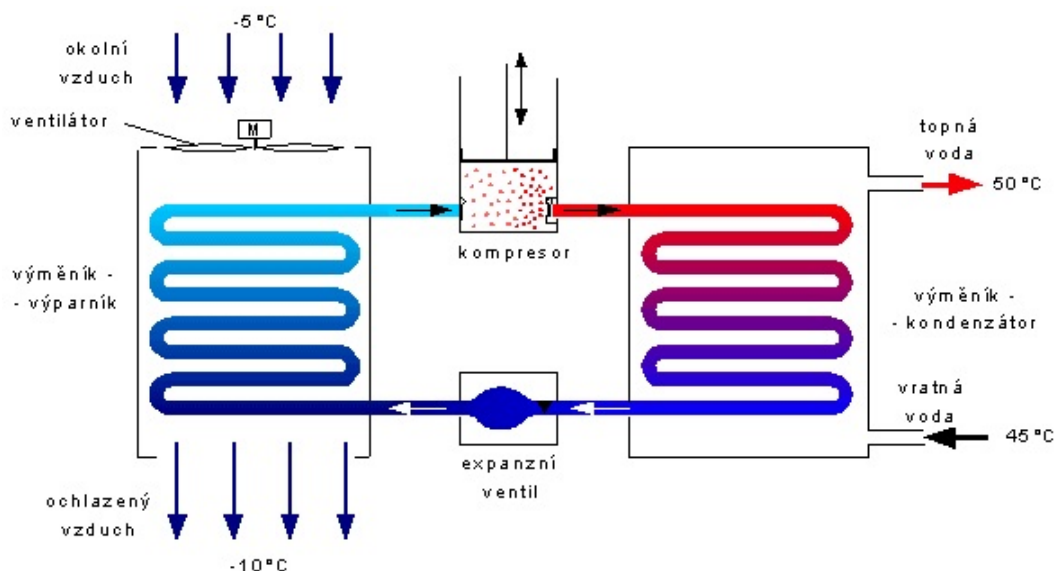
A právě na tomto principu staví celá tato práce. Úkolem je zjistit, zda vůbec existuje vhodná technologie, u které by se dala uplatnit optimalizace spínání tepelného čerpadla dle venkovní teploty, a jaké by to přibližně přineslo úspory. Ideou této práce je, při zachování stávajícího systému ohřevu teplé vody (tepelné čerpadlo typu vzduch-voda, zásobník teplé vody), pouze změnou času spínání tepelného čerpadla dosáhnout finanční úspory. V praxi by to znamenalo, že s minimální vstupní investicí (pouze náklady pro nastavení času spínání v řídicí jednotce), by čerpadlo pracovalo v časech, kdy je jeho účinnost nejvyšší, čímž by se snížily náklady pro ohřev teplé vody.

Cílem této práce je se nejprve seznámit s popisem a funkcí tepelného čerpadla i zásobníku teplé vody. Na základě těchto znalostí vytvořit model přípravy teplé vody pro různé druhy zásobníků a variant ohřevu. Dalším úkolem je, s využitím reálných venkovních denních teplot a typických odběrových diagramů, zjistit spotřebu elektrické energie pro jednotlivé varianty ohřevu. Závěrem zbývá dosažené výsledky stručně ekonomicky zhodnotit.

Kapitola 2

Tepelná čerpadla

Druhý termodynamický zákon říká, že teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa studenějšího na těleso teplejší. A přesto tepelné čerpadlo získává tepelnou energii z chladnějšího okolního prostoru (ať už se jedná o vzduch, vodu či půdu) a předává ji prostředí teplejšímu (typicky se jedná o vytápění domu/bytu či ohřevu teplé vody). Nejedná se však o žádné zázračné zařízení, které by ignorovalo fyzikální principy, pouze je zde důmyslně využita fyzikální vlastnost plynů, kdy se dle stavové rovnice při změně tlaku plynu za konstantního objemu mění i jeho teplota. Na stejném fyzikálním principu funguje např. i lednice či mrazák, kdy je teplo uvnitř lednice odčerpáváno ven, čímž se teplota uvnitř lednice snižuje a v okolí úměrně tomu zvyšuje.



Obrázek 2.1. Princip funkce tepelného čerpadla [1]

Na obrázku 2.1 je zobrazen zjednodušený princip funkce tepelného čerpadla. Stlačené kapalně teplotnosné médium se rozpíná v expanzním ventilu, odkud pokračuje dále do výparníku, kde změní své skupenství na páru. Tím se také výrazně sníží teplota chladiva. Jelikož má okolní prostředí vyšší teplotu než je teplota chladiva ve výparníku, dochází k přestupu tepla z okolního prostředí do chladiva, které se tak ohřívá. Ohřáté chladivo v plynné formě proudí do kompresoru, kde dojde k jeho stlačení, a tím i zvýšení jeho tlaku a teploty. Za kompresorem se nachází kondenzátor, kde chladivo změní své skupenství na kapalnou, a zároveň předá v tepelném výměníku část své tepelné energie ohřívávané látce (topné vodě). Pracovní cyklus se dále opakuje. [1]

2.1 Základní části tepelného čerpadla

Jak vyplývá z předchozího textu, každé tepelné čerpadlo se skládá ze čtyř základních částí. První z nich, výměník výparník, se nachází v primárním okruhu, který odebírá teplo okolnímu prostředí. Jeho opakem, nacházejícím se v sekundárním okruhu, který dodává teplo objektu, je výměník kondenzátor. Mezi primárním a sekundárním okruhem se dále nachází kompresor a expanzní ventil. [2] [3]

2.1.1 Výparník

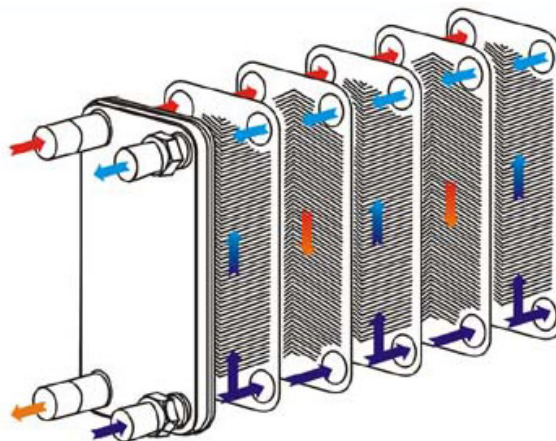
Výparník se nachází v prostředí, ze kterého tepelné čerpadlo odebírá teplo. Může být deskového nebo trubkovitého tvaru v případě kapalného chladiva, případně žebrovaný pro vzduch. Ve výparníku proudí při nízkém tlaku chladivo, které má nízkou teplotu varu, a tak se při průchodu výparníkem vypaří. Chladivo odebírá tepelnou energii nízkopotenciálnímu zdroji tepla (okolí), který by sám o sobě byl pro vytápění či ohřev vody nevhodný. [2] [3]



Obrázek 2.2. Ukázka výparníku- zemní kolektor pro tepelné čerpadlo země-voda [4]

2.1.2 Kondenzátor

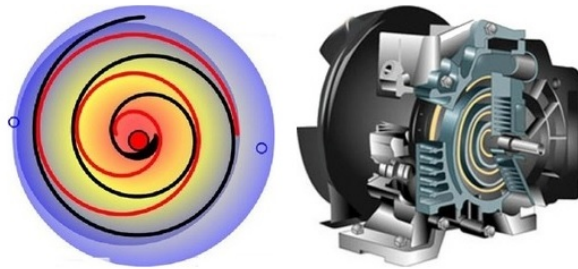
Kondenzátor má obdobnou konstrukci jako výparník, přesto z pohledu tepelného čerpadla plní funkci opačnou. Plynné chladivo na vstupu do kondenzátoru je po průchodu kompresorem pod vysokým tlakem, začne tedy kapalnět a předává tepelnou energii otopné soustavě. Výměník kondenzátoru může být podobně jako výměník výparníku deskového, trubkovitého nebo žebrovaného provedení. [2] [3]



Obrázek 2.3. Deskový výměník (kondenzátor) [4]

2.1.3 Kompressor

Kompressor odděluje primární a sekundární okruh. Nasává chladivo v plynném skupenství o nízkém tlaku z výparníku a stlačuje ho na vysoký tlak kondenzátoru. Kompressor je zařízením tepelného čerpadla, které spotřebovává nejvíce elektrické energie. Ta je používána na přečerpání tepelné energie z nižší teplotní hladiny na vyšší, která je dále využitelná např. pro vytápění či ohřev teplé vody. V dnešní době jsou nejpoužívanější rotační (typu scroll nebo twin rotary) případně pístové kompresory. Aby se zabránilo unikům chladiva, mohou být kompresory menších až středních výkonů hermeticky uzavřené. [2] [3]



Obrázek 2.4. Scroll kompressor: červená spirála se excentricky pohybuje v pevné černé spirále, čímž tlačí vzduch ke středu [5]

2.1.4 Expanzní ventil

Expanzní ventil, podobně jako kompressor, odděluje primární okruh s nízkým tlakem a sekundární okruh s tlakem vysokým. Jeho úkolem je udržovat tlakový rozdíl na jeho vstupu (vysoký tlak z kondenzátoru) a výstupu (nízký tlak ve výparníku), a to tak, že reguluje průtok chladiva z kondenzátoru do výparníku. Dalším cílem expanzního ventilu je pomocí regulace průtoku chladiva zajistit, aby se všechno chladivo ve výparníku zcela vypařilo. Expanzní ventil může být řízen termostaticky nebo elektronicky. [2] [3]



Obrázek 2.5. Elektronicky řízený expanzní ventil [6]

2.2 Typy tepelných čerpadel

Existují tři základní možnosti, odkud lze získávat tepelnou energii. Ze vzduchu, ze země a z vody. Přestože všechny tyto tři základní varianty pracují na stejném fyzikálním principu, jednotlivé varianty se mezi sebou liší technickým řešením výparníku, a s tím i sou-

visející složitostí realizace. S tím samozřejmě také souvisí odlišná finanční náročnost, ať už při prvotní investici, nebo na provoz a údržbu tepelného čerpadla.

2.2.1 Vzduch-voda

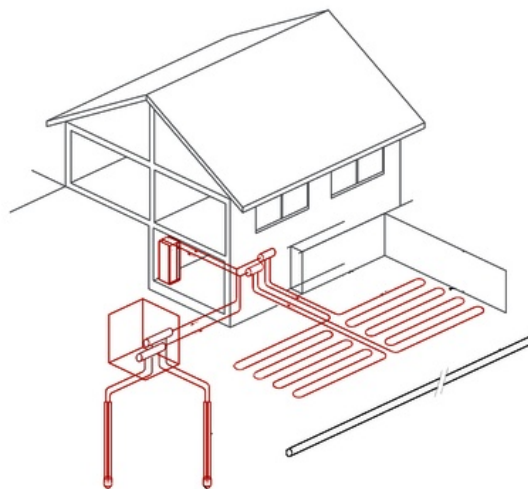
Nejjednodušší na instalaci jsou tepelná čerpadla získávající tepelnou energii ze vzduchu. Typickým zástupcem je tepelné čerpadlo typu vzduch-voda. Jeho hlavní výhodou je jednoduchá a rychlá instalace, kdy pouze stačí umístit k objektu venkovní jednotku a připojit ji k vnitřní otopné soustavě. Nejsou zde žádné nároky na velikost pozemku pro umístění kolektoru. Investiční náklady jsou tedy v porovnání s ostatními typy tepelných čerpadel nižší, avšak tepelná čerpadla vzduch-voda mají přibližně o 30% vyšší spotřebu elektřiny než ostatní druhy. Může zde být také problém s hlučností venkovní jednotky. Další nevýhodou je snížená efektivita čerpadla při nižších teplotách a s tím spojený nižší výkon a teplota výstupní topné vody. Tepelná čerpadla vzduch-voda bývají vybavena plynulým řízením výkonu (invertorem či frekvenčním měničem), který upravuje teplotu výstupní topné vody na základě vnější teploty. Čerpadlo tak může běžet nepřetržitě, čímž se jednak prodlužuje životnost kompresoru a také není potřeba instalace akumulární nádrže. V létě lze čerpadlo využít i pro chlazení interiéru. Dalším typem tepelného čerpadla získávajícího tepelnou energii ze vzduchu je tepelné čerpadlo vzduch-vzduch. Je velmi podobné předchozímu typu vzduch-voda, pouze s tím rozdílem, že není připojeno na vnitřní otopnou soustavu, ale vnitřní vzduch je ohříván přímo. [7] [8]



Obrázek 2.6. Tři různá provedení venkovní jednotky (vlevo) a dvě provedení vnitřní jednotky (vpravo) [9]

2.2.2 Země-voda

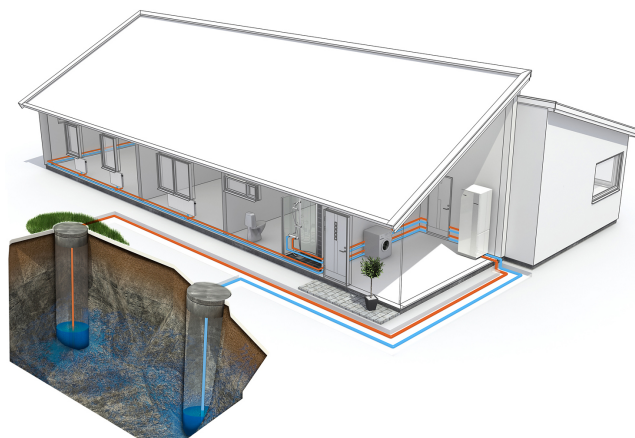
Další možností, odkud lze získávat tepelnou energii je země, a to buď pomocí plošného kolektoru nebo vrtu. Oproti získávání energie ze vzduchu je zde výhoda přibližně o 30% menší spotřeby elektrické energie a nezávislost na okolní teplotě. Dalším benefitem je bezhlučný provoz a vyšší životnost kolektoru a tepelného čerpadla. Nevýhodou je samotný kolektor, kdy v případě plošného kolektoru je třeba umístit PE trubky do hloubky cca 1,2 - 1,5 m na několik stovek metrů čtverečných pozemku. U vrtů se jedná o hloubku 100 - 150 m a je na ně potřeba stavební povolení. Tepelná čerpadla země-voda jsou typu ON-OFF, k jejich provozu je tedy potřeba akumulární nádrže na ohřátou vodu. [7] [8]



Obrázek 2.7. Schematický náčrt TČ země-voda (vlevo dva vrty, vpravo plošný kolektor) [10]

2.2.3 Voda-voda

Posledním základním typem je tepelné čerpadlo voda-voda. Podobně jako u typu země-voda jsou zde dvě základní možnosti provedení plošného kolektoru. První typ je plošný, který odebírá tepelnou energii z vodního díla (např. rybníku v těsné blízkosti objektu). Výhodou tohoto řešení jsou relativně nízké náklady na vybudování kolektoru, nejnižší náklady ze všech na provoz tepelného čerpadla a také bezhlučný provoz. Velkou nevýhodou je však nutnost blízkosti vodního díla a povolení od správce povodí. Druhou možností provedení kolektoru je studna. V tomto případě je voda čerpána ze studny do tepelného čerpadla, kde předá svoji tepelnou energii a následně je opět navrácena do studny. Tento systém dosahuje nejvyšších topných faktorů a je možné zde využít i odpadní teplo z průmyslu. Tepelné čerpadlo voda-voda se studnou je však možné použít pouze v lokalitách, kde je dostatek vody (spodní, geotermální, technologické). Další nevýhodou jsou zvýšené nároky na servis z důvodu údržby studny a sacího zařízení. [7] [8] [11]



Obrázek 2.8. Schematický náčrt TČ voda-voda (dvě studny) [12]

2.3 Topný faktor COP

V předchozím článku byla několikrát zmíněna spotřeba elektřiny tepelného čerpadla. Tu spotřebovává převážně kompresor tepelného čerpadla. Dále je potřeba pro překonání tlakové ztráty výparníku a kondenzátoru, odtávání výparníku či pro vlastní řízení a regulaci tepelného čerpadla. Aby bylo možné dát do souvislosti spotřebu a tepelný výkon, případně jednoduše porovnávat tepelná čerpadla v konkrétní situaci mezi sebou, byl zaveden Topný faktor COP (coefficient of performance). Ten je určen pro jeden standardní provozní bod, který by měl přibližně odpovídat běžnému provoznímu stavu. Slouží tedy pro základní rychlé porovnání jednotlivých tepelných čerpadel za definovaných standardizovaných podmínek (dle normy ČSN EN 14511-1), avšak již neposkytuje přesné informace o chování tepelného čerpadla v reálném prostředí. [11]

Zjednodušeně lze říci, že topný faktor je poměr topného výkonu tepelného čerpadla a jeho příkonu za ustálených provozních podmínek:

$$COP = \frac{\Phi}{P_c + P_{aux}}$$

kde:

Φ - tepelný výkon tepelného čerpadla [kW]

P_c - elektrický příkon kompresoru [kW]

P_{aux} - elektrický příkon potřebný pro překonání tlakové ztráty výparníku a kondenzátoru, odtávání výparníku a vlastní regulaci a řízení tepelného čerpadla [kW] [11]

2.4 Sezónní topný faktor SCOP

Topný faktor COP, který se určuje pro jeden konkrétní bod, už z principu nemůže věrohodně vyjadřovat skutečné energetické nároky tepelného čerpadla v reálných podmínkách s měnící se vnitřní i venkovní teplotou. Z tohoto důvodu byl zaveden Sezónní topný faktor SCOP (seasonal coefficient of performance), který v sobě již zahrnuje měnící se teplotní podmínky (na straně výparníku- zdroje tepla i na straně kondenzátoru- odběru tepla) i měnící se odběrový výkon, případně doplňkový zdroj tepelné energie. Výpočet SCOP v sobě zahrnuje nejen celoroční bilanci produkce tepla tepelného čerpadla v aktivním chodu, ale i energetické ztráty vlivem cyklování tepelného čerpadla, spotřebu při náběhu čerpadla, udržování kompresoru na požadované teplotě, ztráty vychládáním výměníku v období mimo provoz, či již zmíněný doplňkový zdroj tepla. [11] [13]

Sezónní topný faktor je možné vypočítat dle vztahu:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}}$$

kde:

Q_H - roční potřeba tepla [kWh]

Q_{HE} - roční spotřebovaná energie tepelným čerpadlem

Roční spotřebovaná elektrická energie tepelným čerpadlem se určí dle vztahu:

$$Q_{HE} = \frac{Q_H}{SCOP_{on}} + H_{TO} * P_{TO} + H_{SB} * P_{SB} + H_{CK} * P_{CK} + H_{OFF} * P_{OFF}$$

kde:

$SCOP_{on}$ - topný faktor v aktivním režimu určený dle ČSN EN 14825 [-]

H_{TO} - počet hodin ve vypnutém stavu na termostatu [hod/rok]

P_{TO} - příkon jednotky ve vypnutém stavu termostatu [kW]

H_{SB} - počet hodin v pohotovostním režimu [hod/rok]

P_{SB} - příkon jednotky v pohotovostním režimu [kW]

H_{CK} - počet hodin v režimu zahřívání skříně [hod/rok]

P_{CK} - příkon v režimu zahřívání skříně kompresoru [kW]

H_{OFF} - počet hodin ve vypnutém stavu [hod/rok]

P_{OFF} - příkon ve vypnutém stavu [kW] [11] [13]

