České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití větru k temperaci rekreačních objektů

Praha, 2015 **Autor: Pavel Fencl**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne _____ _____

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu za spolupráci a objektivní kritiku během tvorby. Dále chci poděkovat mé rodině za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

Má diplomová práce se zabývá temperací rekreačních objektů. Skládá se z několika částí. První kapitola uvádí čitatele do problému, kterým je temperace rekreačního objektu. Druhá kapitola popisuje vlastnosti referenčního objektu a jeho okolí. Třetí kapitola se zabývá teoretickým rozborem energetické bilance a jednotlivých komponent. Čtvrtá kapitola popisuje způsoby hodnocení a obsahuje ekonomické vyhodnocení některých variant. Poslední kapitola uzavírá celou práci výsledným doporučením k realizaci či nerealizaci projektu.

Klíčková slova

Větrná elektrárna, temperace, vítr, ekonomické vyhodnocení, přímotop, tepelné čerpadlo

Abstract

My thesis deals with temperation of holliday cottage. It is composed from several parts. First chapter introduces reader into problem which is temperation of holliday cottage. Second chapter describes properties of refferal object and it‘s surroundings. Third chapter is dealing with theoretical analysis of energetic review and single components. Fourth chapter describes scoring methods and contains economic results of few variants. Last chapter closes whole thesis with final recommendation to realize or not to realize the project.

Keywords

Wind turbine, temperation, wind, economic evaluation, heaters, heat pump

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Pavel Fencl

Studijní program: elektrotechnika, energetika a management
Obor: ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Využití větru k temperaci rekreačního objektu

Pokyny pro vypracování:

- popis rekreačního objektu
- metody využití větru
- ekonomické vyhodnocení

Seznam odborné literatury:

Pivrnec, J.: Finanční management. Grada, Praha 1995
Vítek, M.: Ekonomika dopravních energetických systémů. Skriptum FEL ČVUT, Praha 2008

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc. – ČVUT FEL, K 13116

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2015/2016
L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 22.1. 2015

Obsah

Seznam obrázků **ix**

Seznam tabulek **xi**

1 Koncepce **1**

2 Situační popis **3**

2.1 Legislativa . . . 3

2.1.1 Oblastní legislativa . . . 4

2.2 Temperace . . . 4

2.2.1 Eletrický proud . . . 5

2.2.2 Plyn . . . 6

2.2.3 Dřevěné pelety . . . 7

2.2.4 Solární energie . . . 7

2.2.5 Větrná energie . . . 7

2.2.6 Offgrid systémy . . . 8

2.3 Popis rekreačního objektu . . . 9

2.3.1 Zkoumaný objekt . . . 9

2.3.2 Konstrukce objektu . . . 10

2.3.3 Křivka trvání teplot v oblasti . . . 10

2.3.4 Tepelná ztráta objektu . . . 13

2.3.5 Tepelná kapacita objektu . . . 16

2.3.6 Povětrnostní podmínky v oblasti . . . 18

3 Návrh systému vytápění větrem **23**

3.1 Obecná energetická bilance . . . 24

3.2 Návrh prvků řetězce . . . 29

3.2.1 Přeměna větrné energie na mechanickou . . . 29

3.2.2 Přenos mechanické rotační energie 32
3.2.3 Přeměna větrné energie na elektrickou 32
3.2.4 Přeměna mechanické rotační energie na elektrickou 33
3.2.5 Přenos elektrické energie 34
3.2.6 Přeměna elektrické energie na tepelnou 36
3.2.7 Přeměna mechanické energie na tepelnou 38
3.3 Shrnutí závislostí jednotlivých přeměn 39
3.4 Problematika návrhu zdroje tepla 40
3.4.1 Výkonová charakteristika zdroje tepla 40
3.5 Parametry topné soustavy 44
3.5.1 Velikost plochy rotoru turbíny 45
3.5.2 Spolehlivost zdroje tepla 46
3.5.2.1 Nezálohovaný systém 47
3.5.2.2 Zálohovaný systém 48

4 Zhodnocení temperace větrem **51**
4.1 Hodnota vyrobené energie 51
4.2 Množství vyrobené energie 53
4.2.1 Vyrobená tepelná energie 54
4.2.2 Zálohová energie 55
4.2.3 Ušetřená energie 56
4.2.4 Elektrická vyrobená energie 56
4.3 Cena zálohové energie 57
4.4 Hodnocení ekonomické efektivity 57
4.5 Návrh variant řetězce 59
4.5.1 Kombinace horizontální turbíny a přímotopu 60
4.5.2 Kombinace horizontální turbíny a tepelného čerpadla 62
4.5.3 Kombinace vertikální turbíny a přímotopu 64
4.5.4 Kombinace vertikální turbíny a tepelného čerpadla 65
4.5.5 Kombinace vertikální turbíny a vrtule 67

5 Vyhodnocení **73**

Literatura **77**

Seznam obrázků

2.1 Lokace referenčního objektu 10
2.2 Křivka trvání teplot pro (2.8), (2.7) a (2.10) 12
2.3 Doba trvání ztrátového výkonu 15
2.4 Průběh vnitřní teploty v čase při nefunkčním otopném systému. 18
2.5 Větrná mapa České republiky 2012 19
2.6 Weibullovo rozdělení pro A = 3,95 m/s a k = 2 20
2.7 Intenzita větru v průběhu roku 21

3.1 Zobecněná energetická bilance 24
3.2 Element obecné energetické bilance 25
3.3 Příklad energetické bilance 27
3.4 Výkonová charakteristika větrné elektrárny 500 kW 31
3.5 Příklad účinností asynchronních motorů Siemens 34
3.6 Příklad topné křivky tepelného čerpadla 38
3.7 Závislost výkonu turbíny na rychlosti větru 41
3.8 Pravděpodobnostní rozložení výkonu soustavy 42
3.9 Doba výskytu výkonu zdroje 43
3.10 Doba trvání výkonu zdroje 44
3.11 Výkonová charakteristika záložního zdroje 49

4.1 Porovnání tepelných ztrát a tepelných zisků objektu 54
4.2 Porovnání tepelných ztrát a výkonu naddimenzovaného zdroje 55
4.3 Energetická bilance pro horizontální turbínu a přímotop 61
4.4 Plocha NPV pro horizontální turbínu a přímotop 62
4.5 Energetická bilance pro horizontální turbínu a přímotop 63
4.6 Plocha NPV pro horizontální turbínu a tepelné čerpadlo 65
4.7 Energetická bilance pro vertikální turbínu a přímotop 66
4.8 Plocha NPV pro vertikální turbínu a přímotop 67

4.9 Energetická bilance pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo 68
4.10 Plocha NPV pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo 69
4.11 Koncept kontrukce pro vertikální turbínu a vrtuli 70
4.12 Energetická bilance pro vertikální turbínu a vrtuli 71

Seznam tabulek

2.1 Fyzické rozměry referenčního objektu 11
2.2 Kvalitativní parametry objektu 14
2.3 Tepelně-kapacitní parametry budovy 16

3.1 Porovnání typů větrných turbín 30
3.2 Souhrn teoretických koeficientů k 39
3.3 Příklad navrženého systému 45

4.1 Základní údaje pro hodnocení 59
4.2 Návrh parametrů pro horizontální turbínu a přímotop 60
4.3 Spočtené energie a úspory pro horizontální turbínu a přímotop 61
4.4 Návrh parametrů pro horizontální turbínu a tepelné čerpadlo 62
4.5 Spočtené energie a úspory pro horizontální turbínu a tepelné čerpadlo . . 64
4.6 Návrh parametrů pro vertikální turbínu a přímotop 65
4.9 Spočtené energie a úspory pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo . . . 66
4.7 Spočtené energie a úspory pro vertikální turbínu a přímotop 67
4.8 Návrh parametrů pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo 68
4.10 Návrh parametrů pro vertikální turbínu a vrtuli 69

Kapitola 1

Koncepce

Obyvatelé České Republiky jsou známí svou oblibou v chalupářství a chatařství. Mnoho lidí vlastní chalupy a chaty v oblastech vzdálených od civilizace a tráví zde volné víkendy a dovolené. Často jsou tyto objekty pužívány pouze rekreačně a je nutno se o ně přes zimu postarat, aby budovy nestrádaly a na jaře bylo možno pohodlně užívat čistého vzduchu bez starostí o napravování škod po předešlé zimě.

Jaké jsou možnosti udržování objektů v zimě a pro případné zimní výlety? Je velmi nepříjemné vyrazit na výlet do zasněženého podhůří a než se stačí chalupa vytopit, člověk je na cestě domu. Pokud je objekt v zimě nevyužíván, může se nábytek přikrýt, uklidit či odvést a při zajištěném ponechat dům svému osudu. Takový systém je levný, vyžaduje však poměrně velké množství práce při zazimování a odzimování. V zazimovaném objektu nepřichází výlet v zimě v úvahu.

Další možností je objekt udržovat vytopený konstatně na nižší teplotu, při které je objekt neobyvatelný, avšak takzvaně nevymrzne. V případě zimní návštěvy se podaří vytopit na příjemnou teplotu rychle a odpadají nutné práce při zazimování. Je však nutno dbát na náklady spojené s vytápěním objektu, byť na nižší teplotu. Je vhodné pak otopný systém pro tento účel navrhnout efektivně, aby majitel za náklady ušetřil.

V současné době existuje několik technologií, jak objekt temperovat a mnoho výrobců, jež realizaci jednotlivých principů instalují. Jednotlivé typy jsou závislé na dostupnosti zdroje energie a hodnotou nutné investice pro jejich realizaci. Situace se dále zkomplikuje ve chvíli, kdy objekt nemá přípojku elektrického proudu. Jelikož mnoho technologií je závislé na dostupnosti elektrické energie, jejich realizace je náročnější o získání dodatečného zdroje této energie.

Systémů, jež by byly schopny temperovat objekt bez zdroje energie bez vysokých investičních nákladů je velmi málo. V takovýchto situacích přichází ke slovu ve velké míře

obnovitelné zdroje energie (energie větru, vody, slunce). Jsou dostupné téměř kdekoliv a jejich velikost se mění spíše v lokálním měřítku. Různé geografické oblasti disponují jinou intenzitou daného zdroje.

Sluneční energie je v současné době nejvyužívanější. Je dotována státem a je z obnovitelných zdrojů nejpříznivější. Pro použití k temperaci objektů bez elektřiny však svou povahou nemusí být úplně vhodná. Výkon hlavně v zimních měsících klesá.

Energie větrná se k temperaci většinou nepoužívá. Česká Republika svou geografickou polohou nedisponuje příznivými povětrnostními podmínkami. Problémem jsou poměrně vysoké pořizovací náklady a nízké průměrné rychlosti větru na území. Větrná turbína musí v extrémních případech odolávat poměrně velkým silám a spolehlivost jeho konstrukce se odráží na jeho ceně.

Česká Republika a ostatní země společně cílí na zvýšení podílu spotřeby z obnovitelných zdrojů a snížení emisí CO_2. Obnovitelné zdroje nejsou při současných cenách energií konkurenceschopné. Většina zařízení pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů má typicky vysoké investiční náklady.

Kapitola 2

Situační popis

V následující kapitole se pokusím popsat zkoumaný problém a přijmout některé zjednodušující předpoklady.

2.1 Legislativa

Se vstupem do Evropské Unie přijala Česká Republika vyšší odpovědnost za svou energetickou politiku. Rada Evropského parlamentu stanovila indikativní cíle do budoucích let a podporuje všechny státy v dosažení určených cílů. V České Republice byl v roce 2005 přijat Energetický zákon (Zákon č. 180/2005 Sb.), který vymezuje dílčí cíle národního hospodářství, nástroje k jejich dosažení a způsoby jejich kontroly. Pro evropský průměr byl stanoven podíl obnovitelných zdrojů energie na celkové výrobě 20 % do roku 2020, 24 % do roku 2030 a 25 % do roku 2050. Česká republika přijala v národním akčním plánu podíl na celkové spotřebě energie 13 % do roku 2020 [1].

Energetický zákon a jeho pozdější novely upravují způsob jakým daných cílů dosáhnout. Základním nástrojem je podpora rozvoje výroben elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Přednostně je kladen důraz na výrobu elektřiny. Dalšími podporovanými oblastmi jsou druhotné zdroje a kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Základními nástroji pro podporu rozvoje jsou:

- Jistota návratnosti
- Systém výkupních cen

[1] (*Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů*, 2012)

- Zelený bonus

Donedávna dotace na zvyšování energetické efektivity rodiných domů řešil program Nová zelená úsporám. Jejím cílem je motivovat obyvatele k postupnému snižování energetické náročnosti budov (novostaveb i stávajících) a snižování emisí CO_2. Z hlediska výměny kotlů na tuhá paliva za ekologicky šetrnější varianty je podporováno mnoho typů alternativních zdrojů tepla. Podpora se především týkala kotlů na biomasu, tepelných čerpadel a solárních systémů. Vítr, jako zdroj tepelné energie není v současnosti součástí podpory, jelikož Česká Republika nedisponuje dostatečným větrným potenciálem pro rozšířené využití jako zdroje energie.

2.1.1 Oblastní legislativa

Všechny stavby s větší rozlohou nebo specifickou konstrukcí musí projít schvalovacím řízením na oblastním stavebním úřadě. Územním plánem jsou určeny základní rysy budoucí výstavby v oblasti. S ohledem na povahu výstavby konstrukce větrníku se jedná především o výšku konstrukce, jež je plánem stanovena. Každá stavba by měla odpovídat plánovanému dojmu z nové zástavby. Přesná pravidla a podmínky budou odlišné pro satelitní město a pro výstavbu na venkově.

Kromě estetického hlediska a vlivu na krajinu (Beranovský J., 2007) je stěžejním parametrem budované turbíny hlučnost. Ochrana lidského zdraví před hlukem je zakotvena v zákoně o ochraně veřejného zdraví (č. 258/2000 Sb.). Konkrétní hodnoty hladin hluku jsou stanoveny nařízením vlády (č. 148/2006 Sb.). Přes den je limit 50 dB a v noci je limit 40 dB (*Limity hluku* [online], 2015). Návrhované větrné turbíny musí tyto hladiny hluku respektovat. Menší větrné turbíny obecně nemají s těmito limity problémy a hlasitost při provozu typicky nepřekračuje samotnou hlučnost okolí působením větru.

