



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ**

Diplomová práce

Prediktivní řízení tepelného čerpadla

Vypracovala: Karolína Indruchová

Studijní program: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

Rok: 2021/2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Indruchová** Jméno: **Karolína** Osobní číslo: **439594**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Prediktivní řízení tepelného čerpadla

Název diplomové práce anglicky:

Model based predictive control of a heat pump system

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou tepelných čerpadel a vytápění obytných objektů.
2. Pro zvolený idealizovaný systém vytvořte matematický model tepelného čerpadla a otopného systému v monovalentním provozu, tepelnou setrvačnost objektu zanedbejte.
3. Pro zvolený systém vytvořte matematický model tepelného čerpadla a otopného systému v bivalentním provozu; uvažujte variantu s elektrickým přívěvem výstupního média a s přímotopy v objektu, tepelnou setrvačnost objektu zanedbejte.
4. Uvažujte systém s akumulací tepelné energie a naznačte možnosti úspor vhodným spínáním tepelného čerpadla podle predikce venkovní teploty.
5. Určete energetickou náročnost vytápění zvolenými systémy a finanční náklady.
6. Získané výsledky kriticky zhodnoťte a formulujte obecná doporučení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Wolfram, S.: The Mathematica Book, Cambridge University Press, 1999
- [2] ČSN 06 0210 Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění
- [3] Hlavatý, J.: Tepelná pohoda nebytových prostor (diplomová práce ČVUT-FEL 2002)
- [4] Kuboth, S., Weith, T., Heberle, F., Welzl, M., Brüggemann, D.: Experimental Long-Term Investigation of Model Predictive Heat Pump Control in Residential Buildings with Photovoltaic Power Generation; Energies 2020, 13, 6016;
- [5] Pichlera, M. F., Heinza, A., Rieberera, R.: Model Predictive Heat Pump and Building Control to maximize PV-power on Site Use; 12th IEA Heat Pump Conference00 (2017) O.2.4.1

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: **11.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2022/2023

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na tepelné čerpadla, jejich využití a zlepšování jejich energetické efektivity. Teoretická část práce nás seznamuje s problematikou tepelných čerpadel a jejich vyhodnocováním, základní charakteristikou akumulace tepelné energie v otopném systému s tepelným čerpadlem a problematikou vytápění objektů. V praktické části diplomové práce nalezneme návrhy matematických modelů otopných soustav s využitím tepelného čerpadla, otopný systém s tepelným čerpadlem a akumulční nádrže s možností prediktivního řízení. Součástí práce je také technické a energetické vyhodnocení modelů.

Klíčová slova

tepelné čerpadlo, topný faktor, akumulace tepelné energie, vytápění, matematický model otopného systému, prediktivní řízení

Annotation

The diploma thesis deals with the issue of heat pumps, their using for the system of heating and optimization of energy efficiency. In the theoretical part of the thesis are described various types of these devices, the principles of heat accumulation in the heating system and project's standarts of the heating systems. The practical part of the diploma thesis there are presented the proposals for mathematical models of heating systems using a heat pump, a heating system with a heat pump and storage tanks with the possibility of predictive control. Part of the thesis describes technical and energy evaluation of mathematical models.

Keywords

Heat pump, Coefficient of performance, Heat energy accumulation, Heating, Mathematical model of the heating system, Predictive control

Bibliografická citace

INDRUCHOVÁ, Karolína. *Prediktivní řízení tepelného čerpadla*. Praha, 2022. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.

Bibliographic citation

INDRUCHOVÁ, Karolína. *Model based predictive control of a heat pump system*. Prague, 2022. Diploma thesis. Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurement Thesis supervisor doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za odborné a trpělivé vedení, poskytnutí cenných rad během zpracování této diplomové práce.

V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a přátelům za podporu během studií.

Prohlášení

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

V Praze dne 20. května 2022

Bc. Karolína Indruchová

Obsah

Úvod	15
1 Problematika tepelných čerpadel	17
1.1 Pracovní cyklus tepelného čerpadla	17
1.2 Princip tepelných čerpadel	18
1.3 Základní rozdělení tepelných čerpadel	19
1.3.1 Země – voda	19
1.3.2 Voda – voda	20
1.3.3 Vzduch – voda	20
1.4 Základní části tepelných čerpadel	21
1.4.1 Výparník	21
1.4.2 Kompresor	21
1.4.3 Kondenzátor	22
1.4.4 Expanzní ventil	23
1.5 Chladiva	23
1.5.1 Chladivo R410a	24
1.5.2 Chladivo R407c	24
1.5.3 Chladivo R134a	24
1.5.4 Chladivo R32	24
1.6 Způsoby provozu tepelných čerpadel	25
1.6.1 Bivalentní provoz tepelného čerpadla	25
1.7 Topná soustava s tepelným čerpadlem	26
1.8 Ekvitermní regulace tepelného čerpadla	27
1.9 Akumulace tepla	28
1.9.1 Akumulace citelného tepla	28
1.9.2 Ohřev teplé užitkové vody	29
1.9.3 Akumulace tepelné energie a tepelné čerpadlo	29
1.9.4 Otopný systém tepelného čerpadla s akumulací tepelné energie s možným prediktivním spínáním tepelného čerpadla dle venkovní teploty	31
2 Hodnocení efektivity tepelných čerpadel	33
2.1 Topný faktor COP	33
2.2 Sezónní topný faktor SCOP	33
2.3 Značka kvality EHPA	34

3	Problematika vytápění obytných objektů	36
3.1	Podklady pro výpočet tepelných ztrát.....	36
3.2	Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN 06 0210	36
3.2.1	Výpočet celkových ztrát.....	36
3.2.2	Výpočet tepelných ztrát prostupem Q_p	37
3.2.3	Výpočet tepelných ztrát větráním Q_v	37
3.3	Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN EN 12831.....	38
3.3.1	Celková návrhová tepelná ztráta vytápěného prostoru.....	38
3.3.2	Návrhová tepelná ztráta tepla vytápěného prostoru	38
3.3.3	Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy.....	39
3.3.4	Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do nevytápěného prostoru ³⁹	
3.3.5	Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do zeminy.....	39
3.3.6	Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do sousedního prostoru vytápěného na jinou teplotu.....	40
3.3.7	Návrhová tepelná ztráta větráním	41
3.3.8	Přirozené větrání	41
3.3.9	Nucené větrání	41
3.3.10	Tepelný zátopový výkon	42
3.3.11	Návrhový tepelný výkon	42
4	Ztráty objektu a parametry topné soustavy pro matematický model	43
4.1	Idealizovaný objekt	43
4.1.1	Fiktivní objekt dle projektu 2	43
4.2	Výpočtová venková teplota t_e	43
4.3	Výpočtová vnitřní teplota t_i	43
4.4	Závislost potřebného topného výkonu na venkové teplotě.....	44
4.5	Parametry objektu a otopné soustavy	45
4.6	Data pro vyhodnocení.....	45
5	Matematické modely tepelného čerpadla a otopného systému	46
5.1	Typ použitého tepelného čerpadla vzduch-voda	46
5.2	Bivalentní provoz tepelného čerpadla se sériově napojeným elektrokotlem	47
5.2.1	Vyhodnocení dle matematického modelu bivalentního systému tepelného čerpadla s elektrokotlem z Wolfram Mathematica 13.0	49
5.3	Bivalentní provoz tepelného čerpadla s přímotopy uvnitř objektu.....	50

5.3.1	Vyhodnocení dle matematického modelu bivalentního systému tepelného čerpadla s přímotopy z Wolfram Mathematica 13.0	52
5.4	Monovalentní provoz tepelného čerpadla vzduch – voda	53
5.4.1	Vyhodnocení dle matematického modelu monovalentního systému tepelného čerpadla z Wolfram Mathematica 13.0	55
5.5	Jednoduchý otopný systém s akumulační nádrží	57
6	Vyhodnocení základních modelů otopných systémů s tepelným čerpadlem vzduch voda	58
6.1	Technické a energetické vyhodnocení	58
6.2	Finanční zhodnocení modelů systémů tepelného čerpadla.....	59
6.2.1	Citlivostní analýza růstu cen energie	61
7	Optimalizace otopného systému tepelného čerpadla s akumulací tepelné energie za pomoci prediktivního řízení dle venkovní teploty	62
7.1	Zjednodušený princip prediktivního řízení tepelného čerpadla vzduch-voda se zařazenou akumulační nádrží.....	62
7.2	Matematický popis systému	64
7.2.1	Základní rovnice popisující systém tepelného čerpadla s akumulační nádrží.....	64
7.2.2	Odvození rovnic pro matematický model.....	64
7.2.3	Omezující funkce matematického modelu	65
7.2.4	Prediktivní řízení	65
7.3	Vyhodnocení prediktivního systému.....	68
7.3.1	Predikované spínání pro denní spotřeby akumulace tepla.....	69
	Závěr	73
	Přílohy.....	75
	Seznam použitých zkratk	77
	Seznam obrázků.....	79
	Seznam tabulek.....	81
	Seznam grafů	83
	Bibliografie.....	85

Úvod

V dnešní době je, je čím dál větší tlak na ekologičnost a energetické úspory objektů. Vyplývá to z negativních vlivů hromadění skleníkových plynů v atmosféře v závislosti na použití fosilních paliv. Takto nahrazené fosilní zdroje energie obnovitelnými zdroji jsou nejen trend v oblasti energetiky, ale také naléhavost z důvodu klimatické situace. Díky použití obnovitelných zdrojů může uživatel při dnešních cenách za elektřinu či plyn výrazně ušetřit náklady na provoz vytápění. Při správném návrhu a využití obnovitelných či alternativních zdrojů vytápění se může objekt stát soběstačným či částečně soběstačným během části roku.

Proto při volbě vytápění objektu se v dnešní době čím dál více uvažuje o vytápění pomocí tepelného čerpadla. Vytápění tepelnými čerpadly se v zahraničí prosazuje již řadu let a tato zařízení jsou na velmi dobré technické úrovni. Správně dimenzované tepelné čerpadlo na konkrétním objektu snižuje náklady na provoz vytápění.

V této práci se tedy budeme zabývat tepelnými čerpadly vzduch-voda a jejich přídatnými zdroji. V úvodní části práce bude čtenář seznámen se základními principy a informacemi tepelného čerpadla, používaných systémech a základních částech, ze kterých je konstruováno. Bude vysvětlen základní princip funkce prediktivního řízení tepelného čerpadla dle venkovní teploty. Dle platných norem bude vysvětlena problematika vytápění objektů.

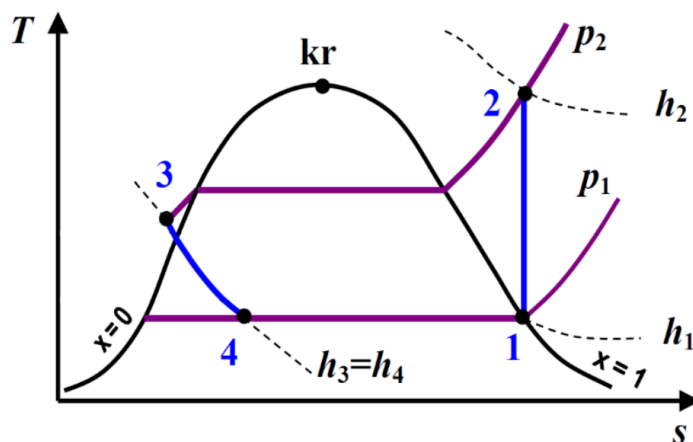
Všechny tyto teoretické informace budou použity v praktické části práce, kde budou navrženy matematické modely pro tři různé způsoby provozu tepelného čerpadla zvoleného systému vzduch – voda a pro konkrétní objekt. Díky tomuto matematickému seznámení se pokusíme, co nejjednodušeji nasimulovat princip prediktivního řízení v systému tepelného čerpadla vzduch-voda se zařazeným akumulacním zásobníkem. Na základě výsledků takto vytvořených matematických systémů budeme schopni vyhodnotit technickou, energetickou a ekonomickou náročnost systémů. K řešení matematických modelů provozů tepelného čerpadla bude využit program Wolfram Mathematica 13.0.

1 Problematika tepelných čerpadel

Cílem funkce tepelného čerpadla je odebrat energii z oblasti s nízkou teplotní hladinou a předat jí do oblasti s vysokou teplotní hladinou. Z druhého zákona termodynamiky vyplývá, že toto není samovolně možno, tudíž pro dosažení přenosu energie je nutno dodávat systému práci.

1.1 Pracovní cyklus tepelného čerpadla

Skutečné procesy v oběhu tepelného čerpadla nejlépe vyjadřuje obrácený Rankin-Clausiusův cyklus. Chladicí oběh transformuje dodávanou práci na teplo, resp. spotřebovává práci za účelem změny stavových veličin pracovní látky. Teoretický pracovní cyklus tepelného čerpadla je znázorněn v T-s (teplota-entropie) diagramu na obr. 1. Páry chladiva jsou v kompresoru izoentropicky stlačovány ze stavu syté páry 1 na stav přehřáté páry o vyšší teplotě 2. V kondenzátoru se pracovní plyn ochladí na mez sytosti plynu a následně zkondenzuje až do kapalného stavu 3, přičemž je chladivu izobaricky odváděno teplo. V expanzním ventilu dochází k izoentalpickému škrcení chladiva na nižší tlak a teplotu, čímž se pracovní látka dostane do stavu mokré páry 4. Ve výparníku probíhá vypařování pracovní tekutiny do stavu syté páry 1 v důsledku přenosu tepla z ochlazované látky. (1)

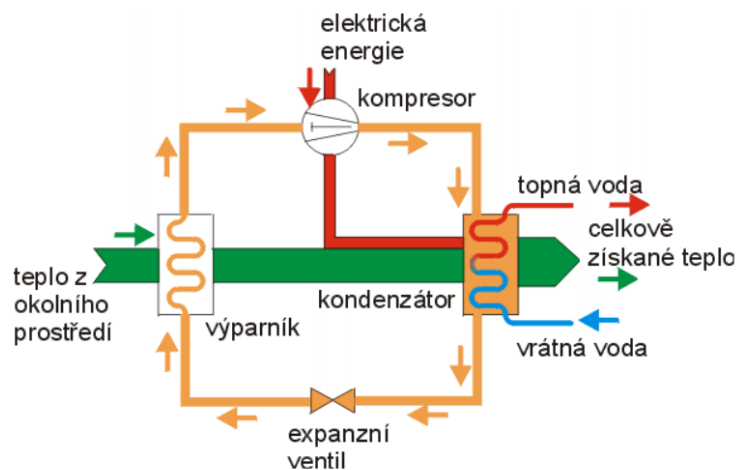


Obrázek 1 - Pracovní cyklus v T-s diagramu (1)

1.2 Princip tepelných čerpadel

Tepelné čerpadlo využívá až 70% přírodní energie. Tepelné čerpadlo je zařízení, které umí využívat nízkopotenciální energii. Samotné zdroje nízkopotenciálního tepla mohou být různé. Podle využívaného zdroje nízkopotenciálního tepla můžeme tepelná čerpadla rozdělit na tři základní systémy: země – voda, voda – voda, vzduch – voda. (2) Tato odebraná energie ze země, vody nebo vzduchu byla ohřívána energetickým potenciálem slunce (obnovitelná energie) a je díky čerpadlu transformována na vyšší energetickou úroveň, abychom obdrželi potřebnou energii pro vytápění objektu. Jedná se tedy o alternativní obnovitelný zdroj energie.

Tepelná čerpadla využívají teplo z okolního prostředí, pomocí kruhového děje zvyšují jeho teplotu a zajišťují využitelnost k vytápění. Teplo z okolí je odváděno pomocí výměníku tepla (primární strana), kterým proudí nemrznoucí kapalina. Nemrznoucí kapalina je vždy chladnější než teplota okolního prostředí a díky tomu, může přijímat teplo, rozhodující je vždy rozdíl teplot. Odebrané teplo se předává pomocí termostatického expanzního ventilu do okruhu technologie s chladivem. Tlak za expanzním ventilem je nižší než venkovní teplota, a proto se chladivo rychle odpařuje. Chladivo má schopnost odpařování již při velmi nízkých teplotách. Plyn přijme odebrané teplo a nasaje jej kompresor. Kompresor chladicí medium v plynné podobě nasaje, silně stlačí a tím stoupne jeho teplota. Chladivo v plynném stavu je velmi horké a je možné jeho teplo využít v topném okruhu. Horký plyn je veden přes kondenzátor (sekundární strana), kde zkapalní a teplo je odebráno topným systémem. Pro jeho znovupoužití je potřeba jej výrazně ochladit, pokračuje přes expanzní ventil, kde se redukuje tlak chladiva a tím klesne i jeho teplota, a je znovu připraveno přijímat teplo a cyklus se může opakovat.



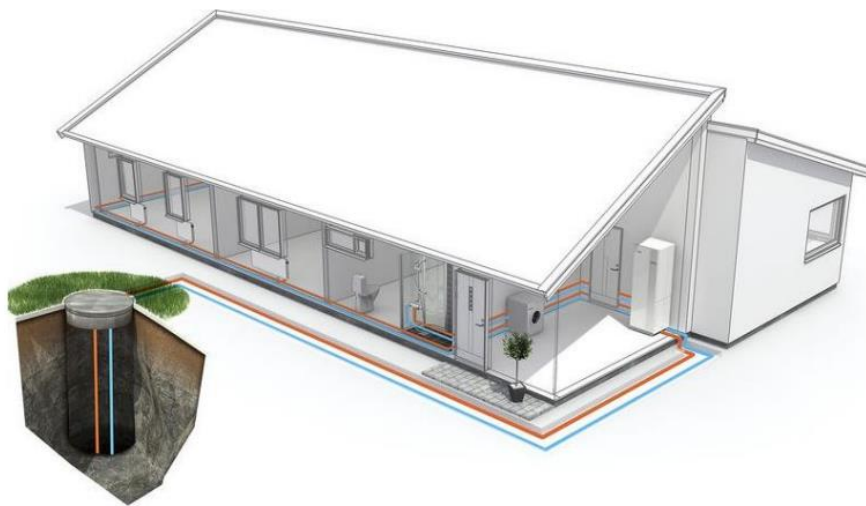
Obrázek 2 - Princip kompresorového tepelného čerpadla (3)

1.3 Základní rozdělení tepelných čerpadel

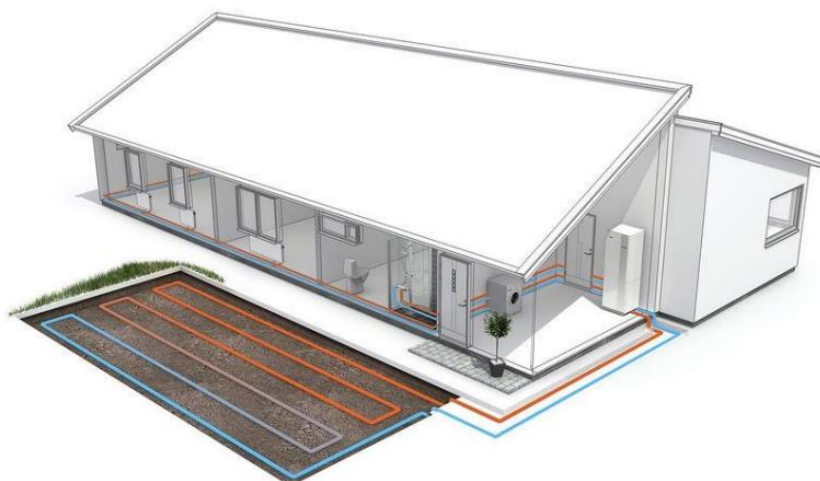
1.3.1 Země – voda

System tepelného čerpadla země-voda má dva typy ukládání – horizontální a vertikální. Při horizontálním uložení systému nese s sebou technologie nevýhodu – velký pozemek a jeho znehodnocení pro další výstavbu. Vertikální uložení systému je realizováno vrtem a případná závada je v budoucnu těžko opravitelná. Obě řešení systému nám kvůli pracím potřebných k výstavbě technologie výrazně zvyšují cenu.

V primární části okruhu jsou výparníky uzpůsobeny pro uložení do země. V sekundární části je teplo předáváno do vody. Výparník tvořen deskovým výměníkem, do něj je přiváděno chladivo s vlastnostmi nemrznoucí směsi, které odebírá nízkopotenciální energii zemině, která je získána z půdy díky zemním kolektorům (horizontální uložení) nebo zemní sondou (vertikální uložení – vrt). Tento systém tepelného čerpadla zaručuje stálý výkon systému jelikož energie získaná ze zeminy je proměnná minimálně.