2.5 Chladiva používaná v tepelných čerpadlech

Chladivo tepelného čerpadla je látka, která cirkuluje v tepelném okruhu, mění přitom své skupenství, odebírá teplotu okolí ve výparníku a předává ji otopné soustavě v kondenzátoru. V minulosti se používalo několik druhů chladiv. Část z nich je již v dnešní době zakázána nebo omezoována z důvodu poškozování ozonové vrstvy a přispívání ke globálnímu oteplování. [14]

2.5.1 Vliv chladiva na životní prostředí

Existují dva základní ukazatele posuzující vliv chladiva na životní prostředí. Prvním z nich je ukazatel pro hodnocení poškozování ozonové vrstvy- ODP (ozone depletion potencial). Jedná se o relativní číslo udávající potenciál daného chladiva k poškození ozonové vrstvy oproti referenčnímu chladivu CCl_3F (R11). Chladivo R11 má tedy $ODP = 1$. Použití chladiv s $ODP > 0$ je v současné době regulováno, jedná se tedy o regulované látky. [14]

Druhým ukazatelem je ukazatel pro hodnocení vlivu chladiva na globální oteplování- GWP (global warming potencial). Termínem globální oteplování je zde myšlena schopnost zachytit teplo v atmosféře, případně ho odrazit zpět k zemskému povrchu. GWP vyjadřuje příspěvek daného plynu ke skleníkovému efektu oproti referenčnímu chladivu CO_2 (R744). GWP chladiva R744 je rovno 1. Obdobně jako u koeficientu ODP jsou chladiva s $GWP > 0$ regulována. GWP je možné vypočítat dle vztahu: [14]

$$GWP_x = \frac{\int_0^{TH} a_x[x(t)]}{\int_0^{TH} a_r[r(t)]}$$

kde:

TH - délka počítaného časového intervalu [s]

a_x - radiační účinnost látky x [$Wm^{-2}kg^{-1}$]

a_r - radiační účinnost referenční látky CO_2 [$Wm^{-2}kg^{-1}$]

$x(t)$ - časově závislý rozklad počítané látky [-]

$r(t)$ - časově závislý rozklad referenční látky [-]

V případě víceprvkového chladiva se jeho celkové GWP spočítá dle vztahu:

$$GWP = \sum (látkaX * GWP_X + látkaY * GWP_Y + \dots + látkaN * GWP_N)$$

kde X,Y až N jsou hmotnostní podíly dané látky ve výsledně směsi. [14]

2.5.2 Druhy chladiv

Freony

Halogenderiváty uhlovodíků s druhovým označením CFC nebo HCFC, která se ve velké míře používala v druhé polovině 20. století. Kvůli obsahu chlóru silně poškozují ozonovou vrstvu, proto jsou již v dnešní době u nových zařízení úplně zakázána. Starší zařízení využívající freonovou náplň se mohou používat i nadále, avšak při problému s chladivem nemohou být opravována, nýbrž odborně zlikvidována. [15]

F-plyny

F-plyny neobsahují chlór, nepoškozují ozonovou vrstvu a mají ODP rovno 0. Jsou to částečně fluorované uhlovodíky, obsahující uhlík, vodík a fluor, označují se tedy HFC. Díky těmto látkám však přispívají ke skleníkovému efektu, jejich GWP se pohybuje v řádu tisíců. Přírodně se nevyskytují, je nutné je uměle vyrábět. [15]

Hydrofluoro-Olefiny HFO

Nová chladiva na bázi nenasycených uhlovodíků alkenů (olefinů) s jednou dvojitou vazbou mezi atomy uhlíku v molekule. Nepoškozují ozonovou vrstvu, mají tedy $ODP = 0$. Některé mají velmi nízký ukazatel GWP (v řádu jednotek). Jedná se o možnou náhradu chladiv typu HFC. [15]

Přírodní chladiva

Základní prvky, ze kterých se skládají přírodní chladiva se objevují v přírodních biochemických procesech, nezatěžují tedy životní prostředí jako ostatní typy chladiv. Žádné z nich nepoškozují ozonovou vrstvu ($ODP = 0$) a ke globálnímu oteplování nepřispívají buď vůbec, nebo jen velmi mírně (GWP v řádu jednotek). Používala se hojně v padesátých letech dvacátého století, poté byla nahrazena výrobně i provozně výhodnějšími freony. Ty jsou však v dnešní době zakázané, použití přírodních chladiv se tedy považuje za návrat. Jejich nevýhodou (mimo oxid uhličitý) je jejich jedovatost či hořlavost, v některých případech dokonce obojí. [15]

2.6 Ecocute

Pojmem ecocute jsou označována tepelná čerpadla pro ohřev teplé vody, která používají přírodní chladivo CO_2 . Jejich velkou výhodou je možnost ohřevu teplé vody až na teplotu $90^\circ C$ při zachování vysokého topného faktoru. Jejich konstrukce je přizpůsobena trvalému provozu při vysokém výkonu, netrpí tedy zkracováním životnosti kompresoru, jako by tomu bylo u jiných druhů tepelných čerpadel při dlouhodobém provozu na plný výkon. Díky použitému chladivu, které nepoškozují ozonovou vrstvu ($ODP=0$) a pouze minimálně přispívá ke globálnímu oteplování ($GWP=1$), nejsou nutné povinné prohlídky těsnosti chladicího okruhu.

Nevýhodou technologie ecocute je nutnost dodržení vysokého teplotního spádu ($40 - 50^\circ C$), kterým je podmíněn vysoký topný faktor COP. Tato podmínka je snadno splnitelná u ohřevu teplé vody, avšak činí tepelná čerpadla s technologií ecocute nevhodná pro vytápění, kde se teplotní spád pohybuje pouze okolo $10^\circ C$. Řídící jednotka tepelných čerpadel s technologií ecocute automaticky nastavuje průtok ohřívání vody tak, aby její výstupní teplota byla konstantní a požadované výše. [16] [17]

Kapitola 3

Příprava teplé vody

V několika posledních desetiletích se stále zvyšuje kvalita zateplení stavebních konstrukcí, díky čemuž klesly náklady na vytápění budov o desítky procent. Požadavky na přípravu teplé vody, její teplotu a množství se však změnily jen málo. Přitom v dnešní době tvoří náklady na přípravu teplé vody přibližně čtvrtinu všech nákladů na provoz objektu (vytápění, příprava teplé vody, osvětlení, větrání, úprava vlhkosti a chlazení). Dle normy ČSN EN 806-2 musí při úplném otevření výtokové armatury vytékat nejpozději po uplynutí 30 sekund voda o teplotě 50 - 55 °C, výjimečně 60°C (v odběrové špičce krátkodobě nejméně 45°C). [18] [19]

3.1 Základní dělení přípravy teplé vody

Existuje spousta hledisek, dle kterých lze rozdělit způsoby přípravy teplé vody. V následujících článcích bude uvedeno několik základních způsobů dělení.

3.1.1 Dle způsobu předávání tepla: přímý, nepřímý

Existují dvě možnosti způsobu předávání tepla: přímo nebo nepřímo. Při přímém ohřevu je požadovaná teplá voda ohřívána elektrickým topným tělesem umístěným přímo v této vodě (např. elektrický bojler). Toto řešení je jednoduché a levné na instalaci i obsluhu. Nevýhodou však jsou vysoké náklady na dodané teplo, jelikož se přímo rovnají ceně spotřebované elektřiny.

Při nepřímém ohřevu vody je využito výměníku tepla, přes který se předává energie ohřívané vodě. Velkou výhodou této varianty je možnost využití různých druhů tepla, např. tepelného čerpadla, kondenzačního kotle a dalších. Zákazník tak není vázán k přímému ohřevu, kde za 1 kWh elektřiny dostane přibližně 3600 kJ tepla, ale může k ohřevu použít např. tepelné čerpadlo s průměrným COP=3, kde za 1 kWh elektřiny dostane přibližně 10800 kJ tepla. Nepřímý ohřev vody je tedy výrazně levnější než ohřev přímý. Nevýhodou však jsou vyšší investiční náklady v porovnání se zařízeními na přímý ohřev vody. [20] [21]

3.1.2 Dle místa ohřevu: místní, centrální, dálkový

Pro malé množství teplé vody je nejlepší místní ohřev. Zpravidla slouží pouze pro jedno zařízení (např. umyvadlo) umístěné v těsné blízkosti. Pro místní ohřev vody mohou být instalovány ohřivače průtokové i malé zásobníkové.

Pro centrální ohřev teplé vody je zapotřebí větší ohřivač, musí totiž zásobovat teplou vodou celý byt, skupinu bytů nebo i celý dům. Výhodou tohoto řešení je jednodušší realizace, kdy je vybudován pouze jeden ohřivač a do jednotlivých odběrných míst je pak vedeno potrubí s ohřátou vodou. Při větší délce a světlosti potrubí je možné zřídit cirkulaci teplé vody, čímž bude zajištěna požadovaná teplota teplé vody v každém okamžiku v každém místě potrubí.

U dálkového rozvodu je voda ohřívána (na vyšší teplotu, než je požadovaná v domácnosti) v teplárnách či odpadním teplem v elektrárnách. Poté je vedena primárním potrubím do výměníku, kde se teplo předává sekundárnímu potrubí již vedoucímu do domácností. Primární potrubí může měřit až desítky kilometrů, musí být řádně zaizolované, upevněné a musí mu být umožněno měnit svoji délku vzhledem k okolní teplotě. Sekundární potrubí by mělo být v rámci možností co nejkratší a taktéž dobře zaizolované. Aby byla zajištěna dostatečná teplota vody i mimo odběrovou špičku, je zde nutná cirkulace vody. [20] [22]

■ 3.1.3 Dle konstrukce zařízení: akumulční, průtočný

Jak již název napovídá, akumulční způsob ohřevu vody využívá akumulční nádrž (např. bojler), kde je teplá voda připravená k použití. Ta se může ohřát kdykoliv během dne, nejsou tedy kladeny nároky na dostatečně vydatný zdroj tepla ve chvíli odběru a voda se může ohřívát v tarifu s nižší sazbou (v případě ohřevu zařízením na elektriku). Teplo může být do akumulční nádrže dodáváno přímo nebo nepřímo skrze výměník. Nevýhodou tohoto řešení jsou ztráty tepelné energie do okolí při skladování ohřáté vody.

Při průtočném ohřevu vody se voda ohřívá přímo ve chvíli spotřeby při průtoku přes výměník tepla. Výhodou tohoto řešení jsou menší rozměry zařízení (není potřeba akumulční nádrž), a také neomezené množství teplé vody. Velkou nevýhodou je však příkon takového zařízení, který může dosáhnout i desítek kW. V objektu je tedy potřeba kvalitní elektrická síť, která např. v rekreačních zařízeních nemusí být vždy k dispozici. Dále musí být na takový odběr dimenzovaný proudový jistič, s čímž souvisí zvýšené fixní poplatky za elektřinu. [20]

■ 3.1.4 Dle způsobu ohřevu: jednostupňový, vícestupňový

Při jednostupňovém ohřevu je voda ohřívána pouze jedním zdrojem tepla, nejčastěji elektrickým nebo plynovým zásobníkovým ohříváčem. Jedná se o nejjednodušší a v domácnostech nejběžnější způsob ohřevu teplé vody.

U vícestupňových ohříváků teplé vody je kombinováno několik způsobů ohřevu, kdy např. jeden způsob ohřevu vodu předejde a druhý způsob dále zvýší její teplotu na teplotu požadovanou. Tím je umožněno, aby každý způsob ohřevu pracoval ve svém nejeftektivnějším rozsahu teplot, a tím se dosáhlo finanční úspory. V současné době se začíná rozšiřovat kombinace předejde pomocí tepelného čerpadla či solárních panelů (nízkoteplotního zdroje) a následného dohřevu pomocí záložního nebo dalšího zdroje tepla (např. kondenzační kotel, průtokový ohříváč apod.). [20]

■ 3.1.5 Dle zdroje energie: elektrický, plynový, na tuhá paliva, s netradičními zdroji tepla

Elektrické ohříváče existují zásobníkové i průtokové. Oba druhy se běžně používají a díky svým výhodám a nevýhodám jsou vhodné pro různé aplikace. Akumulční ohříváče mají zpravidla objem 50-200 litrů, ale mohou mít i více či méně. Lze u nich využít zvýhodněnou distribuční sazbu elektřiny, kde se voda ohřeje někdy během 8 hodin (případně 20 hodin u plně elektrifikované domácnosti), kdy je nižší sazba elektřiny. Průtokové ohříváče nemají možnost být připojené na výhodnější sazbu elektřiny, jelikož jsou využívány kdykoliv, tedy i mimo dobu nižší sazby. Vyžadují vysoký příkon (až desítky kW), kterému musí být přizpůsobený jistič. Např. v případě, že je průtokový ohříváč využíván i pro sprchu, je nutný výkon až 24 kW, čemuž odpovídá trojfázové zapojení jističe s minimálně 3 x 32 A, což se výrazně projeví ve fixních poplatcích za elektřinu.

Plynové ohřivače mohou jako palivo využívat zemní plyn nebo propan-butan (ten se však v dnešní době využívá již jen málo). Stejně jako elektrické ohřivače existují ve variantě akumulární i průtočné, avšak oproti elektřině mají výhodu v dostupnosti většího příkonu, jelikož je přípojka plynu většinou více dimenzována než přípojka elektřiny. S tím také souvisí vyšší rychlost ohřevu teplé vody. Existují i mobilní plynové ohřivače, které se připojují na tlakovou láhev s plynem.

Ohřivače na tuhá paliva se v dnešní době používají zejména v oblastech, kde je k dispozici levné palivo (dřevo, dřevěné brikety, dřevní odpad, uhlí). Typickým příkladem jsou lázeňská kamna, kde se ve spodní části nalézá topeniště. Voda lze tuhými palivy ohřát např. i v krbových kamnech pomocí výměníku tepla nebo krbové vložky.

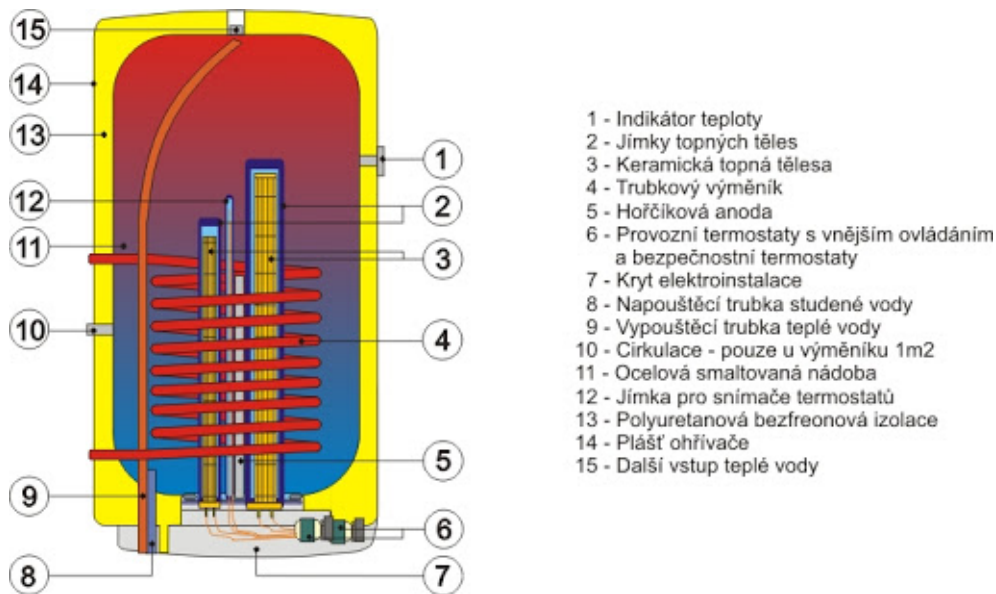
Netradiční zdroje tepla v dnešní době znamenají ohřev pomocí tepelného čerpadla, případně pomocí slunečního záření. O tepelných čerpadlech toho již bylo napsáno mnoho v předchozí kapitole. V kontextu ohřevu teplé vody se používají pro akumulární způsob ohřevu. Jejich provoz je možné dále kombinovat s elektrickým přehřevem či plynovým kotlem, zejména kvůli snižujícímu se faktoru COP při zvyšující se teplotě výstupní vody. Fototermický ohřev (pomocí slunečního záření) bude pravděpodobně v budoucnu s rozvojem technologie využíván stále častěji. Pomocí solárních tepelných panelů se ohřívá kapalina, která následně předá ve výměníku svoji tepelnou energii ohřívané vodě. Nevýhodou tohoto systému je malá účinnost v zimních měsících, kdy je intenzita slunečního záření nízká. Podobně jako u tepelných čerpadel je vhodné výstupní vodu dále přehřívát. [20]

3.2 Zásobník teplé vody

Ohřátá voda se uchovává v zásobníku teplé vody. Ten je většinou realizován formou dobře izolované válcovité nádoby, kde je teplá voda skladována a připravena k použití. Teplá voda může být připravována přímo v zásobníku nebo je teplo vodě v zásobníku předáváno skrze tepelný výměník. V takovém případě může být zároveň využito i více různých zdrojů tepla (např. fotovoltaický ohřev, tepelné čerpadlo, plynový kotel, ..). Existují dva základní typy zásobníků teplé vody, a to homogenní (promíchávaný) a stratifikační (vrstvený) zásobník. [23]

3.2.1 Homogenní zásobník teplé vody

Tento typ zásobníku je ve spojení s nepřímým ohřevem teplé vody pomocí plynového kotle v praxi nejčastěji využívaným řešením. Ve spodní části zásobníku je umístěný tepelný výměník (nejčastěji ve tvaru spirály), který ohřívá okolní vodu. Do spodní části zásobníku je rovněž při odběru teplé vody ze zásobníku přiváděna neohřátá voda, která se ohřívá pomocí tepelného výměníku, přičemž přirozeně stoupá vlivem rozdílné hustoty vzhůru, a tím se směšuje s ostatní vodou v zásobníku. Díky tomu má voda v zásobníku ve všech místech přibližně stejnou teplotu. Nevýhodou tohoto řešení je delší doba ohřevu vody v případech, kdy je odebráno větší množství teplé vody, čímž se sníží celková teplota vody v zásobníku. Může se tak snadno stát, že systém nebude schopný po dobu ohřevu vody v zásobníku dodávat teplou vodu o stanovené minimální teplotě. [23]



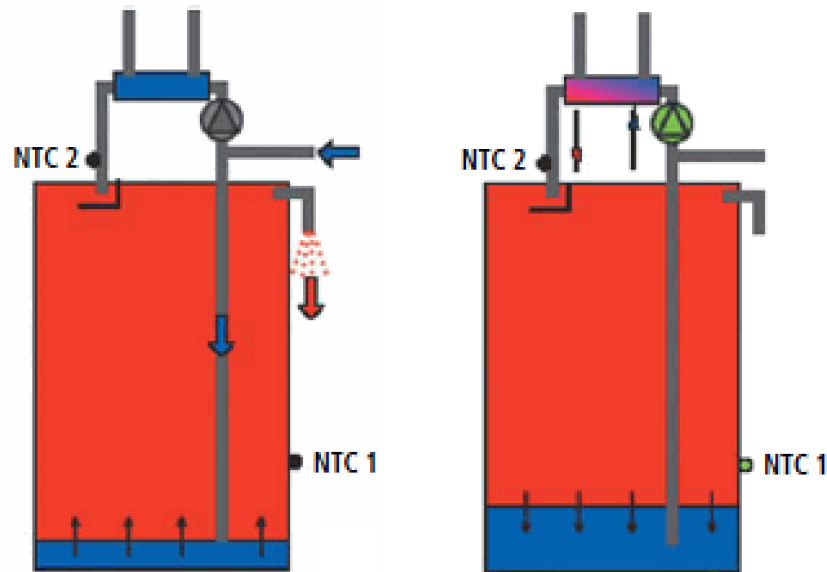
Obrázek 3.1. Schéma homogenního zásobníku teplé vody [24]