2.2 Temperace

Temperace objektů je pojem spjatý především s vlastnictvím a provozováním objektů s občasným využitím. Technicky ji lze popsat jako celoroční udržování teploty nad určitou mezní teplotou. Při ní je zaručeno nevymrznutí objektu avšak teplota je příliš nízká pro pobyt. Netemperovaný objekt hlavně v zimní období strádá a některé technologie (například topení s vodním médiem) vyžaduje nutnost zazimování. Základním problémem

v zimním období je přirozený růst vlhkosti při nižších teplotách a následná kondenzace vody v mrznoucím objektu. Vnitřní vybavení i stavba samotná může být poškozována.

Ve své práci zvolím teplotu, pro kterou budu navržený otopný systém dimenzovat a počítat.

$$T_t = 5°C \tag{2.1}$$

kde T_t je teplota pod kterou by teplota v objektu neměla klesnout a na níž bude systém (zdroj tepla) dimenzován. Při této teplotě je zaručeno, že voda v otopném a rozvodném systému nezamrzne a nepoškodí další systémy a vybavení. Tepelná ztráta objektu a tepelný výkon zdroje tepla bude počítán k této hodnotě.

$$T_k = 0°C \tag{2.2}$$

Teplota je nižší z defenzivních důvodů. Jelikož pokles pod kritickou teplotu způsobuje velké problémy, je nutno zaručit co největší prevenci. Při poklesu teploty pod kritickou teplotu dochází k poškození otopného systému. Navržený systém musí při extrémních podmínkách být s velkou pravděpodobností schopen udržet teplotu v objektu. Extrémními podmínkami je myšlena minimální výpočtová teplota teplota -18 °C (2.8) a bezvětří.

2.2.1 Eletrický proud

Temperace elektrickým proudem je nejjednodušší a pravděpodobně nejrozšířenější variantou. Z technického hlediska umožňuje jednoduchou a snadnou regulaci výkonu. Z ekonomického hlediska výhoda spočívá především v nízkých investičních nákladechas. Základní podmínkou všech variant je dostatečná přípojka elektrického proudu, což nemusí být pro rekreační a odlehlé objekty obecně splněno. Nejrozšířenějšími variantami jsou:

- Přímotop
- Elektrokotel
- Tepelné čerpadlo

Účinnost všech typů vytápění (a potažmo variabilní náklady na vytápění) jsou určeny topným faktorem. Topný faktor určuje množství vyprodukované tepelné energie na jednotku energie elektrické. Hodnota vyjadřuje poměr získaného tepla k použité elektrické

energii, respektive přeměny elektrické energie na energii tepelnou (*Wikipedia: Topný faktor* [online], 2015).

$$COP = \frac{|\Delta Q|}{\Delta W}[-] \tag{2.3}$$

Přímotopy jsou nejlevnější a nejsnažší variantou temperace. Hlavní nevýhodou této varianty jsou poměrně vysoké variabilní náklady na vytápění (vzhledem k vytápění tuhými palivy). Oproti centrálnímu vytápění kotlem výsledný užitek temperace závisí na rovnoměrném rozložení topných těles při jejich současně dostatečné sumě výkonu pro temperaci objektu.

Elektrokotel je realizován samostatně nebo v kombinaci s jiným druhem paliva. Temperování probíhá pouze elektřinou. Sekundární druh paliva je využíván v době pobytu obyvatel v objektu s typicky levnějšími topnými náklady. Elektrokotel může být realizován v objektech, které disponují centrálním otopným systémem (například samospádové topení s vodním médiem). Topný faktor přímotopu a elektrokotle. Jeho hodnota je přibližně rovna jedné ($COP \approx 1$).

Tepelná čerpadla jsou moderním způsobem řešení problému vytápění. Existuje několik principálních řešení, které se označují jako ohřívané médium-ochlazované médium. Jednotlivé principy se liší svou efektivitou, výkonem a především cenou. Dle požadovaného výkonu je nutno zvolit efektivní a dostupný typ.

Základním principem je podchlazení chladícího média zplyněním, ohřátím od okolí, stlačením a předáním tepla ohřívanému médiu. Teplota po zplynění je nutně nižší než teplota ochlazovaného média, která je téměř konstantní nezávisle na vnější teplotě. S klesající teplotou ochlazovaného média klesá i topný faktor tepelného čerpadla (COP nepřímo koreluje s venkovní teplotou). Topný faktor se pohybuje přibližně $2 < COP < 10$. Nižší topné faktory odpovídají jednoduchým a levným realizacím, vyšší pak složitějším a dražším realizacím.

2.2.2 Plyn

Efektivní a jednoduchou variantou je využití plynu pro temperaci (např. zemní plyn). Běžně jsou k dostání plynové kotle, nebo kotle na tuhá paliva s přídavným plynovým hořákem. Systém je automaticky řízen řídící jednotkou, pro zajištění efektivní temperace. Variabilní náklady jsou menší ve srovnání s náklady na temperaci elektřinou. Využití tohoto způsobu je spjato s vyššími náklady. V případě neexistující přípojky plynu náklady

dále rostou z důvodu nutnosti vybudování zásobníku na plyn.

2.2.3 Dřevěné pelety

Automatické kotle na pelety mohou automaticky temperovat objekt bez zásahu uživatele. Doba temperace na jedno naplnění peletami je přímo závislá na velikosti zásobníku, výhřevnosti pelet a účinosti spalování kotle. Tento způsob nabízí jedny nejnižší variabilní náklady na temperaci. Hlavní nevýhodou je oproti ostatním variantám nutnost pravidelných návštěv z účelem doplnění zásobníku peletami.

2.2.4 Solární energie

Solární energie je v současnosti konkurenceschopnou variantou při celoroční přípravě teplé vody a výrobě tepla. To je dáno i podporou státu pro výrobu tepla solárními systémy 2.1. Energii slunečního záření lze na užitečnou energii přeměnit dvěma způsoby

- Sluneční kolektory - Zachycené sluneční záření předá svou energii ohřívanému médiu. Hlavní výhodou je jednoduchý a levný princip.
- Fotovoltaické panely - Energie zachyceného slunečního záření je přímo přeměněna na elektrickou energii. Ta pak může být přeměněna na energii tepelnou nebo využita k pohonu jiných zařízení produkujících teplo .

Navzdory jednoduchosti a obecné dostupnosti slunečního záření má solární energie i své nevýhody. Stejně jako u větrné energie nelze zaručit stálý přísun sluneční energie. Vzhledem k menší náhodnosti rozložení svítivosti v roce lze předpokládat delší střední doby bez slunečního svitu. Zisky ze slunečních kolektorů a fotovoltaických panelů navíc přímo korelují s venkovní teplotou a ročním obdobím. Mnou zkoumané období představuje pro přeměnu energie ze slunce velmi nevýhodný časový úsek.

2.2.5 Větrná energie

Vítr je v současnosti nevyužívaným zdrojem pro vytápěním. Neexistuje jednoduchý způsob účinné přeměny větrné energie na energii tepelnou. Společným problémem sluneční a větrné energie je nerovnoměrnost v jejím výkonu. Energie je přeměněna na elektrickou energii a ta je uložena do akumulačního systému. Systém energii zadržuje a energie je

do vytápěného prostoru uvolňována pouze v takovém nutném množství, které odpovídá okamžité tepelné ztrátě.

Základním problémem tohoto přístupu však je samotná akumulace energie. Akumulační systém je primárně stavěný na stálou či krátkodobou intenziviní akumulaci. Vzhledem k nerovnoměrnému charakteru okamžitého výkonu musela být akumulační zařízení uzpůsobena tomuto typu akumulace. V současnosti je taková akumulace možná, avšak tato nutná vlastnost je vyvážena navýšením investičních nákladů (Kreutzer, 2013).

V testovacím provozu je uvažován systém výroby elektrické energie větru a jeho následná akumulace či napájení tepelného čerpadla (Steffes, 2008). Větrná energie je pro tento provoz spíše dodatečným zdrojem energie. Vytápění založené jen a pouze na větrné energii realizováno není. Systémy jsou většinou primárně postavené na temperaci elektrickým proudem, respektive jeho přeměnou na teplo.

2.2.6 Offgrid systémy

Offgrid systém je zařízení, jež ke své činnosti nevyžaduje připojení k elektrické síti a současně je zcela autonomní [2]. O těchto systémech mluvíme především v souvislosti s lokalitami, kde není elektrické připojení k dispozici, či by bylo ekonomicky nevýhodné připojení realizovat.

Z hlediska vytápění jsou plně autonomními pouze systémy založené na obnovitelných zdrojích. Neelektrické způsoby temperace mohou být realizovány jako autonomní systémy pouze v kombinaci s externím zdrojem elektrické energie. Ta potom většinou pochází z obnovitelných zdrojů (energie větru, vody, slunce). Takovéto autonomní systémy se obecně skládají ze zdroje elektrické energie, akumulátoru, řídící jednotky a zdroje tepla.

Autonomní systémy mají vyšší investiční náklady, které znatelně rostou se zvyšujícími se nároky na spolehlivost systému. Nejefektivnější varianta je pak svázána s objektem, pro který je realizována.

Při volbě je nutno zohlednit mnoho kritérií:

- Vlastnosti objektu
  - Poloha
  - Tepelná ztráta
  - Tepelná kapacita

[2] (*Wikipedia: Off-the-grid* [online], 2015)

- Okolí objektu
  - Teplotní podmínky v oblasti
  - Povětrnostní podmínky v oblasti
  - Dostupnost připojení elektřiny (cena)
  - Dostupnost a cena paliv
- Požadavky
  - Spolehlivost
  - Investiční náklady
  - Možnost stavebních úprav
  - Teplota temperace
  - Ostatní (nevole k připojení elektřiny, plynu)

2.3 Popis rekreačního objektu

Pro objektivní návrh systému temperace je vhodné vztahovat výpočty na reálný objekt. Návrh na skutečný objekt dále může nabídnout snadné porovnání s fungujícím (referenčním) modelem temperace, jakožto i další problémy a specifika s tím spojená.

Pro samotný návrh topného zdroje otopné soustavy je v první řadě důležité stanovit tepelnou ztrátu a tepelnou kapacitu objektu. K tomuto účelu je vhodné znát rozměry a složení konstrukce stavby.

2.3.1 Zkoumaný objekt

Jako referenční objekt jsem zvolil rekreační chalupu v obci Zbilidy na Jihlavsku. Obec se nachází v Českomoravské vrchovině v nadmořské výšce přibližně 650 m. n. m. V oblasti objektu dosahuje rychlost větru přibližně celorepublikovému průměru. Díky známosti s majitelem nemovitosti mám k dispozici potřebné dokumenty a mohu snáze určit a porovnat zjištěné údaje se skutečností.

Stavba byla zkolaudována kolem roku 1927. Objekt je přibližně z 30ti procent podsklepený. Základem podlah je 5 cm perlitového betonu a 5 cm klasického betonu. Pod touto

Obrázek 2.1: Lokace referenčního objektu

vrstvou je příprava na vzdušné vytápění. Vnější zdi jsou vystavěny z pískovcových bloků. Všechny vnitřní příčky jsou z pálených cihel až na nosnou zeď uprostřed objektu, jež je taktéž vystavěna z pískovcových bloků. Stropy jsou klenuté z pálených cihel, polystyrenové izolační vrstvy a vrstvy 10 cm betonu. Podkroví je nevytápěné a střecha je izolována skelnou vatou.

V současnosti je stavba používána jako chalupa a v době nepřítomnosti obyvatel je temperována přímotopy. Otopný systém je běžně napuštěn vodou. V zimním období bývá však voda vypuštěna a systém je zazimován.

2.3.2 Konstrukce objektu

Energetické vlastnosti objektu určuje především vnitřní uspořádání a materiály, z nichž je objekt vystavěn. Základem je velikost vytápěného prostoru. Tu lze stanovit z technických plánů viz Appendix 1. Výsledné rozměry se nalézají v tabulce 2.1.