Obrázek 3 - Tepelné čerpadlo (vrt) typu země – voda (4)

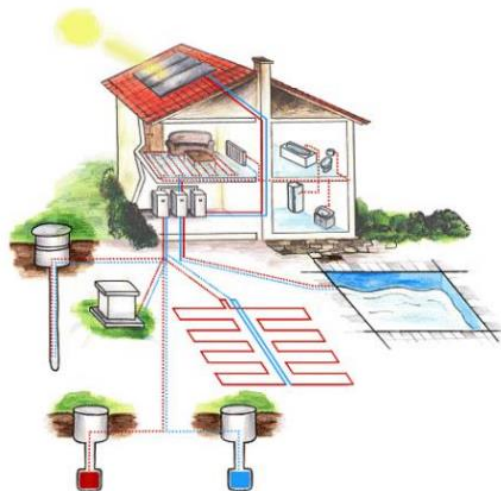


Obrázek 4 - Tepelné čerpadlo (plošný kolektor) typu země – voda (4)

1.3.2 Voda – voda

Systém využívá nízkopotencionální teplo ze „spodní“ nebo povrchové vody, kdy její teplota nesmí klesnout pod $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je třeba přečerpávat určité množství vody za hodinu pro zachování správné funkčnosti systému.

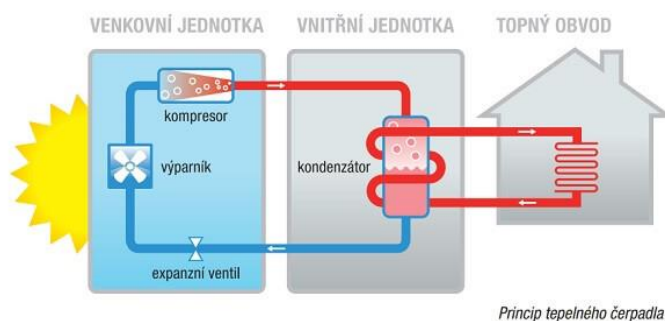
Podzemní voda, která je využita v systému, si během roku udržuje stálost teploty. Teplota se pohybuje mezi $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky této vlastnosti je topný faktor a výkon tepelného čerpadla po celý rok příznivý. Bohužel tato varianta je během přípravné stavební fáze velmi nákladná kvůli vrtům studny, který je hlubší než 10 metrů.



Obrázek 5 - Tepelné čerpadlo typu voda -voda (5)

1.3.3 Vzduch – voda

Nízkopotenciální zdroj tepla tohoto systému je vzduch. Díky tomu, že je vzduch všude přítomný, je tato technologie výhodná. Další výhodou této technologie spočívá v tom, že není potřeba razantních stavebních úprav během její instalace. V primárním okruhu nám tepelná energie vzduchu dodává energii do sekundárního okruhu – vody. Vzduch jako zdroj tepla má však tu nevýhodu, že jeho teplota se mění v závislosti na ročním období a na počasí, což má negativní vliv na provozní parametry tepelného čerpadla. Když je vzduch nejchladnější, je zapotřebí na vytápění tepla nejvíce. S klesající teplotou okolního vzduchu se snižuje topný faktor. Při návrhu je také nutno brát v úvahu hlučnost a odvod kondenzátu.



Princip tepelného čerpadla

Obrázek 6 - Tepelné čerpadlo typu vzduch - voda (6)

1.4 Základní části tepelných čerpadel

1.4.1 Výparník

Ve výparníku dochází k předání odebraného tepla kapalnému chladivu. Jako chladivo se používají látky s nízkou teplotou varu. Příkladem mohou být fluorované uhlovodíky, mezi něž patří R134a, R152a, R143a, R407C, R404A a jiné. Samotný výparník je přitom zhotoven buď jako letovaná deska nebo jako trubkový žebrovaný (měděné potrubí, hliníková žebra). (7)



Obrázek 7 - Lamelový výměník tepla (1)

1.4.2 Kompresor

V kompresoru dochází ke zvýšení tlaku odpařeného chladiva z tlaku odpovídajícímu výparné teplotě chladiva na tlak odpovídající kondenzační teplotě v kondenzátoru. Kompresor je nejčastěji poháněn elektrickou energií, která je po odečtení ztrát kompresoru uložena v chladícím médiu. V současnosti se nejčastěji používají rotační a pístové kompresory. Aby došlo k zabránění úniku chladiva do atmosféry přes spojovací těsnění, je kompresor společně s elektrickým motorem, jež ho pohání, uložen v uzavřené nádobě (tzv. hermetický kompresor). (7)

1.4.2.1 Typy kompresorů

Kompresor je jedna z nejdůležitějších částí tepelného čerpadla, je spolu s elektrickým motorem uložen v uzavřené ocelové nádobě – hermetický kompresor.

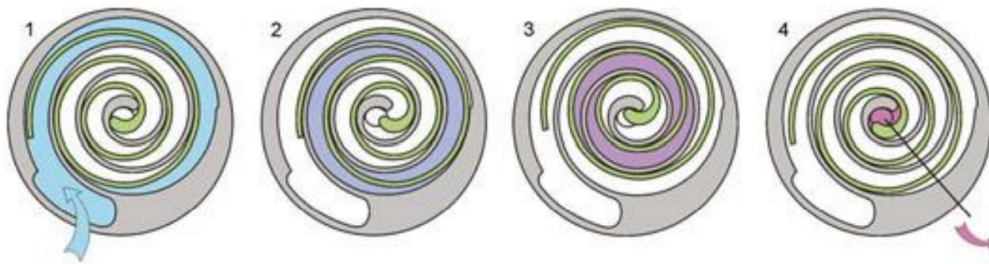
Hermetický pístový kompresor - V začátcích tepelných čerpadel se jednalo o nejrozšířenější typ kompresoru. Teď jej najdeme hlavně ve všech chladničkách. Kompresor stlačí nasávanou pracovní látku z tlaku sacího na konečný tlak při jednom pracovním zdvihu a v jedné pracovní komoře.

Šroubový kompresor – Používá se u tepelných čerpadel s vysokými výkony. Má dva šroubovitě rotory s tvary „samička“ a „sameček“, které se po sobě odvalují.

Rotační kompresor – Hlavní použití v malých klimatizačních jednotkách a jsou vyráběny pro menší výkony. Jedná se o rotující píst kruhového tvaru umístěného v kruhové komoře. V jednom místě je těsnicí destička, která se podle polohy pístu vysouvá a zasouvá a odděluje tak prostor sání a výtlačku. Píst může být upevněn excentricky na hřídeli a

v kruhové komoře rotuje, nebo rotuje kruhový excentr uložený v kruhovém pístu a ten se po vnitřní stěně komory odvaluje. (8)

Hermetický spirálový kompresor scroll - Skládá se ze dvou spirál, jež jsou vloženy do sebe, přičemž jedna z nich je pevná a druhá excentricky krouží. Tím se mezi spirálami vytváří plynové kapsy, které se pohybují směrem ke středu spirály a zmenšují svůj objem, čímž dochází ke stlačování par chladiva a zvyšování jejich teploty. Páry jsou nasávány na obvodu spirály (1) a vystupují výfukovým otvorem ve středu (4). Spirály je nutné nepřetržitě mazat, aby nedocházelo k úniku chladiva. Celý proces je znázorněn na obr. 7. Tento kompresor patří mezi nejčastěji používané spolu s dvojité rotačním kompresorem. (1)



Obrázek 8 - Znárodnění principu funkce kompresoru typu scroll (1)

1.4.3 Kondenzátor

V kondenzátoru předává chladicí médium teplo do otopné soustavy. Celý děj probíhá při vysoké teplotě a tlaku. Kondenzátory jsou podobně jako výparníky zhotovené buď jako letované desky nebo jako trubkové. (7)



Obrázek 9 - Deskové výměníky tepla (1)

1.4.4 Expanzní ventil

Expanzní ventil je redukční ventil, který zajišťuje snížení tlaku kondenzátu, čímž dochází také k dalšímu snížení teploty. Chladivo poté pokračuje opět do výparníku. Expanzní ventily jsou v tepelném čerpadle řízeny buď termostaticky nebo elektronicky. (7)



Obrázek 10 - Elektronický expanzní ventil (Carel) (1)

1.5 Chladiva

Chladivo je pracovní látka v systému, která nese energii a která cirkuluje v chladivovém okruhu systému. Pro systém tepelného čerpadla uvedeme nejčastěji používaná chladiva. Tyto chladiva mohou být čisté jednosložkové sloučeniny, nebo směsi dvou a více sloučenin. Označení chladiv: „R“ z anglického slova „refrigerant“.

Na základě jejich fyzikálních vlastností je můžeme rozdělit do dvou skupin:

Azeotropní chladiva - Chovají se jako čisté kapaliny a během fázové přeměny z páry na kapalinu se složení par a kapaliny nemění. Azeotropní chladivo: R22, R290; Azeotropní směs: R502, R507.

Zeotropní chladiva - Směsi 2 až 4 druhů chladiv, které mají během fázové přeměny z páry na kapalinu proměnné složení, jednotlivé složky zeotropních směsí mají tedy rozdílné teploty vypařování a kondenzace (tzv. teplotní skluz). Zeotropní chladivo: R407a. (8)

Chladiva a jejich plyny a páry jsou regulované a hlídané dle koeficientů ODP a GWP.

ODP (Ozone Depletion Potential) - Koeficient (relativní číslo), který stanovuje, jaký vliv má na poškozování ozónové vrstvy Země. Koeficient ODP je stanoven jako 1. Čím je poměrné číslo látky menší, tím je vliv na poškozování ozónové vrstvy nižší.

GWP (Global Warming Potential) – Koeficient, který udává vliv látek na skleníkový efekt. Udává se také počet let vlivu, číslo je vztahováno k CO₂/100let, kde je GWP = 1. Vyšší číslo znamená negativní vliv. (8)

Chladiva dělíme také dle jejich chemického složení na skupiny CFC, HCFC, HCF a HC. "

Dle tabulky 1 specifikujeme nejčastěji používaná chladiva v systému tepelného čerpadla. Jedná se o chladiva ze skupiny látek HFC. Skupina chladiv HFC nemá v molekule atomy chloru, jen fluor. Koeficient ODP = 0, ale mají vysoký koeficient GWP. (8)

Chladivo	Chemický vzorec, příp. hmotnostní složení (%)	Skupina	ODP	GWP
R410A	R32/R125 (50%/50%)	HFC	0	2088
R407C	R32/R125/R134a (23/25/52)	HFC	0	1774
R134a	$C_2H_2F_4$	HFC	0	1430
R32	CH_2F_2	HFC	0	675

Tabulka 1 - Nejčastěji používaná chladiva v tepelných čerpadlech

1.5.1 Chladivo R410a

Jde o téměř azeotropní směs, kdy máme směs chladiv R32/R125 (50/50%). Používá se pouze s olejem POE. Bod varu při atmosférickém tlaku $-51,6^{\circ}C$, ODP = 0,00, GWP = 2340, nehořlavé, nevýbušné, nejedovaté, potřeba vyšších tlaků – až 4MPa (tzn. pro modifikované kompresory a kondenzátory pro vyšší provozní tlaky). (8)

1.5.2 Chladivo R407c

Jde o směs chladiv R32/R125/R134a (23/25/52%). Stabilní látka, GWP = 1774. Bod varu při atmosférickém tlaku $-43,9^{\circ}C$. Pro životní prostředí má příznivější dopad, než je tomu u chladiva R410a. (9) (10)

1.5.3 Chladivo R134a

Nejvyužívanější chladivo, které je na bázi tetrafluoroethanu, GWP = 1430, bod varu - $26,3^{\circ}C$ při 1013 mbar, nízká hustota v kapalně formě, vysoká hustota v plynné formě, kritická teplota $101,1^{\circ}C$, kritický tlak 40,6 bar, bezbarvý plyn se slabým éterickým zápachem. (10)

1.5.4 Chladivo R32

Nejekologičtější varianta chladiva, které je na bázi difluormethanu CH_2F_2 . GWP = 675, s touto nízkou hodnotou koeficientu je bezpečné a udržitelné, chladivo je energeticky účinnější s lepší schopností přenosu tepla. (9)

1.6 Způsoby provozu tepelných čerpadel

Podle způsobu práce tepelného čerpadla se rozlišují následující provozové režimy:

Monovalentní provoz – Tepelné čerpadlo je v objektu jediným vytápěcím zařízením sloužícím pro vytápění, případně k přípravě teplé užitkové vody.

Monoenergetický provoz - Tento systém nevyžaduje žádné další vytápěcí zařízení. Od určité venkovní teploty, kdy již výkon samotného tepelného čerpadla nestačí, se připne přídatný elektrický ohřev.

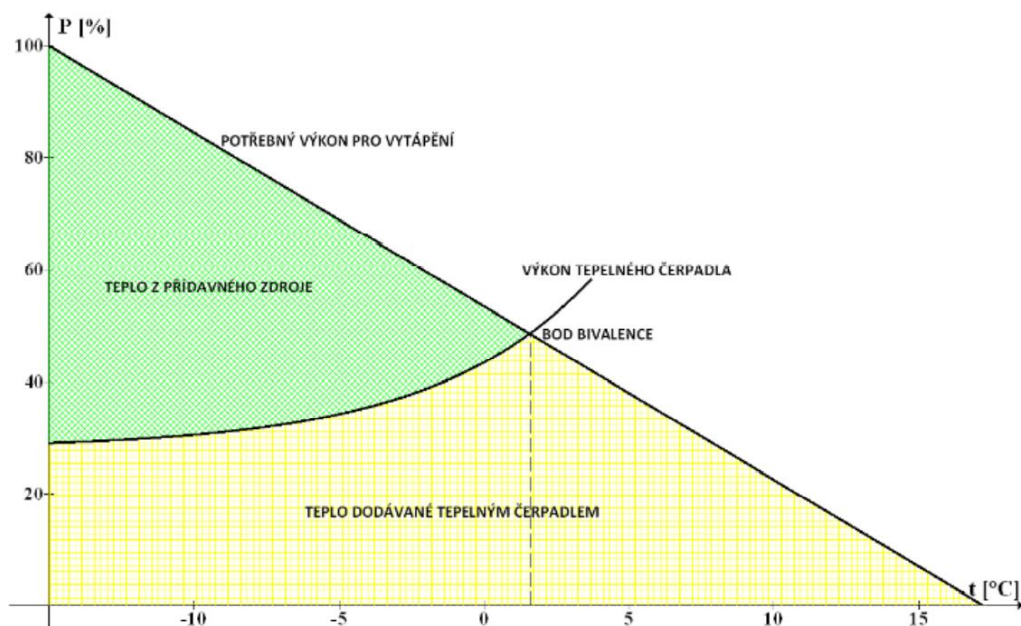
Alternativně bivalentní provoz - V tomto případě tepelné čerpadlo pokrývá celou potřebu tepla až do určité teploty venkovního vzduchu. Tato teplota je předem nastavená. V případě, že poklesne teplota venkovního vzduchu pod tuto hodnotu, tepelné čerpadlo se vypne a produkci přebírá další tepelný zdroj.

Paralelně bivalentní provoz - Při tomto způsobu provozu tepelné čerpadlo produkuje až do určité teploty potřebné teplo samo. Při nízkých teplotách se připne další zdroj tepla. Tento způsob provozu se od předešlého liší v tom, že podíl tepelného čerpadla na celoroční produkci tepla je větší.

Částečně paralelně bivalentní provoz - Do určité venkovní teploty opět tepelné čerpadlo produkuje potřebné teplo samo. Jestliže venkovní teplota poklesne pod tuto hodnotu, připojí se k němu další tepelný zdroj. Pokud tepelné čerpadlo neprodukuje vodu, jejíž teplota odpovídá teplotě topné vody, tepelné čerpadlo se vypne.

1.6.1 Bivalentní provoz tepelného čerpadla

Během roku a topné sezóny se nám potřeba na tepelný výkon mění v závislosti na venkovní teplotě. Dimenzování tepelného čerpadla pro maximální výkon objektu je většinou neekonomické. Proto do otopného systému zařazujeme ještě jeden topný zdroj, který nám pokryje topnou část, kdy tepelné čerpadlo nezvládá potřebnou energii dodat. Jde o to, že tepelné čerpadlo pokryje samostatně spotřebu tepla na vytápění jen do určité venkovní teploty. Při dalším ochlazení je výkon tepelného čerpadla nedostačující a musí být zapojen bivalentní zdroj, jenž dodá chybějící tepelnou energii. Teplota venkovního vzduchu, při níž je výkon TČ roven aktuální tepelné ztrátě objektu, se nazývá bodem bivalence. Teplota bivalence je dána tepelnou ztrátou objektu, druhem otopné plochy, výkonem tepelného čerpadla a maximální teplotou, na kterou je možno ohřát topnou vodu. Obr. 11 znázorňuje bod bivalence, průsečík křivek výkonu tepelného čerpadla a průběhu tepelné ztráty objektu v závislosti na teplotě venkovního vzduchu. (1)



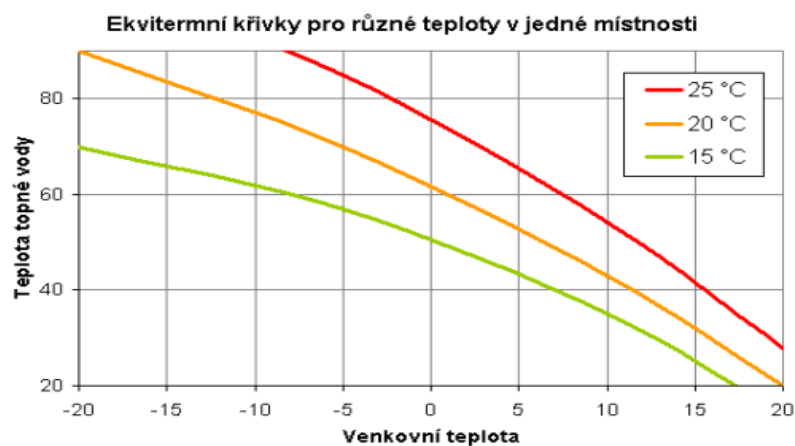
Obrázek 11 - Výkon tepelného čerpadla vzduch/voda a potřebný výkon pro vytápění v závislosti na venkovní teplotě (11)

1.7 Topná soustava s tepelným čerpadlem

Dle vlastností budovy a tepelné soustavy musí být tepelné čerpadlo jako zdroj tepla dimenzováno tak, aby systém pokryl tepelné ztráty objektu a v domě byla udržována stálá vnitřní požadovaná teplota i přes nízké teploty venkovního vzduchu. Tepelné ztráty jsou počítány podle stanovených kritérií pro venkovní výpočtovou teplotu, která se v České republice pohybuje v rozmezí -12 až -21 °C a pro délku topného období dané lokality. (1) Dále je potřeba si uvědomit, že tepelné čerpadlo bude pracovat neefektivněji s nízkými teplotami otopné vody – tzv. nízkoteplotní systém. Většina tepelných čerpadel dodává do otopného systému vodu o teplotě maximálně 55°C. Čím je nižší teplota do otopného systému, tím efektivněji tepelné čerpadlo pracuje. Ideální otopný systém objektu pro tepelné čerpadlo je podlahové topení (topný systém trubek zalitý v betonu či anhydridu), kdy topné médium nepřekračuje teplotu 40 °C, práce v teplotním spádu 40/35 °C. Nicméně z hygienického hlediska by neměla povrchová teplota podlahy překročit 29 °C v obytných místnostech, v koupelnách 32°C. Pokud nelze dostat z podlahového topení dostatečný výkon, je možné do objektu dosadit další topná tělesa, nejlépe však elektrické přímotopy či krb. Kombinace podlahové vytápění a otopná tělesa jako jsou například radiátory je nutné pečlivě zvážit, jelikož taková kombinace ubírá na efektivnosti celého konceptu. Pokud se tepelné čerpadlo bude dimenzovat na stávající otopnou soustavu a otopná tělesa (deskové radiátory), je potřeba provést na objektu stavební úpravy a zateplení, abychom snížili ztráty domu a tím snížili teplotní spád otopné vody. Pro dobře izolovanou budovu s radiátory je možné se dostat na teplotní spád vody 45/35°C. (12)

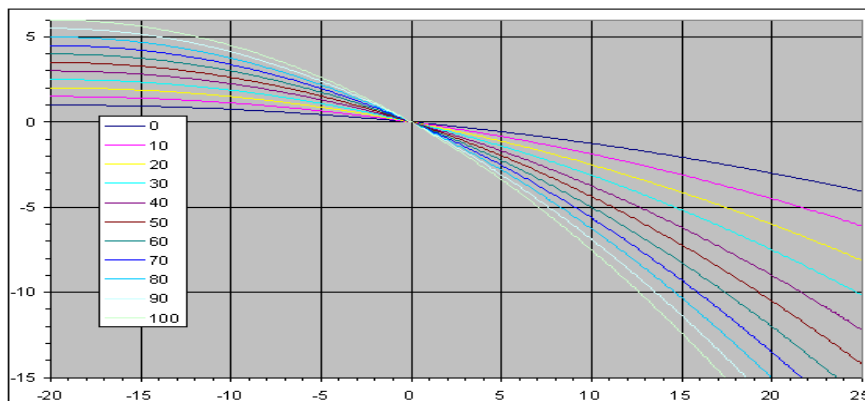
1.8 Ekvitermní regulace tepelného čerpadla