3.2.2 Stratifikační zásobník teplé vody

Hlavní odlišností stratifikačního zásobníku teplé vody od homogenního je v tom, že voda nemá ve všech místech zásobníku přibližně stejnou teplotu, ale naopak je striktně rozvrstvena podle teploty od nejstudenější dole po nejteplejší nahoře. To je umožněno díky rozdílné hustotě vody o různé teplotě, kdy nejstudenější voda (v rozsahu teplot které se běžně využívají v zásobnících teplé vody) má největší hustotu, a tím pádem se díky měrné váze drží v nejspodnějších místech zásobníku. S rostoucí teplotou vody klesá její hustota a měrná váha. Měrná tepelná vodivost vody je relativně malá, jednotlivé vrstvy tedy nemají tendenci se v krátkém čase směšovat (byť k tomu po delší době dojde). Velkou výhodou tohoto řešení je, že pokud nebudou zásoby teplé vody v zásobníku zcela vyčerpány, bude mít dostupná teplá voda požadovanou teplotu. [23] [25] [26]

Stratifikační zásobníky teplé vody v principu fungují jako kombinace průtokového ohřivače a následné akumulace ohřáté vody v zásobníku. Studená voda ze dna zásobníku je odváděna do výměníku tepla (např. tepelného čerpadla či kondenzačního kotle), kde je ohřáta na požadovanou teplotu a následně uložena v horní části zásobníku. Je důležité zajistit, aby nedošlo k mechanickému promíchání jednotlivých vrstev, k čemuž musí být přizpůsobeny odvody studené a přívody teplé vody. Jelikož je voda ohřívána na teplotu 55 - 60°C, je její ohřev efektivnější, než u klasického homogenního zásobníku teplé vody, který z principu funkce musí být ohříván vodou vyšší teploty (aby docházelo k přestupu tepla ve výměníku). [23] [25] [26]

Voda ve stratifikačním zásobníku teplé vody může být jednoduše ohřívána i zdroji tepla, pomocí kterých nedosáhne na požadovanou teplotu 55 - 60°C, např. fotovoltaikou. Stačí, aby byla ohřátá voda z těchto zdrojů přivedena do vrstvy vody v zásobníku s odpovídající teplotou. Stejně tak je možné odebírat vodu konkrétní teploty přímo ze zásobníku, a to z vrstvy vody o příslušné teplotě. [23] [25] [26]



Obrázek 3.2. Schéma stratifikačního zásobníku teplé vody (vlevo odběr teplé vody, vpravo ohřev vody) [27]

3.3 Distribuční sazby elektřiny

Distribuční sazby elektřiny se přidělují na základě zařízení, která spotřebovávají elektrickou energii. Většina běžných domácností spadá do distribuční sazby D01d případně D02d. Tento tarif je určený pro malou spotřebu a běžné spotřebiče, jako např. lednice, osvětlení, televize, trouba, apod. Jeho výhodou je malá fixní měsíční platba za jistič, avšak za cenu vyšší ceny za jednotku elektrické energie.

Pokud se v domácnosti nacházejí přístroje, které spotřebovávají velké množství elektrické energie (např. el. bojler, elektromobil, tepelné čerpadlo, apod.), je možné zažádat o výhodnější distribuční sazbu. Jejich přehled se nachází v tabulce 3.1. Některé sazby se skládají z nízkého a vysokého tarifu, přičemž cena za jednotku el. energie je v každém tarifu různá. Odběratel u těchto zvýhodněných sazeb je však povinen fyzicky blokovat odběr el. energie tímto zařízením ze sítě v době platnosti vysokého tarifu. [28] [29]

| Dist. sazba | Podmínky | VT x NT [hod] | VT [Kč/kWh] | NT [Kč/kWh] | jistič [Kč/měsíc] |
|-------------|-------------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|
| D01d | běžné spotřebiče | 24 x 0 | 5,84 | - | 44 |
| D02d | běžné spotřebiče | 24 x 0 | 5,16 | - | 123 |
| D25d | el. bojler | 16 x 8 | 5,24 | 3,03 | 165 |
| D26d | akumulační topení | 16 x 8 | 3,82 | 3,03 | 275 |
| D27d | elektromobil | 16 x 8 | 4,90 | 2,64 | 275 |
| D35d* | el. topení | 8 x 16 | 3,44 | 3,16 | 363 |
| D45d* | přímotopy | 4 x 20 | 3,29 | 3,10 | 427 |
| D56d* | tepelné čerpadlo | 2 x 22 | 3,19 | 3,01 | 427 |
| D57d | el. topení | 4 x 20 | 3,11 | 3,07 | 357 |
| D61d | - | NT o víkendu | 6,42 | 2,67 | 62 |

Tabulka 3.1. Distribuční sazby elektřiny. Distribuční sazby označené hvězdičkou již není možné v dnešní době získat, avšak jsou stále aktivní pro odběrná místa, která danou sazbu získala v minulosti. Ceny za kWh a jistič jsou orientační (liší se u každé distribuční společnosti) pro získání představy o rozdílech mezi jednotlivými sazbami. [28] [29]

Kapitola 4

Popis simulačního modelu

Za účelem simulace ohřevu vody v zásobníku a zjištění energetických nároků při různých variantách ohřevu vznikly dva simulační modely. První z nich se zabývá stratifikačním zásobníkem teplé vody. Druhý simuluje rozšířenější variantu skladování teplé vody, a sice zásobník promíchávaný. Oba modely jsou si velmi podobné, mají stejnou strukturu, a liší se pouze ve způsobu výpočtu aktuálních tepelných poměrů v zásobníku.

U stratifikačního modelu je nutné vyjádřit přestup tepla mezi ohřátou a neohřátou částí, čehož je docíleno řešením jednorozměrné rovnice vedení tepla. Odběry a ohřevy (odtok/přítok ohřáté vody a souběžný přítok/odtok neohřáté), jsou v tomto případě řešeny jako posun rozhraní mezi ohřátou a neohřátou částí ve svislém směru zásobníku.

U promíchávaného zásobníku má celá vodní masa stejnou teplotu, která se však díky odběrům a ohřevům v čase mění. Stěžejní částí celého programu tak je implementace první věty termodynamické, která dává přehled o aktuální teplotě vody v zásobníku.

Vzhledem k malým odlišnostem mezi oběma programy budou tyto dvě verze popisovány společně. Pouze funkce, které jsou rozdílné, budou popsány zvlášť pro každou variantu.

Tepelné čerpadlo použité v této práci je typu vzduch-voda, protože při odebírání tepelné energie ze vzduchu se oproti ostatním variantám nejvíce projeví závislost odebíraného výkonu na teplotě prostředí (vzduchu). Pro simulování konkrétních výsledků bylo v této práci použito tepelné čerpadlo Vitocal 222-A, které při teplotě výstupní vody 55°C dosahuje tepelného výkonu téměř 7 kW a COP 4,5 (při venkovní teplotě 30°C). Není však problém použité čerpadlo zaměnit za jiné, stačí v simulačním modelu změnit charakteristiky čerpadla za nové.

4.1 Varianty ohřevu

Základním cílem obou modelů je simulovat čtyři různé varianty ohřevu, které se následně porovnávají z hlediska energetické náročnosti a spotřebované energie za daný časový interval. Varianta ohřevu stratifikačního zásobníku se od toho promíchávaného liší pouze varianty číslo 3, kdy je třeba rozlišit mezi objemem teplé vody (u vrstveného) a celkovou teplotou vody (u promíchávaného). Jednotlivé varianty ohřevu jsou:

1. Přímý ohřev pomocí topného tělesa, kdykoliv je to možné
2. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, kdykoliv je to možné
3. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, když hladina/teplota teplé vody klesne pod danou úroveň
4. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, optimalizovaný dle venkovní teploty

4.2 Struktura programu

Samotný program je rozdělený do několika tématických částí, které obsahují funkce řešící vždy jednu oblast problematiky. Jsou to:

- Uživatelské nastavení parametrů
- Parametry a deklarace nutné pro chod programu
- Načtení parametrů tepelného čerpadla a denních teplot
- Funkce pro odběr a ohřev vody
- Funkce pro výpočet ideálního času ohřevu
- Jednotlivé varianty ohřevu a odběru vody
- Řešení rovnice přestupu tepla /první věty termodynamické
- Funkce udávající platnost jednotlivých distribučních tarifů elektřiny
- Funkce pro zobrazení grafů
- Ovládání programu

4.3 Zjednodušený princip programu

Na samém začátku programu se zavolají dvě funkce: `NactiTepelneCerpadlo` a `NactiVenkovniTeploty`. První z funkcí má ve svém těle pevně zadané parametry daného tepelného čerpadla typu vzduch-voda. Množství tepelné energie odebírané ze vzduchu je ze všech variant nejvíce závislé na venkovní teplotě, případná úspora při optimalizace ohřevu se tedy u tohoto typu tepelného čerpadla projeví nejvíce. Venkovní teploty se zadávají do samostatného listu Excelu, druhá z funkcí tedy načte příslušný soubor do paměti a vytvoří dvourozměrný list obsahující údaj o teplotě každou hodinu každý den v jednom kalendářním roce.

Dále se zavolá funkce `SimulujDen`, a to přesně tolikrát, kolik dnů má být simulováno. Argumentem funkce je varianta ohřevu. Jednotlivé varianty již byly popsány v článku 4.1. S každým zavoláním funkce `SimulujDen` se vynulují listy udávající stav objemu teplé vody a spotřebu energie za daný den. Také se o jednu zvýší globální proměnná `den`, která určuje jaký den v roce se právě simuluje. Funkce `SimulujDen` dále volá funkci `NactiOdbery`.

Pokud je varianta ohřevu předaná této funkci optimalizována dle teploty, zavolá se funkce `VypocetCasuOptimalizace` (bude popsáno později). Funkce `NactiOdbery` nejprve operuje s časovým intervalem jednoho dne, který dle odběrů rozdělí na příslušný počet subintervalů. Každý subinterval se skládá z časového rámce jednoho odběru a následující přestávky mezi odběry (v případě, že by dva odběry následovaly ihned po sobě, bude mít přestávka délku nula). Tento subinterval je společně s objemem odebrané vody při odběru a variantou ohřevu jako argument předán funkci `Ohrivej`.

Funkce `Ohrivej` dle dané varianty ohřevu nejprve zavolá pomocnou funkci, která vrací informaci o tom, zda právě běží nízký distribuční tarif pro ohřev vody/tepelné čerpadlo, jak dlouho ještě poběží, případně za jak dlouho bude nízký distribuční tarif následovat, pokud právě běží ten vysoký a dané spotřebiče jsou blokovány. Na základě těchto informací se zavolá funkce příslušná dané variantě ohřevu, a to její varianta pro nízký, nebo pro vysoký tarif. Stejný proces se následně provede i pro přestávku mezi dvěma odběry.

Funkce pro nízký a vysoký tarif dané varianty ohřevu mají za úkol provádět odběry a ve vhodných momentech i ohřevy vody. Jejich algoritmus bude podrobně vysvětlen v textu dále. Jejich výstupem je zavolání funkce `PrestupTepla`, které jako argumenty

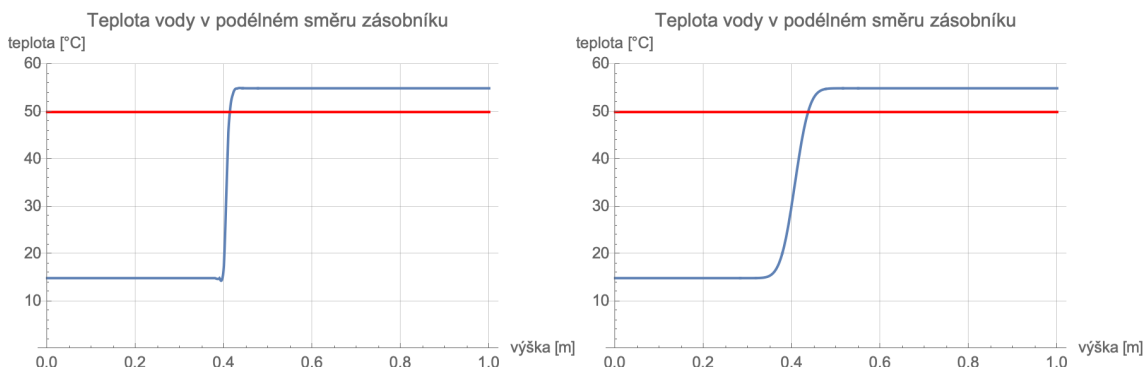
předávají začátek a konec vyhodnocovaného časového intervalu a objem odebrané vody v litrech (v případě ohřevu bude hodnota objemu odebrané vody záporná).

PrestupTepla je důležitá funkce, která má s několika dalšími pomocnými funkcemi za úkol vyřešit rovnici přestupu tepla a posunout rozhraní mezi ohřátou a neohřátou vodou v případě odběru/ohřevu u stratifikačního zásobníku, případně vyřešit první větu termodynamickou u promíchávaného. Nakonec přidá aktuální stav o tepelných poměrech v zásobníku do příslušných globálních listů. Princip této části programu bude ještě podrobně vysvětlen dále.

4.4 Vrstvený zásobník - řešení rovnice přestupu tepla

Pokud by neexistoval přestup tepla, bude stratifikační zásobník obecně obsahovat dva objemy vody o různých parametrech (součet těchto dvou objemů je objem zásobníku). Obě části se od sebe budou lišit teplotou a dalšími veličinami na teplotě závislých, především hustotou a měrnou tepelnou kapacitou. Díky rozdílné hustotě, která v intervalu hodnot teploty vody 15 - 55 °C použitých v této práci, se se zvyšující teplotou zmenšuje, se bude objem teplé vody nacházet v horní části zásobníku, objem studené vody v dolní části, a bez mechanického zásahu (např. promíchání) nedojde k vyrovnání teplot.

V reálném světě však k přestupu tepla dochází. S postupem času tedy bude spodní vrstva teplé vody ohřívat vrchní vrstvu studené vody a naopak, čímž se z původní skokové změny teploty stane pozvolný přechod. Příklad tohoto fyzikálního procesu je na obrázku 4.1. Pokud by nebyly žádné tepelné ztráty zásobníku, za dostatečně dlouhou dobu by celý objem vody v zásobníku měl stejnou teplotu, která se dá spočítat dle kalorimetrické rovnice. Tato doba je však řádově vyšší než doby, kterých se dosáhne při běžném používání zásobníku. V praxi je tak pouze nutné počítat se snižujícím se objemem ohřáté vody v čase způsobený ochlazováním spodní vrstvy teplé vody, která již nedosahuje minimální požadované teploty. V případě ohřevu veškeré vody na požadovanou teplotu žádné rozhraní v zásobníku nebude a při následném odběru vznikne opět skokový rozdíl teplot.



Obrázek 4.1. Příklad přestupu tepla v zásobníku. Na obrázku vlevo je ostré rozhraní mezi ohřátou a neohřátou vodou, na obrázku vpravo je to stejné rozhraní po několika hodinách.

Rozložení teploty vody lze při zanedbání ztrát tepla do okolí skrze stěny zásobníku řešit pomocí rovnice přestupu tepla:

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$$

kde:

T - teplota

τ - čas

λ - součinitel tepelné vodivosti vody

c - měrná tepelná kapacita vody

ρ - hustota vody

x - vertikální osa zásobníku

Jelikož není v této práci uvažován přestup tepla do okolí, jsou použity Neumannovy okrajové podmínky vyjadřující nulový tok tepla (pro $x=0$ a x =výška zásobníku):

$$\frac{\delta T}{\delta x} = 0$$

Počáteční stav je vyjádřený globální proměnnou **funkce**, která vyjadřuje rozdělení teploty po vertikální ose zásobníku. Proměnná **funkce** se aktualizuje s každým zavoláním funkce `PrestupTepla`, která řeší pouze konkrétní časový okamžik (např. dobu jednoho odběru). Znamená to tedy, že vývoj objemu teplé vody není řešením pouze jednoho výpočtu rovnice přestupu tepla, ale je poskládán z více těchto řešení. Uvedeno na příkladu, rovnice přestupu tepla vyřeší odběr v čase 3600 - 4000 s ($t_{start} = 0$, $t_{end} = 400$), proměnná **funkce** bude reflektovat stav teploty v zásobníku v čase 4000 s. Přestup tepla pro následnou přestávku mezi odběry v čase 4001 - 4200 s bude opět řešením rovnice s $t_{start} = 0$, $t_{end} = 199$ atd.

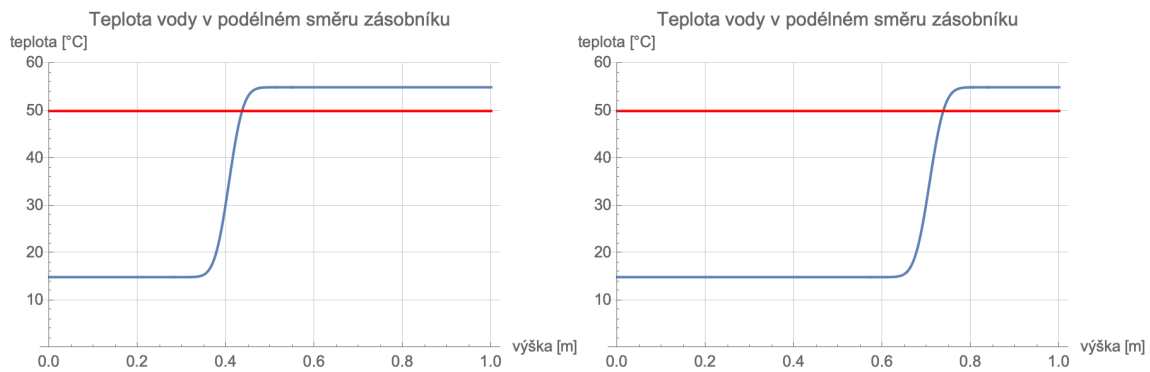
Výhodou tohoto řešení je, že není potřeba pracovat s funkcí dvou proměnných (poloha, čas), ale pouze s funkcí jedné proměnné (poloha). Nevýhodou poté je, že program obecně nezná přesný objem ohřáté vody v jakémkoliv čase, ale pouze v okamžicích, kdy začínal/končil časový interval vyšetřovaný rovnicí přestupu tepla. Nicméně tyto nepřesnosti jsou velmi malé a v algoritmu vyhodnocování modelu nehrají žádnou roli.

4.5 Vrstvený zásobník - odběr a ohřev vody

Při odběru teplé vody se snižuje objem ohřáté vody a zvyšuje objem studené vody. U ohřevu je to naopak. V obou případech se však posouvá rozhraní mezi ohřátou a neohřátou vodou, a to nahoru v případě odběru a dolů u ohřevu. Obdobně to funguje i v samotném modelu. Odběr nebo ohřev v litrech je přepočítán dle rozměrů zásobníku na výšku vodního sloupce, o kterou se následně posune rozhraní mezi ohřátou a neohřátou vodou. Příklad takového posunu je na obrázku 4.2.

Technicky princip popsany výše funguje tak, že se nejprve z původní funkce vyjádří přiměřený počet bodů, přičemž každý bod je reprezentovaný výškou a teplotou vody v dané výšce. Aby byl pokrytý celý interval výšky zásobníku, přidají se na obě strany další body v rozsahu odpovídajícím původnímu intervalu o teplotě studené (pro interval (-výška, 0)) nebo teplé (interval (výška, 2*výška)) vody. Pro všechny body se následně parametr výšky zvětší nebo zmenší o výšku vodního sloupce odpovídající odběru nebo ohřevu. Nakonec se všechny body zinterpolují, čímž vznikne proměnná **funkce** vyjadřující tepelné poměry po odběru nebo ohřevu.