2.3.3 Křivka trvání teplot v oblasti

Pro určení teplotních podmínek je vhodné znát dobu trvání teplot v oblasti. Nejvíce vypovídající informaci poskytují měření v meteorologických stanicích v obci a okolí. Při ne-

Délka budovy	l_l	m	18,5
Šířka budovy	l_w	m	7,3
Výška stropu	l_h	m	3,0
Šířka - zeď S	w_S	m	0,6
Šířka - zeď J	w_J	m	0,35
Šířka - zeď Z	w_Z	m	0,67
Šířka - zeď V	w_V	m	0,67
Podlahová plocha	S_p	m^2	104,8
Zastavěná plocha	S_z	m^2	135,3
Podlaha nad sklepem	S_s	m^2	24,3
Vnitřní objem	V_i	m^3	314,5
Vnější objem	V_e	m^3	406

Tabulka 2.1: Fyzické rozměry referenčního objektu

znalosti konkrétních údajů lze odhadnou z historických dat trvání teplot v dané lokalitě. Tvar křivky trvání teplot je určen rovnicí (Krainer, 2011, Strana 72)

$$\vartheta = (1-v)^{0,985v^{-0,626}}, \vartheta \in <0;1>, v \ \in <0;1> \tag{2.4}$$

Kde ϑ je bezrozměrnou proměnnou určující poměrný rozdíl teplot. Vychází z rovnice

$$\vartheta = \frac{t_{max} - t_e}{t_{max} - t_{min}} \tag{2.5}$$

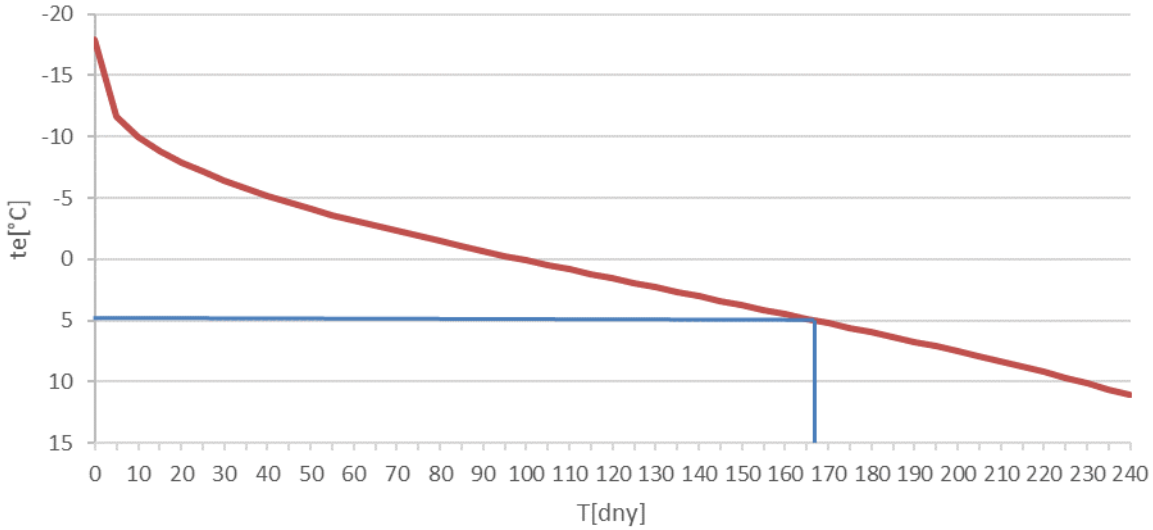
Z rovnice můžeme vyjádřit t_e a tím dostaneme výslednou teplotu pro vstupní parametr ϑ

$$t_e = t_{max} - \vartheta(t_{max} - t_{min}) \tag{2.6}$$

Teploty t_{max} a t_{min} jsou stanoveny pro dáne otopné období. Teplota t_{min} představuje minimální teplotu během otopného období. Nejedná se o teplotu extrémní, ale plošně naměřenou. Pokud venkovní teplota klesne pod t_{max} celistvě na určitou dobu (typicky dva dny) začíná otopná sezona. Teploty jsou vztaženy k oblasti a jejich hodnota může být ještě snížena pro vyšší nadmořské výšky (*Venkovní výpočtové teploty a otopná období dle lokalit* [online], 2015).

$$t_{max} = 13°C \tag{2.7}$$

$$t_{min} = -18°C \tag{2.8}$$



Obrázek 2.2: Křivka trvání teplot pro (2.8), (2.7) a (2.10)

Parametr v v rovnici (2.4) představuje časový rozměr křivky. Transformaci do rozměru dnů (hodin) lze provést vztahem:

$$v = \frac{\tau}{d} \tag{2.9}$$

Kde d je délka otopného období a τ je doba trvání ve stejném rozměru jako d. Délka otopného období je určena teplotou t_{max}, pro (2.7) je její velikost:

$$d = 257\, dnů \tag{2.10}$$

Rozšířením rovnice (2.4) o rozměry z rovnic (2.6) a (2.9) dostaneme výsledný tvar, který vyjadřuje teoretickou závislot teploty na délce trvání. Výsledná křivka je zobrazea na křivce trvání teplot obr. 2.2.

Standardně jsou tepelné ztráty vztaženy na referenční (cílovou) teplotu pohybující se kolem 20°C. Doba topného období je pro temperaci kratší. Podle křivky trvání teplot je teplota nižší či rovna teplotě temperace (2.1) po dobu

$$d_5 = 35\, dnů \tag{2.11}$$

Doba trvání teplot je základní informací pro výpočet tepelných ztrát, stejně jakožto i pro podrobení navrženého systému kritické analýze.

2.3.4 Tepelná ztráta objektu

Jelikož navrhovaný systém by měl sloužit jako otopná soustava objektu, je nutno znát základní charakteristiky objektu. Vytápěný objekt na základě principů termodynamiky předává svou tepelnou energii do studenějšího okolí.

Obecně lze tepelné ztráty objektu prostupem tepla (energii unikající z objektu) vyjádřit vzorcem (Tywoniak, 2005, Strana 25)

$$H_T = L_D + L_S + H_U \tag{2.12}$$

Kde H_T je ztráta prostupem tepla, L_D je tepelná propustnost pláštěm budovy, L_S ztráta přes zeminu a H_U měrná ztráta prostupem přes nevytápěné prostory.

Výsledná tepelná ztráta obsahuje ještě další bilanční toky (Tywoniak, 2005, Kapitola 3).

- Vnitřní tepelné zisky z jiných zdrojů než otopné soustavy (např. při přípravě pokrmů). Ve výpočtech budu předpokládat tyto zisky za rovny nule. Považuji objekt za neobývaný, resp. cílem je temperace v době, kdy není obydlí obýváno.
- Tepelné ztráty výměnou vzduchu způsobují tepelnou ztrátu unikajícím teplým vzduchem a jeho náhradou za vzduch studený. Během výpočtů budu považovat za velmi nízkou až nulovou, pouze pasivní prodyšností objektu.
- Pasivní solární zisky způsobené především průnikem slunečních paprsků přes prosklené plochy objektu.

Výsledná tepelná ztráta je potom rovna

$$Q_C = Q_{HT} + Q_V + Q_S + Q_O \tag{2.13}$$

Kde Q_C je celková tepelná ztráta, Q_{HT} ztráta prostupem tepla, Q_V ztráta výměnou vzduchu, Q_S solární zisky a Q_O ostatní vnitřní zisky. Všechny ztráty a zisky jsou určovány k období totožnému s období tepelné ztráty. Ztráta je vztažena na období topné sezóny.

Výpočet jednotlivých ztrát/zisků určují ČSN normy a jejich výpočet je komplexní teoretickou procedurou. Pro potřeby mé práce není nutno znát přesnou hodnotu tepelné ztráty, proto jsem vybral jeden z dostupných kalkulátorů (Reinberk Z., 2009). Rozměry budovy se nalézají v tabulce 2.1. Důležitou roli hrají kvalitativní vlastnosti objektu a jeho uspořádání. S ohledem na vlastnosti objektu 2.3.2 je možno odhadnout fyzikální vlastnosti obálky ohraničující vytápěný prostor.

V tabulce 2.2 jsou podle normy [3] určeny honoty prostupu tepla $U_i[Wm^{-2}K^{-1}]$ určující

[3] ČSN 73 0540-2:2007

velikost ztrátového výkonu jednotkovou plochou při jednotkovém rozdílu vnější a vnitřní teploty a bezrozměrný činitel teplotní redukce b_k, který určuje redukovanou ztrátu prostupem přes nevytápěné prostory H_U [4].

Z hlediska temperace budu považovat temperovaný prostor za částečně vytápěný. Teplotní spád není tak velký a prostup tepla přes nevytápěné prostory bude probíhat zpomaleně.

	S	U_i	b_k
Podlaha na terénu	80,6	3,1	0,4
Podlaha nad sklepem	24,3	3,1	0,29
Strop	104,8	0,51	0,29
Zeď J	50,9	1,3	0,9
Zeď Z	17,1	1,5	1
Zeď S	50,9	1,3	1
Zeď V	21,9	2,6	0,2
Okna	14,3	2,35	0,82
Dveře	6,3	4,7	0,49

Tabulka 2.2: Kvalitativní parametry objektu

Ztrátový výkon na jednotkový rozdíl vnitřní a vnější teploty mi vyšel

$$P_Z \cong 350\,WK^{-1} \tag{2.14}$$

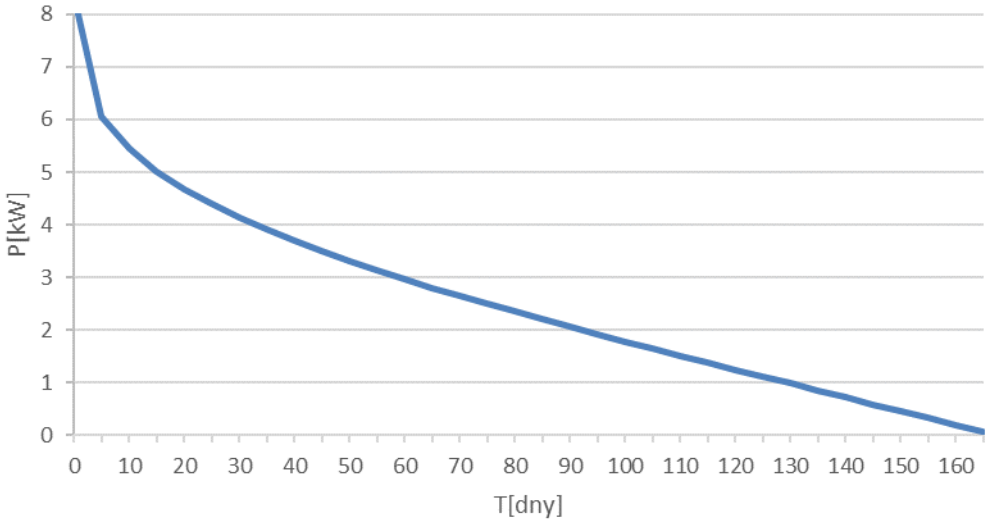
Výkon navrženého otopného systému vychází z tepelné ztráty objektu. Navržený systém by měl dodávat do systému dostatek tepla na pokrytí tepelné ztráty při maximálním rozdílu teplot. Takový systém je při minimální venkovní teplotě schopen udržet uvnitř objektu teplotu temperace 5 °C (2.1).

$$P_O = (t_t - t_{min}) \cdot P_Z = (5 - (-8)) \cdot 350 \doteq 8\,kW \tag{2.15}$$

kde P_O je potřebný výkon soustvy, t_t odpovídá 5 °C (2.1) a t_{min} odpovídá -18 °C (2.8).

Teplo ztracené za celé temperační období mohu určit z doby trvání venkovní teploty (obr. 2.2). S ohledem na temperaci je energie ztrácena pouze v případě, kdy venkovní teplota klesne pod teplotu temperace 5 °C (2.1). Z výsledků kapitoly 2.3.3 vychází doba temperační sezóny d_5 rovna přibližně 167 dnů (2.11). Ztracená energie je při přepočítání venkovní teploty na ztrátový výkon plochou pod křivkou trvání ztrátového výkonu (obr. 2.3).

[4](Novák, 2008)



Obrázek 2.3: Doba trvání ztrátového výkonu

Obecně tak energie pod křivkou vychází z integrálu

$$Q = \int_0^{d_5} P(\tau) d\tau \tag{2.16}$$

Rozvedením $P(\tau)$ podle vztahu (2.15) získám následující rovnici integrálu

$$Q_{ZC} = \int_0^{d_5} P_Z \cdot (t_t - t(\tau)) d\tau \tag{2.17}$$

Křivka trvání teplot vyjádřená funkcí $t(\tau)$ je dle kapitoly 2.3.3 pro integraci nevhodná z důvodu složitosti. Plochu pod křivkou mohu snadněji spočítat součtem obdélníků pod křivkou o šířce vzorkovacího intervalu, který budu předpokládat velký jednu hodinu, a výšce rovné ztrátovému výkonu uprostřed intervalu. Touto metodou získám velikost plochy pod křivkou. Jelikož křivka trvání teplot nemá žádné rychle se měnící pasáže, bude se pouze drobně lišit od reálné hodnoty získané integrací. Obecně tímto způsobem mohu spočítat energii podle následujícího vztahu

$$Q_Z = \sum_{\tau=0}^{d_5} P(\tau) \tag{2.18}$$

Opětovným rozvedením podle vztahu získám výsledný vztah vhodný k výpočtu

$$Q_Z = \sum_{\tau=0}^{d_5} P_Z \cdot (t_t - t(\tau)) \tag{2.19}$$

Pro referenční objekt vychází tepelná ztráta podle vztahu (2.20) rovna

$$Q_Z \doteq 93\, MWh \tag{2.20}$$

2.3.5 Tepelná kapacita objektu

Tepelná kapacita je další důležitou charakteristickou vlastností objektu. Určuje setrvačnost vnitřní teploty při náhlému výpadku tepelného zdroje. Počítá se jako suma tepelných kapacit všech vnějších i vnitřních stěn, podlah a stropů. Tepelná kapacita vzduchu a vybavení je zanedbatelná vzhledem k mnohonásobně vyšší tepelné kapacitě zdiva [5].

Tepelná kapacita zdiva se pak spočte jako

$$C = c \cdot \delta \tag{2.21}$$

kde c je měrná tepelná kapacita materiálu zdiva v $Jkg^{-1}K^{-1}$, δ je hustota zdiva v m^3kg^{-1}.

Celkové teplo akumulované vůči současné venkovní teplotě lze spočítat dle vztahu

$$Q_K = (t_e - t_{int}) \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot V_i \tag{2.22}$$

kde t_e je velkovní teplota v Kelvinech, t_{int} je vnitřní teplota v kelvinech, C_i je objemová tepelná kapacita i-tého zdiva s rozměrem $Jm^{-3}K^{-1}$ a V_i je objem i-tého zdiva v m^3.

Referenční objekt podle projektové dokumentace a parametrů v kapitole 2.3.1 má hodnoty uvedné v tabulce (tabulka 2.3) [6]. Na základě těchto hodnot lze vypočítat přibližnou hodnotu tepelné kapacity.

	Materiál	V	C	ρ
Vnější stěny	Pískovec	91,5	720	1800
Vnitřní stěny	Cihly	19,9	877	1237
Podlaha	Beton	21	645	1150
Strop	Beton + Cihly	21	830	1220

Tabulka 2.3: Tepelně-kapacitní parametry budovy

Výsledná hustota a tepelná kapacita je váženým průměrem materiálů z nichž je okrajová plocha otopné zóny vystavěna.

Výsledná kapacita referenčního objektu dle vztahu (2.22) pro rezervní kapacitu před dosažením kritické teploty je rovna

$$Q_K \doteq 0{,}9\,GJ \tag{2.23}$$

[5] (Kučera, 2006)

[6] (*Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů* [online], 2015)

pro t_e odpovídající teplotě kritické 0 °C (2.2) a t_i odpovídající teplotě temperační 5 °C (2.1).