Výkon tepelné soustavy a zdroje tepla závisí na teplotě venkovního vzduchu. K regulaci teploty topné vody na základě venkovní teploty slouží tzv. ekvitermní regulátory, které zajišťují, že dodávané teplo a tepelné ztráty místnosti budou vždy v rovnováze a vnitřní teplota se tak nebude měnit. Ekvitermní regulátory ovládají zdroj tepla podle zvolené tzv. ekvitermní (topné) křivky, což je charakteristika popisující závislost teploty topné vody na venkovní teplotě pro vybranou teplotu místnosti. Soustava ekvitermních křivek se stanovuje dle požadované vnitřní teploty v objektu a nejnižší venkovní teploty, které bylo v dané lokalitě dosaženo. Ekvitermní křivku lze stanovit výpočtem, který je však velmi teoretický, proto raději používáme adaptační ekvitermní křivku. Na obr. 12 je uveden typický průběh ekvitermních charakteristik pro požadované teploty v místnosti 25 °C, 20°C a 15 °C. (1) (13)



Obrázek 12 - Ekvitermní křivky (1)

Díky správnému nastavení ekvitermní křivky dosáhneme hospodárnosti a snížíme energetickou spotřebu objektu. Vše můžeme vysvětlit dle obr. 13. Na vodorovné ose je průměrná venkovní teplota, na svislé pak velikost korekce požadované teploty z topení vzhledem k zvolené ekvitermní křivce. Příklad: pro ekvitermní křivku č. 30 (světle zelená) bude při venkovní teplotě -10 °C zvýšena teplota z topení o 2 °C, při venkovní teplotě +10°C bude snížena o 3,5 °C. Volbou správné ekvitermní křivky lze dosáhnout, že v objektu bude stálá teplota, nezávislá na venkovní teplotě. (14)



Obrázek 13 - Princip ekvitermní regulace (14)

1.9 Akumulace tepla

Akumulaci tepla můžeme popsat podobně jako akumulaci u solárních systémů a využití akumulátorů – baterií. Energie, v našem případě teplo, je využita během kolísání solárních zisků během dne či vyplnění časového období špičkových výkonů. Na podobném principu funguje také akumulace tepla v otopném systému s tepelným čerpadlem. Akumulace nám pomáhá snížit energetickou náročnost objektu a otopného systému. Teplo se ukládá v izolované akumulační nádrži. Akumulace je rozdělena do čtyř různých skupin podle druhu tepla: akumulace citelného tepla, akumulace latentního tepla, akumulace s využitím chemických reakcí, akumulace s využitím adsorpčního tepla. Nejběžnější využití akumulace v otopných systémech s tepelným čerpadlem je akumulace tepla do vody. Nádrže slouží k ukládání tepla vyrobeného tepelným čerpadlem nebo dalším zdrojem tepla. Umožňují také ohřev nebo přehřev teplé vody. Vhodně zvolená akumulační nádrž zajistí dostatek teplé vody v systému a efektivní využití vyrobeného tepla. Zařazení akumulační nádrže do systému snižuje počet potřebných startů tepelného čerpadla nebo jiného zdroje tepla a zvyšuje se tak ekonomičnost a životnost celého systému vytápění a ohřevu teplé vody. (15) (12) (16)

Použití a návrh akumulátorů jsou závislé na několika faktorech:

- Topný systém s možnými rychlými změnami průtoku topné vody v systému (regulace místností)
- Množství topné vody v topném systému pro potřebu 20 l topné vody na 1 kW špičkového výkonu tepelného čerpadla
- Monovalentní systém tepelného čerpadla a přechodné období, kdy je venkovní teplota 5°C (12)

1.9.1 Akumulace citelného tepla

Pro naše účely této práce budeme pracovat s nejběžnější akumulací tepla, tj. akumulace citelného tepla. Akumulační látka je nejčastěji použita voda (je možné využít také půdu, štěrk, stavební konstrukce apod.). Akumulace citelného tepla využívá tepelnou kapacitu pracovní látky v daném rozsahu provozních teplot. Jedná se o ohřev a ochlazování pracovní látky beze změny jejího skupenství. Odebírání tepla je provázeno změnou teploty pracovní látky, přičemž akumulovaná energie závisí přímo úměrně na rozdílu mezi počáteční a konečnou teplotou. Aby byla akumulace a její využití, co nejefektivnější, je potřeba akumulační nádrže dostatečně izolovat a tím zmenšit tepelné ztráty akumulátoru. Vodní zásobníky ukládají teplo buď do užitkové vody, nebo do topné vody, případně mohou být kombinované a připravovat jak topnou vodu, tak TUV. Pro otopný systém s tepelným čerpadlem a se zařazenou akumulační nádrží to znamená, že tepelné čerpadlo bude v chodu po celý rok, nejen na topnou sezónu. Správně navržený systém s akumulační nádrží je ekonomicky využitelný pro objekty s velkou plochou či s velkou spotřebou teplé vody, kdy tyto objekty nemají levnější zdroj tepla na přípravu TUV nebo nejsou napojené na centrální zásobování teplem. (15) (1) (17) (11)

1.9.2 Ohřev teplé užitkové vody

Tepelné čerpadlo je možné využít současně i pro přípravu teplé užitkové vody, je však třeba počítat s větším potřebným výkonem. Teplá voda by měla být ohřívána na 55 až 60°C, kdežto teplotní spád nízkoteplotní otopné soustavy se pro nejnižší venkovní výpočtové teploty obvykle pohybuje v rozsahu od 40/30 °C do 55/45 °C, přičemž teplota topné vody se mění v závislosti na teplotě venkovního vzduchu (viz ekvitermní regulace). Teplá pitná voda je připravována na konstantní teplotu, jež je podstatně vyšší než potřebná teplota topné vody, což má nezanedbatelný vliv na provoz TČ. Vlivem ohřevu vody na vyšší teplotu klesá hodnota COP a zhoršuje se tak účinnost provozu tepelného čerpadla. Energeticky výhodnějším řešením může být ohřev vody na výstupu z kondenzátoru pouze na teplotu topné vody – TUV tepelným čerpadlem předeřívát a její dohřev na konečnou teplotu zajistit bivalentním zdrojem. (1) Ohřev teplé užitkové vody není cílem této práce.

1.9.3 Akumulace tepelné energie a tepelné čerpadlo

V běžném použití tepelného čerpadla, tj. tepelné čerpadlo s invertorem pro rodinný dům akumulaci tepelné energie ve většině případech nepotřebujeme. Tepelné čerpadlo s invertorem si přizpůsobují topný výkon dle požadavku na otopnou soustavu díky ekvitermnímu regulátoru. V tomto případě také uvažujeme, že tepelné čerpadlo může ohřát vodu jen na maximální teplotu 55 °C, není využito vysokoteplotní tepelné čerpadlo. Dle kapitoly 1.9.1 budeme uvažovat, že máme v objektu velké výkyvy na nárok pro tepelný výkon, objekt s velkou plochou či objekt s velkou spotřebou teplé vody. Proto bude potřeba vyrovnat tyto výkyvy ekonomičtěji a efektivněji. Bez akumulací nádoby by tepelné čerpadlo muselo spínat častěji, což by vedlo ke zvýšení nákladu za spotřebu elektrické energie a časté starty kompresoru by vedly k jeho dřívějšímu opotřebení nebo celkovému poškození.

Využití akumulované energie v závislosti na teplotě otopné vody a ztrátě objektu si můžeme vysvětlit na zjednodušeném příkladu viz Tabulka 1. (18). V nejjednodušším případě uvažujeme obyčejné tepelné čerpadlo, které dokáže ohřívát topnou vodu na maximální teplotu 55 °C a budeme dva typy vytápění: podlahové topení a radiátory. Pro podlahové topení uvažujeme teplotu otopné vody 35 °C a 40 °C a pro radiátory 50 °C a 55°C. Akumulační nádrž bude o objemu 500 l a teplota vody uvnitř nádoby je udržována na 55°C.

Akumulace tepelné energie		
Využití akumulované energie z tepelného čerpadla (bez udání výkonu) - akumulací nádoba 500 l, teplota vody v nádobě 55 °C, tepelná ztráta objektu 10 kW		
Teplota topné vody [°C]	Naakumulovaná energie P [kW]	Čas, po který můžeme energii dodávat t [min.]
35	11,7	70,2
40	8,7	52,2
50	2,9	17,4
55	0	0

Tabulka 2 - Příklady nakumulované energie v závislosti na teplotě topné vody

Z tabulky 1 je zřejmé, že čím nižší je teplota topné vody, tím delší čas může akumulací nádrž dodávat tepelnou energii prostřednictvím teplé vody. Například ve správně zaizolovaných objektech se potřeba na tepelnou energii objektu snižuje (i v závislosti na venkovní teplotě), a tím pádem bývá potřeba topné vody nižší, než je uvedeno v tabulce. Dále můžeme konstatovat, že se snížením objemu akumulací nádrže se zároveň snižuje doba, po kterou by bylo možné využít naakumulovanou energii. A naopak.

Naakumulovanou energií nám také ovlivňuje fakt, jakým způsobem jsou zaizolované proti tepelným ztrátám, které nám ovlivňují čas, jak dlouho energie v nádrži vydrží. Akumulací nádrže jsou vyrobené z běžného ocelového plechu, případně z plechu nerezového, z vnější strany lakované proti korozi, tepelná izolace je v minimální tloušťce 100 mm. Výhoda akumulací zásobníků je, že od sebe oddělují zdroje tepla a tepelné spotřebiče, což nám dává možnost propojit několik zdrojů tepla, k tepelnému čerpadlu například solární panely. Díky takové možnosti by se tepelné čerpadlo s propojením dalšího zdroje tepla z obnovitelných zdrojů a s akumulací nádrží stalo ještě ekonomičtější a účinnější. Nevýhoda využití akumulací nádrží spočívá v omezeném čase užití tepelné energie v nádrži kvůli tepelným ztrátám samotného zásobníku potřeba většího prostoru pro instalaci zařízení v technické místnosti. Dále je zapotřebí, aby tepelné čerpadlo jako zdroj tepla fungovalo celoročně a také na větší výkon, než by byl potřeba bez této nádrže, jelikož máme definovanou teplotu teplé vody v nádrži. (19)

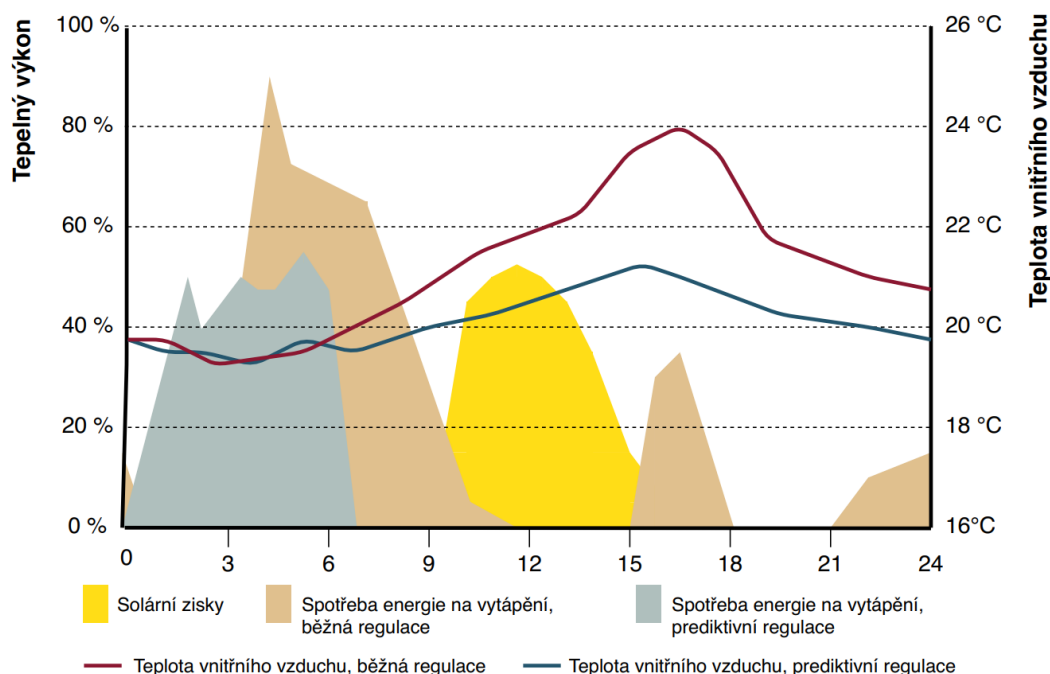
Dimenzování akumulacího zásobníku pro různé zdroje tepla udává orientační přehled v tabulce 3. (19)

Zdroj tepla	Potřebný objem akumulací nádrže
Kotel na dřevo	55 l/kW výkonu kotle
Tepelné čerpadlo bez invertoru	20 – 25 l/kW výkonu TČ
Tepelné čerpadlo s invertorem	běžně neuzavíratelný objem 50 l (doporučeno 100 - 200 l)
Solární zařízení s přípravou teplé vody	60 - 100 l na 1 m ² plochy kolektorů
Solární podpora vytápění	50 - 100 l na 1 m ² solárního systému

Tabulka 3 - Přehled objemů akumulací nádrže pro různé zdroje tepla

1.9.4 Otopný systém tepelného čerpadla s akumulací tepelné energie s možným prediktivním spínáním tepelného čerpadla dle venkovní teploty

V dnešní době je neustálý tlak na snížení spotřeby na provoz vytápění objektů, který je dán měnícími se aspekty ve světě a společnosti – růst populace, rozvoj urbanizace, zvýšené požadavky na úroveň komfortu uvnitř budov, snižování emisí. Tyto aspekty kladou čím dál větší požadavky na energetickou účinnost a soběstačnost budov s využitím obnovitelných zdrojů. Snižit energetickou náročnost budov je možné s technologiemi stálými i nově vyvíjenými. Všechna tato opatření pro snížení energetické náročnosti budovy s sebou nese vyšší investiční náklady, které mají za cíl dosáhnout energetických úspor. Na základě našich předchozích kapitol jsme si definovali řadu možných otopných systémů s tepelným čerpadlem vzduch – voda a také akumulaci tepelné energie. Pro další snížení nákladů na provoz tepelného čerpadla a zlepšení jeho účinnosti se pokusíme do systému zařadit tzv. prediktivní regulaci tepelného čerpadla. Tato regulace je výhodná hlavně pro komerční objekty, jelikož finanční úspory jsou znatelné a investice do takovéto regulace bude rychleji návratná. Dle obr. 15 je patrné chování běžné a prediktivní regulace využívající předpověď počasí v otopném systému tepelného čerpadla. Aby byla zajištěna tepelná pohoda v ranních hodinách, je vidět nárůst výkonu zdroje tepla v obou případech již během noci. Je patrné, že výkon zdroje tepla u systému s prediktivní regulací se začíná snižovat výrazně dříve než u běžného systému. Díky tomu dochází k výrazně nižšímu nárůstu teploty vnitřního vzduchu. Výsledkem je vyšší komfort a nižší provozní náklady. (20)



Obrázek 14 -Porovnání průběhu teplot a tepelného výkonu během dne mezi otopným systémem s použitím běžné a prediktivní regulace během slunečného dne (20)

Princip prediktivního řízení dle teploty je založen na hledání takové spojitosti, která využívá co nejvíce dostupných informací o budově a o počasí a vrací nám zpětnou vazbu.

Jedná se o strategii, kterou lze jednoduše popsat jako funkci

$$\Phi_{medium} = f(\Phi_{in}, \Phi_{out}, \Phi_{predicted}, x, system),$$

Kde Φ_{medium} je teplota topného média, Φ_{in} je teplota uvnitř objektu, Φ_{out} je venkovní teplota, $\Phi_{predicted}$ je předpověď venkovní teploty, x jsou další informace o vnějším a vnitřním prostředí jako je například počet osob v objektu či tepelné zisky, $system$ značí znalost systému ve smyslu jeho dynamiky. (21)

Pro takto definovaný systém se využívá řízení za pomoci MPC (Model-based Predictive Control) strategie.

Pro otopný systém tepelného čerpadla se zařazenou akumulací nádrží a využitím prediktivního řízení budeme využívat fakt, že známe informace venkovních teplot v místě objektu, návrhovou vnitřní teplotu a tím potřebu tepla pro další den. Pokusíme se tedy implementovat fakt, že dopředu predikujeme, jakou tepelnou energii musíme do dalšího dne naakumulovat v nádrži v závislosti na venkovní teplotě.

1.9.4.1 Funkce MPC regulátorů

Pro definovaný systém v kapitole 1.9.4. se využívá řízení za pomoci prediktivní regulace MPC (Model-based Predictive Control) strategie, který se využívá na řízení rozsáhlých systémů (chemický průmysl, administrativní budovy, velké komplexy). Pokud mluvíme o MPC regulátorech, nejedná se o jeden konkrétní regulátor, každý regulátor je individuálně programován pro konkrétní účely. Všechny tyto regulátory, ale využívají explicitní model procesu jako základ pro optimalizační funkci (tzn. snížení nákladů, minimalizace regulační odchylky) a omezení (tj. pro velikost akčního zásahu, velikost změny regulované veličiny). Celkový tento model využívaného MPC funguje na principu tzv. „receding horizon control“, kdy se spočítá množina optimálních vstupů na horizontu predikce, např. časové a do systému se pustí první z nich. V dalším kroku se vše opakuje pro aktuální výstupy regulovaného systému.

První krok systému je nalezení dynamického modelu za pomoci

$$y = P(u, x, t),$$

Kde y je vektor výstupu modelu, u je vektor jeho vstupů, x jsou stavy modelu a t je čas. Úkolem regulátoru je najít optimální posloupnost vstupů u vyjádřenou ve vztahu k optimalizačnímu kritériu J

$$u_{optimal} = \arg \min_u J(P(u, x, t), u, t)$$

Kde optimalizace může být vhodně omezená.

Fungující a dobrý model pro predikci je naprosto zásadní, přičemž v praxi je nemožné přesný model nalézt a je potřeba model doplnit pozorovatelem stavu. (21)

Popis takto prediktivního modelu přesahuje téma této práce, proto se v matematickém modelu budeme snažit prediktivní spínání, co nejvíce zjednodušit.

2 Hodnocení efektivity tepelných čerpadel

2.1 Topný faktor COP

Topný faktor tepelného čerpadla, značení COP (z ang. Coefficient of Performance), představuje důležitý údaj tepelného čerpadla, který udává, kolikrát je větší získaný výkon tepla z tepelného čerpadla proti vynaloženému příkonu, elektrickému. Tento parametr energetické efektivity samotného tepelného čerpadla závisí na teplotě zdroje tepla a na teplotě, při které je teplo spotřebováno. Čím vyšší je teplota zdroje tepla a čím nižší je teplota, při které se teplo spotřebovává, tím větší je topný faktor. Vztahuje se vždy jako momentální hodnota na určitý provozní stav. (22) (1)

Pro topný faktor se pro současná tepelná čerpadla udává následující přibližný vztah:

$$COP = \frac{Q_T}{P} = \frac{Q_T}{Q_T - Q_{CH}}$$

Q_T ... topný výkon TČ [kW]

Q_{CH} ...chladičí výkon nízkoteplotního zdroje [kW]

P ... elektrický příkon TČ [kW]

Z rovnice vyplývá energetická bilance tepelného čerpadla: tepelný výkon Q_T je roven součtu chladičího výkonu nízkoteplotního zdroje Q_{CH} a elektrického příkonu P . Do celkového elektrického příkonu se započítává veškerý elektrický příkon součástí tepelného čerpadla a jeho systému - kompresorů, oběhových čerpadel, ventilátorů, ale též energie spotřebovaná na odtávání či provoz regulačních a zabezpečovacích prvků. [4, 34] Pokud chceme srovnávat tepelná čerpadla, musíme kromě samotné hodnoty COP znát i podmínky, při kterých byl uvedený topný faktor stanoven – teploty na vstupu do výparníku a teploty na výstupu z kondenzátoru. Standardní podmínky pro laboratorní měření COP jsou dány normou ČSN EN 145111. (22) (1)

2.2 Sezónní topný faktor SCOP

Sezónní topný faktor tepelného čerpadla SCOP (z angl. Seasonal Coefficient of Performance) je výstižnější parametr při výběru tepelného čerpadla než samotný parametr COP. Jedná se o poměr mezi teplem dodaným tepelným čerpadlem a spotřebou elektrické energie na provoz systému za celý rok.

$$SCOP = \frac{\text{roční spotřeba tepla}}{\text{roční spotřeba elektrické energie}}$$

Výpočet SCOP se provádí dle postupu definovaného normou ČSN EN 148253 pro standardizované provozní podmínky, kterými jsou návrhová tepelná ztráta budovy a nízkoteplotní (35 °C) nebo vysokoteplotní (55 °C) otopná soustava, a pro standardizované klimatické podmínky, vychází z celoroční bilance produkce tepla daným tepelným

čerpádem a krytím potřeby tepla definovaného objektu v otopné sezóně. Pro účely výpočtu jsou definovány tři klimatické oblasti, do nichž je Evropa rozdělena na obr. 15. (1) (22)



Obrázek 15 - Klimatické oblasti Evropy (22)

2.3 Značka kvality EHPA

Asociace kvality EHPA, European Heat Pump Association, zajišťuje systém a kritéria hodnocení pro kvalitu tepelných čerpadel z pohledu ekodesignu a energetiky. Proto Evropská asociace tepelných čerpadel vytvořila soubor požadavků na zajištění kvality výrobků a služeb a vypracovala metodiku měření a hodnocení, na jejímž základě je tepelným čerpadlům přidělována mezinárodní značka kvality European Quality Label for Heat Pumps označovaná též jako Q-label (obr. 16). U zařízení označených tímto štítkem je kromě kvality výrobku zajištěna též dostupnost náhradních dílů a celková údržba po instalaci. (1) (22)



Obrázek 16 - Značka kvality (22)

Jsou hodnocené parametry tepelného čerpadla dle:

- Shoda všech hlavních komponent s předpisy EU (CE)
- Minimální hodnota topného faktoru COP pro jednotlivé druhy tepelných čerpadel
- Deklarace hladiny akustického výkonu
- Existence odborného prodeje, instalace a servisu, doložení servisní a provozní dokumentace v místním jazyce
- Funkční servisní síť s 24hodinovou reakcí na reklamace
- Záruka min. 2 roky a deklaráce 10leté garance dostupnosti náhradních dílů (22)

Tepelné čerpadlo	Jmenovité podmínky	Požadavek
vzduch/voda	A2/W35	COP > 3,1
země/voda	B0/W35	COP > 4,3
voda/voda	W10/W35	COP > 5,1

Obrázek 17 - Minimální topné faktory tepelných čerpadel (1)

3 Problematika vytápění obytných objektů

Ke správnému vypracování projektu tepelného čerpadla je nutné znát veškeré informace o objektu, jeho tepelné ztráty a kde bude technologie umístěna. Je nutné uvést, v jaké lokalitě se objekt nachází, popsat stav objektu, jaké byly, jsou a budou použity materiály pro zateplení či stavební úpravy, jak bude objekt vytápěn, zda bude tepelné čerpadlo pracovat pouze monovalentně nebo bivalentně, apod.