Posledním krokem k dokončení odběru či ohřevu je spočítat polohu rozhraní mezi ohřátou a neohřátou vodou. Jako poloha rozhraní se v tomto kroku bere výška, kde má voda minimální požadovanou teplotu. Tento bod se najde modifikovanou metodou půlení intervalů a bude dále využíván pro určení tepla potřebného k ohřátí veškeré vody v zásobníku na požadovanou teplotu.



Obrázek 4.2. Příklad odběru v zásobníku. Na obrázku vlevo je stav před odběrem, vpravo po odebrání 60 litrů ohřáté vody. Rozhraní mezi ohřátou a neohřátou vodou se posunulo úměrně k odtoku ohřáté a přítoku neohřáté vody.

4.6 Promíchávaný zásobník - řešení první věty termodynamické

U promíchávaného zásobníku je situace o dost jednodušší. Celý objem vody má stejnou teplotu, která se při zanedbání tepelných ztrát do okolí mění pouze při ohřevu či odběru. Aktuální teplota vody v daném čase je dána dle rovnice první věty termodynamické v diferenciálním tvaru:

$$cm \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{in} + c\dot{m}(T_{studená} - T)$$

kde:

T - teplota

c - měrná tepelná kapacita vody

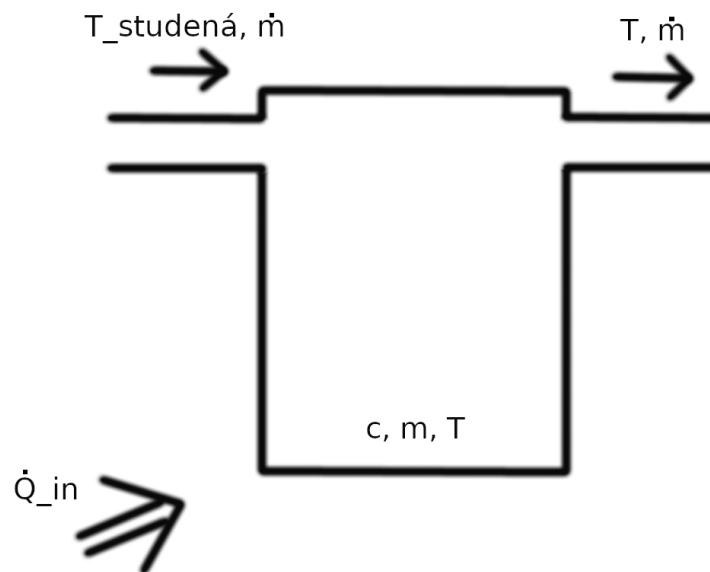
m - hmotnost

\dot{m} - hmotnostní průtok (odběr)

\dot{Q}_{in} - tok tepla dovnitř zásobníku (ohřev)

Počáteční podmínkou je globální proměnná `aktualniTeplota`, která vyjadřuje teplotu vody v zásobníku na začátku vyšetřovaného časového úseku. Po zjištění teploty vody na konci vyhodnocovaného časového intervalu se tato hodnota opět uloží do proměnné `aktualniTeplota`. Podobně jako v případě stratifikačního zásobníku, i zde se vývoj teploty za celý den skládá z příslušného počtu kratších časových intervalů řešených pomocí první věty termodynamické.

Co je však rozdílné oproti předchozímu případu, je řešení odběrů a ohřevů. První věta termodynamická v sobě obsahuje členy pro dodanou a odevzdanou energii, všechny termodynamické jevy v zásobníku jsou tedy již vyřešeny touto rovnicí, čímž je situace značně zjednodušena. Grafické znázornění první věty termodynamické v modifikaci použité v této práci je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3. Grafické znázornění promíchávaného zásobníku teplé vody, včetně ohřevu a odběru.

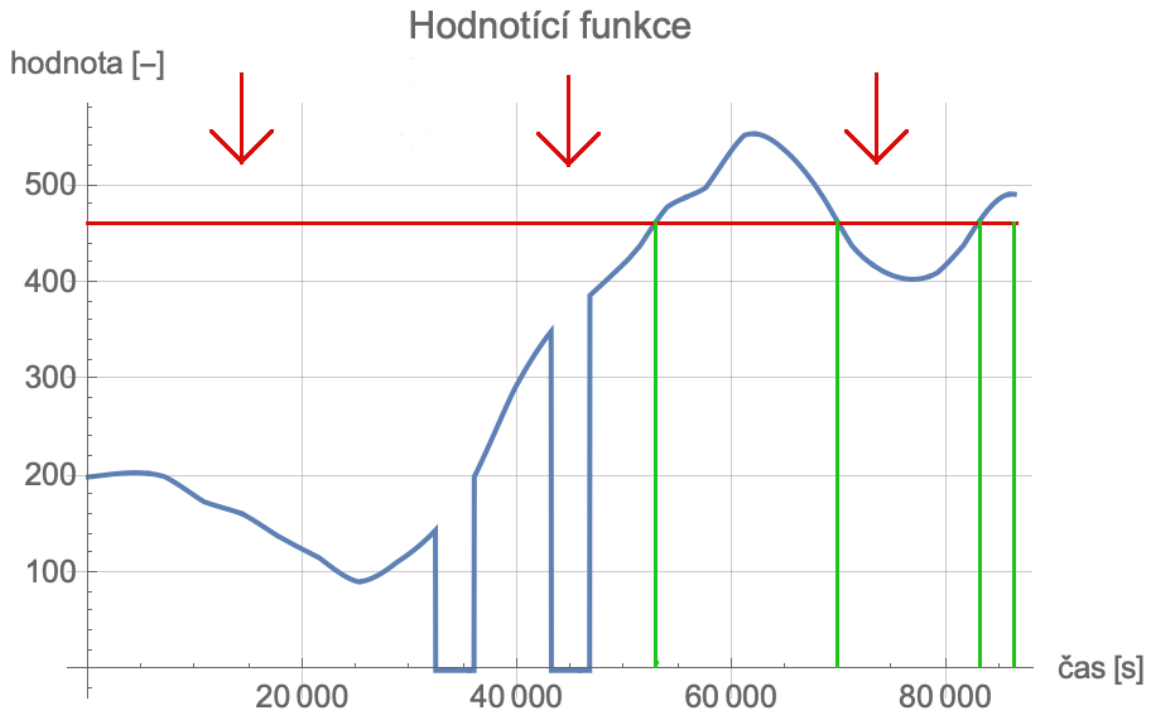
4.7 Výpočet ideálního času ohřevu

Největší úspory elektrické energie se dosáhne, když bude ohřev co nejméně efektivní. Efektivitu ohřevu vyjadřuje ukazatel COP, tedy podíl dodané a spotřebované energie. COP je závislé mimo jiné na venkovní teplotě a obecně se zvyšuje se zvyšující se teplotou. Cílem této části práce je tedy najít takové časové intervaly v průběhu dne, aby se za daný čas ohřála všechna voda v zásobníku a zároveň bylo COP v tomto čase co nejvyšší. Za tímto účelem vznikl následující algoritmus:

1. Pro daný den se vytvoří **hodnoticí funkce** závislá na čase ve tvaru $f(t) = 10COP^2$.
2. Najde se minimální hodnota této funkce a od funkční hodnoty celé funkce se odečte 0,9 násobek této minimální hodnoty.
3. Časové úseky trvání vysokého distribučního tarifu pro daný typ ohřevu budou mít v **hodnoticí funkci** hodnotu 0.
4. Najdou se všechna lokální maxima **hodnoticí funkce** a seřadí se dle velikosti funkční hodnoty.
5. Sečte se objem všech odběrů od začátku dne do času globálního maxima.
6. V případě promíchávaného zásobníku se určí teplota, která by byla v čase globálního maxima s odběry vypočtenými v předchozím kroku. Pokud je tato teplota menší, než je minimální možná teplota, bude mít hodnotu minimální možné teploty. U stratifikačního zásobníku je tento princip obdobný, pouze se místo teploty bere objem ohřáté vody. Následně se vypočítá teplo, které by bylo potřeba zásobníku dodat pro ohřátí veškeré vody v zásobníku v čase globálního maxima.
7. Zadefinuje se proměnná **hranice**, která má hodnotu funkční hodnoty globálního maxima **hodnoticí funkce**.
8. Od proměnné **hranice** se odečte proměnná **interval**.
9. V okolí všech lokálních maxim, které mají vyšší funkční hodnotu než **hranice** se najde časový interval, kde má **hodnoticí funkce** vyšší hodnotu než **hranice**.
10. Vypočítá se celkové teplo, které by bylo zásobníku dodáno za všechny časové úseky vypočtené v předchozím bodě.

11. Pokud je vypočítané teplo větší než požadované, k hranici se přičte hodnota interval, která se následně zmenší a opět se od hranice odečte.
12. Pokud je proměnná interval větší než předem daná hodnota, pokračuje se bodem 8. Pokud je proměnná interval menší než předem daná hodnota, našly se intervaly ohřevu o dané přesnosti a algoritmus končí.

Výstupem algoritmu je jeden nebo více časových intervalů, kdy je optimální ohřívat vodu v zásobníku, neboli kdy ohřát veškerou vodu v zásobníku, aby k tomu bylo spotřebováno co nejméně elektrické energie. Konkrétní příklad aplikace algoritmu je na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4. Grafické znázornění algoritmu pro výpočet ideálního času ohřevu. Modrou čarou je vykreslena hodnotící funkce. Červená čára znázorňuje proměnnou hranici, která se postupně snižuje. Zelené čáry představují hranice časových intervalů, v rámci kterých se počítá, jaké teplo by mohlo být za tento čas dodáno.

4.8 Popis jednotlivých variant ohřevu

Níže uvedené funkce mají za cíl projít všechny odběry za daný den a simulovat vývoj objemu ohřáté vody v případě vrstveného zásobníku, či teplotu vody u promíchávaného. V závislosti na typu ohřevu následně vypočtou časové úseky, kdy se bude voda v zásobníku ohřívat.

Každá varianta obsahuje dvě hlavní funkce a sice pro nízký a pro vysoký tarif. Funkce pro nízký tarif budou podrobně popsány dále. Při platnosti vysokého distribučního tarifu se nejprve zavolá pomocná funkce vyjadřující, kdy začne platit nízký tarif. Pokud to již nebude v aktuálně vyšetřovaném časovém úseku, zavolá se pouze funkce `PrestupTepla`, která vyhodnotí případný odběr v daném čase. Pokud však nízký tarif začne platit v rámci zkoumaného časového období, zavolá se funkce `PrestupTepla` s parametry jen do konce vysokého tarifu (kvůli případnému odběru) a zbytek časového úseku a odběru se předá funkci pro nízký tarif.

Pro zopakování, jednotlivé varianty ohřevu jsou:

1. Přímý ohřev pomocí topného tělesa, kdykoliv je to možné
2. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, kdykoliv je to možné
3. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, když hladina/teplota teplé vody klesne pod danou úroveň
4. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, optimalizovaný dle venkovní teploty

4.8.1 Přímý ohřev pomocí topného tělesa, kdykoliv je to možné

Základ této funkce je velmi jednoduchý. Na začátku se spočítá, kolik tepla je třeba aktuálně dodat, aby se všechna voda v zásobníku ohřála na požadovanou teplotu a jak dlouho by to zdroji tepelné energie trvalo. Poté se zavolá pomocná funkce, jejíž jednou z návratových hodnot je, jak dlouho bude ještě trvat nízký distribuční tarif. Výsledný čas ohřevu se určí jako minimální hodnota z:

- doby trvání nízkého tarifu
- doby trvání vyšetřovaného časového úseku
- doby trvání ohřevu zdrojem tepelné energie.

Nakonec se zavolá funkce `Ohrev`, která na základě vypočtené doby ohřevu spočítá, kolik tepla se předá vodě v zásobníku, a tento parametr předá funkci `PrestupTepla`. Tato funkce je volána na celý vyšetřovaný časový interval (před případným ohřevem i po něm), aby byly do denních statistik správně zaneseny všechny odběry. Dále funkce nízkého tarifu přičte spotřebovanou energii k denní statistice spotřeby elektrické energie.

Výše popsaný algoritmus má jednu zásadní vadu. Pokud by byl dlouhý odběr, funkce vyhodnotí možnost ohřevu na začátku odběru a tím skončí. Mohlo by se poté stát, že díky odběru dojde v zásobníku ohřátá voda, či vychladne na příliš nízkou teplotu. A právě proto je zde ještě implementovaný `while` cyklus, který se spustí, když je délka vyšetřovaného úseku delší než parametr `periodaSpinani`. V takovém případě se výše popsaný algoritmus provádí opakovaně, vždy s časovým odstupem `periodaSpinani`, dokud trvá daný odběr. Pokud by se stalo, že při daném odběru, případně přestávce mezi odběry, skončí platnost nízkého distribučního tarifu, zavolá se funkce vysokého tarifu. Příklad vývoje objemu ohřáté vody za celý den s touto variantou ohřevu je na obrázku 4.5.

V případě vrstveného zásobníku se teplo, které je třeba dodat, určuje dle vztahu:

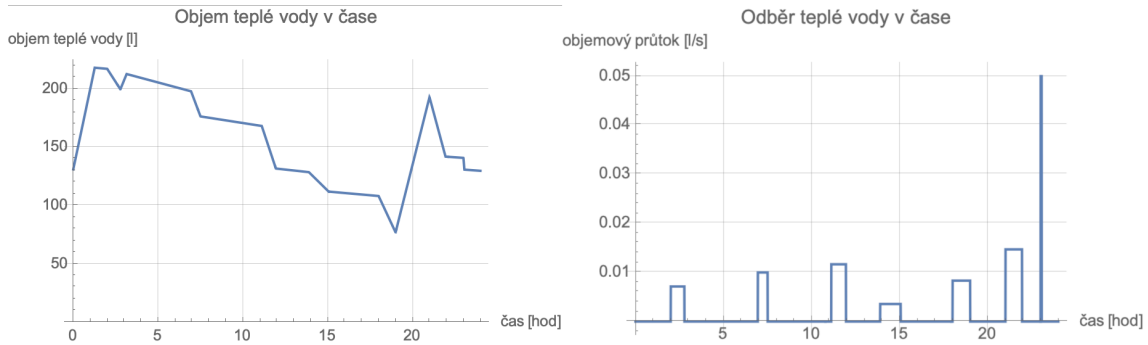
$$Q_{chybějící} = c\rho \frac{\pi \text{průměr}^2}{4} (55 \text{ poloha} - \int_0^{\text{poloha}} \text{funkce } dx)$$

U promíchávaného je vzorec o něco jednodušší:

$$Q_{chybějící} = c\rho \frac{\pi \text{průměr}^2}{4} \text{výška} (55 - \text{teplota})$$

Dodané teplo se pak shodně v obou variantách vypočte jako:

$$Q_{dodané} = \text{cas vykonBojleru}$$



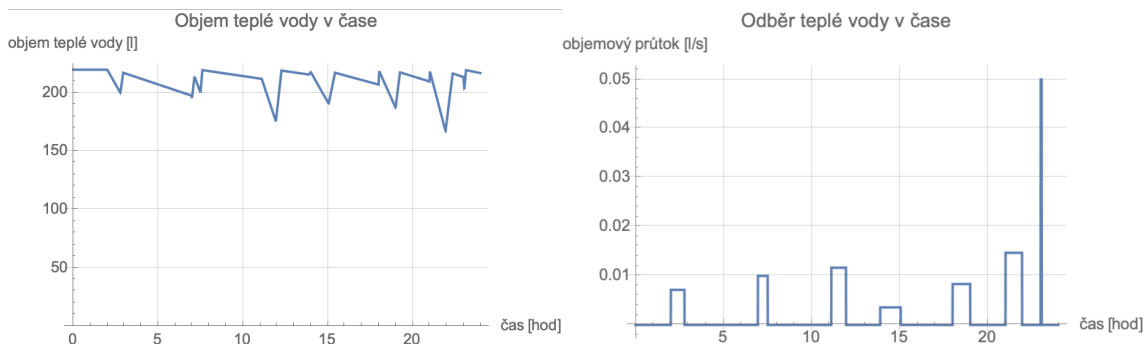
Obrázek 4.5. Příklad ohřevu dle varianty číslo 1. Na levém grafu je množství ohřáté vody v čase, na pravém jsou jednotlivé odběry v čase. Nízký distribuční tarif v tomto případě je platný mezi 0. a 6. hodinou a poté mezi 19. až 21. hodinou.

4.8.2 Ohřev pomocí TČ, kdykoliv je to možné

Druhá varianta ohřevu je téměř shodná s tou první, jediný rozdíl je ve způsobu ohřevu, kdy není voda ohřívána přímo pomocí topného tělesa, ale pomocí tepelného čerpadla. Tepelný výkon tepelného čerpadla je přímo závislý na venkovní teplotě a teplotě ohříváné vody (v tomto případě 55°C .) Příklad vývoje objemu ohřáté vody za celý den s touto variantou ohřevu je na obrázku 4.6.

Dodané teplo je tedy integrál tepelného výkonu čerpadla přes celý vyšetřovaný časový úsek a vypočte se jako:

$$Q_{\text{dodané}} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} TC_{\text{tep}}[T_{\text{venkovni}}, 55] dt$$



Obrázek 4.6. Příklad ohřevu dle varianty číslo 2. Na levém grafu je množství ohřáté vody v čase, na pravém jsou jednotlivé odběry v čase. Nízký distribuční tarif v tomto případě je platný vždy mimo 6.-7. hod, 9.-10. hod, 13.-14. hod a 16.-17. hod.

4.8.3 Ohřev pomocí TČ, když hladina/teplota klesne pod danou úroveň

Hladina/teplota vody může pod danou úroveň klesnout ve dvou případech: při odběru, a u vrstveného zásobníku i při přestávce mezi odběry, vlivem přestupu tepla do neohřátého objemu vody. U této práce se však nepředpokládají dlouhé přestávky mezi odběry, a tak tato druhá možnost zůstane dále nerozebírána.

Klesne-li hladina/teplota vody pod danou úroveň při právě vyšetřovaném časovém úseku, je důležité vědět, kdy se tak stane. Okamžik po začátku odběru, kdy je nutné začít ohřívát vodu z důvodu poklesu parametru pod danou úroveň, je v této práci

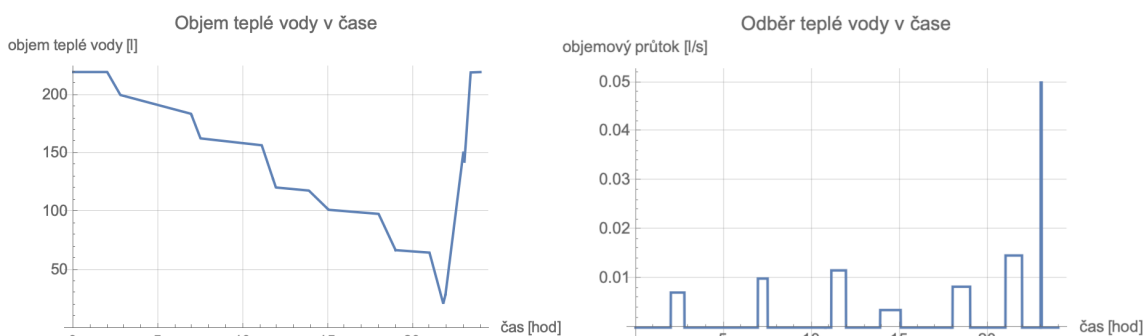
označen jako `casOdkladu`. U stratifikačního zásobníku se vypočítá jako poměr objemu ohřáté vody (bez offsetu) ku odběru, vynásobený délkou vyšetřovaného časového úseku:

$$casOdkladu = \frac{1000 \pi průměr^2}{4 odber} (offset - poloha)(tend - tstart)$$

U promíchávaného zásobníku je situace v tomto ohledu složitější, jelikož nelze jednoduchým výpočtem zjistit, za jak dlouho klesne teplota vody v zásobníku pod danou mez. Z tohoto důvodu vznikla funkce podobná funkci řešící první větu termodynamickou, jen s tím rozdílem, že využívá pouze lokální proměnné, které slouží pro tento výpočet času a nijak více neovlivňují chod programu. Modifikovanou metodou půlení intervalů se následně díky této funkci vypočte `casOdkladu` i pro promíchávaný zásobník.