Průběh vnitřní teploty při chladnutí objektu je velmi složitý termodynamický proces během nějž není teplota uvnitř objektu rovnoměrná. Objekt chladne nerovnoměrně. To je způsobeno různými tepelnými prostupy a redukčími koeficienty (přes nevytápěné prostory bude plocha vychládat pomaleji). Při tomto procesu hraje svou roli i tepelná vodivost zdiva. Na její velikosti záleží rovnoměrnost prochladnutí či ohřátí objektu.

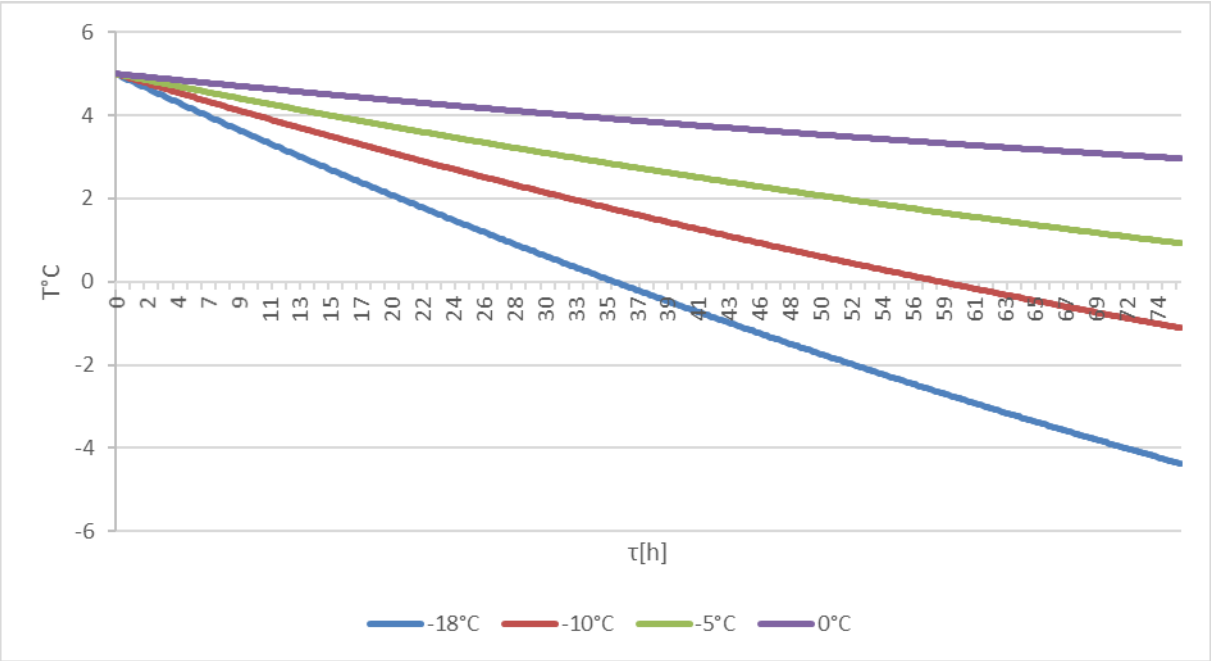
Pro zkoumání spolehlivosti systému mne zajímá časová konstanta vychladnutí. Doba během níž vnitřní teplota klesne na teplotu kritickou 0 °C (2.2). Tato doba poukazuje jakou dobu systém překlene svou akumulační schopností. Což znamená, jak dlouhé bezvětří neohrozí systém přílišným poklesem teploty. Bezvětří není úplně přesný výraz. Správně by mělo být řečeno období, během nejž nejsou větrné podmínky dost příznivé, aby systém vyráběl dostatek tepla.

Relaxační konstanta je určena rovnicí

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\Delta T}{\tau_0} \tag{2.24}$$

kde τ_0 je relaxační konstanta, τ je čas od přerušení dodávky, $\frac{dt}{d\tau}$ je rychlost poklesu vnitřní povrchové teploty v Ks^{-1}.

Jelikož již znám tepelnou ztrátu objektu, tepelnou kapacitu objektu a budu předpokládat velmi krátké časové úseky, mohu po malých krocích výslednou charakteristiku vypočítat. Samozřejmě při aproximaci může dojít k chybě, avšak případná chyba se pohybuje do jedné hodiny. Výsledná hodnota tak bude defensivně zvolená, při jejím splnění lze předpokládat, že stabilita reálného systému bude stejná či větší. Díky přijatým podmínkám mohu objekt aproximovat referenčním útvarem o stejné tepelné kapacitě, stejné tepelné ztrátě a nulové velikosti (hmotný bod).



Obrázek 2.4: Průběh vnitřní teploty v čase při nefunkčním otopném systému.

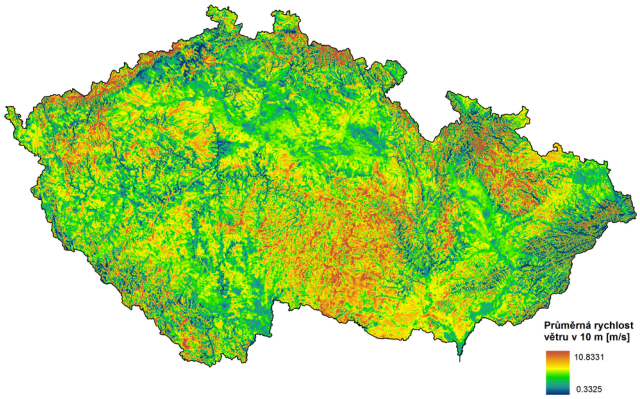
Vzhledem k náhodné povaze dodávaného výkonu je vhodné zkoumat dobu, za kterou je zkoumaný objekt vystaven potenciálnímu riziku dosažení kritické teploty 0 °C (2.2). Při kritických podmínkách $t_e = -18°C$ (2.8) a současnému bezvětří je kritická doba (doba při které vnitřní teplota klesne na kritickou teplotu (obr. 2.4)) je rovna

$$T_{krit} = 35\, hodin \tag{2.25}$$

2.3.6 Povětrnostní podmínky v oblasti

Průměrná rychlost větru je zásadní pro zhodnocení realizované větrné elektrárny. Nejoptimálnější variantou by bylo měřit rychlost větru přímo v místě, kde se bude větrná elektrárna nacházet. To je však časově i finančně náročné na následné zhodnocení.

Ústav fyziky atmosféry AV ČR dlouhodobě využívá tři základní modely pro výpočet a zobrazení průměrných rychlostí větru na území České republiky. Každý model nabízí trochu jiný pohled na povětrnostní podmínky na základě naměřených dat. Graficky vyobrazené podmínky na určitém území se nazývají Větrné mapy. Výsledná mapa je pak syntézou běžně užívaných modelů (Hanslian D., 2013*a*, Díl I)



Obrázek 2.5: Větrná mapa České republiky 2012

V realizaci je předpokládáno využití malé větrné elektrárny. Pro malé elektrárny lze považovat rychlost v 10 m nad povrchem objektivní vzhledem k technické realizaci elektrárny. Jelikož odečíst reálnou hodnotu z větrné mapy by bylo spíše tipováním, rozhodl jsem se kontaktovat Oddělení meteorologie Akademie Věd. Mgr. David Hanslian dle větrných modelů určil, že rychlost větru ve výšce 10 metrů (nad zkoumaným objektem) bude maximálně rovna celorepublikovému průměru.

V dalších výpočtech budu předpokládat průměrnou rychlost větru

$$v_p = 3{,}5\, ms^{-1} \tag{2.26}$$

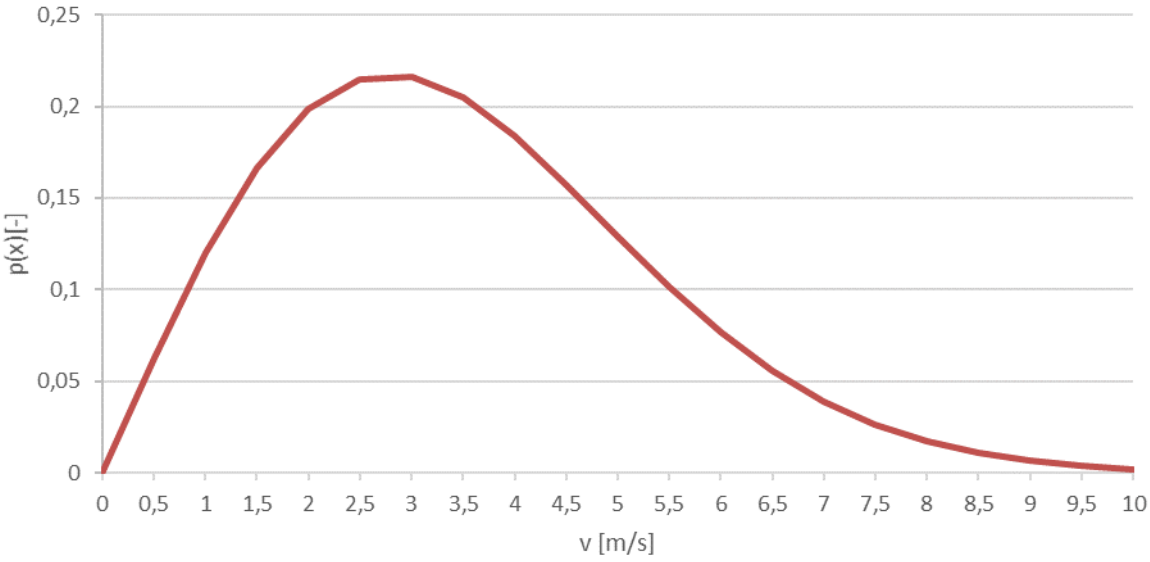
Pohyby vzduchu v zemské atmosféře však často mění svou okamžitou rychlost. To je běžným jevem v České republice, která je svým geografickým rozložením velmi členitá. Obecně čím větší rovná plocha, tím stabilnější rychlost větru je. Jelikož rychlost není konstatní a výkon rotorů větrných elektráren neroste lineárně s okamžitou rychlostí větru (3.14), pro správné určení transformované energie je zapotřebí znát dobu trvání rychlostí větru.

Okamžitou rychlost větru lze pro jeho náhodnou povahu [7] popsat jako náhodnou veličinu. Většinou je rychlost větru aproximována Rayleighovým rozdělením (Hanslian D., 2013*b*, Díl II). To je speciálním případem Weibullova rozdělení

$$f(x,k,A) = \frac{k \cdot x^{k-1}}{A^k} \cdot e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}, x > 0 \tag{2.27}$$

kde $x[-]$ náhodně proměnná rychlost větru, $k[-]$ tvarový parametr rozložení a $A[ms^{-1}]$ určuje rozměr rozdělení.

[7] Obecně to úplně neplatí, protože rychlost větru se nikdy skokově nemění během okamžiku



Obrázek 2.6: Weibullovo rozdělení pro A = 3,95 m/s a k = 2

Rayleighovo rozdělení je specifické parametrem k rovným hodnotě 2 [8]. Parametr A lze aproximovat podle vztahu [9]

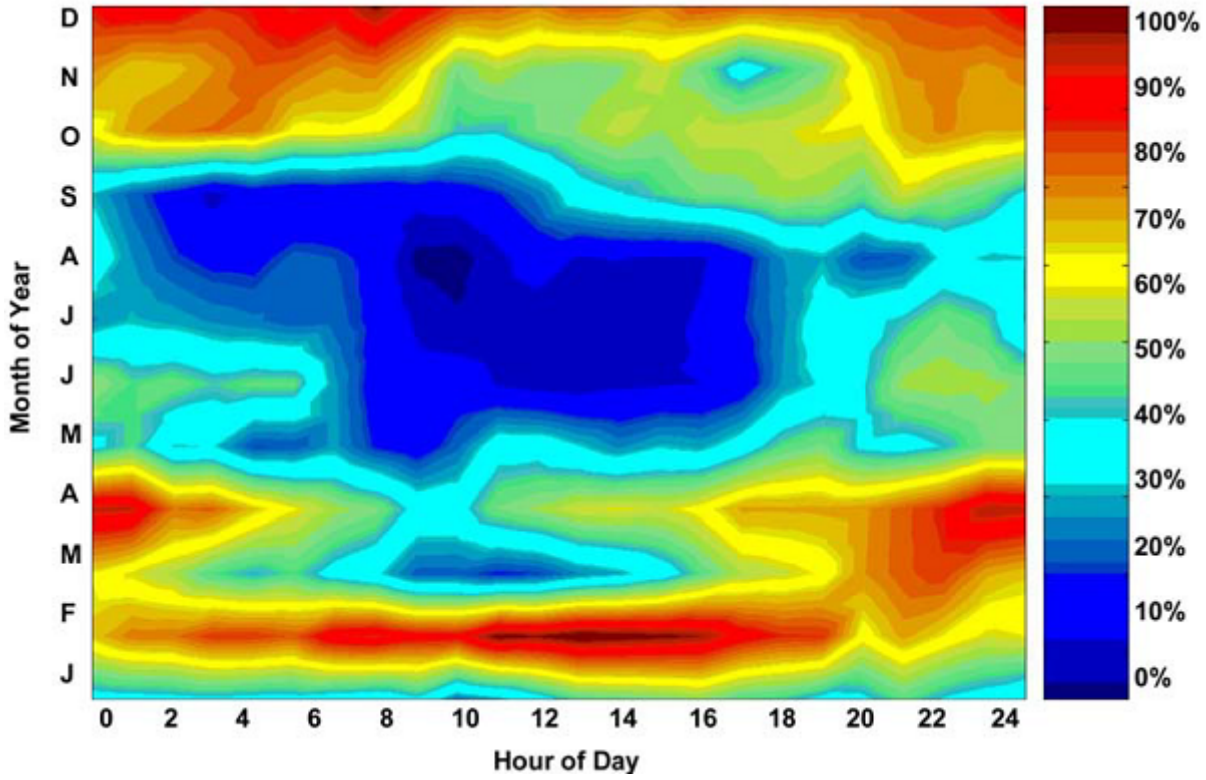
$$A \approx \frac{v_p}{0{,}886} \tag{2.28}$$

Pro odečtenou hodnotu v_p má distribuční funkce tvar

$$f(x) = 0{,}128 \cdot x \cdot e^{-\left(\frac{x}{3{,}95}\right)^2}, x > 0 \tag{2.29}$$

Z hlediska temperace je vhodné zkoumat korelaci rychlosti větru s ročním obdobím, potažmo venkovní teplotou. Diagram (obr. 2.7) (Steffes, 2008) naznačuje, že větší intenzity větru se projevují v zimních měsících a více v nočních hodinách. Samozřejmě by bylo mylné na tomto faktu systémy navrhovat, ale je možno říci, že systém, navržený pro rovnoměrnou intenzitu během celého roku je defensivní variantou a pro reálný systém budou platit příznivější podmínky.