3.1 Podklady pro výpočet tepelných ztrát

- Situační (polohopisný) plán, ze kterého je zřejmá poloha budovy vzhledem ke světovým stranám, výška a vzájemná vzdálenost okolních budov, terénních překážek apod., nadmořská výška místa stavby a převládající směr a intenzita větru.
- Půdorysy jednotlivých podlaží se všemi hlavními skladebnými (popř. světlými) rozměry, včetně rozměrů oken a dveří (nejméně v měřítku 1:100)
- Řezy budovou s udáním hlavních světlých a konstrukčních výšek podlaží.
- Tepelně technické vlastnosti stavebních konstrukcí podle ČSN 73 0540 – 3:1994.
- Součinitel spárové průvzdušnosti oken i_{LV} (ve smyslu ČSN 73 0540 – 1:1994 i_{LVp}) a součinitel prostupu tepla oken a dveří k (ve smyslu ČSN 73 0540-1:1994 $k_{ok,p}$), popř. údaje o materiálu a konstrukci oken a dveří potřebné k výpočtu tepelné ztráty místnosti prostupem a tepelné ztráty místností infilrací.
- Údaje o druhu (účelu) místnosti.
- Údaje o teplotách t_i , t_e a teploty v sousedních nevytápěných místnostech – tabulky normy.
- Součinitel prostupu tepla k se stanoví dle ČSN 73 05 40 – 4. (23)

3.2 Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN 06 0210

3.2.1 Výpočet celkových ztrát

Celková tepelná ztráta je dána součtem všech tepelných ztrát objektu, která je ponížena o tepelný zisk.

$$Q_c = Q_p + Q_v - Q_z$$

Q_c ...celková tepelná ztráta [W]

Q_p ...teplená ztráta prostupem tepla [W]

Q_v ...teplená ztráta větráním [W]

Q_z ...teplené zisky [W]

3.2.2 Výpočet tepelných ztrát prostupem Q_p

Tepelná ztráta prostupem tepla definuje ztráty prostupem tepla mezi konstrukcemi.

$$Q_p = Q_o * (1 + p_1 + p_2 + p_3)$$

Q_o ...základní tepelná ztráta prostupem tepla [W]

p_1 ...přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí

p_2 ...přirážka na urychlení zátoku

p_3 ...přirážka na světovou stranu

$$Q_o = \sum_{j=1}^{j=n} U_j * S_j * (\theta_i - \theta_e)$$

U_j ... součinitel prostupu tepla [$W/m^2 \cdot K$]

S_j ... ochlazovaná plocha konstrukce [m^2]

θ_i ... výpočtová vnitřní teplota [$^{\circ}C$]

θ_e ... teplota na vnější straně konstrukce [$^{\circ}C$]

3.2.3 Výpočet tepelných ztrát větráním Q_v

Ztráta větrání se vypočítá dle vztahu

$$Q_v = c_p * V_v (\theta_i - \theta_e)$$

Q_v ... tepelná ztráta větráním [W]

c_p ... měrná tepelná kapacita vzduchu při teplotě $0^{\circ}C$ [$J \cdot m^3 / K$]

V_v ... objemový tok větracího vzduchu [m^3/s]

θ_i ... vnitřní teplota [$^{\circ}C$]

θ_e ... teplota na vnější straně konstrukce [$^{\circ}C$]

Objemový tok větracího vzduchu prostoru z hygienických nebo technických požadavků

$$V_{vH} = \frac{n_H}{3600} * V_m$$

V_m ... vnitřní objem prostoru [m^3]

n_H ... intenzita výměny vzduchu [h^{-1}]

Objemový tok vzduchu přirozeným větráním

$$V_{vP} = \sum (i_{LV} * l) * B * M$$

$\sum(i_{LV} * L)$...součet průvzdušnosti oken a venkovních dveří dané místnosti

i_{LV} ... součinitel spárové průvzdušnosti [$m^2 * s^{-1} * Pa^{-0,67}$]

l ... délka spar otvíratelných částí oken a venkovních dveří [m]

B ... charakteristické číslo budovy [$Pa^{-0,67}$]

M ... charakteristické číslo místnosti [-]

3.3 Výpočet tepelných ztrát podle normy ČSN EN 12831

3.3.1 Celková návrhová tepelná ztráta vytápěného prostoru

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i}$$

Φ_i ... celková návrhová ztráta vytápěného prostoru [W]

$\Phi_{T,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru [W]

$\Phi_{V,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem větráním vytápěného prostoru [W]

3.3.2 Návrhová tepelná ztráta tepla vytápěného prostoru

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,ue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) * (\theta_{int,i} - \theta_e)$$

$\Phi_{T,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru [W]

$H_{T,ie}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy [W/K]

$H_{T,ue}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí nevytápěným prostorem [W/K]

$H_{T,ig}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do zeminy v ustáleném stavu [W/K]

$H_{T,ij}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do sousedního prostoru vytápěného na výrazně jinou teplotu [W/K]

$\theta_{int,i}$... výpočtová vnitřní teplota vytápěného prostoru [°C]

θ_e ... výpočtová venkovní teplota [°C]

3.3.3 Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k * U_k * e_k + \sum_l \psi_l * l_l * e_l$$

$H_{T,ie}$... součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do venkovního prostředí pláštěm budovy [W/K]

A_k ... plocha stavební části [m²]

U_k ... součinitel prostupu tepla stavební části [W/m²*K]

e_k, e_l ... korekční činitel vystavení povětrnostním vlivům při uvažování klimatických vlivů jako je různé oslunění, pohlcování vlhkosti stavebními díly, rychlost větru a teplota, pokud tyto vlivy nebyly uvažovány při stanovení hodnot součinitele prostupu tepla [-]

ψ_l ... činitel lineárního prostupu tepla lineárního tepelného mostu [W/m*K]

l_l ... délka tepelného mostu [m]

3.3.4 Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do nevytápěného prostoru

Sousedí-li vytápěná místnost s nevytápěnou místností, která je vedle exteriéru, potom:

$$H_{T,ue} = \sum_k A_k * U_k * b_u + \sum_l \psi_l * l_l * b_u$$

b_u ... teplotní redukční faktor, který vychází z rozdílu teplot nevytápěného prostoru a venkovní výpočtovou teplotou [-]

Teplotní redukční faktor se vyjádří podle:

$$b_u = \frac{\theta_{int,i} - \theta_u}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

θ_u ... teplota nevytápěného prostoru [°C]

3.3.5 Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do zeminy

$$H_{T,ig} = f_{g1} + f_{g2} \left(\sum_k A_k * U_{equiv,k} * G_w \right)$$

f_{g1} ... korekční činitel zohledňující vliv ročních změn venkovní teploty [-]

f_{g2} ... teplotní redukční činitel zohledňující rozdíl mezi roční průměrnou teplotou a výpočtovou venkovní teplotou [-]

$U_{equiv,k}$... ekvivalentní součinitel prostupu tepla stavební části [W/m²*K]

G_w ... korekční činitel zohledňující vliv spodní vody [-]

Hodnota *korekčního faktoru* f_{g1} je stanovena normou ČSN EN 12831 na 1,45.

Korekční faktor f_{g2} se vypočte ze vztahu:

$$f_{g2} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{m,e}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{m,e}$... průměrná roční venkovní teplota [°C]

Ekvivalentní součinitel prostupu tepla stavební částí závisí na teplotním součiniteli stavební konstrukce a na charakteristickém rozměru, přičemž musíme rozlišit, zda je podlaha umístěna na úrovni terénu nebo pod ním.

Charakteristický rozměr:

$$B = \frac{A_g}{0,5 * P}$$

B ... charakteristický rozměr [m]

A_g ... plocha podlahy [m²]

P ... obvod podlahy [m]

3.3.6 Součinitel tepelné ztráty prostupem z vytápěného prostoru do sousedního prostoru vytápěného na jinou teplotu

$$H_{T,ij} = \sum_k f_{ij} * A_k * U_k$$

f_{ij} ... redukční teplotní činitel [-]

Redukční teplotní činitel zohledňuje rozdíl mezi teplotou sousedícího prostoru a venkovní výpočtovou teplotu:

$$f_{g2} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{vyt.sous.prostoru}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{vyt.sous.prostoru}$... teplota sousedního vytápěného prostoru [°C]

3.3.7 Návrhová tepelná ztráta větráním

$$\phi_{V,i} = H_{V,i} * (\theta_{int,i} - \theta_e)$$

$\phi_{V,i}$... návrhová tepelná ztráta větráním [W]

$H_{V,i}$... součinitel návrhové tepelné ztráty [W/K]

Velikost součinitele návrhové tepelné ztráty je přímo úměrná objemovému toku vzduchu:

$$H_{V,i} = (V_i * \rho * c_p)$$

V_i ... vyměňovaný objemový tok vzduchu [m³/s]

ρ ... hustota vzduchu [kg/m³]

c_p ... měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku [kJ/kg*K]

3.3.8 Přirozené větrání

$$V_i = \max (\dot{V}_{inf,i}, V_{min,i})$$

$\dot{V}_{inf,i}$... vzduch infiltrací [m³/h]

$V_{min,i}$... požadovaná výměna vzduchu z hygienických důvodů [m³/h]

Kde pro minimální objemový tok požadovaný z hygienických důvodů platí:

$$V_{min,i} = n_{min} * V_i$$

n_{min} ... minimální intenzita výměny vzduchu za hodinu, která se liší dle příslušné místnosti a její hodnota se stanoví normou ČSN EN 12831 [1/h]

V_i ... objem vytápěného prostoru [m³]

Pro velikost infiltrovaného množství vzduchu infiltrací platí:

$$\dot{V}_{inf,i} = 2 * V_i * n_{50} * e_i * \varepsilon_i$$

n_{50} ... intenzita výměny vzduchu mezi vnitřkem a vnějškem při rozdílu tlaků 50 Pa

e_i ... stínící součinitel

ε_i výškový korekční činitel

3.3.9 Nucené větrání

$$V_i = \dot{V}_{inf,i} + V_{su,i} * f_{V,i} + \dot{V}_{mech,inf,i}$$

$\dot{V}_{inf,i}$... vzduch infiltrací, výpočet stejný jako u přirozeného větrání [m³/h]

$\dot{V}_{su,i}$... přiváděný vzduch, určí projektant [m³/h]

$f_{V,i}$... redukční teplotní činitel [m³/h]

$\dot{V}_{mech,inf,i}$... rozdíl mezi množstvím odváděného vzduchu soustavou a množstvím přiváděného vzduchu soustavou [m³/h]

Redukční teplotní činitel:

$$f_{g2} = \frac{\theta_{int,i} - \theta_{su,i}}{\theta_{int,i} - \theta_e}$$

$\theta_{su,i}$... teplota přiváděného vzduchu [°C]

Pro bilanci množství vzduchu celé budovy $\dot{V}_{mech,inf,i}$ pak platí:

$$\dot{V}_{mech,inf,i} = \max(\dot{V}_{ex} - \dot{V}_{su}, 0)$$

\dot{V}_{ex} ... odváděný vzduch pro celou budovu [m³/h]

\dot{V}_{su} ... přiváděný vzduch pro celou budovu [m³/h]

3.3.10 Tepelný zátopový výkon

U objektů vytápěny přerušovaným způsobem se do návrhového tepelného výkonu přičítá i zátopový výkon, který závisí na době zátoku a teplotním poklesu vnitřní teploty.

$$\phi_{RH,i} = A_i * f_{RH}$$

$\phi_{RH,i}$... zátopový tepelný výkon [W]

A_i ... plocha podlahy vytápěného prostoru [m²]

f_{RH} ... korekční činitel [-]

3.3.11 Návrhový tepelný výkon

Nyní máme již všechny potřebné hodnoty pro stanovení návrhového tepelného výkonu, který je dán součtem celkových tepelných ztrát a zátopových výkonů.

$$\phi_{HL,i} = \phi_i + \phi_{RH,i} = \phi_{T,i} + \phi_{V,i} + \phi_{RH,i}$$

A dále pak pro budovu jako:

$$\phi_{HL} = \sum \phi_{T,i} + \sum \phi_{V,i} + \sum \phi_{RH,i}$$

$\phi_{T,i}$... návrhová tepelná ztráta prostupem tepla vytápěného prostoru [W]

$\phi_{V,i}$... návrhová tepelná ztráta větráním [W]

$\phi_{RH,i}$... zátopový tepelný výkon při přerušovaném vytápění [W]

4 Ztráty objektu a parametry topné soustavy pro matematický model

4.1 Idealizovaný objekt

Pro návrh matematických modelů si vytvoříme idealizovaný objekt bez uvažování tepelné setrvačnosti. Objekt je jednoduchého tvaru, např. krychle, bez střechy a oken, s jednotnou tloušťkou obvodových zdí. Objekt si zjednodušíme z důvodu, že ostatní tepelné ztráty ani tepelné zisky nejsou cílem této práce. Tato práce se zabývá návrhem otopných systémů pro fiktivní objekt, proto si tepelné ztráty objektu jednoduše nasimulujeme a definujeme parametry našeho fiktivního objektu, vše v souladu dle normy ČSN 060210.

4.1.1 Fiktivní objekt dle projektu 2

Pokud bychom chtěli uvažovat objekt s reálnými parametry museli bychom si navrhout takový objekt, kde bychom si definovali všechny aspekty příslušící domu vč. jejich parametrů, tzn. stavební výplně, střechu, tepelné izolace, součinitele tepelní vodivosti. Do objektu bychom museli zahrnout teplotní setrvačnosti, tepelné zisky a tepelné ztráty. Takto definovaný objekt bychom mohli opatřit úspornými energetickými stavebními úpravami, které by vedly ke snížení tepelných ztrát a snížení potřeby tepla, tj. snížení topného výkonu tepelného čerpadla a snížení finančních nákladů na vytápění. Pro potřeby dalších budoucích projektů je tedy možné spojit Projekt 2 předcházející diplomovou práci a programy této diplomové práce.

4.2 Výpočtová venkovní teplota t_e

Výpočtovou teplotu t_e jsme určili průměrnou teplotu pěti za sebou následujících nejchladnějších dnů podle meteorologického pozorování.

Pro ČR jsou zvoleny tři základní výpočtové venkovní teploty:

- $t_e = -12^\circ\text{C}$... do 400 m.n.m.
- $t_e = -15^\circ\text{C}$... do 600 m.n.m.
- $t_e = -18^\circ\text{C}$... do 800 m.n.m.

4.3 Výpočtová vnitřní teplota t_i

Za výpočtovou vnitřní teplotu t_i se volí tzv. výsledná teplota, která je aritmetickým průměrem mezi teplotou vnitřního vzduchu a průměrnou povrchovou teplotou stěn ohraničujících vytápěnou místnost. Pokud není předepsáno jinak, volí se obvykle výpočtová vnitřní teplota dle ČSN 060210.

4.4 Závislost potřebného topného výkonu na venkovní teplotě

Při návrhu vytápění objektu je nezbytné znát jeho tepelné ztráty při výpočtové venkovní teplotě a jeho geografické umístění. Pro náš případ budeme uvažovat osaměle stojící rodinný domek situovaný do normální krajiny (s ohledem na intenzitu větru) u Brna. Tím jsme tedy určili jeho geografické umístění, Brno se nachází v 215 m.n.m., dle normy ČSN 060210 je tedy stanovena výpočtová venkovní teplota, tj. teplota při které se stanovují tepelné ztráty objektu na -12°C . Požadovaná průměrná vnitřní teplota v obytných místnostech je 20°C .

Tepelné ztráty objektu přímo úměrné rozdílu teplot venkovního vzduchu a teploty uvnitř. Pro vytápěný objekt tedy platí následující vztah:

$$P_{top} = k_1 * (T_{in} - T_{air})$$

P_{top} tepelná ztráta objektu (potřebný topný výkon) [W]

k_1 konstanta charakterizující přestup tepla mezi vytápěným vnitřním prostorem a venkovním prostředím [W/K]

T_{air} venkovní teplota, teplota vzduchu vstupující do výparníku [$^{\circ}\text{C}$]

T_{in} požadovaná vnitřní teplota [$^{\circ}\text{C}$]

V našem případě pro zjednodušení stanovíme tepelné ztráty rodinného domku, a díky kterým budeme v následujících kapitolách navrhovat optimální způsob vytápění, při výpočtové venkovní teplotě -12°C volbou a to 25 kW. Víme tedy, že rodinný dům má při venkovní teplotě -12°C tepelné ztráty 25 kW a při venkovní teplotě 20°C tepelné ztráty nulové. Pro stav rodinného domku při výpočtové venkovní teplotě určíme ze vztahu konstantu k_1 , tzn:

$$P_{top} = 25\text{kW}$$

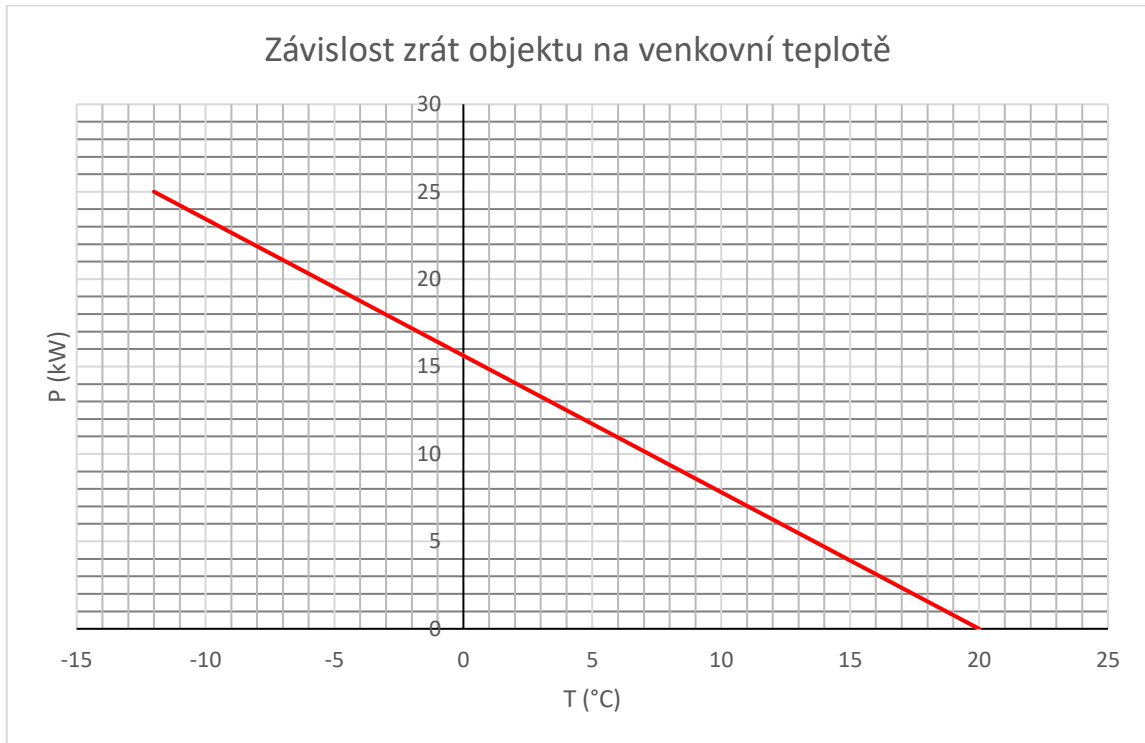
$$T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{air} = -12^{\circ}\text{C}$$

$$k_1 = \frac{P_{top}}{(T_{in} - T_{air})}$$

$$k_1 = 0,78125$$

Známe-li konstantu k_1 řešíme rovnici pro různé teploty venkovního vzduchu a dostaneme tak potřebný topný výkon pro vytápění rodinného domku pro tyto teploty. Ze získaných hodnot sestrojíme závislost $P_{top} = f(T_{air})$. Pro sestrojení grafu použijeme průměrné hodnoty ve městě Brno a graf sestrojíme za pomoci programu EXCEL. Ve vlastních programech ovšem zjednodušeně uvažujeme tepelné tak, že uvažujeme nulový potřebný výkon ve shodě s definicí topné sezóny, tedy nulový pro průměrnou denní teplotu vyšší než 13°C .