Pokud je `casOdkladu` delší než délka vyšetřovaného úseku, zaznamená se pouze odebraný objem vody, pomocí zavolání funkce `PrestupTepla`. V opačném případě se navíc v příslušném čase začne ohřívat voda. Mohlo by se stát, že se v rámci vyšetřovaného časového úseku nestihne ohřát všechna voda v zásobníku, případě všechna voda na požadovanou teplotu. Proto je zde globální proměnná `ohratCele`, jejíž hodnota se změní na 1, má-li být ohřát celý zásobník. Při příští iteraci této funkce se pak začne voda rovnou ohřívat. V případě, kdy je již všechna voda ohřáta, změní se hodnota proměnné `ohratCele` opět na 0. Příklad vývoje objemu ohřáté vody za celý den s touto variantou ohřevu je na obrázku 4.7.

Výpočet tepla, které je třeba dodat, i které bylo dodáno, je shodný jako v předchozím případě.



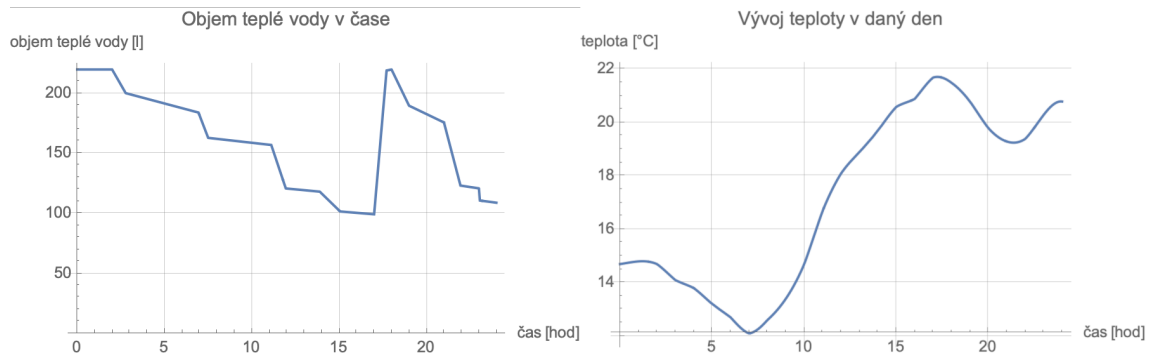
Obrázek 4.7. Příklad ohřevu dle varianty číslo 3. Na levém grafu je množství ohřáté vody v čase, na pravém jsou jednotlivé odběry v čase. Nízký distribuční tarif v tomto případě je platný vždy mimo 6.-7. hod, 9.-10. hod, 13.-14. hod a 16.-17. hod. Minimální přípustný objem ohřáté vody byl v tomto případě stanoven na 30 litrů.

4.8.4 Ohřev pomocí TČ, optimalizovaný dle teploty

Poslední varianta ohřevu, optimalizovaná dle venkovní teploty, má svůj základ v předchozí variantě, kdy je voda v zásobníku ohřívána, pokud klesne hladina/teplota pod danou úroveň. Tento princip slouží jako pojistka, aby se nikdy nestalo, že dojde ohřátá voda. Pokud by se však stalo, že se voda bude ohřívát z důvodu nízké hladiny/teploty ohřáté vody, neohřeje se všechna, nýbrž jen malá část. Nadstavbou oproti předchozí metodě je pak ohřev v určitý předem vypočítaný čas, jinak jsou si tyto dvě metody principem velmi podobné.

Jak již bylo popsáno v článku 4.7., nejprve se pro daný den spočítají časové intervaly, kdy je nejvýhodnější ohřívát vodu v zásobníku. Na začátku algoritmu funkce nízkého

tarifu se najde nejbližší ideální interval ohřevu a odečtením času začátku vyšetřovaného úseku se získá druhý čas odkladu (první je stejný jako v předchozí variantě, tedy kolik zbývá času, než dojde ohřátá voda). Z těchto dvou časů odkladu se vezme ten dřívější a dále se s ním nakládá obdobně jako v předchozí variantě ohřevu. Příklad vývoje objemu ohřáté vody za celý den s touto variantou ohřevu je na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8. Příklad ohřevu dle varianty číslo 4. Na levém grafu je množství ohřáté vody v čase, na pravém je vývoj teploty za celý den. Odběry jsou stejné jako v předchozích případech. Nízký distribuční tarif v tomto případě je platný vždy mimo 6.-7. hod, 9.-10. hod, 13.-14. hod a 16.-17. hod.

4.9 Zjednodušující předpoklady

Aby bylo vůbec možné popsat reálný systém přípravy teplé vody, musely být zavedeny některé zjednodušující předpoklady, jejichž aplikací není dosaženo velkého zkrácení oproti realitě, avšak díky kterým se značně zjednoduší výsledný model.

Nejpodstatnější, a zároveň největší chybu tvořící, zjednodušení představuje zanedbání přestupu tepla do okolí, neboli tepelných ztrát zásobníku. Ty se za normálních okolností pohybují okolo 1-1,3 kWh za den, v závislosti na teplotě vody v zásobníku (teplejší voda v zásobníku tvoří větší rozdíl teplot a tedy větší ztráty). Z celkových přibližně 8,3 kWh, potřebných pro ohřátí 180 litrů odebírané vody, tak toto zjednodušení tvoří odchylku přibližně 12 - 16%. Nicméně tyto ztráty přestupem tepla do okolí probíhají u všech variant ohřevu, při jejich vzájemném porovnávání se tedy částečně vyruší. Dá se také předpokládat, že u variant ohřevu 3 a 4, kdy se v zásobníku průměrně nachází menší objem ohřáté vody, budou tepelné ztráty nižší, než u variant 1 a 2, kdy je zásobník většinu času plný ohřáté vody.

Další zjednodušení se týká zanedbání teplotní závislosti hustoty ρ , měrné tepelné kapacity c , tepelné vodivosti λ a součinitele teplotní vodivosti α . V tabulce 4.1 jsou hodnoty těchto veličin pro teplotu 15°C a 55°C, dále pak použitá hodnota v této práci a maximální vzniklá odchylka.

| veličina | t=15°C | t=55°C | použitá | odchylka |
|---|------------------|------------------|-----------------|----------|
| hustota ρ [$kg * m^{-3}$] | 999,1 | 985,9 | 990 | 0,9% |
| měrná tepelná kapacita c [$J * kg^{-1} * K^{-1}$] | 4187 | 4179 | 4181 | 0,1% |
| tepelná vodivost λ [$W * m^{-1} * K^{-1}$] | 0,59 | 0,65 | 0,62 | 4,8% |
| součinitel teplotní vodivosti α [$m^2 * s^{-1}$] | $1,41 * 10^{-7}$ | $1,58 * 10^{-7}$ | $1,5 * 10^{-7}$ | 6% |

Tabulka 4.1. Přehled veličin, u kterých byla zanedbána teplotní závislost

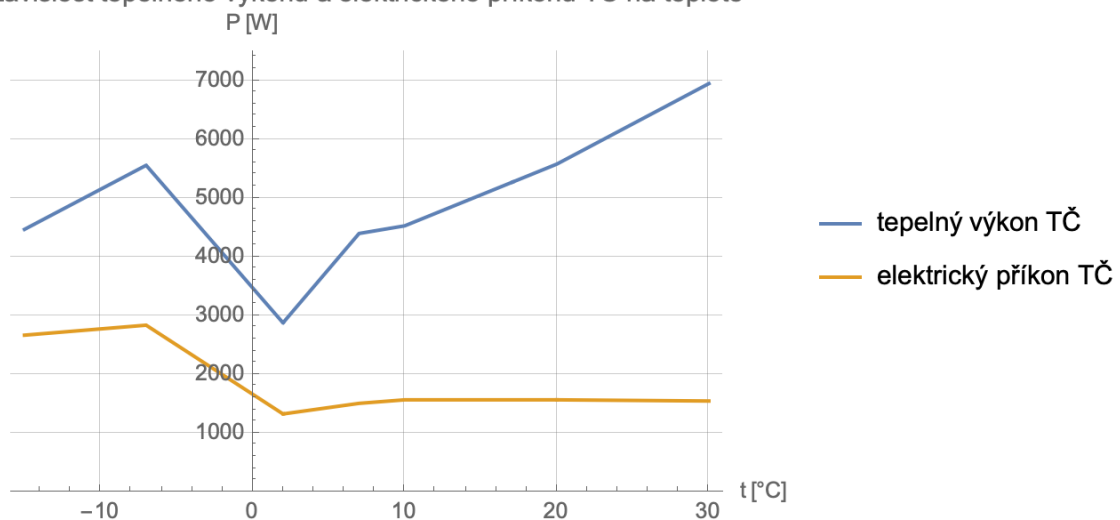
Taktéž teplota příchozí neohřáté vody není po celý rok stejná, ale mění se dle ročního období a s tím související průměrné venkovní teploty. Nicméně stejně jako v předchozích případech, i zde je teplota neohřáté vody u všech variant ohřevu stejná, a tak má při jejich porovnávání zanedbatelný vliv.

Ani odběry teplé vody a střídání distribučních tarifů neprobíhají každý den ve stejnou dobu, ale méně se mění. Takto vzniklé rozdíly jsou však minimální.

4.10 Parametry tepelného čerpadla

Na obrázku 4.9 je graf znázorňující tepelný výkon a elektrický příkon tepelného čerpadla. Tepelný výkon je na výstupu TČ, a přes výměník se předává ohřivané vodě. Elektrický příkon je poté elektrická energie potřebná pro provoz TČ. Zároveň je tento údaj potřebný při dimenzování hlavního jističe.

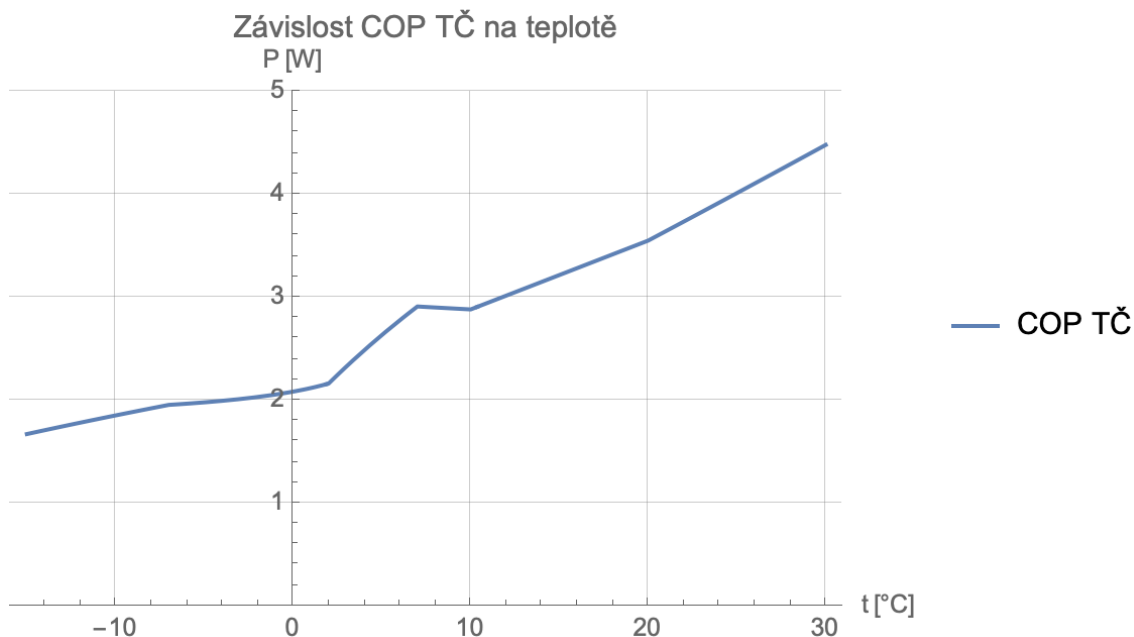
Závislost tepelného výkonu a elektrického příkonu TČ na teplotě



Obrázek 4.9. Závislost tepelného výkonu (modrá čára) a elektrického příkonu (oranžová čára) tepelného čerpadla na venkovní teplotě

Na obrázku 4.10 se poté nachází závislost COP tepelného čerpadla na venkovní teplotě. Ukazatel COP vyjadřuje poměr mezi tepelným výkonem TČ a jeho elektrickým příkonem a určuje účinnost TČ.

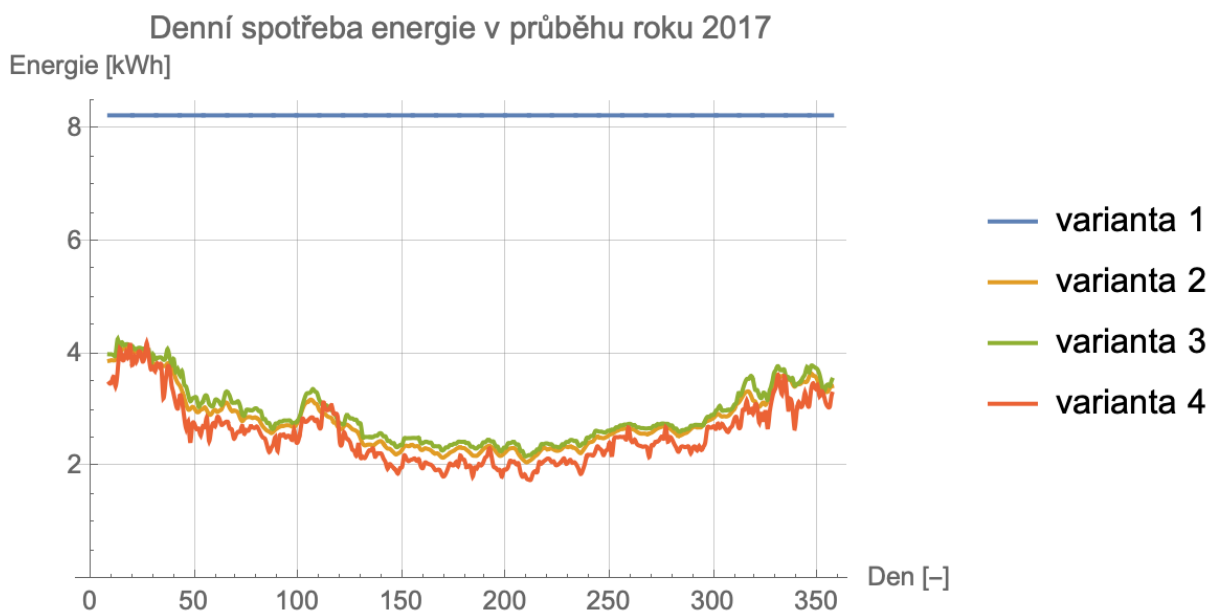
$$COP = \frac{\text{tepelný výkon TČ}}{\text{elektrický příkon TČ}}$$



Obrázek 4.10. Závislost COP tepelného čerpadla na venkovní teplotě

4.11 Výstup programu

Na obrázku 4.11 se nachází příklad grafu porovnávajícího denní spotřebu všech variant ohřevu vody za celý rok. Pro simulaci modelu byl použitý odběrový diagram s celkovým denním odběrem 180 litrů, který se nachází např. na obrázku 4.7. Průběh denních teplot za celý rok 2017 byl stažen z archívu portálu weather.sh.cvut.cz. Zásobník má celkový objem 220 litrů, přičemž studená příchozí voda o teplotě 15°C se zde ohřívá na teplotu 55°C.



Obrázek 4.11. Příklad grafu znázorňujícího denní spotřebu el. energie pro jednotlivé varianty ohřevu

Kapitola 5

Stručné ekonomické zhodnocení

Tato kapitola má za cíl představit a zhodnotit výsledky, které byly dosaženy pomocí modelů popsanych v předchozí kapitole. Nejprve zde budou popsány vstupní předpoklady, se kterými probíhala simulace, a které byly použity při výpočtu pomocí ekonomického ukazatele NPV. Následovat budou samotné výsledky, včetně vysvětlení, proč jsou zrovna takovéto. Nakonec zde bude proveden výpočet NPV, s různými možnými vstupními parametry, a zhodnocení celkových výsledků.

5.1 Optimalizace ohřevu u promíchávaného zásobníku

U promíchávaného zásobníku teplé vody se příchozí neohřátá voda směšuje se zbytkem ohřáté vody, který zůstává v zásobníku po odběru. To má za následek snížení teploty veškeré vody v zásobníku. U 220 litrového zásobníku teplé vody stačí odebrat pouhých 30 litrů, a celková teplota vody klesne na 50°C, což je v této práci bráno jako minimální možná teplota ohřáté vody.

Při odebrání součtu všech uvažovaných denních odběrů, tedy 180 litrů, klesne teplota vody na 32,5°C. Aby si ohřátá voda zachovala při tomto denním odběru teplotu nad požadovaných 50°C, musel by mít zásobník objem větší než 1370 litrů.

Hlavní idea práce je s aktuálním zařízením (zásobník vody, zdroj tepla) vypočítat možné úspory. Zvětšování zásobníku tak této idey odporuje hned dvěma způsoby. Jednak by se musel pořídit větší zásobník vody, nezůstalo by tedy původní vybavení a znamenalo by to nezanedbatelné vstupní investice. Druhým důvodem je, že u takto velkého zásobníku by byly výrazně vyšší denní tepelné ztráty, které by několikanásobně převýšily případnou úsporu při ohřevu.

Jediným způsobem, jak udržet teplotu v zásobníku nad požadovanou minimální hodnotou, je ohřát vodu několikrát za den, minimálně však šestkrát (180 litrů celkový odběr, po odebrání 30 litrů klesne teplota vody na minimální požadovanou teplotu). A zde je zase rozpor s principem optimalizace, kdy je ve většině případů ideální ohřívání vody jednou za den, kdy venkovní teplota dosáhne svého maxima.

Z výše zmíněných důvodů se ukázal promíchávaný zásobník teplé vody pro tento způsob optimalizace úspory elektrické energie pro ohřev vody jako nevhodný a nebude již v této práci dále uvažován.

5.2 Porovnání bojleru a tepelného čerpadla

Simulační model je vytvořený (a funkční) pro všechny čtyři uvažované varianty ohřevu. V následujících několika článcích budou popsány náklady u všech těchto variant. Ve výsledném hodnocení se však objeví pouze tři varianty ohřevu, a to ty s tepelným čerpadlem jako zdrojem tepla. Energetické nároky varianty ohřevu pomocí bojleru tu jsou pouze pro porovnání.