[8] (*Wikipedia: Weibullovo rozdělení* [online], 2015)
[9] (*Wikipedia: Weibullovo rozdělení 2* [online], 2015)



Obrázek 2.7: Intenzita větru v průběhu roku

Kapitola 3

Návrh systému vytápění větrem

"Tepelná soustava je soustava, ve které se teplo vyrábí a dopravuje kapalinami nebo parami potrubím ke spotřebičům."(Valenta, 2010)

Tepelná soustava se skládá ze zdrojů, rozvodů a spotřebičů tepla. Distribuce tepla v objektu se velkou měrou podílí na celkovém efektu soustavy. Šíření tepla otopnou soutavou a jeho následná distribuce v temperované zóně je velmi komplikovaný a komplexní termodynamický proces. V rámci mojí práce se dopravou hlouběji zabývat nebudu.

Pro zjednodušení zkoumaného problému budu přenos tepla považovat za dostatečně rychlý a homogenní, aby veškerá akumulovaná tepelná energie uvnitř vytápěné oblasti mohla být považována za jednorozměrnou veličinu. Tím se mi zredukuje počet spotřebičů na jeden, jehož stavové proměnné jsou okamžité teplo, teplota a ztrátový výkon.

"Zdroj tepla je úplné zařízení, ve kterém se získává teplo pro tepelnou soustavu" (Valenta, 2010)

Návrh zdroje tepla založeném na větru je náročný problém. Mohu formulovat několik základních faktů, jež návrh zdroje komplikují z fyzikálního hlediska.

Fundamentální problémy návrhu zdroje tepla:

1. Zdroj energie se nachází mimo vytápěnou oblast

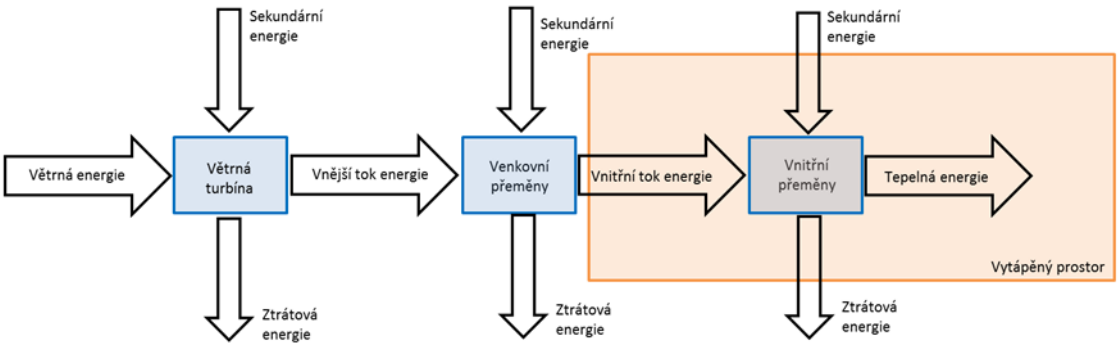
2. Větrná energie nemůže být přeměněna přímo na teplo

Zdroj větrné energie se logicky nachází mimo vytápěnou oblast. Typicky se vzdáleností (výškou) od otopné oblasti plošná hustota energie roste. Dalším problémem je neexistence jednoduchého způsobu přeměny větrné energie na tepelnou přímo. Větrná energie

je transformována pomocí turbíny na mechanickou rotační energii, která je dále transformována. Bohužel existence snadné (a efektivní přeměny) větrné energie na tepelnou neskýtá přílišný nárůst užitku. Jelikož se zdroj nachází mimo otopnou oblast, bylo by nutno vyrobené teplo do otopné oblasti dopravovat. Přenos tepla je z mnou užitých forem energie nejvíce ztrátový. Dodatečná izolace či ztráty by v konečném důsledku vedly k snížení ekonomického užitku ze systému tento princip využívajícího.

Celý proces přeměny musí probíhat skrze několik přeměn energie až ke konečné výrobě tepla a jeho spotřebě. Je proto potřeba navrhnout několik komponent.

3.1 Obecná energetická bilance



Obrázek 3.1: Zobecněná energetická bilance

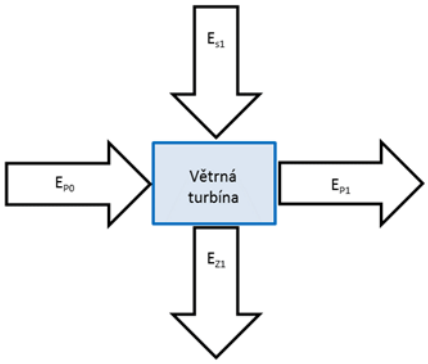
Energetickou bilanci zdroje tepla založeném na větrné energii popisuje schéma obecné energetické bilance obr. 3.1. Primární energie má na vstupu vždy formu energie větrné a na výstupu formu energie tepelné. Řetězec obsahuje obecně 3 prvky transformační a n-1 prvků přenosových. To je dáno fundamentálními problémy návrhu 3. Přenosové prvky jsou na diagramu reprezentovány šipkou vnějšího a vnitřního toku energie. Mají samozřejmě vlastní schéma toků energie, ale pro osvětlení principu by pouze zbytečně schéma komplikovaly. Hlavní prvky řetězce mohou uskutečňovat více druhů přeměn a přenosů. Samy reprezentují subsystémy pro něž platí stejná pravidla jako pro systém hlavní.

Reálný systém nemusí disponovat všemi hlavními prvky. Některé mohou chybět, jiné

mohou být svou strukturou složitější než je nakresleno. U všech prvků vně temperované zóny je ztráta nezávisle na formě trvalou. V případě vnitřních přeměn je situace složitější. U většiny prováděných transformací se většina ztrátové energie sérií přeměn přemění na formu tepelnou. Ta je žádoucím (primárním) produktem zdroje tepla. Příkladem může být situace, kdy je elektrický proud přenášen kabely. Na kabelech vznikají tepelné Joulovy ztráty. Z hlediska primárního toku energie se jedná o ztrátový tok, avšak z hlediska výstupu zdroje tepla má tato ztráta stejnou užitnou hodnotu jako primárně vyrobené teplo. Finální množství vyrobené energie je tak výsledkem analýzy energetického toku navrženého systému.

Samozřejmě reálný systém nemá všechny toky energie nenulové. V případech, kdy o ztrátách nelze hovořit, nemusí ztrátový tok existovat. Stejně je tomu u energií sekundární. Ta většinou reprezentuje případné napájení a řízení jednotlivých systémů. V takových případech se jedná o toky, které uzavírají komplexnost návrhu. Některé toky však mohou být vysoké a žádoucí. Příkladem může být tepelné čerpadlo.

Pro zjednodušení problému a zúžení zkoumaného problému budu předpokládat, že žádný prvek řetězce není dlouhodobým zdrojem či úložištěm energie. Po tomto zjednodušení se systém stává časově nezávislý a můžeme hovořit pouze o jeho okamžitých hodnotách či množstvích vyrobené energie za libovolně volený interval.



Obrázek 3.2: Element obecné energetické bilance

S tímto zjednodušením mohu parafrázovat a poupravit 1. Kirhoffův zákon pro použití pro tok energie: "Součet energie toků vstupujících do uzlu se rovná součtu energie vystupující toky vystupujícími.". To mohu vyjádřit vztahem obr. 3.2

$$E_{p(i-1)} + E_{si} = E_{pi} + E_{zi} \tag{3.1}$$

Kde E_{pi} je primární energie na výstupu i-tého prvku, $E_{p(i-1)}$ primární energie na vstupu

i-tého prvk, E_{si} sekundární energie vstupující do i-tého prvku a E_{zi} je ztrátová energie při přenosu či transformaci i-tým prvkem.

Dále platí

$$E_{xi} \geq 0 \tag{3.2}$$

Všechny typy transformačních zařízení nemají sjednocené jmenování a rozměry energetické účinnosti. Některá zařízení disponují účinností, ztrátami či topným faktorem. Z tohoto důvodu si zavedu transformační koeficient k. V průběhu analýzy se pokusím zjistit či odvodit tento koeficient pro jednotlivá zařízení a přeměny. Koeficient by měl být závislý pouze na velikosti vstupním výkonu prvku (ztráty při přenosu) a na venkovní teplotě (ztráty v turbíně a při čerpání tepla).

Pro každý prvek řetězce tak mohu určit jeho transformační (přenosová) koeficient

$$k_i = \frac{E_{pi}}{E_{p(i-1)}}[-] < 0; \infty > \tag{3.3}$$

Všechny hodnoty energií musí mít stejný rozměr nezávisle na formě energie. Pro výpočty v Kapitole 3 budou tyto hodnoty v jednotkách Watthodin a jejich násobcích v případě mezivýsledků. Prvek řetězce nemůže v obecném případě disponovat účinností, jelikož velikost k_i může překročit hodnotu 1 pro

$$E_{si} > E_{zi} \Rightarrow k_i > 1 \tag{3.4}$$

za předpokladu že platí Kirhoffův zákon zobecněný pro energii (3.1).

Charakteristiky všech prvků mají typicky přímo úměrné a nelineární charakteristiky [1]. Transformační koeficient je dvourozměrným parametrem přímo závislým na velikosti vstupní energie a venkovní teplotě

$$k_i = f(E_{p(i-1)}, t) \tag{3.5}$$

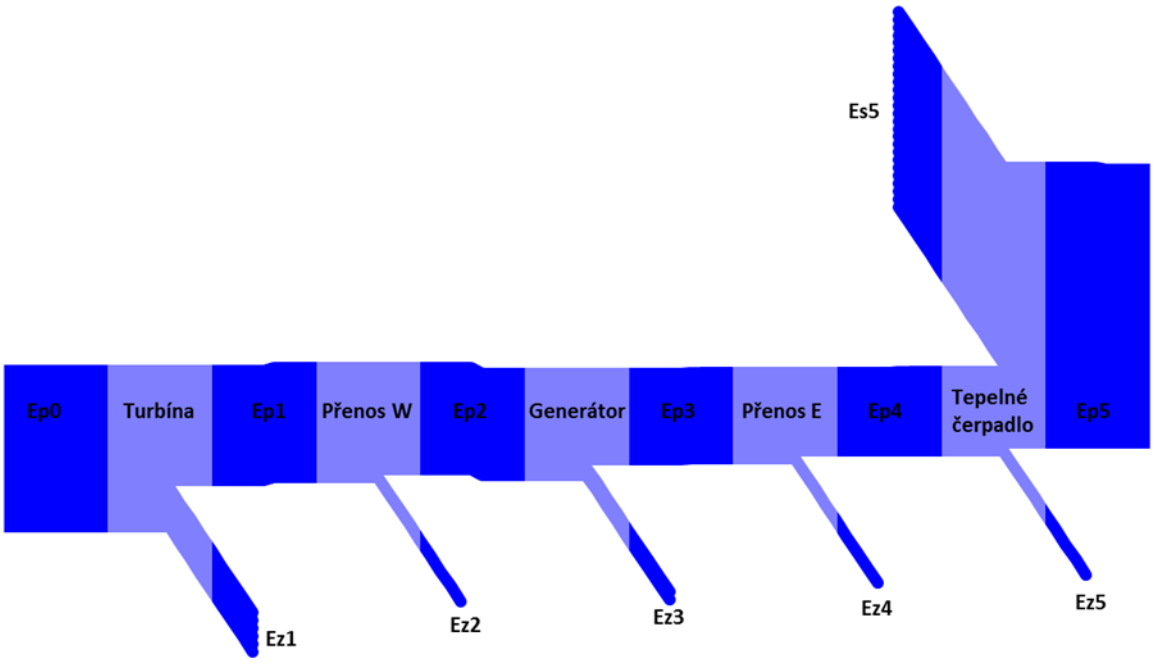
Při návrhu systému se můžeme omezit na zkoumání situace při jedné teplotě. Na teplotní závislost parametru k však musíme brát ohled při hodnocení množství vyrobené energie. V dalších úvahách a výpočtech proto budu považovat teplotu za konstantní, rovnu teplotě minimální -18°C (2.8) a budu zkoumat vlastnosti parametru k.

Schéma obecné energetické bilance obr. 3.1 je vhodné hlavně pro ilustraci a popisu veličin v energetické bilanci. Po dosazení spočtených hodnot (viz další kapitoly) není tento způsob vizualizace příliš vhodný. Pro účely vizualizace ztrát v energetických systémech

[1] S rostoucí primární energií na vstupu stoupají ztráty energie a objem primární výstupní energie pro většinu zařízení

se jeví vhodné použít Sankeyho diagramy (*Sankey Diagrams* [online], 2009). Diagramy názorně ukazují relativní proudění energie skrz celý řetězec a umožňují odhad prvků, jež by měly být předmětem pozornosti při následné ekonomické optimalizaci a prvky, jejichž optimalizací se nemá smysl hlouběji zabývat.

Na obrázku energetické bilance obr. 3.3 je názorný diagram pro náhodně vybrané parametry vygenerovaný Tabulkovým programem Excel. Pro tento účel jsem vytvořil jednoduchý sešit umožňující generování těchto diagramů. Všechny diagramy proto budou pro snadné porovnání generovány tímto sešitem.