Graf 1 - Závislost ztrát objektu na venkovní teplotě

4.5 Parametry objektu a otopné soustavy

Objekt je jednoduchého tvaru, např. krychle o tepelné ztrátě 25 kW. Otopná soustava je původní, po objektu jsou rozmístěné radiátory s teplotním spádem topné vody $40^{\circ}\text{C}/35^{\circ}\text{C}$.

4.6 Data pro vyhodnocení

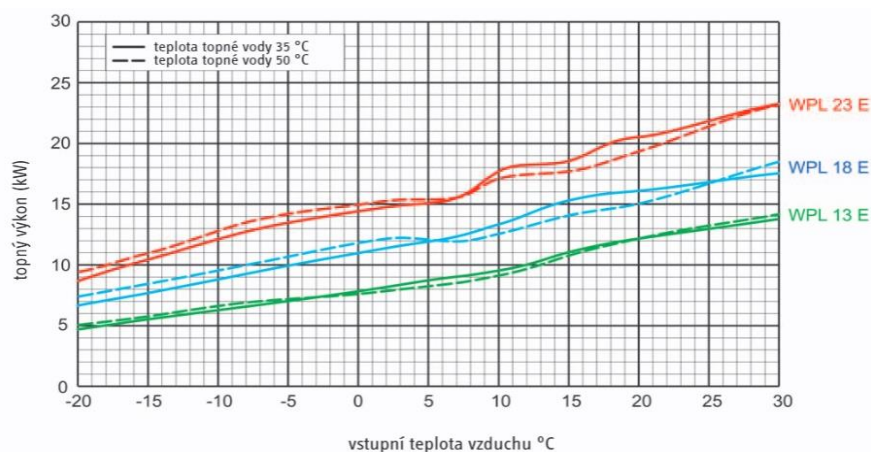
Vedoucím práce byly dodané data potřebné pro diplomovou práci: tepelné čerpadlo vzduch – voda o topném výkonu 18 kW. Toto čerpadlo je obsaženo v souboru *struct* (z programu *WPL18E1b*). Dále byly vedoucím dodány reálně naměřené hodnoty z Brna, které vychází ze souboru *teplotyBrno*.

5 Matematické modely tepelného čerpadla a otopného systému

V předchozí kapitole jsme definovali parametry objektu a jeho ztráty, které budou využity v následujících v návrzích matematických modelů otopných systémů s tepelným čerpadlem. V kapitole také nalezneme parametry použitého tepelného čerpadla pro účely matematických modelů. Díky podkapitolám budeme moci určit veškeré energetické náklady na vytápění objektu a určit finanční náročnost pro každý systém zvlášť. Následně tyto systémy můžeme mezi sebou porovnat.

5.1 Typ použitého tepelného čerpadla vzduch-voda

Pro potřeby této diplomové práce budeme využívat parametry a reálné charakteristiky tepelného čerpadla vzduch - voda. Jedná se o tepelné čerpadlo WPL 18 E, dodavatel Stiebel Eltron spol. s.r.o., Praha.



Obrázek 18 - Závislost teploty vzduchu na výkonu čerpadla WPL 18 E (data převzaté od dodavatele Stiebel Eltron)

Tepelné čerpadlo WPL 18 E/cool (režim vytápění)

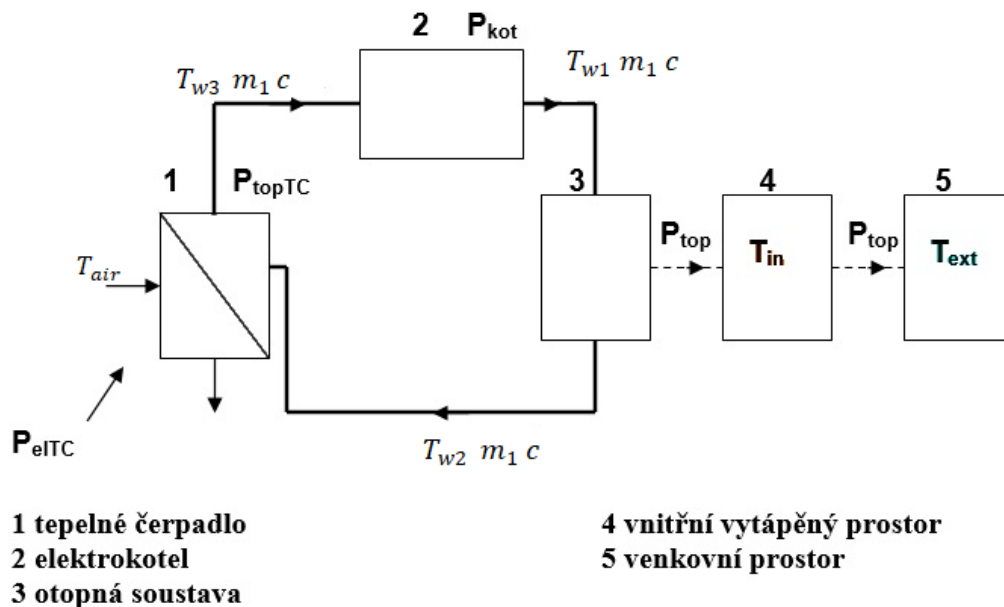
Topný výkon (kW), příkon (kW) a topný faktor ϵ

teplota venkovního vzduchu	topný výkon při teplotě topné vody			příkon při teplotě topné vody			topný faktor při teplotě topné vody		
	35°C kW	50°C kW	60°C kW	35°C kW	50°C kW	60°C kW	35°C ϵ	50°C ϵ	60°C ϵ
-20	6,7	7,3	7,8	2,8	3,9	4,9	2,4	1,9	1,6
-15	7,7	8,2	8,7	2,9	3,9	4,9	2,7	2,1	1,8
-7	9,6	10,1	10,5	3	4,1	5	3,2	2,5	2,1
+2	11,3	11,9	11,6	3	4,1	5	3,7	2,9	2,3
+7	12,3	11,6	11,2	2,9	3,8	4,5	4,3	3	2,5
+10	15,2	14,2	13,6	3	3,9	4,7	5,1	3,7	2,9
+15	16,1	15,2	14,6	3	3,9	4,7	5,3	3,9	3,1
+20	17,6	18,6	17,8	3	4,1	4,8	5,8	4,6	3,7
+30	18,2	20,3	19,8	3	4	4,8	6,1	5	4,1
+40	7,7	25,7	26,4	4,4	5,9	7,2	5,6	4,4	3,6

Obrázek 19 - Souhrnná tabulka tepelného čerpadla WPL 18 E (data převzaté od dodavatele Stiebel Eltron)

5.2 Bivalentní provoz tepelného čerpadla se sériově napojeným elektrokotlem

Bivalentní provoz systému vytápění nám dává možnost snížit výkon tepelného čerpadla. Správně navržený výkon tepelného čerpadla nám zajistí vytápění po většinu topné sezóny, ale v extrémně chladných dnech mu vypomůže druhý zdroj tepla. V této kapitole navrhne systém tepelného čerpadla se sériově napojeným elektrokotlem. Elektrokotel bude přihřívat topné médium na vyšší teplotu na výstupu tepelného čerpadla, tj. nad hranici bivalence. Celý matematický model bivalentního systému s elektrokotlem popíšeme rovnicemi dle schématu na obr. 7. Určíme Příkon a topný výkon tepelného čerpadla za topné období, příkon (= topný výkon) elektrokotle za topné období, celkový topný výkon za topné období a průměrnou hodnotu topného faktoru tepelného čerpadla. Díky tomuto matematickému popisu zjistíme, kolik elektrické energie spotřebuje tepelné čerpadlo a elektrokotel a zároveň vyčíslíme, jaké tepelné výkony zařízení dodaly. Výsledné hodnoty matematického modelu nám pomůžou stanovit energetickou náročnost varianty a z kalkuloval náklady na vytápění.



Obrázek 20 - Schéma bivalentního systému tepelného čerpadla se sériově napojeným elektrokotlem

Soustava rovnic popisující systém bivalentního provozu tepelného čerpadla se sériově zapojeným elektrokotlem:

$$P_{\text{topTC}} + P_{\text{kot}} = c * m_1 * (T_{w1} - T_{w2})$$

$$P_{\text{top}} = P_{\text{elTC}} + P_{\text{kot}}$$

Rovnice pro samostatné tepelné čerpadlo:

$$P_{\text{topTC}} = c * m_1 * (T_{w3} - T_{w2})$$

$$P_{\text{topTC}} = P_{\text{elTC}} * \text{COP} (T_{\text{air}}, T_{w3})$$

Rovnice pro otopnou soustavu a daný objekt:

$$P_{\text{topTC}} = k_1 * (T_{\text{in}} - T_{\text{air}})$$

$$P_{\text{topTC}} = k_2 * \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{2} - T_{\text{in}}$$

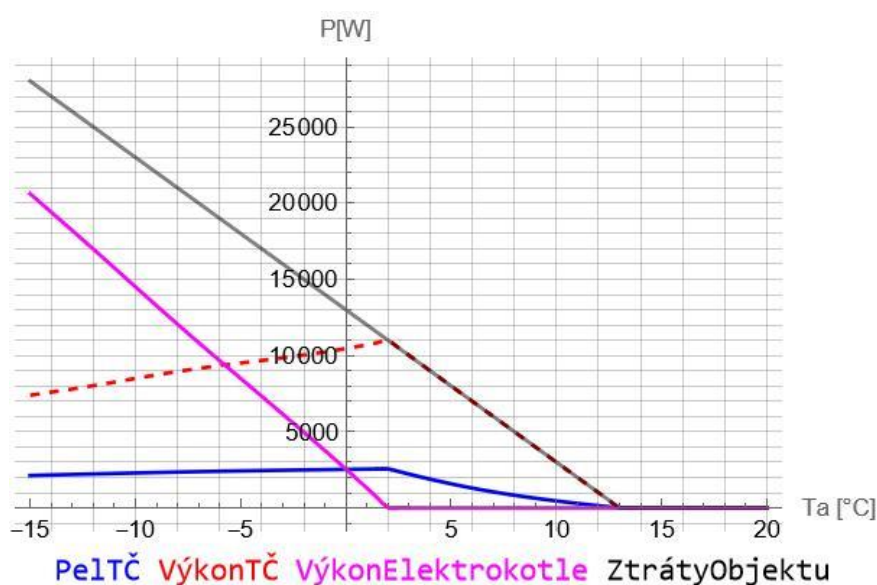
$\text{COP} (T_{\text{air}}, T_{w3})$... výraz představující topný faktor tepelného čerpadla jako funkci dvou teplot, tj. venkovní teplota vzduchu a teploty vody na výstupu tepelného čerpadla

P_{elTC}	elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
P_{topTC}	topný výkon tepelného čerpadla [W]
P_{kot}	elektrický příkon kotle (topný výkon kotle) [W]
P_{top}	celkový topný výkon systému [W]
m_1	hmotnostní průtok vody na topné straně systému [kg s ⁻¹]
c	měrná tepelná kapacita vody [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T_{w1}	teplota vody přiváděné do otopné soustavy za elektrokotlem [°C]
T_{w2}	teplota vratné vody z otopné soustavy [°C]
T_{w3}	teplota na výstupu tepelného čerpadla [°C]
T_{air}	venkovní teplota, teplota vzduchu vstupující do výparníku [°C]
T_{in}	požadovaná vnitřní teplota [°C]
k_1	koeficient charakterizující přestup tepla mezi vnitřním vytápěným prostorem a vnějším okolím [-]
k_2	koeficient charakterizující přestup tepla mezi otopnou soustavou a vnitřním vytápěným prostorem [-]
$\text{COP} (T_{\text{air}}, T_{w3})$	výraz představující topný faktor tepelného čerpadla jako funkci dvou teplot, tj. venkovní teplota vzduchu a teploty vody na výstupu tepelného čerpadla

5.2.1 Vyhodnocení dle matematického modelu bivalentního systému tepelného čerpadla s elektrokotlem z Wolfram Mathematica 13.0

5.2.1.1 Grafické vyhodnocení matematického modelu

Graf 2 znázorňuje reálné chování tepelného čerpadla vzduch-voda se zařazeným elektrokotlem v sérii. V momentě, kdy venkovní teplota klesne pod hranici 2 °C, tepelné čerpadlo ztrácí svůj výkon a musí sepnout bivalentní zdroj, tj. elektrokotel. Při návrhové teplotě -12 °C, kdy má objekt tepelné ztráty 25 kW je potřeba, aby elektrokotel dodal 17 kW výkonu tepla, tzn. většinu topného výkonu, aby byly zachovány požadavky na vnitřní teplotu objektu.



Graf 2 - Graf závislosti výkonu bivalentního systému tepelného čerpadla vzduch-voda s elektrokotlem v sérii na venkovní teplotě

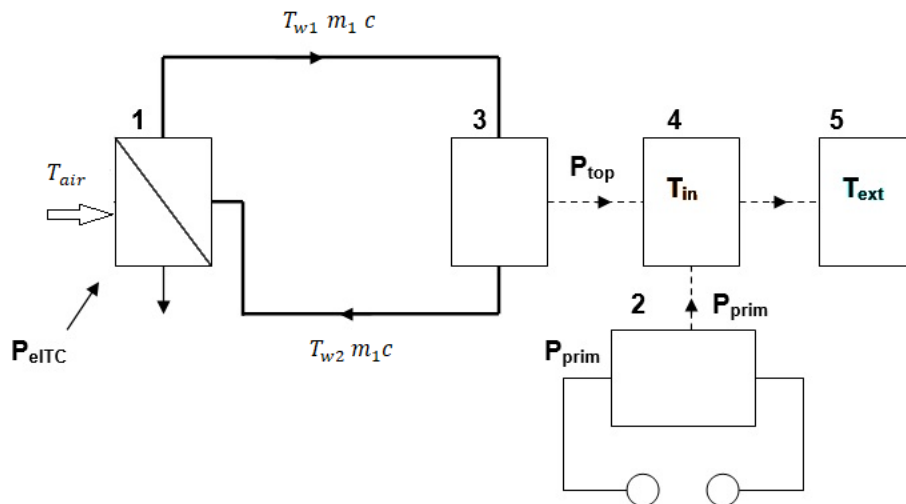
5.2.1.2 Číselné vyhodnocení

Číselné vyhodnocení vychází z výsledků matematického modelu.

Typ otopného systému	Bivalentní systém tepelného čerpadla s elektrokotlem v sérii
Tepelné ztráty objektu [kW]	25
Hranice bivalence [°C]	2,01
Tepelná potřeba objektu [GJ]	173,94
Dodávka tepla tepelným čerpadlem [GJ]	138,39
Dodávka tepla bivalentním zdrojem [GJ]	35,55
COP tepelného čerpadla [-]	4,4
Potřeba elektrické energie pro TČ [GJ]	31,4
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [GJ]	35,55
Potřeba elektrické energie pro TČ [kWh]	8722,22
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [kWh]	9875,00
Celkem spotřebované elektrické energie [kWh]	18597,22

5.3 Bivalentní provoz tepelného čerpadla s přímotopy uvnitř objektu

Opět navrhujeme bivalentní provoz systému vytápění. V tomto systému výkon tepelného čerpadla, který pokryje většinu topné sezóny, ale v extrémně chladných dnech mu vypomůže druhý zdroj tepla. V extrémně chladných dnech bude tepelné čerpadlo vytápět objekt na nižší teplotu, než je požadovaná teplota vzduchu v místnosti a v tomhle momentě nám sepnou přímotopy umístěné uvnitř objektu. Přímotopy pomůžou systému ohřát vzduch v objektu na teplotu požadovanou. Matematický model bivalentního systému s přímotopy uvnitř objektu popíšeme rovnicemi dle schématu na obr. 8. Určíme Příkon a topný výkon tepelného čerpadla za topné období, spotřebu elektrické energie a dodané tepla přímotopy za topné období, celkový topný výkon za topné období a průměrnou hodnotu topného faktoru tepelného čerpadla. Výsledné hodnoty použijeme pro finální analýzu energetické a finanční náročnosti.



1 tepelné čerpadlo
2 přímotopy
3 otopná soustava

4 vnitřní vytápěný prostor
5 venkovní prostor

Obrázek 21 - Schéma bivalentního systému tepelného čerpadla s přímotopy uvnitř objektu

Rovnice popisující tepelné čerpadlo:

$$P_{topTC} = c * m_1 * (T_{w1} - T_{w2})$$

$$P_{topTC} = P_{elTC} * COP(T_{air}, T_{w1})$$

Rovnice popisující tepelné čerpadlo a přímotopy:

$$P_{top} = P_{topTC} + P_{prim}$$

Rovnice pro vytápěný objekt:

$$P_{topTC} = k_1 * (T_{in} - T_{air})$$

Rovnice pro otopnou soustavu, vytápěný objekt a přímotopy:

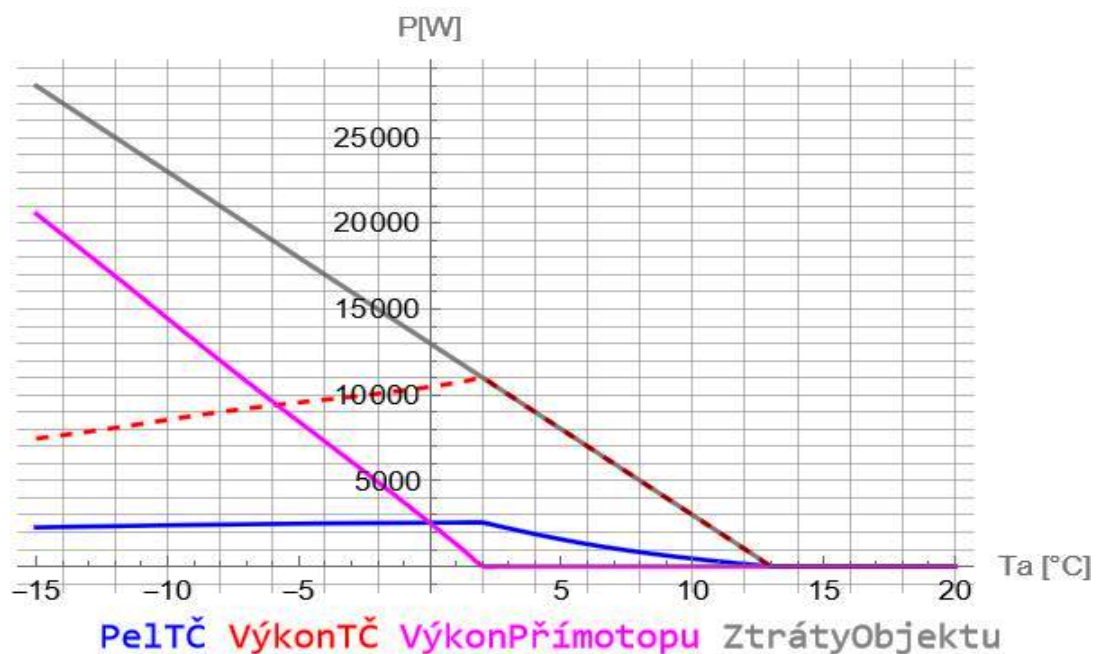
$$P_{top} = k_2 * \left(\frac{(T_{w1} - T_{w2})}{2} - T_{in} \right) + P_{prim}$$

P_{elTC}	elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
P_{topTC}	topný výkon tepelného čerpadla [W]
P_{prim}	elektrický příkon přímotopů (topný výkon přímotopů) [W]
P_{top}	celkový topný výkon systému [W]
m_1	hmotnostní průtok vody na topné straně systému [kg s-1]
c	měrná tepelná kapacita vody [J kg-1K-1]
T_{w1}	teplota vody přiváděné do otopné soustavy [°C]
T_{w2}	teplota vratné vody z otopné soustavy [°C]
T_{air}	venkovní teplota, teplota vzduchu vstupující do výparníku [°C]
T_{in}	požadovaná vnitřní teplota [°C]
k_1	koeficient charakterizující přestup tepla mezi vnitřním vytápěným prostorem a vnějším okolím [-]
k_2	koeficient charakterizující přestup tepla mezi otopnou soustavou a vnitřním vytápěným prostorem [-]
$COP (T_{air}, T_{w1})$	výraz představující topný faktor tepelného čerpadla jako funkci dvou teplot, tj. venkovní teplota vzduchu a teploty vody na výstupu tepelného čerpadla

5.3.1 Vyhodnocení dle matematického modelu bivalentního systému tepelného čerpadla s přímotopy z Wolfram Mathematica 13.0

5.3.1.1 Grafické vyhodnocení matematického modelu

Graf 3 znázorňuje reálné chování tepelného čerpadla vzduch-voda se zařazenými přímotopy v interiéru. Graf zahrnuje tepelné ztráty objektu, přesně tak, jak jsme si je definovali v kapitole 4.4., tedy že tepelné ztráty objektu lineárně závisí na venkovní teplotě vzduchu. V momentě, kdy venkovní teplota klesne pod hranici 2 °C, tepelné čerpadlo ztrácí svůj výkon a musí sepnout bivalentní zdroj, tj. přímotopy, které ohřívají vnitřní vzduch objektu. Při návrhové teplotě -12°C, kdy má objekt tepelné ztráty 25 kW je potřeba, aby přímotopy dodaly 17 kW výkonu tepla, tzn. většinu topného výkonu, aby byly zachovány požadavky na vnitřní teplotu objektu. Tento výsledný graf a jeho závislosti můžeme zkontrolovat dle číselných výsledků viz. kapitola 5.3.1.2.