Cílem této práce bylo optimalizovat ohřev vody dle venkovní teploty, přičemž přímý ohřev vody pomocí topné spirály není na venkovní teplotě závislý. Navíc je problematické z finančního hlediska přímo porovnávat bojler, který slouží pouze pro ohřev vody a tepelné čerpadlo, které mimo ohřevu vody slouží i k vytápění. Aby bylo porovnání korektní, muselo by se do celkových nákladů započítat i vytápění, na které se však spotřebuje více energie než na ohřev vody (na ohřev vody se spotřebuje přibližně 1 MWh elektrické energie ročně, v případě nízkoenergetického domu o výměře 150 m² a spotřebě tepla na vytápění 40 kWh/m² za rok, by to ročně při průměrném COP = 3 tepelného čerpadla byly 2 MWh elektřiny).

Při výše zmíněné možnosti by také velmi záleželo na zvoleném způsobu vytápění k variantě ohřevu vody číslo jedna. Výsledný rozdíl v ceně (ať už ve prospěch tepelného čerpadla či bojleru + dalšího zdroje tepla) by tak z většiny byl závislý na způsobu vytápění, což je zcela mimo téma této diplomové práce.

5.3 Vstupní předpoklady

Tento článek má za cíl představit konkrétní okolnosti a parametry, se kterými budou následně provedeny simulace jednotlivých variant ohřevu. Výsledky těchto simulací budou použity jako vstupní hodnoty pro výsledné ekonomické zhodnocení. Použitá zjednodušení jsou již popsána v článku 4.9. Přehled konkrétních parametrů použitých v simulacích je v tabulce 5.1. V následující tabulce 5.2 se nacházejí parametry pro tvorbu ekonomického zhodnocení. Tyto parametry budou v následujících článcích zdůvodněny, zde je pouze jejich přehled.

| | |
|-------------------------------|---|
| výška zásobníku | 1 m |
| průměr zásobníku | 0,53 m |
| objem | 220 l |
| teplota ohřáté vody | 55°C |
| minimální teplota ohřáté vody | 50°C |
| teplota studené vody | 15°C |
| hustota | 990 kg * m ⁻³ |
| měrná tepelná kapacita | 4 181 J * kg ⁻¹ * K ⁻¹ |
| součinitel teplotní vodivosti | 1,5*10 ⁻⁷ m ² * s ⁻¹ |

Tabulka 5.1. Přehled parametrů simulace

| | |
|---------------------------|-------------------|
| diskont | 3% |
| cena za 1 MWh v NT D57d | 2 190,18 Kč |
| POZE za 1 MWh | 598,95 Kč |
| POZE fixní | 1 367,25 Kč/měsíc |
| eskalace ceny el. energie | -2% - 6% |

Tabulka 5.2. Přehled ekonomických parametrů

V tabulce 5.2 se vyskytují dvě různé výše příspěvku na obnovitelné zdroje (POZE), přičemž do výsledné ceny elektřiny se počítá ta menší z nich. Spotřeba, při které se tyto příspěvky rovnají se spočítá jako:

$$\text{spotřeba} = \frac{1367,25 * 12}{598,95} \doteq 27,4 \text{ MWh}$$

Znamená to tedy, že při spotřebě elektrické energie nižší než 27,4 MWh ročně se platí POZE za každou spotřebovanou MWh a při spotřebě nad 27,4 MWh se již platí fixní poplatek. Spotřeba uvažované domácnosti v této práci je nižší než 27,4 MWh.

5.3.1 Náklady na bojler

V tabulce 5.3 je přehled základních parametrů konkrétního nerezového bojleru z aktuální nabídky. Nerezové bojleru se oproti smaltovaným vyznačují vyšší odolností a delší životností, ovšem za cenu vyšší vstupní investice. Ta je však stále řádově nižší, než v případě tepelného čerpadla. Bojler je však specializovaný na jednu konkrétní věc (ohřev vody), zatímco tepelné čerpadlo je možné využít i k vytápění či chlazení nemovitosti.

Dle doporučení výrobce by se každý rok měla na bojleru dělat servisní prohlídka (a údržba) a každého zhruba 2,5 roku měnit hořčíková (obětovaná) anoda pro prodloužení životnosti bojleru. V praxi však tato doporučení nejsou příliš respektována (zejména kvůli nákladům na údržbu vůči ceně samotného bojleru), a tak servis probíhá až v momentě, kdy nastane nějaký problém.

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| model | ROLF ANTIKOR NB EL 200 Z |
| max příkon | 2,4 kW |
| životnost | 15 - 20 let |
| tepelná ztráta | 1,5 kWh za 1 den |
| cena (včetně DPH) | 20 950 Kč |
| cena instalace | 4990 Kč |
| cena servisní prohlídky | 1590 Kč |
| cena hořčíkové anody | 600 Kč |

Tabulka 5.3. Přehled základních parametrů a cena servisních úkonů konkrétního příkladu nerezového bojleru

5.3.2 Náklady na tepelné čerpadlo

Přehled základních parametrů a nutných nákladů na tepelné čerpadlo typu vzduch-voda je v tabulce 5.4. Opět je zde prezentováno jedno konkrétní čerpadlo z aktuální nabídky, které je také použito i ve zbytku práce. Tento konkrétní model v sobě kromě samotného tepelného čerpadla obsahuje i 220 litrový stratifikační zásobník teplé vody, není tedy již potřeba pro ohřev vody dokupovat nic dalšího. Na nákup tepelného čerpadla lze využít tzv. kotlíkovou dotaci z programu Nová zelená úsporám ve výši 60 000 Kč v případě nezatepleného domu, či dokonce 75 000 Kč v případě domu zatepleného.

Podobně jako u bojleru i u tepelného čerpadla doporučuje výrobce provádět servisní prohlídku a údržbu každý rok, čímž se zajistí bezproblémový chod a delší životnost. Ta je obecně závislá mimo jiné na počtu hodin provozu a počtu startů kompresoru. Obecně tedy bude u varianty ohřevu 3 a 4 životnost tepelného čerpadla o něco delší než u varianty ohřevu č. 2, a to právě kvůli nižšímu počtu startů.

Od 1. ledna 2017 jsou u některých tepelných čerpadel povinné kontroly těsnosti, které by měly odhalit únik chladiva. Nepříznivý vliv chladiv na životní prostředí je popsán v článku 2.5.1. U kompaktního čerpadla je limit hmotnosti chladiva, kdy ještě nemusí být prováděny pravidelné kontroly těsnosti, 10 tun ekvivalentní hmotnosti CO_2 .

Tepelné čerpadlo Vitocal 222-A obsahuje 2,4 kg chladiva R410A. GWP tohoto chladiva je 2088. Ekvivalentní hmotnost CO_2 se vypočte dle vztahu:

$$m_{\text{chladiva}} * GWP = 2,4 \text{ kg} * 2088 = 5011,2 \text{ kg} CO_2\text{-eq}$$

Na toto konkrétní tepelné čerpadlo se tedy povinné kontroly těsnosti nevztahují.

| | |
|----------------------------------|---|
| model | Vitocal 222-A, 230 V (A06) AWOT-M-E 221.A |
| max příkon | 2,84 kW |
| životnost | 20 let |
| tepelná ztráta | 1,5 kWh za 1 den |
| cena (včetně DPH) | 235 360 Kč |
| kotlíková dotace (se zateplením) | 75 000 |
| kotlíková dotace (bez zateplení) | 60 000 |
| cena instalace | 5687 Kč |
| cena servisní prohlídky | 3 146 Kč |
| cena hořčkové anody | 1598 Kč |

Tabulka 5.4. Přehled základních parametrů a cena servisních úkonů konkrétního příkladu tepelného čerpadla

5.3.3 Distribuční sazby

V tabulce 5.5 se nacházejí údaje nutné k výpočtu celkové ceny za elektřinu v dané distribuční sazbě. Cena elektřiny za jeden rok se vypočítá jako součet:

- spotřeby elektřiny ve vysokém tarifu krát jednotková cena
- spotřeby elektřiny v nízkém tarifu krát jednotková cena
- počtu měsíců (12) krát měsíční platba
- nižší hodnoty z: 12 krát fixní platba POZE nebo spotřeba v NT a VT krát cena POZE za jednotku

| | D25d | D56d | D57d |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| vysoký tarif | 4 270,33 Kč/MWh | 2 338,53 Kč/MWh | 2 287,59 Kč/MWh |
| nízký tarif | 2 222,28 Kč/MWh | 2 197,98 Kč/MWh | 2 190,18 Kč/MWh |
| měsíční platby | 264,88 Kč | 509,3 Kč | 477,84 Kč |
| POZE (fixní měsíční platba) | 1 367,25 Kč | 1 367,25 Kč | 1 367,25 Kč |
| POZE (dle spotřeby) | 598,95 Kč/MWh | 598,95 Kč/MWh | 598,95 Kč/MWh |
| doba platnosti NT | 8 hod | 22 hod | 20 hod |

Tabulka 5.5. Celková jednotková cena za elektřinu včetně daně z elektřiny a systémových služeb dle aktuálně platného (duben 2021) ceníku ČEZ [30]

Podmínky pro získání tarifu D25d (Akumulace 8) jsou velmi snadné. Stačí mít řádně nainstalovaný elektrický akumulací spotřebič pro vytápění objektu nebo elektrický akumulací spotřebič pro ohřev užitkové vody a technicky zajistit blokování jejich provozu v době platnosti vysokého tarifu.

Nízký distribuční tarif trvá minimálně osm hodin denně, je rozdělený do maximálně tří časových úseků, přičemž žádný z nich nesmí být kratší než jedna hodina. Zbytek dne tvoří vysoký tarif. Doba platnosti distribučních tarifů se může operativně měnit, přičemž většinou bývá šestihodinový úsek nízkého tarifu v nočních hodinách a zbylý dvouhodinový ve večerních.

Pro získání distribučního tarifu D57d musí být v objektu řádně nainstalován a používán systém vytápění s tepelným čerpadlem (jedna z možností). Stejně jako v předchozím případě musí být zajištěno technické blokování spotřebičů v době platnosti vysokého tarifu, kromě pohonu kompresoru tepelného čerpadla. Další podmínkou je platnost alespoň jednoho z následujících: [31] [32]

- součtový instalovaný výkon systému vytápění s tepelným čerpadlem musí činit nejméně 40% příkonu hlavního jističe před elektroměrem v odběrném místě
- výkon systému vytápění s tepelným čerpadlem odpovídá tepelným ztrátám objektu
- výkon systému vytápění s tepelným čerpadlem odpovídá minimálně 80% pokrytí dílčí potřeby energie na vytápění uvedené v průkazu energetické náročnosti budovy.

Nízký tarif sazby D57d, rozdělený maximálně do sedmi časových úseků, trvá minimálně 20 hodin denně. Časový úsek nízkého tarifu nesmí být kratší než jedna hodina, u vysokého naopak nesmí být delší než 1 hodina. Vysoký tarif bývá rozložen po celý den, aby se interiér nemovitosti nestihl při častých výpadcích vytápění příliš vychladit.

Distribuční tarif D56d se aktuálně již nepřiděluje, vztahuje se pouze na tepelná čerpadla uvedená do provozu do 31. března 2016. Nízký tarif je zde v minimální délce 22 hodin denně a podobně jako v předchozím případě může být rozdělen do maximálně sedmi úseků, přičemž každý úsek musí být delší než jedna hodina.

Náklady v nízkém tarifu za 1 MWh elektrické energie u distribučních sazeb představených výše jsou velmi podobné. Zásadní rozdíl však hraje doba platnosti nízkého distribučního tarifu, která je u tarifu D25d osm hodin a u D57d dvacet hodin (případně u D56d dvacet dva hodin) denně. Úspory za elektrickou energii spotřebovanou ostatními spotřebiči v domácnosti tak mohou být v případě distribučního tarifu s tepelným čerpadlem značné, což opět přispívá k rychlejší návratnosti vyšší počáteční investice tepelného čerpadla a lepší ekonomické bilanci (např. ukazatel NPV v porovnání s ostatními variantami ohřevu vody). [31] [32]

■ 5.3.4 Diskont

Diskont je ekonomický ukazatel, vyjadřující cenu ušlé příležitosti. Člověk může investovat peníze do konkrétní věci, kterou potřebuje (např. bojler pro ohřev teplé vody + náklady na provoz), ale může je investovat i do něčeho jiného, co mu zajistí vyšší výnos. A právě rozdíl ve výnosu obou těchto investic, dále zohledněný o míru rizika, představuje diskont.

V dnešní době (květen 2021) je ekonomika silně ovlivněna pandemií způsobenou onemocněním COVID-19. Úrokové sazby na spořicí účtech se v tom lepším případě pohybují okolo 0,5% p.a., kdežto míra inflace atakuje 3%. Dále existují protiinflační státní dluhopisy, které nabízejí roční výnos o 0,5% vyšší, než je průměrná roční inflace. V neposlední řadě lze také finance investovat, ať už do akcií, nemovitostí, komodit atd, kde jsou možné výnosy i v řádu desítek (výjimečně i stovek) % ročně.

Jak již bylo naznačeno v předchozím odstavci, možností, jak investovat finanční prostředky je velká řada, a jejich výnosy se velmi výrazně liší. Nelze tedy určit konkrétní hodnotu diskontu, která bude obecně platná pro každého. Jsou lidé, kteří ocení hodnotu svých peněz diskontem 1% a naopak jsou i lidé, kteří požadují výnosnost svých investic (diskont) v řádu desítek %. Pro účely této práce byla hodnota diskontu stanovena jako odhad průměru výše zmíněných možností (s předpokladem, že větší část lidí bude dosahovat u svých investic menších výnosů) na 3%.

■ 5.3.5 Eskalace cen

S mírou inflace souvisí i eskalace cen, což v kontextu této práce znamená zvyšující se investiční náklady a také náklady na servis a údržbu zařízení pro ohřev vody. Eskalace cen (investice a údržba zařízení) nehraje v následujícím ekonomickém porovnání důležitou roli, jelikož tyto náklady budou pro všechny porovnávané varianty ohřevu stejné. Nicméně pokud by si chtěl čtenář z dat poskytnutých v tabulkách 5.3 a 5.4 zhruba

vypočítat investiční a servisní náklady zařízení za dobu jeho životnosti, dá se eskalace cen odhadnout zhruba na 3% ročně.

Odhadnout a adekvátně zhodnotit všechny aspekty, které mohou ovlivnit cenu elektrické energie v horizontu příštích 20 let (což je přibližná životnost tepelného čerpadla), by vydalo na další diplomovou práci a stejně by pravděpodobně neobsáhla všechno. Některé aspekty se navíc předpokládat nedají. Z toho důvodu zde pouze bude uveden seznam věcí, který by mohly ovlivnit cenu elektřiny a v závěrečném ekonomickém zhodnocení bude pro tento parametr provedena citlivostní analýza. Některé z okolností, které mohou v příštích 20 letech ovlivnit cenu elektrické energie tedy jsou:

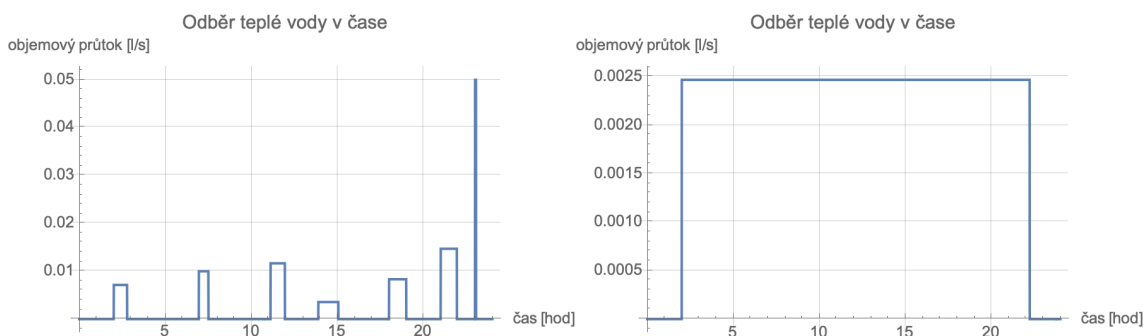
- zvyšující se cena emisních povolenek
- uzavírání uhelných elektráren a jejich nahrazování jinými zdroji
- možná dostavba bloku v JE Dukovany, případně stavba nového bloku i v jiné lokalitě
- mění se podpora obnovitelných zdrojů energie
- rozvoj elektromobility a s tím související zvýšená poptávka po elektřině
- možné odstavení aktuálně běžících bloků v Dukovanech.

5.4 Výsledky simulace

V tabulce 5.6 se nacházejí výsledné roční spotřeby (sumy denních spotřeb elektrické energie za celý rok 2017) pro všechny varianty ohřevu a dva různé denní diagramy odběru. Ty jsou znázorněny v grafech na obrázku 5.1. Grafy průběhu denních spotřeb elektrické energie se nacházejí v příloze B a C.

| Varianta ohřevu | více odběrů [kWh] | jeden odběr [kWh] |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 3012 | 3008 |
| 2 | 1069 | 1048 |
| 3 | 1077 | 1086 |
| 4 | 958 | 961 |

Tabulka 5.6. Přehled roční spotřeby elektrické energie jednotlivými variantami ohřevu pro dva různé diagramy odběru



Obrázek 5.1. Dvě varianty denních diagramů odběru. V grafu vlevo se nachází diagram s několika většími odběry, které reprezentují běžné denní činnosti v domácnosti jako např. vaření či osobní hygienu. Vpravo se nachází diagram s jedním dlouhodobým konstantním odběrem reprezentující provozy, kde se teplá voda v malém množství odebírá neustále.

Z tabulky 5.6 je vidět, že u obou způsobů odběru ohřáté vody bylo u optimalizované varianty ohřevu vody spotřebováno výrazně méně elektrické energie, než u ostatních

variant ohřevu. Rozdíl 3 kWh mezi oběma způsoby odběru vznikl nouzovým spínáním tepelného čerpadla v různých časech (a tedy i s různou venkovní teplotou a s tím související účinností tepelného čerpadla). U této varianty ohřevu se tepelné čerpadlo nouzově sepne, když objem ohřáté vody klesne pod danou minimální úroveň, čímž se zabrání, aby v zásobníku došla teplá voda.

U varianty ohřevu číslo 2 velmi záleží na způsobu odběru. V případě více denních odběrů připadá v tomto případě 60 litrů odebrané ohřáté vody na večer, po 21. hodině. Pokud se tedy voda ohřívá, kdykoliv je to možné (2. varianta ohřevu), bude se třetina denního odběru ohřívát v době, kdy už bývá nižší venkovní teplota a ohřev je tedy méně výhodný. Naopak v případě jednoho denního odběru je ohřev rovnoměrně rozložený po většinu dne, přičemž je voda ohřívána převážně přes den a večer. V brzkých ranních hodinách, kdy je většinou nejnižší denní teplota je všechna voda v zásobníku ohřátá a připravena k odběru. I proto je spotřeba elektrické energie u této varianty ohřevu v tomto konkrétním případě nižší pro jeden dlouhý odběr, než pro více odběrů za den.

U třetí varianty ohřevu, tedy když objem ohřáté vody klesne pod danou minimální mez, je čas ohřevu ze všech variant nejméně závislý na denní době. Neprobíhá ani po odběrech (které jsou většinou přes den, kdy je průměrně vyšší teplota), ani v období nejvyšší denní teploty. Může probíhat kdykoliv. Proto i spotřebovaná elektrická energie pro ohřev je nejvyšší ze všech variant ohřevu (s tepelným čerpadlem). V lepším případě ohřátá voda v zásobníku dojde odpoledne, kdy je průměrně nejvyšší teplota, v tom horším vlivem přestupu tepla v brzkých ranních hodinách, kdy je teplota průměrně nejnižší.