Obrázek 3.3: Příklad energetické bilance

Jako každý subsystém řetězce má vlastní koeficient k_i celý řetězec bude mít také konečnou hodnotu závislou na jednotlivých subsystémech. Již bylo naznačeno, že na výkonu zdroje se podílí nejen teplo získané primárním tokem, ale i další ztráty, které vznikají uvnitř otopné zóny. Nejprve určím koeficient k pro primární tok energie. Chápu-li celý systém jako jeden subsystém, mohu vypočítat koeficient k jako

$$k_{cp} = \frac{E_{pn}}{E_{p0}} \tag{3.6}$$

Vztah (3.6) není vhodný pro výpočet, jelikož návrh začíná u neznámé E_{pn} a k_c. Celkový koeficient je však následujícími úpravami možné převést na tvar nezávislý na veli-

kosti energetických toků. Vyjádřím si energii na n-tém prvku jako funkci energie na výstupu

$$k_{np} = \frac{E_{pn}}{E_{p(n-1)}} \Rightarrow E_{pn} = k_{np} E_{p(n-1)} \tag{3.7}$$

Dosazením E_{pn} ze vztahu (3.7) do vztahu (3.6) získáme vztah

$$k_{cp} = k_{np} \frac{E_{p(n-1)}}{E_{p0}} \tag{3.8}$$

Opakovanou aplikací vztahu (3.7) a (3.8) postupně snížíme index energie v čitateli až na nulu a tím nám energie z rovnice kompletně vypadne. Výsledný vztah pak bude

$$k_{cp} = k_{1p} k_{2p} \ldots k_{(n-1)p} k_{np} \tag{3.9}$$

Ten pak můžeme snadno převést na finální tvar. Samozřejmě každý koeficient k_i je vztažen na pracovní bod, pro který je koeficient počítán.

$$k_{cp} = \prod_{i=1}^{n} k_{ip}(E_{p0}) \tag{3.10}$$

Správnost technického návrhu je možno pomocí k_{cp} snadno ověřit podle vztahu (3.6). Předpokládaná energie větru násobená celkovým koeficientem by měla dát celkovou tepelnou ztrátu na níž je zdroj tepla navrhován. Samozřejmě za předpokladu, že obě energie jsou vztaženy na stejné časové období.

Vztah pro výpočet k_{cp} (3.10) může být snadno použit pro výpočet jakéhokoliv podřetězce. Nyní chci spočítat druhotné parametry k. Rozpojím řetězec mezi dvěmi prvky j a $j+1$ uvnitř vytápěné oblasti. Zaměním tepelný ztrátový tok za primární tok energie [2]. V reálu si tuto situaci představit, jako bych odpojil generátor, ale nechal na něj připojený hřídel. Generátor bude generovat teplo, ale žádný primární tok.

Pro primární tok k prvku mohu spočítat parametr k jako

$$k_{1j} = \prod_{i=1}^{j-1} k_i(E_{p0}) \tag{3.11}$$

k-tý prvek řetězce přemění vstupní energii na teplo s parametrem k_{Qj}. Jeho vynásobením s parametrem k_{1j} podřetězce získám poměr, s jakým je energie na vstupu větrné turbíny přeměněna na energii tepelnou na j-tém prvku

$$k_{Qcj} = k_{1j} \cdot k_{Qj} \tag{3.12}$$

[2] Vně vytápěné oblasti je $k_Q x$ rovno nule

Stejný výpočet platí pro všechny prvky řetězce. Jelikož je jednoznačně dáno, jak energie řetězcem prochází, mohu pro výpočet celkového koeficientu k_c shrnout jediným vzorcem

$$k_c = \prod_{i=1}^{n} k_{ip}(E_{p0}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{Qi} \cdot \prod_{j=1}^{i-1} k_{jp}(E_{p0}) \tag{3.13}$$

Na základě znalosti jednotlivých prvků řetězce a jejich koeficientů pak je možno určit parametr k soustavy a tím i výstupní výkon zdroje tepla.

3.2 Návrh prvků řetězce

Pro návrh řetězce je nejprve nutné zkoumat koeficienty jednotlivých transformačních a přenosových prvků. Varianty těchto prvků se můžou následně mírně lišit, ale je vhodné mít přehled o jejich vlastnostech před samotným návrhem.

3.2.1 Přeměna větrné energie na mechanickou

Větrná turbína je základním prvkem všech tvořených řetězců. Na jejích lopatkách je kinetická energie větru transformována na rotační energii rotoru turbíny. Prakticky známe pouze způsoby přeměny větru na energii mechanickou. Rotační energie rotoru může být následně využita pro přeměny na další formy energie.

Výkon větru lze obecně počítat ze vztahu (Klečka, 2009)

$$P_v = \frac{1}{2} S\rho v^3 \tag{3.14}$$

kde P_t je teoretický výkon turbíny ve W, S plocha rotoru v m^2, ρ hustota vzduchu v kgm^{-3} a v střední rychlost vzduchu v ms^{-1}. Jednotlivé typy větrných turbín se liší především ve výkonovém součiniteli a ploše rotoru. Poměr mezi kinetickým výkonem větru a výkonem turbíny určuje koeficient k každého rotoru.

Samozřejmě výkon větru není přeměnit veškerý na energii mechanickou. Ideální turbína podle Betze dosahuje účinnosti 69 % (Klečka, 2009). Výkon turbíny je možno získat rozšířením výkonové rovnice výkonu větru (3.14) o Betzův limit C_p, který určuje teoretickou účinnost turbíny a je závislý na konstrukčním uspořádání turbíny

$$P_t = C_p P_v \tag{3.15}$$

Výkonová křivka turbíny je nelineární na celém rozsahu výkonů.

Vztlakové horizontální turbíny budu uvažovat o jejich maximální možné účinnosti $C_p = 0{,}45$ a pro vertikální odporové turbíny $C_p = 0{,}2$ [3]. V mnou zkoumaném energetickém řetězci odpovídá Betzův limit C_p koeficinetu k_1 [4].

$$k_1 = \frac{E_t}{E_v} = \frac{P_t t}{P_v t} = \frac{P_t}{P_v} = \frac{C_p P_v}{P_v} = C_p \tag{3.16}$$

Z hlediska návrhu zdroje navrhuji systém pro minimální vnější teploty. Při vyšších teplotách hustota ve vztahu (3.14) klesá [5] a s ní i výstupní výkon.

$$P_v = f(t) \tag{3.17}$$

Větrné turbíny se většinou dělí do dvou základních skupin s různými vlastnostmi tabulka 3.1 (Grygarová, 2014).

Vertikální	**Horizontální**
Odporový princip	Vztlakový princip
Nižší účinnost	Vyšší účinnost
Nižší cena	Vyšší cena
Robustnější	Složitější
Principiální všesměrovost	Konstrukční všesměrovost

Tabulka 3.1: Porovnání typů větrných turbín

V tabulce jsem záměrně opomenul vertikální vztlakové turbíny, jelikož při návrhu s tento typ turbíny nepoužívám. Jednodušší skupinou jsou turbíny vertikální. Jedná se o starší princip odporové turbíny známý po dlouhou dobu (větrné mlýny). Tento typ turbíny se často označuje jako Savoniova turbína. Lopatky rotoru kladou odpor proudícímu vzduchu a ten mu tlakem na lopatky předává energii. Vertikální turbíny dávají základ několika alternativním způsobům přeměny energie větru na energii tepelnou, jež budou zmíněny v Kapitole 4. Díky vertikální ose je otáčení je turbína principielně všesměrovou. Technicky však turbína nemůže dosahovat účinnosti turbín horizontálních.

Horizontální turbíny představují modernější přístup k přeměně větru. Tyto turbíny jsou obecně složitější svou konstrukcí, jakožto i konstrukcí samotných lopatek. Díky aerodynamickému tvaru proud vzduchu obtéká lopatku rotoru různou rychlostí na každé

[3] (*Větrné elektrárny: Nejčastější typy, experimentální projekty a zajímavosti* [online], 2015)

[4] Turbína je vždy prvním prvkem řetězce a můžeme jí automaticky přiřadit index 1

[5] (*Hustota suchého vzduchu* [online], 2015)

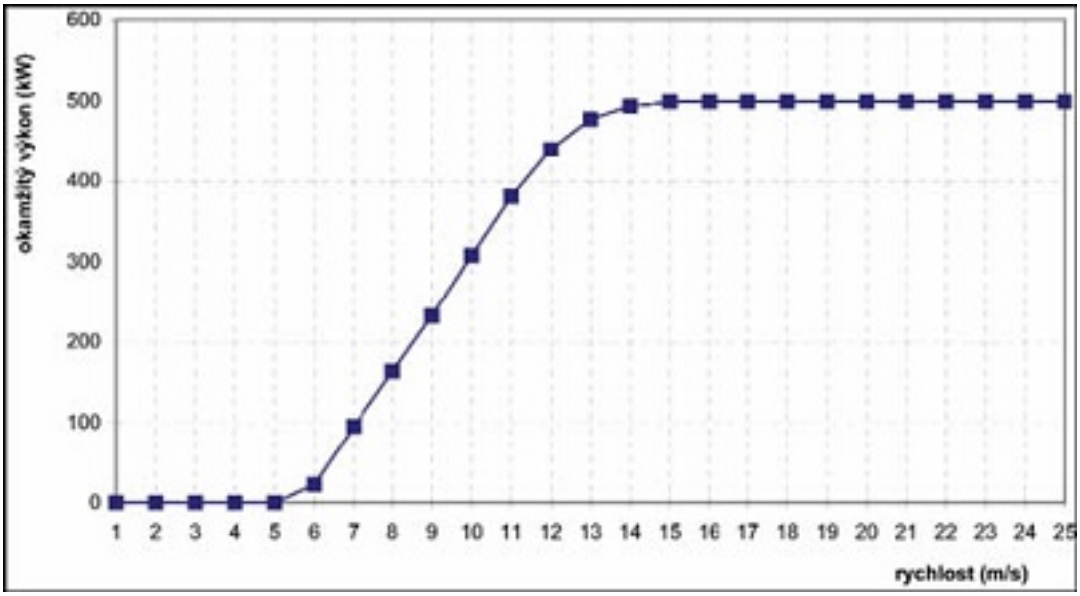
straně a způsobená vztlaková síla roztáčí rotor. Výhodou (vycházející přímo z výkonové rovnice rotoru) jsou díky zvýšené účinnosti menší rozměry turbíny pro stejné jmenovité výkony.

Větrné turbíny mají typicky hlavní mezní parametry, jež se liší typem a velikostí turbíny (Beranovský J., 2007).

- Rozběhová rychlost - rychlost větru, při které se turbína roztáčí. Pro menší turbíny kolem 1 m/s

- Regulační rychlost - rychlost větru, od které jsou otáčky regulovány, aby nedošlo k poškození a výkon turbíny je přibližně konstatní. Rychlost větru kolem 15 m/s

- Rychlost odstavení - rychlost větru, při které je turbína odstavena, aby nedošlo k poškození (výkon nulový). Rychlost větru nad 25 m/s



Obrázek 3.4: Výkonová charakteristika větrné elektrárny 500 kW

Jelikož rychlost větru ve zkoumané lokaci přesahuje 15 m/s pouze minimálně, nebudu zavádět tato omezení pro určité oblasti a budu předpokládat výkon turbíny závislý pouze na rychlosti větru. Toto zjednodušení zavádí do výpočtů drobnou chybu, vyhodnocení dalších charakteristik se však znatelně zjednodušší.

3.2.2 Přenos mechanické rotační energie

Základním stavebním kamenem systémů, jež mám v plánu navrhnout je jednoduchá teorie. Většina ztrátové energie, která vzniká při jednotlivých přeměnách, se přimo či nepřímo (skrze několikero přeměn) přemění na energii tepelnou. Mou snahou je tuto ztrátovou energii využít a tím zvýšit efektivitu celého systému. Logickým způsobem jak toho docílit je přesunout většinu transformací dovnitř topné zóny. Za tímto účelem předpokládám svedení mechanické točivé energie přímo z rotoru turbíny pomocí hřídele dovnitř topné zóny. Hřídel uvažuji jako dlouhou tyč z materiálu o rozumném poměru tuhosti a ceny. Je zřejmé, že hřídel je možno vést pouze z vertikálního typu turbíny. Hřídel by měla dosahovat určité základní tuhosti, aby se snadno nezlomila při kroutících momentech, jež na ní budou působit.

Je zřejmé, že tento způsob je přímo spjat s jistými úpravami, bez kterých není možno realizace založené na tomto předpokladu uskutečnit. Budu však předpokládat, že tyto práce jsou realizovatelné a nebudu se zabývat jednotlivými situacemi, kdy je realizce možná a kdy ne. Samozřejmě jako každý zkoumaný subsystém je nutno zhodnotit energetickou bilanci tohoto přenosu a určit tak přibližnou hodnotu parametru k. Síla působící na tyč způsobuje deformaci tyče. Budu-li předpokládat dostatečně tuhý materiál, tato síla nebude způsobovat trvalou deformaci materiálu. Tlak, jímž síla vyvíjí na tyč, způsobuje nárůst tlaku a tím částečnou přeměnu na teplo. Tyto ztráty budou naprosto minimální avšak pravděpodobně nenulové. Určím si je tedy minimální a parametr k odhadnu roven 0,001.

3.2.3 Přeměna větrné energie na elektrickou

Horizontální turbíny však na rozdíl od turbín verikálních nejsou vhodné pro následné využití mechanické energie. Klasická horizontální turbína je dodávána přímo s generátorem napojeným na hřítel rotoru. Díky tomu prvek řetězce fyzicky nemůže obsahovat energii mechnickou točivou. Forma mechanické energie je přítomna pouze uvnitř kompaktního systému, jakožto forma energie mezi dvěma subsytémy. Jelikož systém je kompaktní a přenos točivé energie prakticky neexistuje, přenos mechanické energie lze zjednodušit jako přenos s koeficientem k rovným jedné a tak ho zanedbáme. Výsledný koeficient k_{tg} bude roven součinu dílčích koeficientů obou subsystémů.