Graf 3 - Graf závislosti výkonu bivalentního systému tepelného čerpadla vzduch-voda s přímotopy na venkovní teplotě

5.3.1.2 Číselné vyhodnocení

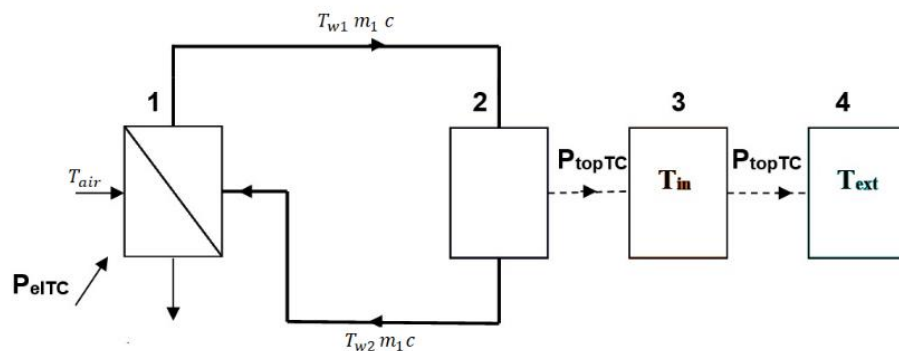
Číselné vyhodnocení vychází z výsledků matematického modelu.

Typ otopného systému	Bivalentní systém tepelného čerpadla s přímotopy v interiéru objektu
Tepelné ztráty objektu [kW]	25
Hranice bivalence [°C]	2,01
Tepelná potřeba objektu [GJ]	173,8
Dodávka tepla tepelným čerpadlem [GJ]	138,42
Dodávka tepla bivalentním zdrojem [GJ]	35,34
COP tepelného čerpadla [-]	4,38
Potřeba elektrické energie pro TČ [GJ]	31,64
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [GJ]	35,34
Potřeba elektrické energie pro TČ [kWh]	8788,89
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [kWh]	9816,67
Celkem spotřebované elektrické energie [kWh]	18605,56

Tabulka 4 - Výsledné parametry bivalentního systému tepelného čerpadla vzduch - voda s přímotopy v interiéru

5.4 Monovalentní provoz tepelného čerpadla vzduch – voda

Monovalentní provoz tepelného čerpadla vzduch – voda by mělo být většího výkonu a musí schopno samostatně a celoročně pokrýt potřebu tepla na vytápění, tzn. samostatné pokrytí tepelných ztrát fiktivního objektu při výpočtové venkovní teplotě. Monovalentní systém tepelného čerpadla matematicky popíšeme dle schématu obr. 21. Určíme příkon tepelného čerpadla za topné období, topný výkon za topné období a průměrnou hodnotu topného faktoru tepelného čerpadla.



1 tepelné čerpadlo

2 otopná soustava

3 vnitřní vytápěný prostor

4 venkovní prostor

Obrázek 22 - Schéma monovalentního systému tepelného čerpadla

Soustava rovnic popisující systém monovalentního provozu tepelného čerpadla:

$$P_{topTC} = c * m_1 * (T_{w1} - T_{w2})$$

$$P_{topTC} = P_{elTC} * COP (T_{air}, T_{w1})$$

Rovnice pro otopnou soustavu a daný objekt:

$$P_{topTC} = k_1 * (T_{in} - T_{air})$$

$$P_{topTC} = k_2 * \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{2} - T_{in}$$

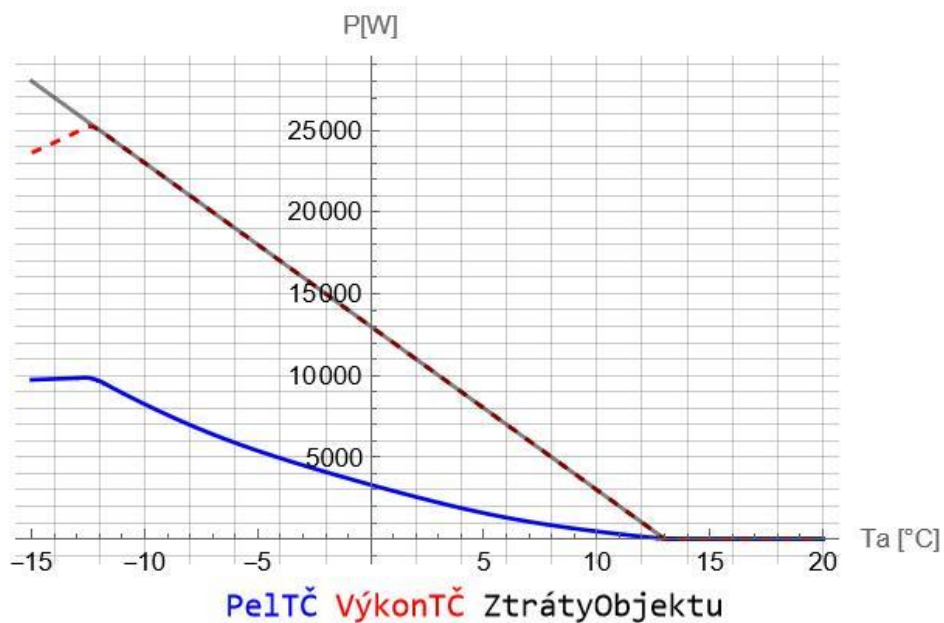
P_{elTC}	elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
P_{topTC}	topný výkon tepelného čerpadla [W]
P_{top}	celkový topný výkon systému [W]
m_1	hmotnostní průtok vody na topné straně systému [kg s ⁻¹]
c	měrná tepelná kapacita vody [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T_{w1}	teplota vody přiváděné do otopné soustavy [°C]
T_{w2}	teplota vratné vody z otopné soustavy [°C]
T_{air}	venkovní teplota, teplota vzduchu vstupující do výparníku [°C]
T_{in}	požadovaná vnitřní teplota [°C]
k_1	koeficient charakterizující přestup tepla mezi vnitřním vytápěným prostorem a vnějším okolím [-]
k_2	koeficient charakterizující přestup tepla mezi otopnou soustavou a vnitřním vytápěným prostorem [-]
$COP (T_{air}, T_{w1})$	výraz představující topný faktor tepelného čerpadla jako funkci dvou teplot, tj. venkovní teplota vzduchu a teploty vody na výstupu tepelného čerpadla

5.4.1 Vyhodnocení dle matematického modelu monovalentního systému tepelného čerpadla z Wolfram Mathematica 13.0

Pro výsledné porovnání všechny systému, jsme museli zachovat reálné charakteristiky a parametry definovaného tepelného čerpadla vzduch – voda. Z předchozích kapitol je zřejmé, že samotné tepelné čerpadlo o výkonu 25 kW nám nedodá potřebný topný výkon až do teploty -12°C . Proto bylo potřeba si tepelné čerpadlo matematicky nasimulovat a matematicky několikrát zvětšit, tak aby tepelné čerpadlo pokrylo definované tepelné ztráty objektu.

5.4.1.1 Grafické vyhodnocení matematického modelu

Výsledný graf 4 monovalentního systému tepelného čerpadla vykresluje že topný výkon je stejný jako tepelné ztráty v objektu v závislosti na venkovní teplotě. Pokud teplota klesne pod -12°C monovalentní systém tepelného čerpadla rapidně klesá na dodaném výkonu. V našem případě, ale můžeme argumentovat zadanými vstupními parametry a tj. geografická poloha objektu, kdy je počítáno s venkovní teplotou -12°C , dle kapitoly 4.2. Pokud by se geografická poloha změnila, změnila by se také venkovní teplota pro celkový výpočet ztrát.



Graf 4 - Graf závislosti výkonu monovalentního systému tepelného čerpadla na venkovní teplotě

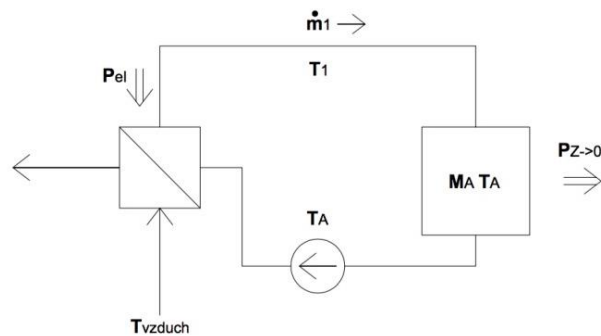
5.4.1.2 Číselné vyhodnocení

Číselné vyhodnocení vychází z výsledků matematického modelu.

Typ otopného systému	Monovalentní systém - Samostatné tepelné čerpadlo 3x18kW
Tepelné ztráty objektu [kW]	25
Hranice bivalence [°C]	X (teoreticky -12°C)
Tepelná potřeba objektu [GJ]	174,6
Dodávka tepla tepelným čerpadlem [GJ]	174,6
Dodávka tepla bivalentním zdrojem [GJ]	X
COP tepelného čerpadla [-]	4,02
Potřeba elektrické energie pro TČ [GJ]	43,47
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [GJ]	X
Potřeba elektrické energie pro TČ [kWh]	12075,00
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [kWh]	X
Celkem spotřebované elektrické energie [kWh]	12075,00

5.5 Jednoduchý otopný systém s akumulací nádrží

V této kapitole si představíme možnost jednoduchého otopného systému s tepelným čerpadlem a se zařazenou akumulací nádrží. Akumulací nádrž bude o určitém objemu, který bude obsahovat určitou hmotnost vody a bude ohřívána na požadovanou teplotu. V extrémně chladných dnech nám teplo v akumulací nádrží může pokrýt topné špičky objektu. Matematický model topného systému s akumulací nádrží na teplou vodu uvnitř objektu popíšeme rovnicemi dle schématu na obr. 9. Tento systém není cílem naší práce. (17)



Obrázek 23 - Schéma systému s akumulací nádrží

Soustava rovnic popisující otopný systém tepelného čerpadla s akumulací nádrží:

$$P_{topTC} = P_{elTC} * COP(T_{air}, T_1)$$

$$P_{top} = m_1 * c * (T_1 - T_A)$$

$$P_{top} = m_A * c * \frac{dT_A}{dt}$$

P_{elTC}	elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
P_{topTC}	topný výkon tepelného čerpadla [W]
P_z	ztrátový výkon [W]
m_1	hmotnostní průtok vody na topné straně systému [kg s ⁻¹]
c	měrná tepelná kapacita vody [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T_1	teplota vody přiváděné [°C]
T_A	teplota vody v akumulací nádrží [°C]
T_{air}	venkovní teplota, teplota vzduchu vstupující do výparníku [°C]
T_{in}	požadovaná vnitřní teplota [°C]
m_A	hmotnost vody v nádrží [kg]
$COP(T_{air}, T_1)$	výraz představující topný faktor tepelného čerpadla jako funkci dvou teplot, tj. venkovní teplota vzduchu a teploty vody na výstupu tepelného čerpadla

6 Vyhodnocení základních modelů otopných systému s tepelným čerpadlem vzduch voda

6.1 Technické a energetické vyhodnocení

Veškeré potřebné parametry pro vyhodnocení, technického i ekonomického, vychází z výsledných hodnot programů, viz. tabulka 5 v kapitole 6.2. Roční potřeba tepla navrženého objektu o ztrátě 25 kW je 174 GJ. Teplo je předáváno pomocí radiátorů. Potřebné teplo bylo zapotřebí dodat všemi navrženými způsoby vytápění. Pokud vyhodnotíme otopný systém s tepelným čerpadlem podle nejdůležitějšího parametru, budeme hodnotit podle koeficientu COP. Systém s nejlepším COP = 4,4 [-] je v bivalentní systém tepelného čerpadla vzduch-voda s elektrokotlem v sérii. Dle analýzy bude tento systém pracovat nejefektivněji. Bivalentní systém tepelného čerpadla vzduch – voda s přímotopy v interiéru má oproti předchozímu systému nižší koeficient, COP = 4,38 [-]. I přes nižší hodnotu COP není rozdíl oproti předchozímu systému markantní. Finální uživatel se tedy může rozhodnout mezi těmito dvěma systémy.

Ze stavebně-technického hlediska je velký rozdíl mezi navrženými bivalentními zdroji. Elektrokotol v sérii s tepelným čerpadlem je zabudovaný ve vnitřní jednotce systému, většinou připojená jako elektropatrona. Díky regulaci a čidel tepelného čerpadla elektrokotel automaticky sepne, pokud je venkovní teplota pod hranicí bivalence. V dnešní době užití tepelných čerpadel vzduch – voda je ve vnitřní jednotce zabudovaný také boiler pro TUV. Proto takto navržený systém zabere místo pouze v technické místnosti objektu a je jednodušší také na elektropřípravu pokud je hlavní rozvaděč domu navržen do technické místnosti.

Proti systému s elektrokotlem je systém s přímotopy ve značné nevýhodě ze stavebně – technického hlediska. Přímotopy by měly být navrženy do každé místnosti objektu, protože přímotopy po sepnutí při teplotě pod hranicí bivalence nenahřívají otopnou vodu, ale vnitřní vzduch v objektu. Musí být navržena správná elektropříprava pro zapojení přímotopů v závislosti na jejich příkonu. Přímotopy v každé místnosti objektu zvyšují také náklady na investici. V posledním bodě můžeme hodnotit neestetičnosti přímotopu a radiátoru v jedné místnosti. Do dnešních moderních objektů pro zlepšení efektivity vytápění a tepelného čerpadla se využívá krb umístěný v objektu, který bude ladit i po estetické stránce, nicméně má také své zápory, např. v případě dřeva a zvýšené emise.

Poslední systém jsme navrhli jako systém monovalentní. Pro účely porovnání s ostatními systémy, jsme tepelné čerpadlo museli matematicky zvětšit tak, aby pokrylo celkovou potřebu objektu na teplo. Tepelné čerpadlo jsme zvětšili 3x. Z výsledných hodnot tabulky 5 má tepelné čerpadlo nejnižší COP, ale oproti předchozím systémům spotřebuje nejméně elektrické energie. Nicméně i přes nízkou spotřebu elektrické energie takto navržené tepelné čerpadlo by bylo několikanásobně dražší než u předchozích systémů a předpokládáme, že návratnost investice by byla delší. Z technického hlediska také vyplývá, že takto vysoký topný výkon tepelného čerpadla pro pokrytí nejhorších ztrát

objektu využijeme jen pár dní v roce. Z těchto argumentů plyne, že monovalentní systém je ekonomický nesmysl a technická zbytečnost.

6.2 Finanční zhodnocení modelů systémů tepelného čerpadla

Výsledkem vytvořených matematických modelů jsou hodnoty a parametry otopného systému s použitím tepelného čerpadla vzduch-voda WPL 18 E. Díky vytvořené simulaci otopného systému jsme získali množství tepla, které je potřeba dodat objektu o ztrátě 25kW, množství tepla, které bylo dodáno tepelným čerpadlem vzduch-voda a zbylou potřebnou energii, která byla dodávána bivalentním zdrojem pod hranicí bivalence tepelného čerpadla, vše rozděleno v tabulce 5 dle druhu otopného systémů. Z těchto výsledků jsme vyčíslili spotřebu elektrické energie samotným tepelným čerpadlem a spotřebu bivalentních zdrojů. Pro vyčíslení celkových finančních nákladů na provoz vytápění využijeme aktuální data a ceny od společnosti ČEZ a.s. Získali jsme data o časech spínání HDO pro nízký tarif z roku 2022 pro distribuční sazbu D57d v dané lokalitě, viz. tabulka 6. Jedná se o dvoutarifovou sazbu s dobou platnosti nízkého tarifu 20hodin denně. Dále pro celkové vyčíslení a dodaný ceník budeme uvažovat, že navržený objekt je domácnost.

Typ otopného systému	Monovalentní systém Samostatné tepelné čerpadlo 3x18kW	Bivalentní systém tepelného čerpadla s elektrokotlem v sérii	Bivalentní systém tepelného čerpadla s přímotopy v interiéru objektu
Tepelné ztráty objektu [kW]	25	25	25
Hranice bivalence [°C]	X (teoreticky - 12°C)	2,01	2,01
Tepelná potřeba objektu [GJ]	174,6	173,94	173,8
Dodávka tepla tepelným čerpadlem [GJ]	174,6	138,39	138,42
Dodávka tepla bivalentním zdrojem [GJ]	X	35,55	35,34
COP tepelného čerpadla [-]	4,02	4,4	4,38
Potřeba elektrické energie pro TČ [GJ]	43,47	31,4	31,64
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [GJ]	X	35,55	35,34
Potřeba elektrické energie pro TČ [kWh]	12075,00	8722,22	8788,89
Potřeba elektrické energie pro bivalentní zdroj [kWh]	X	9875,00	9816,67
Celkem spotřebované elektrické energie [kWh]	12075,00	18597,22	18605,56

Tabulka 5 - Výsledné parametry otopných soustav s použitím tepelného čerpadla vzduch-voda

Časy spínání HDO pro nízký tarif								
	Pásmo NT1		Pásmo NT2		Pásmo NT3		Pásmo NT4	
	od	do	od	do	od	do	od	do
po-pá	0:30	8:00	10:00	14:00	15:00	19:00	19:30	0:00
so-ne	1:00	8:00	9:00	13:15	14:15	19:00	20:00	0:00

Tabulka 6 - Časy spínání HDO pro nízký tarif

Do ceny elektrické energie budeme zahrnovat pouze spotřebu elektrické energie a cenu za distribuci elektrické energie. Pro finální cenu uživatele by bylo zjistit spotřebu elektrické energie ostatních spotřebičů v objektu uživatele a velikost hlavního jističe, za který se účtuje měsíční stálá platba. Ceny energie vychází z ceníku produktu „Elektřina na 3 roky“, distributor ČEZ a.s., tarif D57d, Elektrické topení. Tyto ceny jsou platné od roku 2020 do roku 2023.

Ceník produktu Elektřina na 3 roky (ČEZ a.s.), tarif D57d, ELEKTRICKÉ TOPENÍ	
	Cena za dodávku elektřiny (Kč/MWh)
Vysoký tarif	1837,99
Nízký tarif	1837,99
	Cena za distribuci elektřiny (Kč/MWh)
Vysoký tarif	265,66
Nízký tarif	227,33

Tabulka 7 - Ceník elektrické energie v tarifu D57d

Dle tabulky 8 vychází nejméně náklady na provoz vytápění systém se samostatným tepelným čerpadlem v systému. Nicméně náklady na investici takového systému budou několikanásobně vyšší. V takovém případě by bylo na místě, vyhodnotit tuto investici dle potřebných metod pro ekonomické hodnocení investic, do kterých vstupuje několik proměnných včetně faktu, kolik uspoříme oproti stávajícímu zdroji, který vyměníme za nové tepelné čerpadlo. Dle technických aspektů je monovalentní systém tepelného čerpadla vzduch-voda ekonomický nesmysl, jelikož nepotřebujeme takto velký topný výkon tepelného čerpadla většinu roku, ale pouze v řádu dnů.