5.5 Výpočty

Jednotlivé varianty ohřevu budou vzájemně porovnány pomocí ekonomického ukazatele NPV. Ten se vypočítá jako suma všech ročních cashflow (rozdíl příjmů a výdajů vynásobený eskalací cen) za celou dobu životnosti, podělených diskontní mírou. V nultém roce jsou započítány investiční náklady.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Cashflow za jednotlivé roky se spočítá jako součin spotřeby elektrické energie v MWh, ceny el. energie za jednu MWh + POZE za 1 MWh a členu vyjadřujícího eskalaci ceny el. energie. Ostatní náklady (investice, servis a údržba) se v tomto výpočtu nevyskytují, protože jsou u všech variant ohřevu (s tepelným čerpadlem) stejné a navýšily by tedy výsledné NPV u všech variant o stejnou částku.

$$CF_t = \text{spotřeba} * (\text{cena za jednotku} + \text{POZE}) * (1 + \text{eskalace cen energie})^{t-1}$$

Jak již bylo napsáno dříve, investiční náklady se v tomto konkrétním případě ve výpočtu nevyskytují. Spotřeba energie v nultém roce, kdy ještě není tepelné čerpadlo v provozu je nulová. Cashflow v nultém roce tedy bude 0. V následujících letech se do vzorečku výše vždy dosadí údaje z tabulek 5.5 a 5.6. Níže je příklad výpočtu cashflow pro druhou variantu ohřevu pro první a poslední rok životnosti (dvacátý rok). Eskalace ceny elektrické energie v tomto příkladu bylo zvolena jako 3%.

$$CF_0 = 0$$

$$CF_1 = 1,069 \text{ MWh} * (2190,18 \text{ Kč/MWh} + 598,95 \text{ Kč/MWh}) * (1 + 3\%)^0 = 2981,58 \text{ Kč}$$

$$CF_{20} = 1,069 \text{ MWh} * (2190,18 \text{ Kč/MWh} + 598,95 \text{ Kč/MWh}) * (1 + 3\%)^{19} = 5228,22 \text{ Kč}$$

5.6 Citlivostní analýzy a výsledky

V tabulkách 5.7 a 5.8 se nachází vypočtené NPV a možné dosažitelné úspory při použití optimalizované varianty pro všechny uvažované varianty ohřevu vody (s tepelným čerpadlem) za celou dobu životnosti systému. Míra eskalace ceny elektrické energie zde byla pro ukázkou zvolena jako 2 a 4 %. Na obrázcích 5.2 až 5.5 se dále nacházejí grafy, ze kterých je možné vyčíst dosažené NPV a potenciální úspory pro různou výši eskalace ceny elektrické energie v intervalu (-2%,6%). V posledním sloupečku obou tabulek se nachází možná úspora peněz za elektřinu v %. Jedná se však o údaj, který reflektuje pouze cenu elektrické energie nutné pro ohřev daného množství vody, nikoliv již investiční, servisní a další nutné náklady.

Vypočtené hodnoty samozřejmě poměrově odpovídají hodnotám spotřeby elektrické energie v tabulce 5.6. Nejméně úsporná je v obou případech varianta ohřevu číslo 3, proto i možná úspora při použití optimalizované (4.) varianty ohřevu je nejvyšší.

| Varianta | NPV- 2% [Kč] | úspora- 2% [Kč] | NPV- 4% [Kč] | úspora- 4% [Kč] | úspora [%] |
|----------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|------------|
| 2 | -52 854 | 5 488 | -63 559 | 6 600 | 10,4 |
| 3 | -53 249 | 5 883 | -64 035 | 7 076 | 11,1 |
| 4 | -47 366 | 0 | -56 959 | 0 | 0 |

Tabulka 5.7. Příklad NPV všech variant ohřevu (s tepelným čerpadlem) pro více denních odběrů. Ve druhém a třetím sloupci jsou hodnoty s uvažovanou eskalací cen elektřiny 2%, ve čtvrtém a pátém sloupci 4%. Ve sloupcích úspora je vyjádřen rozdíl NPV mezi příslušnou a optimalizovanou variantou ohřevu. V posledním sloupci se nachází možná úspora elektrické energie nutné pro ohřev vody, pokud by místo dané varianty ohřevu byla aplikována optimalizovaná varianta.

| Varianta | NPV- 2% [Kč] | úspora- 2% [Kč] | NPV- 4% [Kč] | úspora- 4% [Kč] | úspora [%] |
|----------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|------------|
| 2 | -51 815 | 4 302 | -62 310 | 5 172 | 8,3 |
| 3 | -53 694 | 6 181 | -64 570 | 7 432 | 11,5 |
| 4 | -47 513 | 0 | -57 138 | 0 | 0 |

Tabulka 5.8. Příklad NPV všech variant ohřevu (s tepelným čerpadlem) pro jeden denní odběr. Ve druhém a třetím sloupci jsou hodnoty s uvažovanou eskalací cen elektřiny 2%, ve čtvrtém a pátém sloupci 4%. Ve sloupcích úspora je vyjádřen rozdíl NPV mezi příslušnou a optimalizovanou variantou ohřevu. V posledním sloupci se nachází možná úspora elektrické energie nutné pro ohřev vody, pokud by místo dané varianty ohřevu byla aplikována optimalizovaná varianta.

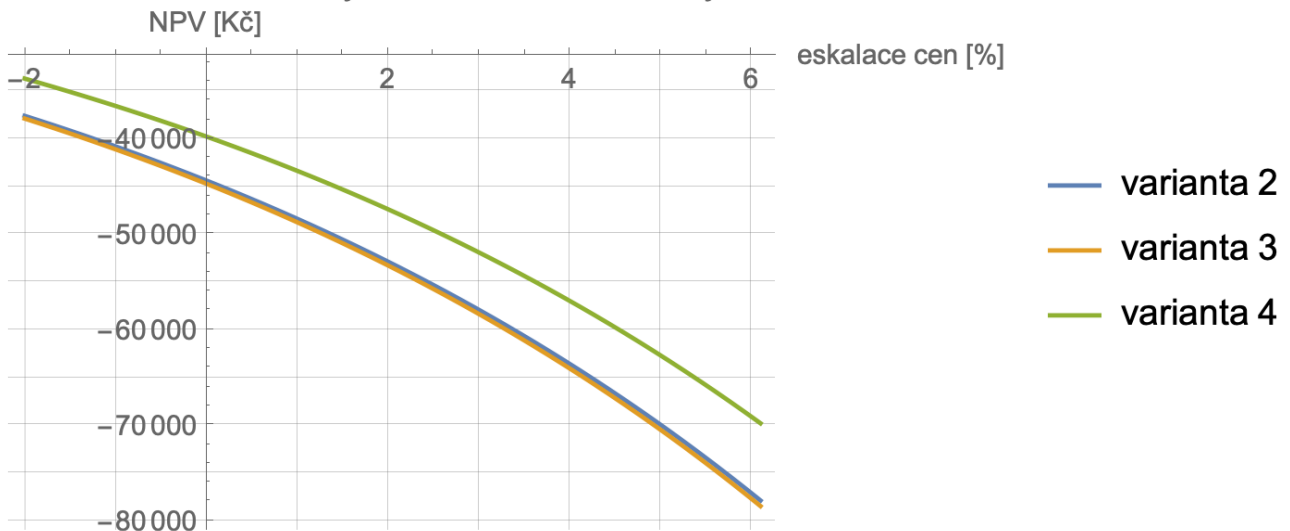
5.6.1 Více denních odběrů

Na obrázku 5.2 je graf znázorňující závislost výše NPV (vertikální osa) na možné eskalaci cen energie v intervalu (-2%,6%) (horizontální osa). Na obrázku 5.3 se poté nachází graf vyjadřující závislost výše úspory v Kč za celou dobu životnosti systému na eskalaci cen el. energie, pokud by místo příslušné varianty ohřevu byla používána varianta optimalizovaná. Oba tyto grafy byly vytvořeny pro odběrový diagram obsahující více krátkých intenzivních odběrů.

Pro zopakování, jednotlivé varianty ohřevu jsou:

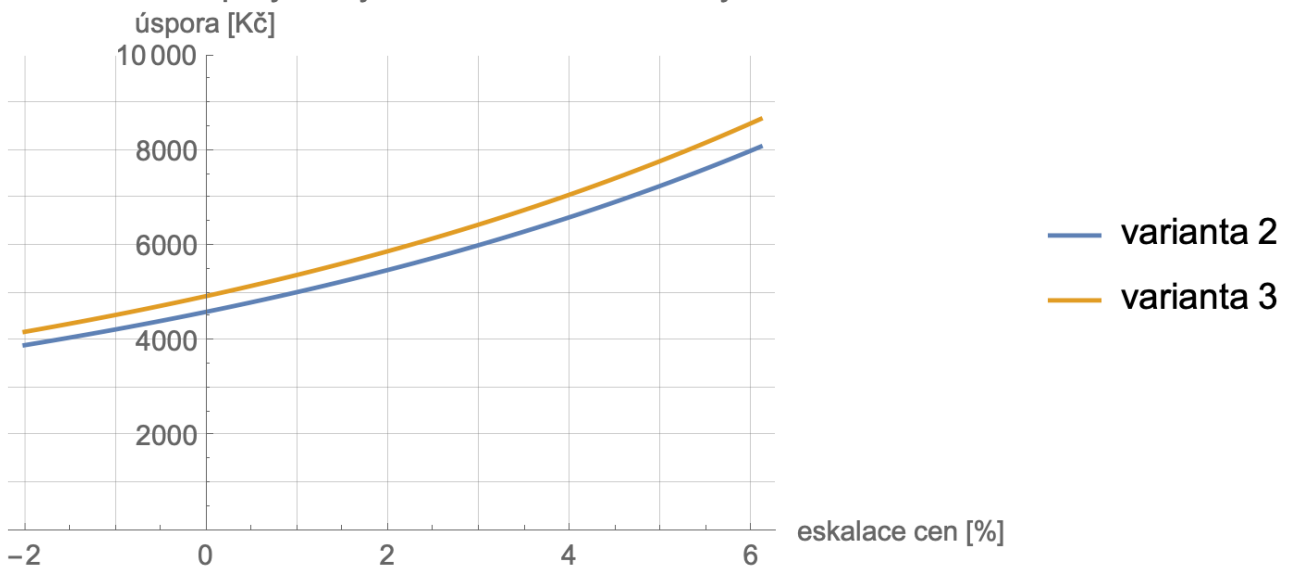
1. Přímý ohřev pomocí topného tělesa, kdykoliv je to možné
2. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, kdykoliv je to možné
3. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, když hladina/teplota teplé vody klesne pod danou úroveň
4. Ohřev pomocí tepelného čerpadla, optimalizovaný dle venkovní teploty

Závislost NPV na výši eskalace cen elektřiny



Obrázek 5.2. Graf závislosti NPV na výši eskalace ceny elektrické energie pro variantu s několika odběry ohřáté vody za den. Vypočtené NPV je za celou dobu životnosti tepelného čerpadla (20 let).

Závislost úspory na výši eskalace cen elektřiny

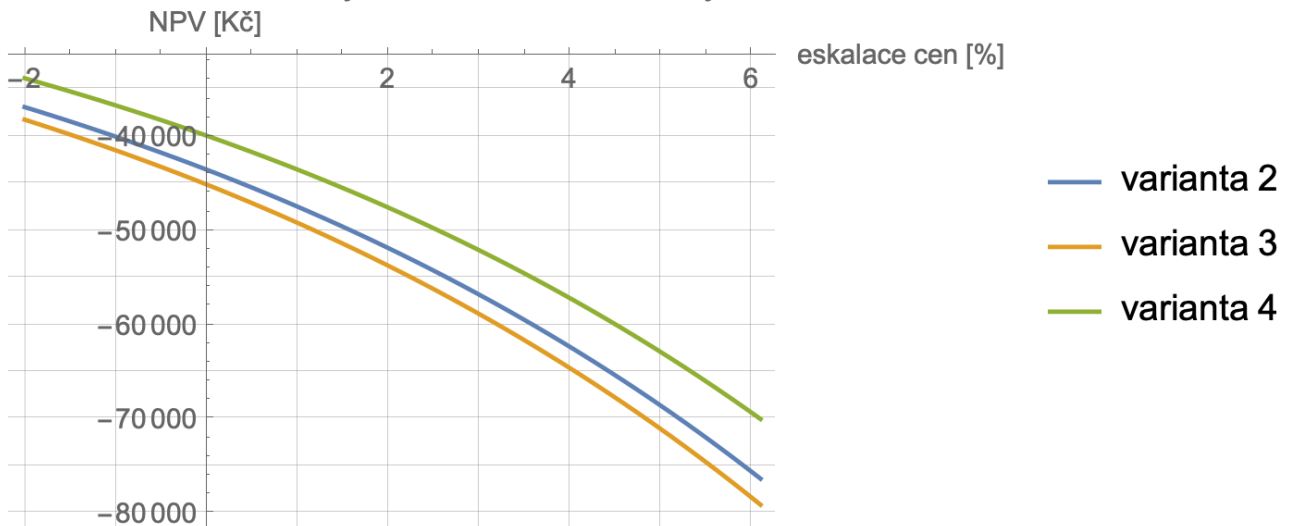


Obrázek 5.3. Graf závislosti úspory finančních prostředků na výši eskalace ceny elektrické energie pro variantu s několika odběry ohřáté vody za den. Znázorněná úspora představuje obnos peněz, které vlastník ušetří za celou dobu životnosti tepelného čerpadla (20 let) při využívání optimalizovaného ohřevu (varianta 4) oproti ostatním variantám.

5.6.2 Jeden denní odběr

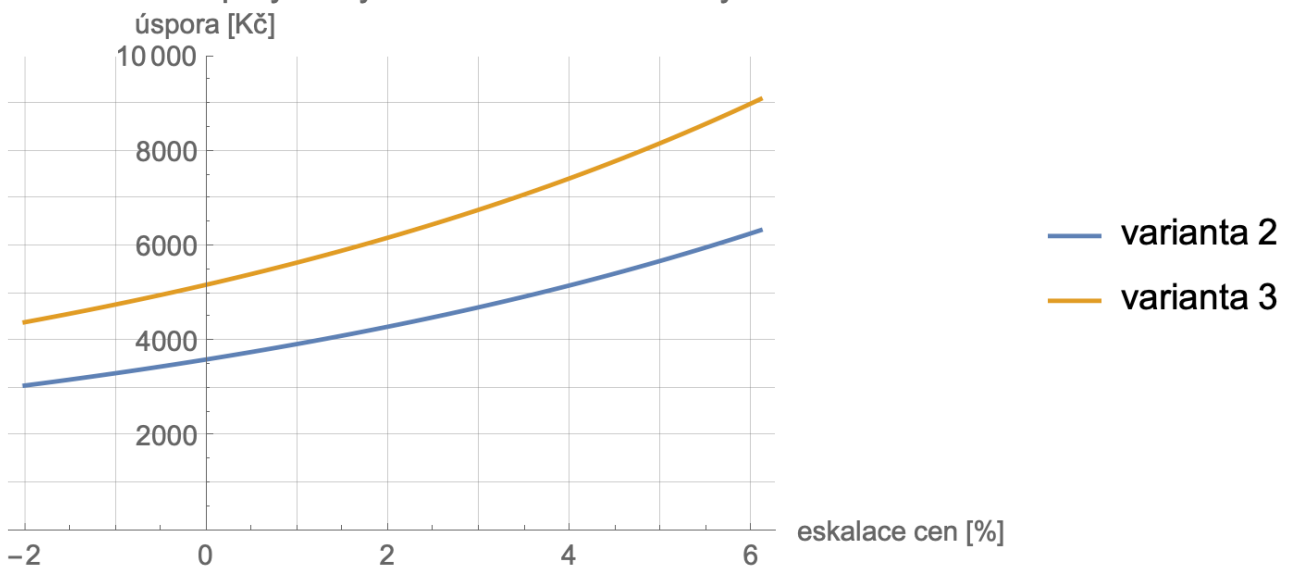
Stejně jako v předchozím článku, i zde se nacházejí dva grafy. První z nich vyjadřuje závislost výše NPV na možné eskalaci cen elektrické energie, druhý poté znázorňuje možnou finanční úsporu za dobu životnosti, pokud by místo dané varianty byla voda v zásobníku ohřívána pomocí varianty optimalizované. Oba grafy se vztahují k jednomu dlouhému dennímu odběru vody.

Závislost NPV na výši eskalace cen elektřiny



Obrázek 5.4. Graf závislosti NPV na výši eskalace ceny elektrické energie pro variantu s jedním dlouhým odběrem ohřáté vody za den. Vypočtené NPV je za celou dobu životnosti tepelného čerpadla (20 let).

Závislost úspory na výši eskalace cen elektřiny



Obrázek 5.5. Graf závislosti úspory finančních prostředků na výši eskalace ceny elektrické energie pro variantu s jedním dlouhým odběrem ohřáté vody za den. Znázorněná úspora představuje obnos peněz, které vlastník ušetří za celou dobu životnosti tepelného čerpadla (20 let) při využívání optimalizovaného ohřevu (varianta 4) oproti ostatním variantám.

Kapitola 6

Závěr

Tato práce se zabývá optimalizací ohřevu vody. Její hlavní idea je, zachovat stávající technické zařízení, a pouze spouštět tepelné čerpadlo v jiný čas, čímž se dosáhne finanční úspory. Nejsou tedy třeba žádné vstupní investice, jediným zásahem do stávajícího systému je nastavení času spouštění tepelného čerpadla v centrální řídicí jednotce.

V teoretické části práce je uveden základní přehled různých typů tepelných čerpadel, včetně jejich výhod a nevýhod, případných omezení a dalších speciálních požadavků k instalaci. Nechybí ani vysvětlení principu fungování tepelného čerpadla a popis jeho základních částí. Následuje představení ukazatelů (COP a SCOP) vyjadřujících účinnost TČ. Kapitola uzavírá přehled aktuálně používaných chladiv a vyjádření jejich vlivu na životní prostředí pomocí ukazatelů ODP a GWP.

Následující kapitola pojednává o možnostech přípravy teplé vody. Nejprve je zde uvedeno dělení podle různých hledisek, přičemž u každého způsobu ohřevu nechybí diskuze jeho výhod a nevýhod, případně typické určení. Následuje technický popis dvou nejpožívanějších variant skladování teplé vody, a sice stratifikačního a homogenního zásobníku. Nakonec je zde uveden přehled aktuálně platných distribučních tarifů elektřiny.

V praktické části této diplomové práce byly v programovacím jazyce Wolfram Language vytvořeny dva modely přípravy teplé vody, pro stratifikační a pro homogenní zásobník. Každý model obsahuje čtyři různé varianty ohřevu: tři běžně se používající a jednu optimalizovanou dle venkovní teploty. U optimalizované varianty ohřevu byl navíc vyvinutý algoritmus, který na základě znalosti průběhu venkovní teploty (např. z předpovědi počasí) a typického odběrového diagramu spočítá časový interval, kdy je optimální ohřívat vodu, aby se tímto procesem spotřebovalo co nejméně elektrické energie. Podrobným popisem a vysvětlením funkce těchto modelů a jednotlivých variant ohřevu se zabývá celá kapitola číslo čtyři.