3.2.4 Přeměna mechanické rotační energie na elektrickou

Základním způsobem jak točivou mechanickou energii je její převod na energii elektrickou. Zařízení, jež provádí tuto transformaci je nazýváno generátorem. Zařízení pro transformaci v opačném směru se nazývají elektrické motory. Princip vychází z definice elektromagnetického vlnění popsaného Maxwellovými rovnicemi. Podle Faradayova Zákona elektromagnetické indukce se změnou magnetického pole působícího na vodič indukuje ve vodiči elektrické napětí (Kopecký, 2005).

$$u = Blv \ [V] \tag{3.18}$$

kde B je intenzita magnetického pole v $[T]$, l délka vodiče v $[m]$ a v je rychlost pohybu vodiče v $[ms^{-1}]$. V mnou zkoumaném případě se bude jednat o jmenovité výkony jednotek až desítek kiloWattů. Pro tyto menší generátory může být buzení magnetického pole řešeno permanentními magnety. V případě větších generátorů je buzení řešeno aktivně-elektromagneticky [6], které vytváří mnohem silnější magnetická pole. Jelikož buzení budu uvažovat za pasivní (i z důvodu zjednodušení energetické bilance) hodnota intenzity magnetického pole bude v čase neměnná.

Délka vodiče je dána vnitřním vinutím na statoru. Je zřejmé, že jeho délka se za chodu měnit nebude, a tak bude také časem neměnná. Jediná proměnná, jež bude určovat okamžitý výkon indukovaného napětí je pohyb vodiče v magnetickém poli.

Samozřejmě žádná transformace energie nemůže být prováděna beze ztrát. Indukovný proud na statoru bude svým pohybem vytvářet magnetické pole, jež bude působit proti magnetickému poli budiče, tím mu předá energii. V magneticky fungujících zařízení vznikají dva základní typy ztrát.

- Ztráty v mědi P_0
- Ztráty v železe P_Z

Ztráty v mědi (nakrátko) jsou způsobeny průchodem proudu statorovým vinutím a přeměně části energie na elektrickém odporu vodiče na teplo. Ztráty v železe vznikají tzv. vířivými proudy. To znamená indukcí elektromagnetického pole průchodem proudu ve vinutí statoru a jeho indukci v železných prvcích generátoru. Konkrétní povaha ztrát bude předmětem dalšího zkoumání při sestavování energetické bilance řetězce.

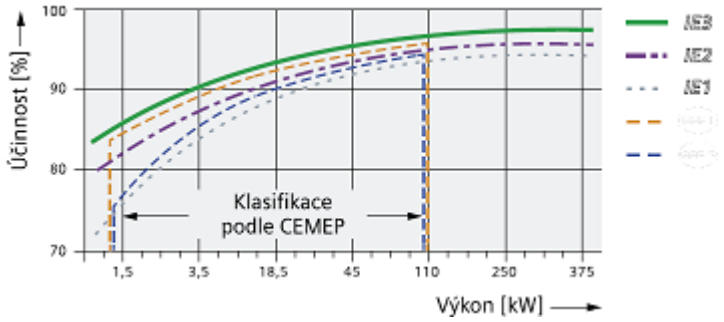
[6] Vychází z další Maxwellovy rovnice (Ampérův zákon celkového proudu) - elektrický proud procházející vodičem vytváří magnetické pole

Generátory mohou pracovat synchronně či asynchronně s distribuční soustavou. Vzhledem k povaze navrhovaného systému (zejména proměnným otáčkám hřídele turbíny) a faktu, že motor nebude připojen k elektrické síti, budu volit generátory asynchronní. Ty by měly disponovat mírně vyšší účinností a jednodušší konstrukcí.

Účinnost generátoru mohu vyjádřit následujícím vztahem a podobně jako pro turbínu určit závislost mezi koeficientem k a účinností (Tyrbach, 2008).

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_m} = \frac{P_e \cdot t}{P_m \cdot t} = \frac{E_e}{E_m} = k_g \tag{3.19}$$

Účinnost vyráběných generátorů určuje norma ČSN EN (IEC) 60034-30. Ta definuje standardy IE1 (standardní), IE2 (zvýšená) a IE3 (vysoká) (Siemens, 2015). Na obrázku 3.5 jsou vidět křivky účinností v závislosti na jmenovitém výkonu. Vyráběný generátor by měl samozřejmě disponovat minimálně stejnou účinností, kterou určuje norma.



Obrázek 3.5: Příklad účinností asynchronních motorů Siemens

3.2.5 Přenos elektrické energie

Elektrická energie je přenášena pomocí metalických vedení. Každé vedení má nějaký elektrický odpor. Na něm při průchodu vznikají ztráty tzv. Joulovým teplem. Jelikož ztrátové teplo pro nás není ztrátou, je nutno pouze zkoumat jeho množství z celkového množství přenesené energie [7]. Ztrátový výkon je možné určit ze vztahu

$$P_Z = RI^2 \tag{3.20}$$

[7] Tepelné čerpadlo vyžaduje vstupní energii ve formě elektrické

Odpor vodiče vychází ze vztahu

$$R = \frac{\rho l}{S} \tag{3.21}$$

kde ρ je měrný odpor vodiče závislý na teplotě a materiálu (Čičmanec, 1980), l je délka vodiče a S je průřez vodiče. Budu uvažovat měděný vodič CYKY 5Jx4 o délce 50m. ρ spočítám ze vztahu

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 0,0175 \cdot (1 + 0,0068 \cdot (-15)) = 0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega m \tag{3.22}$$

Vyčíslením a dosazením ze vztahu (3.22) do (3.21) a (3.21) do (3.20) získám vztah

$$P_Z = 0,24 \cdot I^2 \tag{3.23}$$

Určím velikost ztrát pro maximální ztrátový výkon (2.15). Pro trojfázové vedení proudu budu předkládat ze vztahu pro výpočet elektrického výkonu

$$P = UI \tag{3.24}$$

velikost napětí U rovnu síťovému a to 230V. Potřebný proud pak je 54 A. Jelikož je proud veden třemi vodiči, budu pro každý vodič předpokládat rovnoměrný třetinový tok. Výsledný ztrátový výkon bude roven

$$P_Z = 3 \cdot 0,24 \cdot 18,1^2 = 4,32\,W \tag{3.25}$$

Mohu spočítat koeficient k pro ztráty Joulovým teplem.

$$k_{EJ} = \frac{P_E - P_Z}{P_E} = 0,0004 \tag{3.26}$$

S klesajícím výkonem bude i hodnota parametru k_{EJ} klesat. Jelikož hodnota parametru je minimální, nebudu jí uvažovat jako nelineární a budu předkládat její konstantní velikost.

Vzhledem k povaze větrné elektrárny (turbína a generátor) je nutno brát ohled na technické provedení celého systému. Je nutno zajistit, aby napětí na svorkách generátoru odpovídalo vstupnímu napětí tepelného čerpadla. Dalším specifikem výroby elektrické energie je v mém případě její asynchronost. Parametry elektrické energie by se pro účely tepelného čerpadla měly upravit. Nekladu si za cíl, zkoumat tento proces, vyjdu proto z předpokladu, že 99 % veškeré ztrátové energie při těchto procesech se přemění (přímo

či několika přeměnami) na energii tepelnou. Jelikož tyto procesy budou probíhat uvnitř budovy (před vstupem do vnitřního zařízení TČ) budu je považovat za tepelné ztráty při přenosu elektrické energie a odhadnu je na 10 % veškeré přenášené energie nezávisle na upravovaném výkonu

$$k_{te} = 0{,}9 \tag{3.27}$$

Samozřejmě zařízení, jež tyto změny provádí sebou ponesou jistou investiční zátěž.

3.2.6 Přeměna elektrické energie na tepelnou

Přeměna elektrické energie na energii tepelnou je principielně velmi jednoduchá. Princip byl nastíněn v předchozích kapitolách. Z hlediska návrhu se pokusím využít obou základních principů.

Přímotopy uvádějí účinnost prakticky rovnu hodnotě jedna. Samozřejmě žádná transformace forem energie nemůže docílit hodnoty 1 jako takové. Na přímotopech vznikají tři druhy ztrát a to ve velmi nízké míře. Průchod proudu odporovým drátem přímotopu vytvoří slabé elektromagnetické pole a jeho indukce do okolních kovových předmětů. Část energie se vyzáří zářením absolutně černého tělesa a část energie způsobí plastické (nevratné) opotřebení přímotopu jako takového. V reálu se jedná o promile procent, které mohu zanedbat.

Jelikož přímotop transformuje primární elektrickou energii bez zdroje sekundární energie mohu jeho koeficient k_p určit jako

$$k_p = 1 \tag{3.28}$$

Tepelná čerpadla jsou jediným prvkem, jež bude mít nenulový tok sekundární energie. Tepelná energie je čerpána vně vytápěného prostoru a předávána prostoru vnitřnímu. Princip je relativně jednoduchý avšak pro náš případ je vhodné se zabývat i ztrátami jako takovými, pro určení přibližného parametru k. V objektu se nachází samospádové topení s vodou jako topné médium. Budu tedy uvažovat pouze čerpadla na principu vzduch-voda. Tento typ rozvodů tepla není pro tepelná čerpadla příliš vhodný, jelikož čerpadlo typicky ohřívá vodu na určitou teplotu (pro mé výpočty 35°C). Mnou zkoumaný problém však v tomto ohledu nemá problém, jelikož rozvody bývají dimenzované pro vytápění na pokojovou teplotu a proto pro temperaci bude teplotní spád dosahovat vyšší hodnoty a tím i vyššího topného výkonu. Základní předpoklad z kapitoly ... je tak splněn a já

budu v dalších postupech považovat vyprodukované teplo za úplně předané vytápěnému prostoru.

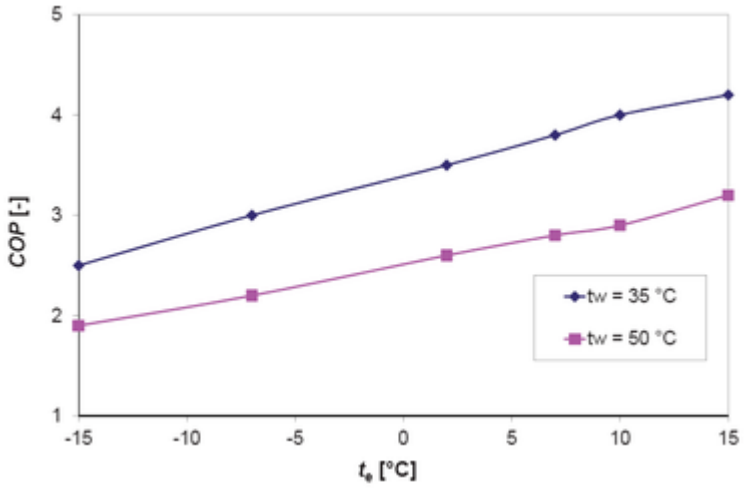
Samozřejmě všechna energie není transformována na čerpání tepelné energie z okolí u běžných systémů. Podpůrná zařízení mají vlastní spotřebu, jež nesouvisí přímo s čerpáním. Na základě zdroje mohou tyto ztráty vznikat na různých prvcích zařízení. Většina této ztrácené energie bude přímo či nepřímo (skrze více přeměn) přeměněna na teplo. Pokud vzniká uvnitř vytápěné zóny, stává se teplem užitečným. V případě, že vzniká vně vytápěné zóny, je nutné ho brát jako ztrátu. V případě vnitřních ztát mohu předpokládat, že většina ztrátové energie se přemění na teplo, jež je vlastně ziskem.

Odhadnuté rozdělení ztrát při provozu tepelného čerpadla (4u-therm s.r.o., 2015)

- Vnější ztráty energie
  - Motory ventilátorů 200W
  - Oběhová čerpadla primární strany 50W
  - Odtávání výparníku tepelného čerpadla vzduch-voda 10W
- Vnitřní ztráty (druhotné zisky) energie
  - Oběhová čerpadla sekundární strany 50W
  - Příkon elektroniky 100W
  - Výhřev oleje kompresoru 50W
  - Cívky pro elektricky ovládané ventily 20W

Definice topného faktoru (2.3) odpovídá koeficientu k, tak jak jsem ho definoval (3.3). Proto budu v dalších výpočtech předpokládat hodnotu k rovnu topnému faktoru. Tepelné čerpadlo je jeden z prvků, jejichž hodnota k je závislá na dalších parametrech a není v čase konstantní (i při stejné velikosti zátěže). Topný faktor je proměnnou závislou na rozdílu vnější teploty a teploty otopného média (ta bývá typicky konstantní). Pro hodnocení spolehlivosti systému budu zkoumat spolehlivost při konstantní nejnižší teplotě. V takovém případě mohu k pro danou teplotu považovat za konstantní. Pro vyhodnocení množství vyrobené energie, bude třeba proměnnost parametru brát v úvahu.

Principielně je množství přečerpané energie závislé na rozdílu vnější teploty a teploty nosného média (přejímajícího teplo z okolí). Se snižující se teplotou se tento rozdíl snižuje a je nutno přečerpat větší množství média, což logicky zvyšuje vstupní příkon a snižuje COP. To nás vede k závislosti parametru k na venkovní teplotě.



Obrázek 3.6: Příklad topné křivky tepelného čerpadla

Závislost elektrického příkonu na teplotě při konstatním topném výkonu popisuje topná křivka. Ta vychází z konstrukčních vlastností celého tepelného čerpadla. Tvar křivky vychází z laboratorních měření, simulujících různé venkovní teploty a vlhkosti vzduchu. Pokud topná křivka není k dispozici, je její tvar na základě měření v reálném prostředí regresní křivkou. Při odhadu závislosti vyjdu z topné křivky na diagramu pro PZP řady HP3AW model 12 SE obr. 3.6. Budu předpokládat lineární závislost a z grafu odečtu hodnoty topného výkonu pro mnou zvolenou teplotu otopného média 35°C.

$$COP_{-15°C} = 2{,}5$$
$$COP_{5°C} = 3{,}5$$

Teplotní závislost tepelného čerpadla pak budu počítat na základě přímky procházející těmito dvěma body (3.2.6).