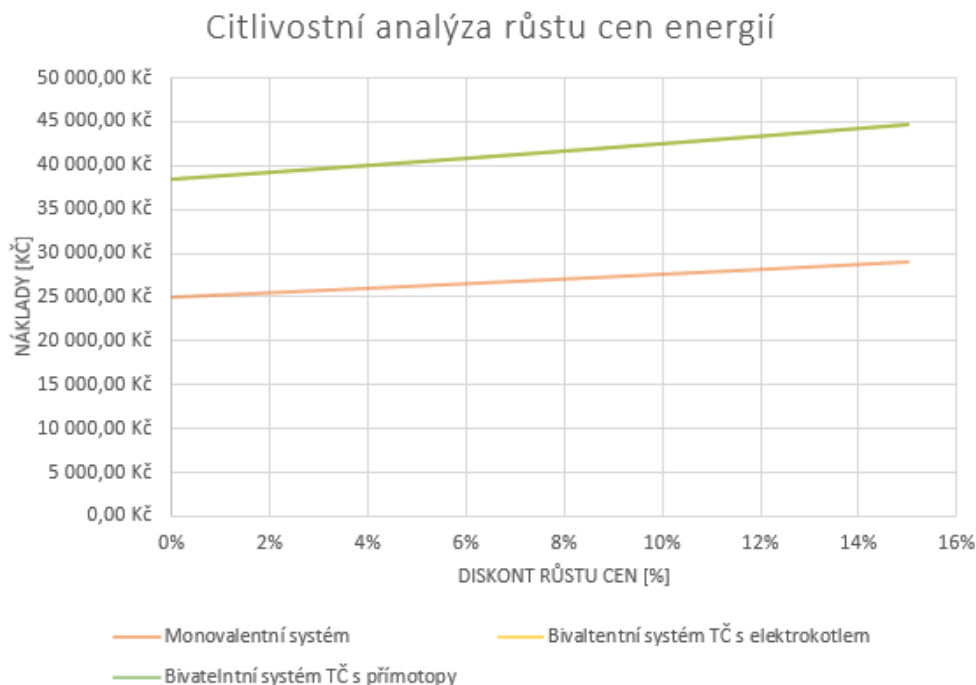
V dalším případě můžeme porovnat náklady systémů z různými bivalentními zdroji. Náklady na spotřebu elektrické při použití elektrokotle do série s tepelným čerpadlem, případně přímotopy do interiéru jsou prakticky totožné (finanční náklady jsou v rozdílu pár korun). Potom je tedy finální rozhodnutí můžeme nechat na konečném uživateli a doporučit mu pouze technické výhody a nevýhody těchto systémů.

Vyčíslení finančních nákladů na vytápění za časové období 1 rok			
	Monovalentní systém 3x18 kW	Bivalentní systém TČ s elektrokotlem	Bivalentní systém TČ s přímotopy
Celková spotřeba elektrické energie [kWh]	12075	18597,22	18605,56
Celková spotřeba elektrické energie [MWh]	12,075	18,5972	18,6056
Celková spotřeba elektrické energie v NT	10,0625	15,4977	15,5046
Celková spotřeba elektrické energie v VT	2,0125	3,0995	3,1009
Cena za dodávku elektřiny [Kč]	22193,73	34181,50	34196,83
Cena za distribuci [Kč]	2822,15	4346,51	4348,46
Celkové roční náklady na provoz vytápění [Kč]	25015,88	38528,02	38545,29

Tabulka 8 – Celkové roční finanční náklady na provoz vytápění dle typu systému

6.2.1 Citlivostní analýza růstu cen energie

V kapitole 6.2 byl použit ceník, který je platný do roku 2023. Po jeho platnosti je vhodné pro účely této práce použít citlivostní analýzu pro roční růst cen energií s diskontem 1,5 % po dobu 10 let. Tato analýza slouží jako predikce cen kvůli nestálému stavu na současném energetickém trhu.



Graf 5 - Citlivostní analýza růstu cen elektrické energie

7 Optimalizace otopného systému tepelného čerpadla s akumulací tepelné energie za pomoci prediktivního řízení dle venkovní teploty

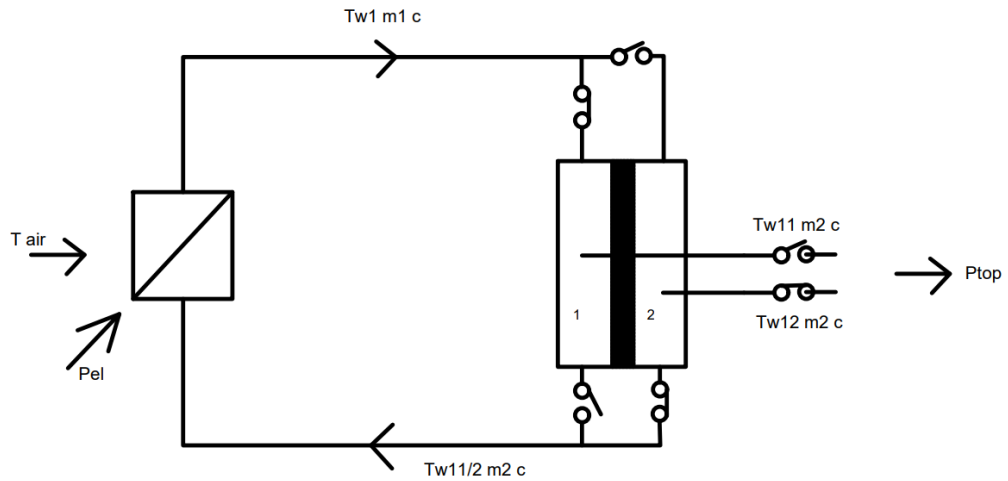
Dle teoretické rešerše jsme si definovali, na jakém obecném principu funguje prediktivní řízení. V naší práci budeme pracovat s parametry venkovních teplot z geografického místa Brno. Prediktivní řízení za pomoci MPC nebudeme využívat, neboť takto naprogramovaný regulátor přesahuje téma této práce. Pro predikci v této práci se budeme snažit matematicky zjednodušit, ale v takovém rozměru, aby byl tento model dále využitelný. Náš předpoklad je, že základ matematického modelu bude vycházet z definované rovnice:

$$\Phi_{medium} = f(\Phi_{in}, \Phi_{out}, \Phi_{predicted}, x, system),$$

Kde Φ_{medium} je teplota topného média, Φ_{in} je teplota uvnitř objektu, Φ_{out} je venkovní teplota, $\Phi_{predicted}$ je předpověď venkovní teploty, x jsou další informace o vnějším a vnitřním prostředí jako je například počet osob v objektu či tepelné zisky, **system** značí znalost systému ve smyslu jeho dynamiky.

7.1 Zjednodušený princip prediktivního řízení tepelného čerpadla vzduch-voda se zařazenou akumulací nádrží

Pro pochopení matematického modelu jsme si zkreslili jednoduché schéma otopného systému viz obr. 24. V systému je zařazené tepelné čerpadlo, které jsme využívali i v předchozích kapitolách, tj. tepelné čerpadlo vzduch – voda WPL 18 e. Systém má zařazenou akumulací nádrž o volitelné velikosti (dle návrhu), její velikost však musí být dostatečně velká, pro dostatečnou akumulaci tepla, které budeme pro navržený objekt potřebovat. Definovaná nádrž je rozdělená na dva sektory 1 a 2. Uvažujme, že sektory jsou oddělené tepelně izolačním materiálem a každá část akumulací nádrže má přírůdky i odvody regulované spínacím zařízením. Pro zjednodušení uvažujeme, že v jedné části akumulací nádrže se teplá voda během jednoho dne nahřívá tepelným čerpadlem a během stejného dne se z druhé části nádrže odebírá topná voda do objektu. Odebíraná topná voda byla připravena tepelným čerpadlem předchozí den dle predikce podle počasí, tj. kolik tepla bude potřeba v daný den do objektu dodat. Pro takto navržený systém je výhodné, že tepelné čerpadlo, které dodává tepelný výkon, uchová také nadbytečnou topnou energii z tepelného čerpadla. Víme, že tepelné ztráty objektu přímo souvisí teplotou venkovního vzduchu, tzn. potřebnou teplotu otopné vody. Z tohoto tvrzení můžeme definovat, že teplota vody pro budoucí den v akumulací nádrži bude také proměnná dle venkovních teplot, času a potřeby objektu. Teplota teplé vody v akumulací nádrži bude záviset na funkci venkovní teploty a teploty topné vody pro objekt. Díky tomuto základnímu tvrzení můžeme nasimulovat matematický model topného systému tepelného čerpadla vzduch – voda se zařazenou akumulací nádrží. Pro vytvoření matematického modelu je opět využit program Wolfram Mathematica 13.0.



Obrázek 24 - Schéma systému tepelného čerpadla se zařízenou akumulací s prediktivním řízením podle venkovní teploty

P_{el}	elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
P_{top}	potřebný topný výkon [W]
T_{air}	teplota vzduchu [°C]
m_1	hmotnostní průtok vody na topné straně systému [kg s^{-1}]
c	měrná tepelná kapacita vody [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
m_{A1}	hmotnost vody v nádrži v sekci 1 [kg]
m_{A2}	hmotnost vody v nádrži v sekci 2 [kg]
T_{w11}	teplota vody z akumulací nádrže ze sekce 1 [°C]
T_{w12}	teplota vody z akumulací nádrže ze sekce 2 [°C]
$T_{w11/2}$	teplota vratné vody z topného systému [°C]
m_2	hmotnostní průtok vody z topné strany systému [kg]

7.2 Matematický popis systému

7.2.1 Základní rovnice popisující systém tepelného čerpadla s akumulací nádrží

$$P_{topTC} = P_{elTC} * COP (T_{air}, T_1)$$

$$P_{top} = m_1 * c * (T_1 - T_A)$$

$$P_{top} = m_A * c * \frac{dT_{Acu}}{dt}$$

7.2.2 Odvození rovnic pro matematický model

Rovnice popisující potřebu teploty vody v čase

$$\frac{dT_{Acu}}{dt} = \frac{P_{top}(T_{air}, T_w)}{c * M_{Acu}}$$

Rovnice popisující spotřebu elektrické energie v čase

$$\frac{dE_{Acu}}{dt} = P_{el}(T_{air}, T_w)$$

P_{el}	elektrický příkon tepelného čerpadla [W]
P_{top}	potřebný topný výkon [W]
T_{air}	teplota vzduchu [°C]
M_{Acu}	Hmotnost vody v nádrži [kg]
c	měrná tepelná kapacita vody [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
E_{Acu}	spotřeba elektrické energie na akumulaci tepla do nádrže [MJ]
T_{Acu}	teplota vody v nádrži [°C]

7.2.3 Omezující funkce matematického modelu

7.2.3.1 Minimální teplota topné vody

Vychází z parametrů tepelného čerpadla. V našem případě se jedná o hodnotu tepelného čerpadla v součtu s bezpečnostním koeficientem.

7.2.3.2 Minimální hmotnostní průtok teplé vody

Jedná se o hodnotu, pod kterou se systém nesmí dostat, poté by tepelné čerpadlo fungovalo v nízkých průtocích a systém by fungoval v jiných parametrech a chladivo tepelného čerpadla by se mohlo dostat do kriticky vysokých hodnot tlaku.

$$msteckou_{min} = \frac{P_{top}(T_{air}, T_w)}{c * (T_{wmin} - T_{Acu})}$$

7.2.3.3 Definice topné sezóny

Topná sezóna je zahájena tehdy, pokud průměrná denní teplota venkovního vzduchu v příslušném geografickém místě klesne pod 13 °C ve dvou dnech po sobě a v budoucích dnech není očekáváno její zvýšení, dle vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu č. 194/2007 Sb.

Dle této definice omezujeme systém: $T_{in} \geq 13$ Systém netopí, případně udržuje na teplotu požadovanou.

7.2.3.4 Nesetrvačnost

Pro účely matematického modelu uvažujeme nesetrvačnou budovu s danou tepelnou ztrátou 25 kW při venkovní teplotě -12°C.

7.2.3.5 Teplota vody v akumulační nádrži

Nejvyšší přípustné hodnoty teploty vody v akumulační nádrži nejsou v této simulaci omezené, jelikož není cílem práce navrhnout její konstrukci. Při definování materiálů konstrukce akumulačního zásobníku by bylo možné si tyto hodnoty omezit. Reálně ovšem musíme dimenzovat akumulační nádrž tak, že nejvyšší teplota není příliš vysoká, neboť pak by vliv celkově nižšího topného faktoru eliminoval pozitivní vliv prediktivního řízení.

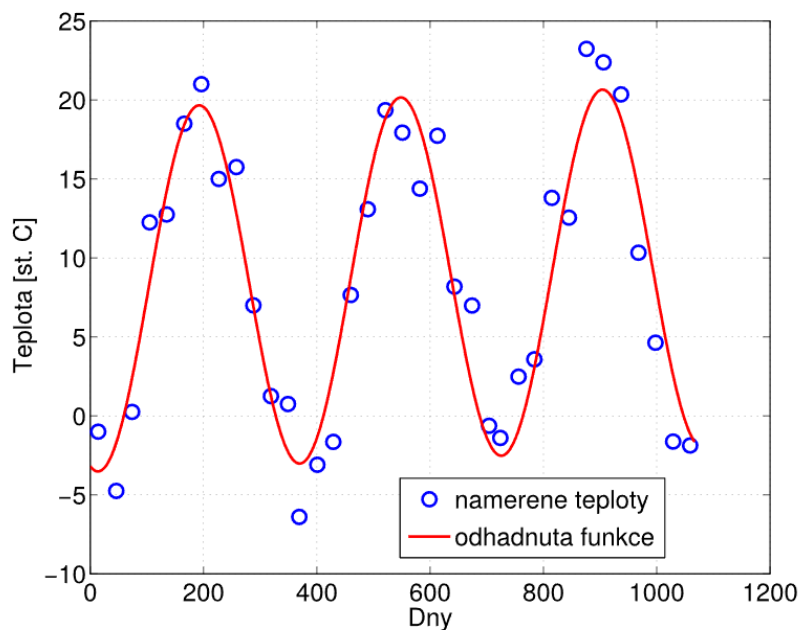
7.2.4 Prediktivní řízení

Prediktivní řízení vychází z mnoha parametrů ovlivňující predikci.

7.2.4.1 Teplota v závislosti na čase

Teplota venkovního vzduchu musí být pro program upravena. Teplota je interpolována a posunutá v závislosti na budoucím čase. Teploty venkovního vzduchu jsou nahrány do programu stejně jako v základních matematických modelech, jsou využity reálné teplotní hodnoty z Brna dodané vedoucím práce.

Interpolace používá vektorové body se známými hodnotami k odhadu hodnot neznámých nebo neměřených. Funkce *Interpolation* si díky dodaným datům definuje nebo odhadne přibližnou funkci teplot v čase, se kterou bude program rychleji pracovat.



Obrázek 25 - Příklad interpolace denních teplot (24)

Posun je definován jako čas za rok a je dán v základních jednotkách, tj. sekundy. Pokud tedy vezmeme interpolovanou funkci venkovních teplot a časově ji posuneme o jeden krok, získáme teploty z budoucího dne.

7.2.4.2 Parametry pro budoucí den

7.2.4.2.1 P_z - ztráty objektu

Tepelná ztrátovost objektu je lineární závislost ztrát objektu na venkovní teplotě. Objekt je definován stejně jako v základních programech.

7.2.4.2.2 $T_{wNaVytopení}$

Teplota topné vody závisí na venkovní teplotě vzduchu a ztrátě objektu.

7.2.4.2.3 t_{Start}

Čas, kdy je potřeba zapnout akumulování tepla z tepelného čerpadla, abychom od této časové hodnoty naakumulovali potřebnou tepelnou energii.

7.2.4.2.4 t_{End}

Čas, kdy skončí akumulování tepelné energie, která bude využita budoucí den.

$$t_{End} = t_{Start} + den$$

7.2.4.2.5 Časy, definice teplot, definice tepelných ztrát

Funkce *Range($t_{Start}, t_{End}, definovaný\ krok$)* definuje rozsah časů mezi kterými se budeme pohybovat výpočet dalších parametrů budoucího dne.

Díky tomuto časovému rozsahu můžeme vyhodnotit, jaké teploty se v tomto rozsahu vyskytují. Na základě teplot v daném úseku definujeme teplenou ztrátu objektu. Vše definováno jako nová funkce *teploty* a *hodnoty*. V závislosti na nově vytvořených funkcích *teploty* a *hodnoty* vypočítáme *teplotuPrumernou* a *energiePotrebna*. Jejich matematický popis vychází ze Simpsonovy numerické metody.

Výsledné parametry jsou použity pro výpočet průměrného výkonu:

$$\text{prumernyvykon} = \frac{\text{energiePotrebna}}{\text{den}}$$

7.2.4.2.6 Rozsah teplot

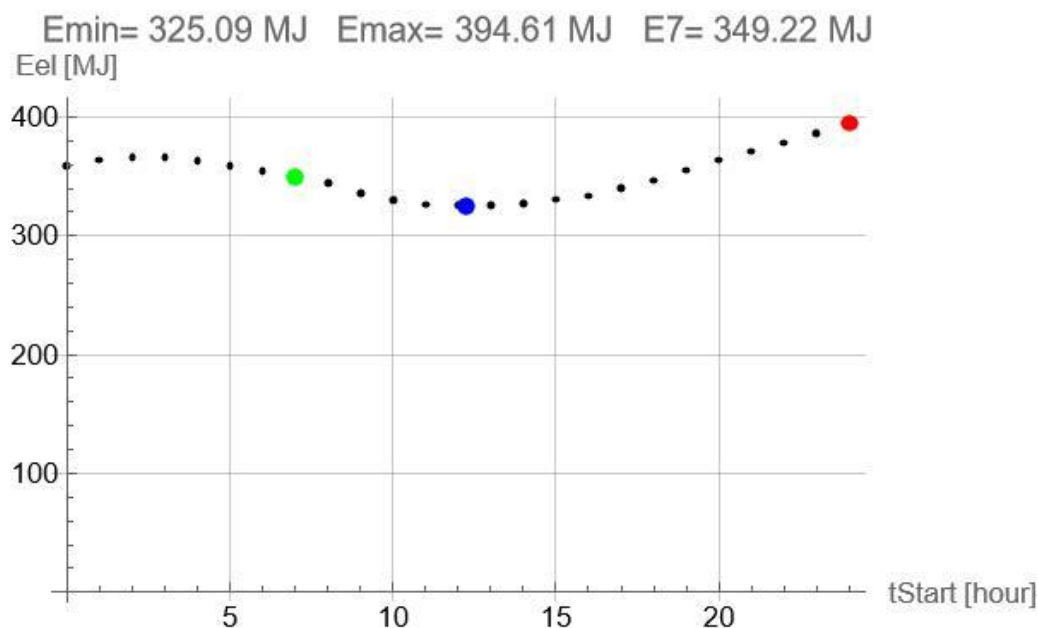
Z parametrů předchozí kapitoly 7.2.4.2.5 vyhodnotíme mezi jakými teplotami vody v nádrži se budeme pohybovat. Je dána definice *teplotyStart* jako závislost teploty pro vytápění a průměrné teploty. Pokud k této teplotě přičteme potřebnou teplotu na konci akumulace, získáme druhý krajní bod rozsahu teplot.

7.2.4.3 Optimalizace času pro začátek akumulace tepla

Vylepšení optimalizace a efektivnosti systému přispěje funkce *dejBestStart*, která vrátí nejlepší čas, od kterého je nejekonomičtější začít topit vodu v akumulární nádrži. Pro porovnání jsou definované také pesimální a pevné časy startu topení.

7.3 Vyhodnocení prediktivního systému

Simulace prediktivního systému tepelného čerpadla s akumulací nádrží by měla vést k optimalizaci a zvýšení efektivity provozu tepelného čerpadla. Základní myšlenkou takto simulovaného systému je využití již naměřených teplot, které jsou použity pro výpočet potřebného tepla objektu pro budoucí den. S takto navrženým systémem, tepelné čerpadlo může akumulovat tepelnou energii již o den dříve. Díky těmto funkcím mohl systém dosáhnout hodnot pro optimální čas sepnutí tepelného čerpadla, od kterého začala akumulace tepelné energie a zároveň využije neoptimálnější teplotu venkovního vzduchu. Při takto definovaném startu program jednoduše dopočítá výslednou hodnotu naakumulované tepelné energie.