U následné simulace se v rámci uvažovaných zjednodušení dbalo na to, aby vstupní data co možná nejlépe odpovídala realitě. Byly použity reálné výkonové charakteristiky konkrétního tepelného čerpadla, obsahujícího zásobník teplé vody. Ze serveru `weather.sh.cvut.cz` byl stažen reálný průběh denních teplot za celý rok 2017. I pásma platnosti vysokého a nízkého distribučního tarifu byla určena tak, aby odpovídala všem podmínkám a co nejvíce se blížila realitě. Simulace také proběhla pro dva různé typické denní odběrové diagramy teplé vody. První z nich simuluje běžnou domácnost, kde je teplá voda odebírána nesouvisle ve větším množství, hlavně pro hygienu, vaření a občasnou domácí práci. Druhý denní odběrový diagram obsahuje jeden dlouhý odběr, představující např. výrobní podniky, kde je teplá voda potřeba kontinuálně a v malém množství.

Při simulacích bylo zjištěno, že daný způsob optimalizace má smysl pouze u stratifikačního zásobníku, ze kterého lze bez dalšího ohřevu odebrat téměř tolik litrů ohřáté vody, jako je jeho celková kapacita, a je tak možné zásobník ohřívat pouze jednou denně v ideální čas. U homogenního zásobníku toto bohužel nelze, jelikož již po odebrání přibližně 30 litrů vody klesne teplota v zásobníku pod 50°C , což je bráno jako minimální přípustná teplota odebírané teplé vody, a voda v zásobníku se musí znovu

ohřát. Pro stratifikační zásobník z výsledků simulace vyplývá, že s danou technologií lze optimalizací ušetřit přibližně 10% elektrické energie nutné pro ohřev příslušného množství vody.

Poslední kapitola se zabývá ekonomickým hodnocením. V rámci vstupních předpokladů pro další výpočty jsou zde rozebrány investiční a provozní náklady na bojler a tepelné čerpadlo, a s tím související náklady na elektřinu v různých distribučních tarifech. Je zde vypočítán ekonomický ukazatel NPV pro oba typy denních diagramů odběru v závislosti na výši eskalace cen elektrické energie po dobu životnosti systému. Z těchto výsledků je dále vypočtena možná finanční úspora, kdyby místo příslušné varianty ohřevu byla využita varianta optimalizovaná. Ta představuje stejně jako u ušetřené energie přibližně 10% z celkových finančních nákladů. Ty představují např. u eskalace ve výši 4% ročně přibližně 62 000 - 64 000 Kč (za dobu životnosti 20 let), u optimalizované varianty přibližně 57 000 Kč, možná úspora se tedy v závislosti na původní variantě ohřevu pohybuje okolo 5 000 - 7 500 Kč.

Jak vyplývá z předchozích odstavců, výsledky této práce dokázaly, že původní myšlenka a hlavní idea práce je správná a má smysl se s ní zabývat i v praxi. Finanční úspora 5 000 - 7 500 Kč za dobu 20 let sice nevypadá závratně vysoká, nicméně je třeba si uvědomit, že tato úspora tvoří přibližně 10% nákladů za elektřinu. Pokud by tedy místo zásobníku teplé vody pro rodinný dům, kde se denně odebere 180 litrů, byla tato technologie uvažována např. pro nemocnice, hotely a další aplikace, kde je vysoká spotřeba teplé vody, byla by finanční úspora násobně vyšší. A vstupní investice jsou téměř nulové.

Literatura

- [1] STRAKA, Tomáš. Tepelné čerpadlo - topení budoucnosti. TZB-info [online]. 26.4.2002 [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/966-tepelne-čerpadlo-topeni-budoucnosti>.
- [2] Přehled základních komponent TČ. TZB-info [online]. [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpadla>.
- [3] BUDÍN, Jan. Tepelná čerpadla - princip funkce a rozdělení. OENERGETICE.cz [online]. 26.3.2015 [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/tepelna-čerpadla>.
- [4] KALETA, Ján a Aleš KISZA. Příklad podpískování – příkopová pokládka kolektorů. Instalace GMSW 7 plus pro topení s vyrovnávacím zásobníkem 200 l, kolektorové pole 4 x 120 m PE-GT v příkopovém uložení. In: TZB-info [online]. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpadla/10178-zakladni-zasady-navrhu-plosneho-zemniho-kolektoru-pro-tepelne-čerpadlo-zeme-voda>.
- [5] Kompresory pro tepelná čerpadla. In: Eurosystemy [online]. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://www.eurosystemy.cz/tepelna-čerpadla/novinky/kompresory-pro-tepelna-čerpadla-10/>.
- [6] Elektronický expanzní ventil. In: Master Therm tepelná čerpadla s. r. o. [online]. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://mastertherm.cz/tepelne-čerpadlo/technologie/eev/>.
- [7] Typy tepelných čerpadel. IVT Tepelná čerpadla s.r.o. [online]. [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: <https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/typy-tepelnych-čerpadel>.
- [8] KAPOUN, Michal. Co je to tepelné čerpadlo - základní části, druhy. TZB-info [online]. 30.4.2015 [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpadla/12629-co-je-to-tepelne-čerpadlo-zakladni-casti-druhy>.
- [9] Tepelná čerpadla vzduch-voda. In: HAJMA, s.r.o. [online]. [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <http://www.hajma.eu/sluzby/ekologicke-vytapani/tepelna-čerpadla-opava/vzduch-voda/>.
- [10] Primární okruhy tepelných čerpadel NIBE. In: NIBE [online]. [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <https://www.nibe.cz/tepelna-čerpadla-zeme-voda/primarni-okruhy-tepelnych-čerpadel-zeme-voda>.
- [11] MATUŠKA, Tomáš. Parametry pro hodnocení efektivity tepelných čerpadel: COP a SCOP. TZB-info [online]. 14.9.2015 [cit. 2020-08-30]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpadla/13196-parametry-pro-hodnoceni-efektivita-tepelnych-čerpadel-cop-a-scop>.
- [12] Tepelná čerpadla (TČ) - voda - voda. In: TermoWatt s.r.o. [online]. [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <http://www.termowatt.cz/tepelna-čerpadla/tepelna-čerpadla-voda-voda.aspx>.
- [13] SEDLÁŘ, Jan. Štítkování a ekodesign tepelných čerpadel pro vytápění a kombinovaných tepelných čerpadel. TZB-info [online]. 31.8.2015 [cit. 2020-08-30].

- Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpádkla/13141-stitkovani-a-ekodesign-tepelných-čerpádek-pro-vytapani-a-kombinovaných-tepelných-čerpádek>.
- [14] SEDLÁŘ, Jan. Chladiva – úvod, definice, historie. TZB-info [online]. 28.12.2015 [cit. 2020-09-03]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/13626-chladiva-uvod-definice-historie>.
- [15] STRAKA, Tomáš a Josef HODBOŮ. Tepelná čerpadla a kontroly těsnosti od 1. ledna 2017. TZB-info [online]. 22.11.2016 [cit. 2020-09-03]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/14986-tepelna-čerpádkla-a-kontroly-tesnosti-od-1-ledna-2017>.
- [16] GT ENERGY S.R.O. 90 °C z tepelného čerpadla? Nová technologie EcoCute pro bytové domy i průmysl. TZB-info [online]. 18.6.2015 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/12861-90-c-z-tepelného-čerpádkla-nova-technologie-ecocute-pro-bytove-domy-i-prumysl>.
- [17] Vysokoteplotní tepelná čerpadla pro ohřev vody. GT Energy s.r.o. [online]. [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://www.gt-energy.cz/cz/vysokoteplotni-tepelna-čerpádkla-pro-ohrev-vody>.
- [18] VAVŘIČKA, Roman a Matěj MAZUR. Příprava teplé vody v obytných budovách. TZB-info [online]. 31.10.2016 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/14864-priprava-teple-vody-v-obytných-budovách>.
- [19] Příprava teplé vody. TZB-info [online]. [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody>.
- [20] DUFKA, Jaroslav. Ohřev vody, aneb příprava teplé vody, III. díl. TZB-info [online]. 20.8.2018 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/17781-ohrev-vody-aneb-priprava-teple-vody-iii-dil>.
- [21] ŠAFRÁNEK, David. Přímý vs. nepřímý ohřev vody: Výhody a nevýhody? STIEBEL ELTRON [online]. 9.9.2020 [cit. 2020-09-23]. Dostupné z: <https://www.stiebel-eltron.cz/cs/o-nas/zajimave-clanky/zajimave-clanky/primy-vs-neprimy-ohrev-vody-vyhody-a-nevyhody.html>.
- [22] VRÁNA, Jakub. Rozvody teplé vody - I. TZB-info [online]. 13.7.2009 [cit. 2020-09-23]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/5775-rozvody-teple-vody-i>.
- [23] Bojler – zásobník na ohřev teplé užitkové vody (vše, co potřebujete vědět). Viessmann [online]. [cit. 2020-09-23]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/zasobnik-na-ohrev-teple-uzitkove-vody.html>.
- [24] Fotovoltaické kombinované ohříváče vody. In: DRAŽICE [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <http://lang.dzd.cz/cs/uvod/archiv-aktualit/105-sortiment/fotovoltaicke-ohrivace/238-fotovoltaicke-ohrivace-kombinovane-okf>.
- [25] KRAMOLIŠ, Petr. Zásobníky tepla. TZB-info [online]. 18.5.2004 [cit. 2020-09-23]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>.
- [26] KRAFČÍK, Milan a Jana PERÁČKOVÁ. Stratifikační akumulární zásobníky. ASB [online]. 9.6.2017 [cit. 2020-09-23]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/zdravotni-technika/stratifikacni-akumulacni-zasobniky>.
- [27] Nejvyšší komfort přípravy teplé vody pro kondenzační kotle CerapurModul firmy Junkers. In: TZB-info [online]. 15.7.2010 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/6641-nejvyssi-komfort-pripravy-teple-vody-pro-kondenzacni-kotle-cerapurmodul-firmy-junkers>.

- [28] Přehled distribučních sazeb. SKUPINA ČEZ [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/vsechny-clanky/prehled-distribucnich-sazeb-elektriny-93426>.
- [29] HAMALČÍKOVÁ, Kamila. Průvodce distribučními sazbami elektřiny: Jak ovlivňují cenu za kWh? Elektřina.cz [online]. 14.4.2020 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/distribucni-sazby-elektriny-2020>.
- [30] Ceník: Elektřina. SKUPINA ČEZ [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina-2021/moo/web-new-cenik-elektrina-dobu-neurcitou-moo-2020-12-cezdi.pdf>.
- [31] Podmínky distribučních sazeb ČEZ Distribuce. ČEZ Distribuce [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/podminky-distribucnich-sazeb-2021-domacnosti.pdf>.
- [32] PÁ SMA PLATNOSTI VYSOKÉHO TARIFU (VT) A NÍZKÉHO TARIFU (NT). ČEZ Distribuce [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/cezdistribuce_pasmaplatnostintavt_prubehove_mereni.pdf.

Příloha A

Použité zkratky, obsah příloženého CD

A.1 Zkratky

V textu práce byly použity následující zkratky:

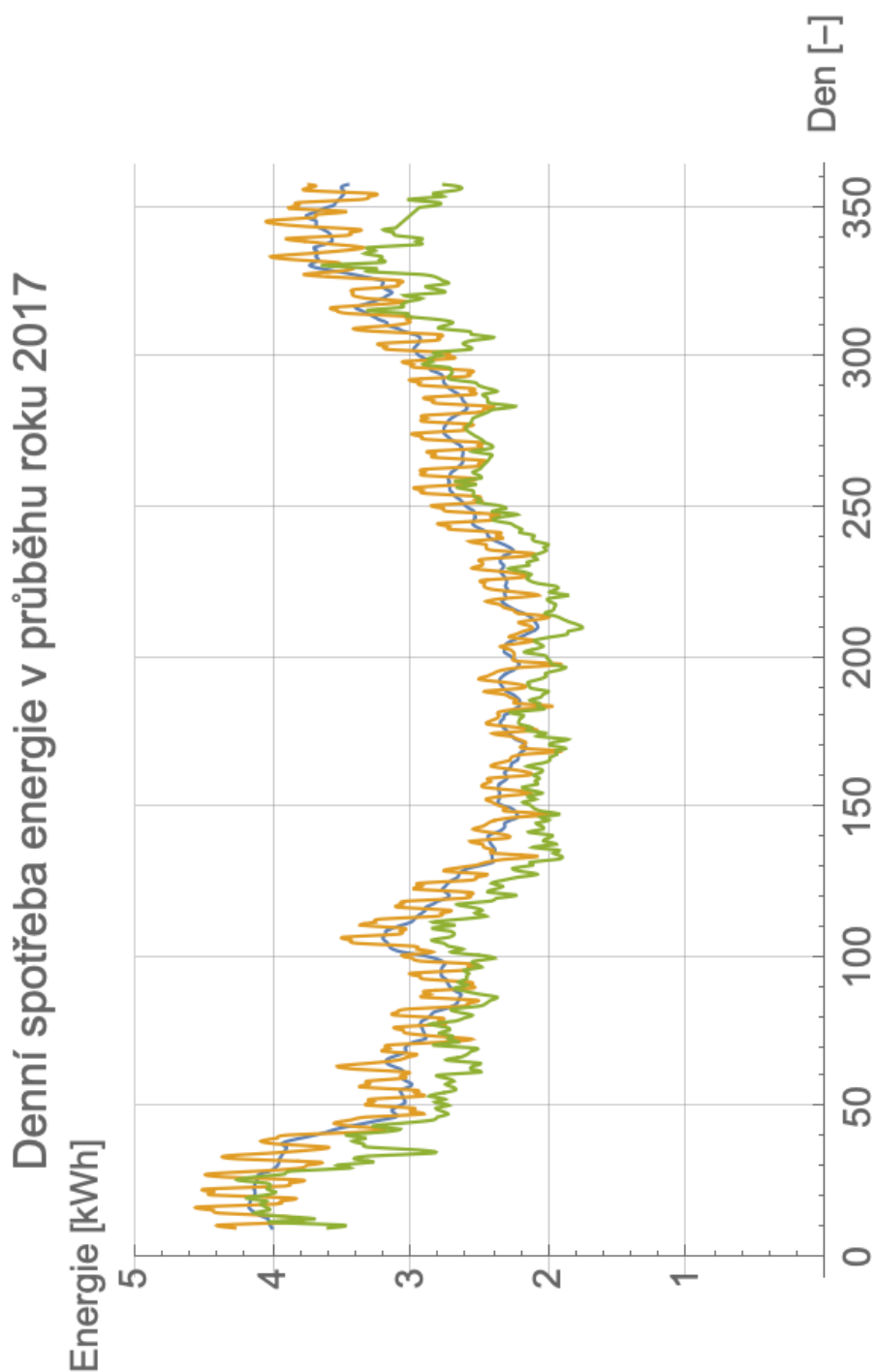
| | |
|-----------|-------------------------------------|
| PE trubky | polyethylenové trubky |
| TČ | tepelné čerpadlo |
| COP | coefficient of performance |
| SCOP | seasonal coefficient of performance |
| ODP | ozone depletion potencial |
| GWP | global warming potencial |
| ČSN | České technické normy |
| EN | Evropské normy |
| CF | cashflow |
| NPV | net present value |
| NT | nízký tarif |
| VT | vysoký tarif |
| POZE | podporované zdroje energie |
| COVID-19 | coronavirus disease 2019 |
| JE | jaderná elektrárna |

A.2 Obsah příloženého CD

- diplomova_prace.pdf
- stratifikacni_zasobnik.pdf
- homogenni_zasobnik.pdf
- zhodnoceni.pdf
- ekonomika.pdf

Příloha B

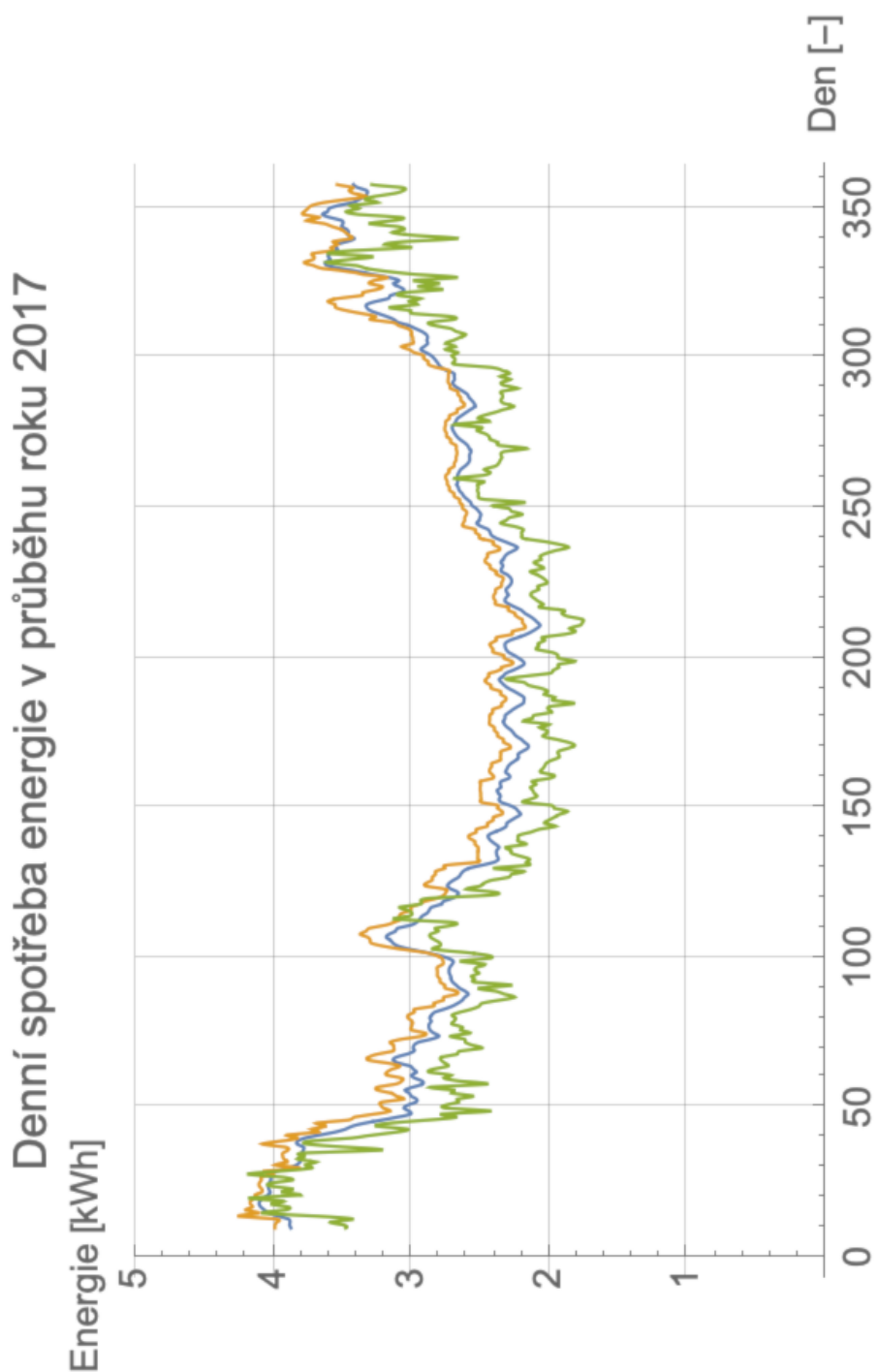
Graf spotřeby energie pro více denních odběrů



Obrázek B.1. Graf znázorňující spotřebu energie každého dne roku 2017 pro tři různé varianty ohřevu (varianta 2- modrá, varianta 3- žlutá, varianta 4- zelená čára).

Příloha C

Graf spotřeby energie pro jeden denní odběr



Obrázek C.2. Graf znázorňující spotřebu energie každého dne roku 2017 pro tři různé varianty ohřevu (varianta 2- modrá, varianta 3- žlutá, varianta 4- zelená čára).