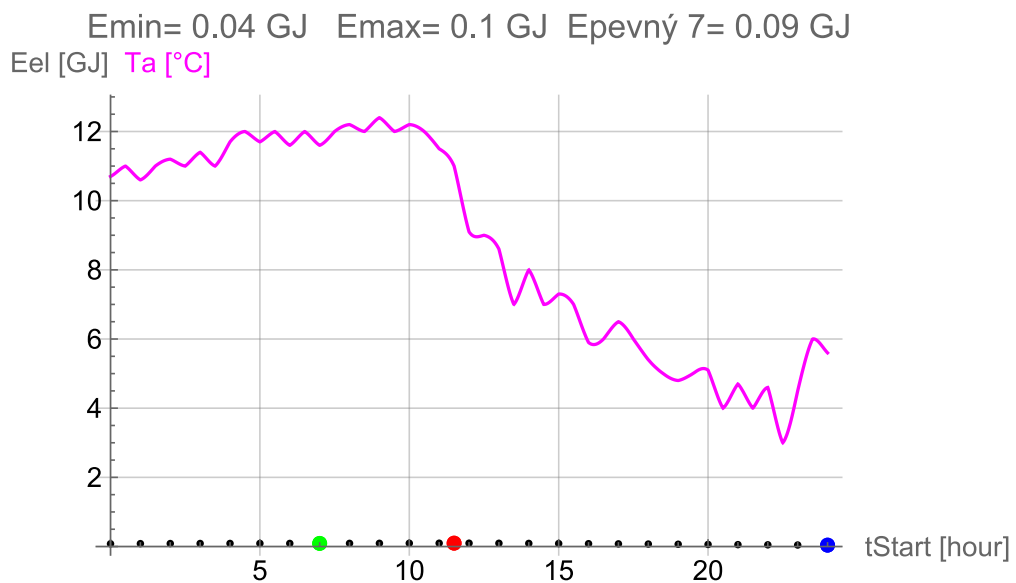
Graf 6 - Spínání tepelného čerpadla v optimálním (modrém), pevném (zeleném) a pesimálním (červeném) čase v závislosti na potřebě tepla

Grafy 6 a 7 znázorňují potřebu tepla pro budoucí den v závislosti na čase sepnutí a venkovní teplotě. Zelená barva znázorňuje optimální čas, kdy tepelné čerpadlo může sepnout. Pokud by tepelné čerpadlo pro akumulaci tepla spínalo až v čase pesimálním (barva červená), pro teplo, které je potřeba naakumulovat, by tepelné čerpadlo muselo pracovat s větším rozsahem topného výkonu a s větší spotřebou elektrické energie. Tyto grafy jsou vygenerované z matematického programu. Den nacházející se v časovém horizontu jeden rok je v programu volitelný. Výsledné grafy 5 a 6 jsou pro 60. den v roce (tedy přelom měsíců únor/březen).



Graf 7 - Závislost spínání a potřeby tepla na venkovní teplotě (60. den)

Pro porovnání spotřeby tepelné energie a závislosti jsme si vygenerovali graf 8, pro 260. den v roce (konec zří).



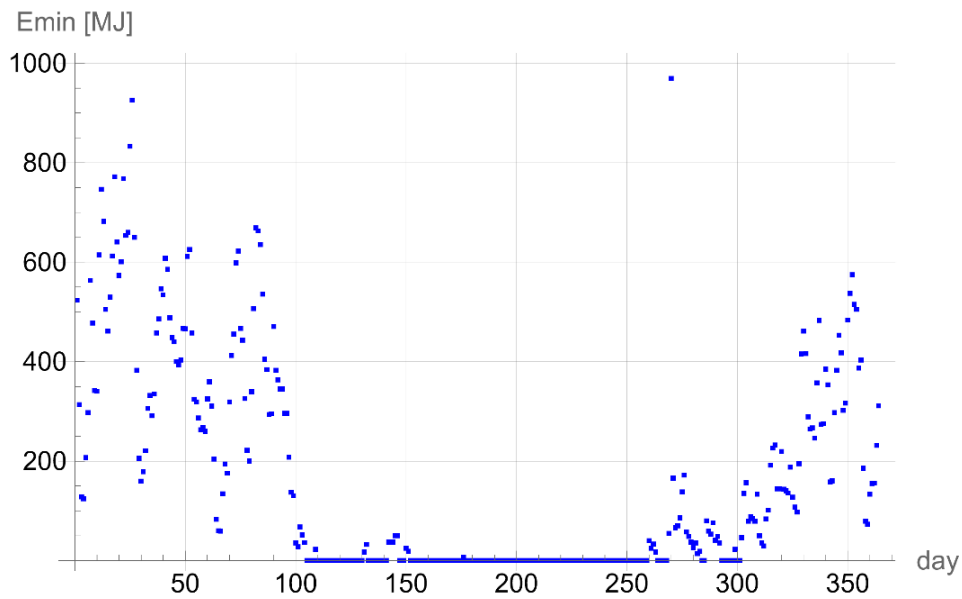
Graf 8 - Závislost spínání a potřeby tepla na venkovní teplotě (260. den)

Výhoda celkového systému je fakt, že tepelné čerpadlo nebude během dne vyrovnávat špičkové ztráty domu a nebude se tak opotřebovovat, všechny špičkové potřeby tepla bude vyrovnávat akumulční zásobník s již naakumulovaným teplem. Jediný úkol tepelného čerpadla predikovat budoucí den a naakumulovat potřebnou energii objektu do dalšího dne.

7.3.1 Predikované spínání pro denní spotřeby akumulace tepla

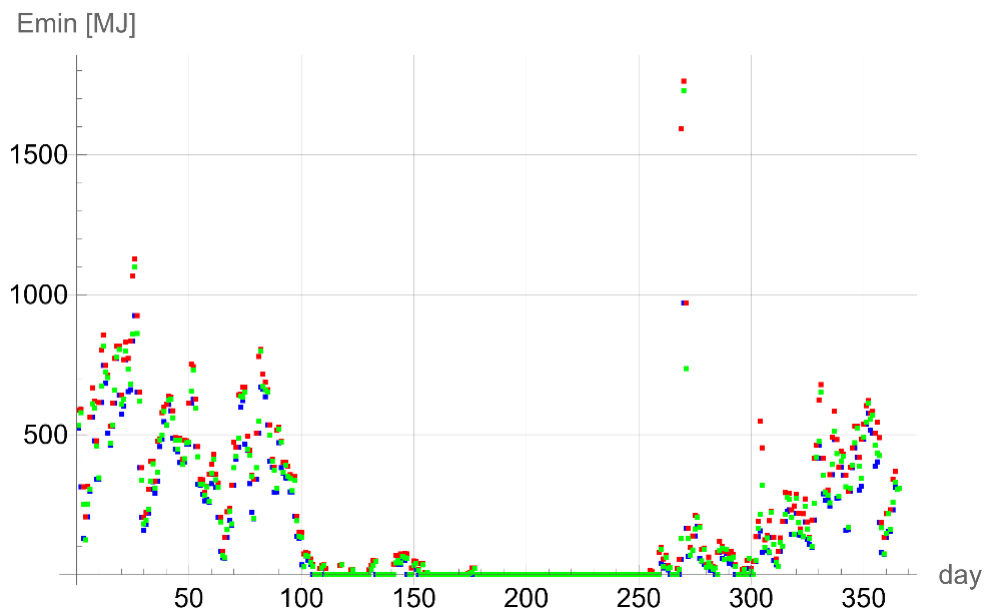
Díky propojení matematického systému s vnějšími parametry ovlivňující predikci je možné si dopředu predikovat spotřebu tepla po celý rok. Vstupní data, tj. venkovní teploty, které nám ovlivňují systém nejvíce, musí být každoročně aktualizovány. Díky

tomu, bychom mohli dosáhnout přesnější predikce. Graf 8 představuje optimální spotřebu tepla v optimálním čase sepnutí systému.



Graf 9 - Optimální spotřeby tepla během jednoho roku

Pokud bychom systém s akumulční nádrží nastavili pouze na funkci spínání v optimálním čase v závislosti na optimálních teplotách venkovního vzduchu a do objektu bychom dostávali optimální potřebu topné energie, takto nastavený systém by byl samostatný a neřešil by další vnější parametry ovlivňující tepelné čerpadlo a spínal by pouze v daném čase. Oproti tomu, pokud bude systém spínat pouze v čase pesimálním (červená barva), tepelné čerpadlo pro akumulaci bude muset pracovat ve větším rozsahu svého topného výkonu, pracovat s větší spotřebou elektrické energie, bude se častěji odmrazovat a kompresor bude spínat častěji. Z dlouhodobého hlediska by takto nastavený systém vedl k dřívějšímu opotřebení tepelného čerpadla.



Graf 10 - Optimální (modré), pevné (zelené) a pesimální (červené) časy sepnutí během roku

Nevýhoda takto navrženého systému je fakt, že tepelné čerpadlo musí tento systém natápět s vyššími teplotami. Pro takto navržený systém by bylo nejlepší využít vysokoteplotní tepelné čerpadlo. Systém by byl nevhodněji použit pro rozsáhlé objekty, pro objekty s velkou spotřebou teplé vody, kde není možnost napojit hlavní otopný systém na jinou komoditu než na elektrickou energii. Prediktivní řízení tepelného čerpadla navrženého systému by měla smysl a návratnost investice by byla rychlejší.

Dále investor musí uvažovat s velkým objemem akumulční nádrže s výbornými a idealizovanými tepelně izolačními vlastnostmi, aby byly minimalizovány ztráty tepla během dne.

Pro lepší efektivnost systému u velkých objektů a průmyslu by bylo vhodné uvažovat o doplnění zdrojů na bázi obnovitelné energie – fotovoltaické panely nebo teplovodní kolektory.

Pokud bychom uvažovali rodinný dům s navrženou tepelnou ztrátou 25kW, v takovém případě by systém v dnešní době postrádal smysl z důvodu vysoké investice a vysokých nákladů na spotřebu elektrické energie. Ale v případě, že by byla na domě vytvořena energeticky úsporná opatření a ztráty by se snížily na možné minimum otopný systém by potřeboval malé množství akumulované energie a pro nízkoenergetické či pasivní domy by tento systém mohl představovat dobrou alternativu pro vytápění.

Závěr

Cílem této práce bylo seznámení s principem tepelných čerpadel vzduch – voda a jejich doplňkovými bivalentními zdroji a možnost využití predikce tepelných čerpadel se zařazením akumulční nádrže.

V první části práce jsme charakterizovali princip tepelných čerpadel, jejich konstrukci a možnosti využití akumulace tepla. Dále byl definován postup pro výpočet potřeby tepla pro vytápění objektu.

Praktická část se zabývala simulací jednotlivých matematických modelů otopných systémů s použitím tepelného čerpadla vzduch-voda a bivalentního zdroje a simulace monovalentního systému tepelného čerpadla vzduch – voda. Pro tyto simulace byl využit program Wolfram Mathematica 13.0. Díky simulacím jsme obdrželi výsledné parametry každého systému, které jsme mezi sebou mohli technicky i ekonomicky porovnat. Mezi nejefektivnější systémy se řadí využití tepelného čerpadla s bivalentním zdrojem v sérii, tj. elektrokotel.

V poslední části jsme naznačili možnosti spínání tepelného čerpadla se zařazenou akumulční nádrží podle predikce venkovní teploty. Výsledkem takto spínaného tepelného čerpadla a jeho akumulace je fakt, že akumulční nádrž by musela být izolovaná idealizovaně, tj. bez nulových teplotních ztrát. Do takto simulovaného systému bychom museli navrhnout vysokoteplotní tepelné čerpadlo, aby systém dával smysl. Využití pro takový systém bychom mohli nalézt v rozsáhlých objektech či průmyslových budovách, kde není možnost využití jiné energie pro vytápění a tepelné čerpadlo s akumulční nádrží by pracovalo dohromady s dodávkou tepla i z obnovitelných zdrojů. V takovém případě bychom se mohli bavit o efektivnosti systému.

Přílohy

Příloha č. 1	1_TČ+ELEKTROKOTEL
Příloha č. 2	2_TČ+PŘÍMOTOPY
Příloha č. 3	3_TČ MONO
Příloha č. 4	4_TČ+AKU
Příloha č. 5	Tabulky
Příloha č. 6	Finanční náklady
Příloha č. 7	WPL18
Příloha č. 8	Ceník produktu Elektřina na 3 roky, Skupina ČEZ

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ODP	Ozone Depletion Potential
GWP	Global Warming Potential
TČ	Tepelné čerpadlo
TUV	Teplá užitková voda
COP	Coefficient of Performance
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
MPC	Model-based Predictive Control
EPHA	European Heat Pump Association
EU	Evropská Unie
CE	Communauté Européenne
m.n.m	Nadmořská výška, metry nad mořem

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pracovní cyklus v T-s diagramu (1)	17
Obrázek 2 - Princip kompresorového tepelného čerpadla (3)	18
Obrázek 3 - Tepelné čerpadlo (vrt) typu země – voda (4)	19
Obrázek 4 - Tepelné čerpadlo (plošný kolektor) typu země – voda (4)	19
Obrázek 5 - Tepelné čerpadlo typu voda -voda (5)	20
Obrázek 6 - Tepelné čerpadlo typu vzduch - voda (5)	20
Obrázek 7 - Lamelový výměník tepla (1)	21
Obrázek 8 - Znázornění principu funkce kompresoru typu scroll (1)	22
Obrázek 9 - Deskové výměníky tepla (1)	22
Obrázek 10 - Elektronický expanzní ventil (Carel) (1)	23
Obrázek 11 - Výkon tepelného čerpadla vzduch/voda a potřebný výkon pro vytápění v závislosti na venkovní teplotě (7)	26
Obrázek 12 - Ekvitermní křivky (1)	27
Obrázek 13 - Princip ekvitermní regulace (10)	27
Obrázek 14 - Porovnání průběhu teplot a tepelného výkonu během dne mezi otopným systémem s použitím běžné a prediktivní regulace během slunečného dne (16)	31
Obrázek 15 - Klimatické oblasti Evropy (20)	34
Obrázek 16 - Značka kvality (20)	34
Obrázek 17 - Minimální topné faktory tepelných čerpadel (1)	35
Obrázek 18 - Závislost teploty vzduchu na výkonu čerpadla WPL 18 E (data převzaté od dodavatele Stiebel Eltron)	46
Obrázek 19 - Souhrnná tabulka tepelného čerpadla WPL 18 E (data převzaté od dodavatele Stiebel Eltron)	46
Obrázek 20 - Schéma bivalentního systému tepelného čerpadla se sériově napojeným elektrokotlem	47
Obrázek 21 - Schéma bivalentního systému tepelného čerpadla s přímotopy uvnitř objektu	50
Obrázek 22 - Schéma monovalentního systému tepelného čerpadla	53
Obrázek 23 - Schéma systému s akumulací	57
Obrázek 24 - Schéma systému tepelného čerpadla se zařazenou akumulací s prediktivním řízením podle venkovní teploty	63
Obrázek 25 - Příklad interpolace denních teplot (20)	66

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Nejčastěji používaná chladiva v tepelných čerpadlech	24
Tabulka 2 - Příklady nakumulované energie v závislosti na teplotě topné vody	29
Tabulka 3 - Přehled objemů akumulační nádrže pro různé zdroje tepla	30
Tabulka 4 - Výsledné parametry bivalentního systému tepelného čerpadla vzduch - voda s přímotopy v interiéru	53
Tabulka 5 - Výsledné parametry otopných soustav s použitím tepelného čerpadla vzduch-voda	59
Tabulka 6 - Časy spínání HDO pro nízký tarif	60
Tabulka 7 - Ceník elektrické energie v tarifu D57d	60
Tabulka 8 – Celkové roční finanční náklady na provoz vytápění dle typu systému	61

Seznam grafů

Graf 1 - Závislost ztrát objektu na venkovní teplotě.....	45
Graf 2 - Graf závislostí výkonu bivalentního systému tepelného čerpadla vzduch-voda s elektrokotlem v sérii na venkovní teplotě	49
Graf 3 - Graf závislostí výkonu bivalentního systému tepelného čerpadla vzduch-voda s přímotopy na venkovní teplotě	52
Graf 4 - Graf závislostí výkonu monovalentního systému tepelného čerpadla na venkovní teplotě.....	55
Graf 5 - Citlivostní analýza růstu cen elektrické energie	61
Graf 6 - Spínání tepelného čerpadla v optimálním (modrém), pevném (zeleném) a pesimálním (červeném) čase v závislosti na potřebě tepla	68
Graf 7 - Závislost spínání a potřeby tepla na venkovní teplotě (60. den)	69
Graf 8 - Závislost spínání a potřeby tepla na venkovní teplotě (260. den)	69
Graf 9 - Optimální spotřeby tepla během jednoho roku	70
Graf 10 - Optimální (modré), pevné (zelené) a pesimální (červené) časy sepnutí během roku	70

Bibliografie

- (1) CHARVÁTOVÁ, Marie. *Vyhodnocení provozních dat tepelného čerpadla*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.
- (2) *OZE Geotermální energie*. Hradec Králové, 20 s. Dostupné také z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/305/OZE_Geotermalni_energie.pdf
- (3) Jak pracuje tepelné čerpadlo?. In: *Teplo Technika*: <http://www.teplotechnika.cz/uvod> [online]. Dostupné také z: <http://www.teplotechnika.cz/funkce-tepelneho-cerpadla>
- (4) Grafika TEPELNÁ ČERPADLA ZEMĚ-VODA, VODA-VODA. In: *NIBE* [online]. Dostupné také z: <https://www.nibe.cz/grafika>
- (5) *Tepelná čerpadla* [online]. Dostupné také z: <http://www.ehos.cz/tepelne-cerpadla>
- (6) Odborník radí, kdy se vyplatí pořídit tepelné čerpadlo na vytápění. In: *Elektrina.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/tepelna-cerpadla-pro-vytapeni-odbornik-radi>
- (7) BUDÍN, Jan. Tepelná čerpadla - princip funkce a rozdělení. In: *OENERGETICE.cz* [online]. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/teplo/tepelna-cerpadla>
- (8) ŽERAVÍK, Antonín. *Stavíme tepelné čerpadlo: [návratnost i za jeden rok]*. Vyd. 1. Přerov: Antonín Žeravík, 2003. ISBN 80-239-0275-X.
- (9) Základní chladiva užívaná v současné době v klimatizacích (R410-A, R407c, R32). In: *AC HS: Advanced Cooling and Heating System* [online]. Dostupné také z: <https://achs.cz/rady-klimatizace/zakladni-chladiva-uzivana-v-soucasne-dobe-v-klimatizacich-r410-a-r407c-r32/>
- (10) Chladiva a jejich rozdělení. In: *E-chladiva* [online]. Dostupné také z: <https://www.e-chladiva.cz/chladiva-rozdeleni-p112.htm>
- (11) *Tepelné čerpadlo* [online]. In: . Dostupné také z: <https://publi.cz/books/93/02.html>

- (12) KARLÍK, Robert. *Tepelné čerpadlo pro váš dům*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-2720-2.
- (13) EKVITERMNÍ KŘIVKA TEPELNÉHO ČERPADLA. In: *TENAUR s.r.o.* [online]. Dostupné také z: <https://tenaur.cz/ekvitermni-krivka-tepelneho-cerpadla/>
- (14) Ekvitermní regulace tepelného čerpadla. In: *EKOVOY: Ekonomické logické vytápění* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <http://www.ekovy.cz/ekvitermni-regulace.htm>
- (15) DVOŘÁK, Zdeněk, Jiří PETRÁK a Luděk KLAZAR. *Tepelná čerpadla*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- (16) NIBE, Akumulační nádrže. In: *NIBE* [online]. Dostupné také z: <https://www.nibe.cz/akumulacni-nadrze>
- (17) RIMBALA, Jan. *Analýza přesnosti různých výpočtových metod potřeby energie na vytápění v systémech s tepelnými čerpadly*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl.
- (18) HONZÍK, Ing. Jiří. Tepelná čerpadla vzduch-voda a akumulční nádoby. In: *Tzbinfo* [online]. Dostupné také z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/8980-tepelna-cerpadla-vzduch-voda-a-akumulacni-nadoby>
- (19) VIESSMANN, SPOL. S.R.O. Akumulační zásobníky. In: *Topenářství instalace* [online]. Dostupné také z: <https://www.topin.cz/clanky/akumulacni-zasobniky-detail-9759>
- (20) ČERVÍN, Ing. Radek. Prediktivní řízení tepelného čerpadla podle předpovědi počasí. In: <https://www.tzb-info.cz/> [online]. 2020. Dostupné také z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/21081-prediktivni-rizeni-tepelneho-cerpadla-podle-predpovedi-pocasi#zdroj02>
- (21) FERKL, Ing., Ph.D. Lukáš. *Prediktivní regulace budovy ČVUT v Praze – Dejvicích: Případová studie*. České vysoké učení technické v Praze. Praha, 2012.
- (22) MATUŠKA, Tomáš, Jan SEDLÁŘ a Tomáš STRAKA. *Hodnocení tepelných čerpadel ve světle nové legislativy*. 1. vydání. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2016. ISBN 978-80-02-02662-4.
- (23) BYSTRICKÝ, Václav a Antonín POKORNÝ. *Technická zařízení budov - B*. Praha, ČVUT.

(24) Interpolace denní teploty ve Svatoňovicích: předmět Optimalizace. In: *CourseWare Wiki* [online]. Dostupné také z:
<https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/b0b33opt/cviceni/hw/lsq1/teplota>