3.2.7 Přeměna mechanické energie na tepelnou

Dříve jsem uváděl, že obecně musí primární tok energie být transformován skrze 2 různé formy energie. Přeměna mechanické energie na tepelnou je spjatá především s třením. Je jasné, že tření dvou částí by vedlo k jejich opotřebení nezávisle na zvoleném materiálu. Dalším potenciálním rizikem je možná indukce statické elektřiny při nevhodně zvolených

materiálech. Tření je však možno využít na molekulární úrovni. Budu předpokládat vrtuli umístěnou ve vodní nádrži a její připojení na hřídel vedoucí z vertikální turbíny. Tím je tato varianta omezena pouze na větrnou turbínu vertikální. Pro horizontální turbíny tento přístup není možný z několika, již dříve uvedených důvodů (dodávka již s generátorem, nemožnost vlastní výroby a tím svedení hřídele).

Roztočení turbíny způsobí roztočení vrtule skrze hřídel. Voda je vířena a veškerá energie je přeměněna ihned či později molekulárním třením na teplo. Teplo vzniká při stlačení kapaliny a následným třením molekul vody o sebe. Vířením vody vznikají v kapalině nerovnoměrné tlaky a tím i teplo. Tento princip je známý již déle a některé zdroje na něj odkazují (Mollison, 1981, Strana 72). Bohužel však bez komplexnějších fyzikálních úvah. Budu předpokládat, že všechna energie se tímto přemění na energii tepelnou a parametr k je roven jedné.

3.3 Shrnutí závislostí jednotlivých přeměn

V následující tabulce jsou uvedeny teoretické koeficienty k pro jednotlivé typy přeměn. Pole vyznačené pomlčkou naznačují, že pro tyto přeměny je uvažována nezávislost na dané proměnné. Hodnoty za lomítkem představují jsou parametry vztažené k tepelnému čerpadlu.

Typ	**Teplotní koeficient k**	**Výkonový koeficient k**
Větrná-Mechanická	-	0-0,69
Přenos mechanické energie	-	0,999
Mechanická-Elektrická	-	0,9
Přenos elektrické energie	-	0,999/0,9
Elektrická-Tepelná	-/2-5	1
Mechanická-Tepelná	-	1

Tabulka 3.2: Souhrn teoretických koeficientů k

3.4 Problematika návrhu zdroje tepla

Jednotlivé prvky jsou explicitně napojeny na předchozí a následující prvky řetězce (kromě případu kdy i = 0 nebo n). To nám dovoluje charakteristiky a vlastnosti jednotlivých prvků jednoznačně oddělit od jejich okolí. Typicky je možno provést návrh topného zařízení od kteréhokoliv prvku řetězce [8]. Navazující prvky už musí být dimenzovány na základě prvku předchozího či následujícího. Tato volba není jednoznačná a je přímo závislá na prvcích řetězce a jejich technických specifikacích (například některá drahá zařízení mají definovány jmenovité výkony, od kterých se může vyplatit systém navrhnout).

Pro návrh zdroje tepla lze použít několika základních přístupů

- Maximální k_c systému
- Minimální cena
- Nejvyšší ekonomie (nejnížší poměrné roční náklady)

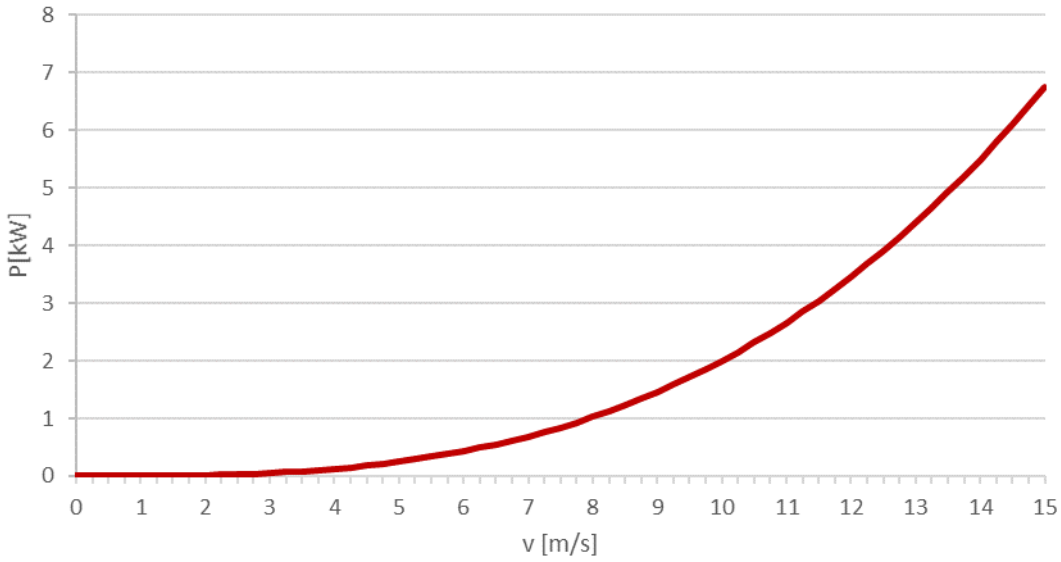
Systém navrhovaný pro maxímální k_c je typicky nejdražší variantou, jelikož zvýšení k_c je typicky podmíněno navýšením investičních nákladů. V mnou zkoumaném případě jsou poměrné náklady minimální (údržba zařízení) oproti nákladům investičním. Z tohoto důvodu bude ekonomický a pro-minimum orientovaný návrh vést ke stejným výsledkům. Při snaze o dosažení konkrétní hodnoty energie na výstupu při nízkých provozních nákladech optimalizace spočívat v minimalizaci investičních nákladů.

3.4.1 Výkonová charakteristika zdroje tepla

Výkonová charakteristika je obecně vícerozměrným grafem [9]. Jelikož teplotní změny nejsou příliš rychlé, můžeme se omezit na zkoumání výkonové charakteristiky pro určitou venkovní teplotu. V takovém případě je výkon zdroje určen pouze okamžitou rychlostí větru. Většina prvků řetězce má lineární, případně s minimální chybou linearizace, charakteristiku. Hlavním určujícím prvkem výkonové křivky se stává turbína. Pro mou studii budu předpokládat nelinearitu pouze v množství energie vyprodukovaném turbínou. Vzhledem k důvodům popsaným v kapitole 3.2.1 zanedbám nelinearitu typu náběhu o určité rychlosti a regulaci od určité rychlosti. Proto mohu zkoumat primárně výkonovou

[8] Volba je možna pouze pro první prvek

[9] Okamžitý výkon je závislý na rychlosti větru a teplotě



Obrázek 3.7: Závislost výkonu turbíny na rychlosti větru

charakteristiku větrné turbíny. Z hlediská návrhu velikosti turbíny mohu snadno z koeficientů k zbylých prvků navrhnout nutný výstupní výkon turbíny.

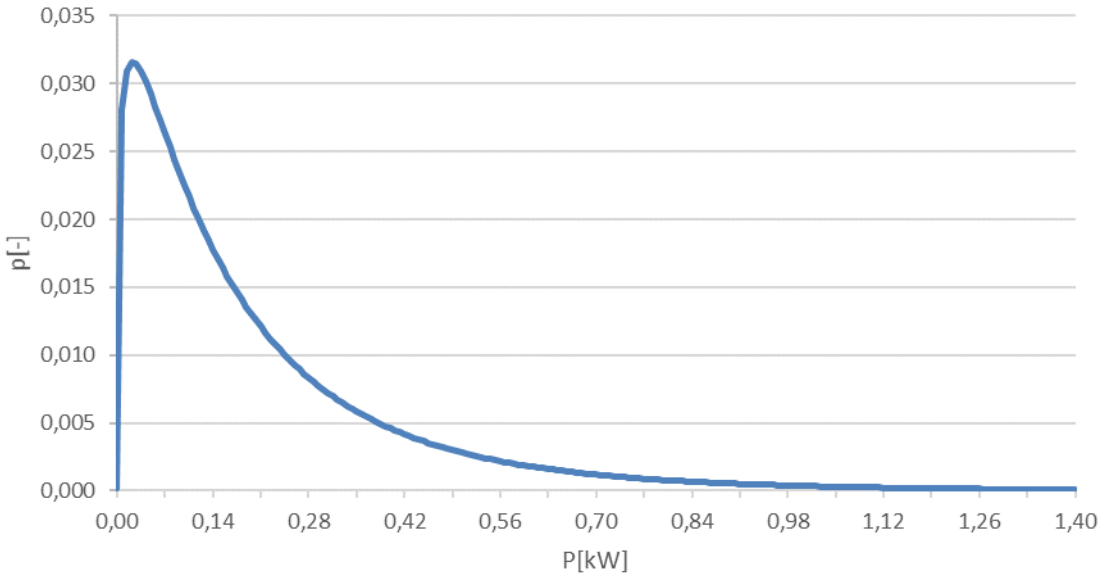
Pro lepší představu budu výpočty a grafy vztahovat k velikosti plochy turbíny $4\,m^2$ (3.38) a navržený řetězec z Kapitoly 4 obsahující horizontální turbínu, generátor a přímotop (4.5.1). Graf na obr. 3.10 ukazuje teoretický výstupní výkon.

Charakteristika (obr. 3.10) mi příliš informací o výkonu turbíny nedává. Z hlediska náhodnosti rychlosti větru budou různé výkony mít různé trvání v čase. Z tohoto důvodu je vhodné znát pravděpodobnostní rozdělení výstupních výkonů.

Teoretické rozložení náhodných výkonů zdroje teploty mohu snadno získat z rovnic (3.14) a (2.27). Vyjádřím si z rovnice (3.14) rychlost větru

$$v = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P}{\rho \cdot C_p \cdot S}} \tag{3.29}$$

Rychlost následně dosadím do rozdělení rychlosti větru s již známými údaji parametrů



Obrázek 3.8: Pravděpodobnostní rozložení výkonu soustavy

A a k a snadno získáme funkci pro rozložení výkonu.

$$p(P) = 0{,}128 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P}{\rho \cdot C_p \cdot S}} \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt[3]{\frac{2 \cdot P}{\rho \cdot C_p \cdot S}}}{3{,}95}\right)^2} \tag{3.30}$$

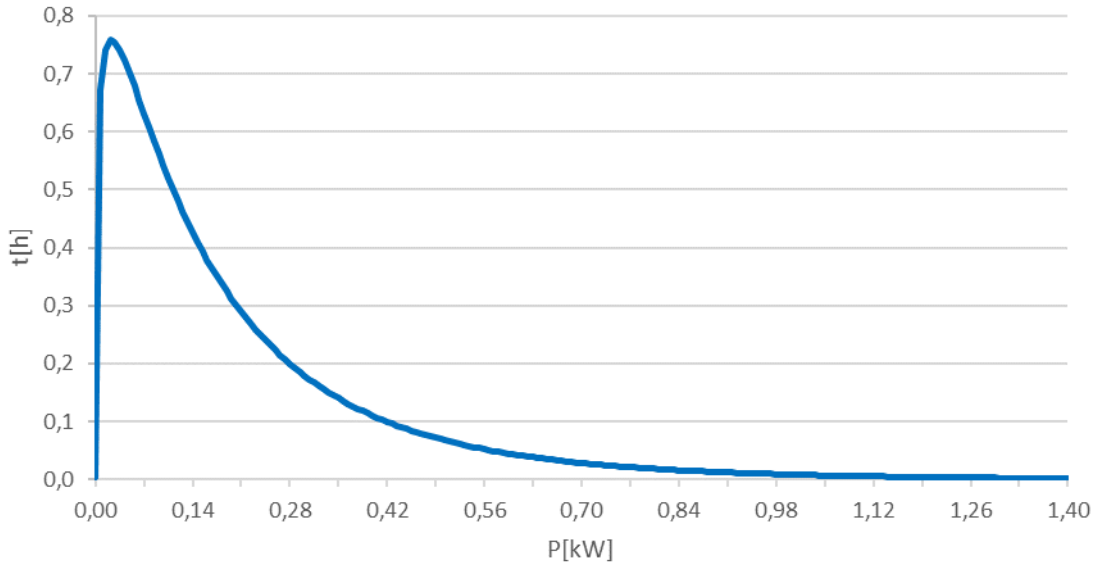
Jelikož výkon turbíny zobrazuje osu rychlosti na osu výkonovu, změní se i plocha pod křivkou. Ta již není nadále jednotková. Určím skupinu náhodných jevů jako množinu výkonů, jejichž pravděpodobnosti znám z rozdělení rychlostí větru. mohu pak pro každou hodnotu výkonu normovat hodnotu pravděpodobnosti podle vztahu

$$p_n(P_x) = \frac{p(P_x)}{\sum_{i=1}^{n} p(P_i)} \tag{3.31}$$

Tímto normováním jsem pravděpodobnostní osu úspěšně přizpůsobil požadavku, aby součet všech uvažovaných výkonů byl roven hodnotě jedna. Takto normovanou osu lze snadno transformovat do jiných rozměrů. Budu-li uvažovat pravděpodobnost za velikost časového úseku, během něhož soustava disponuje daným topným výkonem, mohu pravděpodobnostní osu transformovat do časového rozměru. Časový úsek by měl být dostatečně široký, abych mohl říci, že skryté závislosti v náhodnosti rychlostí větrů vymizí.

Tato závislost je stejně jako pro vývoj teplot dána předpokladem, že budoucí můžeme s velkou pravděpodobností odhadnout jako podobné současným (fouká-li nyní hodně, za minutu pravděpodobně nebude bezvětří).

Ideálním časovém intervalem se jeví relaxační doba vychladnutí objektu o velikosti minimálně jeden den. V reálném případě by tato doba byla příliš krátká, jelikož průměrná rychlost větru je vztažena na období celého roku. Jelikož teplota není konstantní v průběhu tak dlouhého zkoumaného období, na základě předpokladu, že v zimním období jsou průměrné rychlosti vyšší (obr. 2.7) budu uvažovat pravděpodobnostní rozdělení o stejném tvaru pro každý den zkoumaného období. Výsledná křivka trvání výkonů vyjadřuje jakou část dne bude působit jaký výkon. Samozřejmě náhodné rozdělení mi dává informaci o pravděpodobnosti výkonu v každém okamžiku. Pokud však nekonečně mnoho krátkých okamžiků podle centrální limitní věty sloučíme, získáme dobu trvání jednotlivých výkonů v průběhu časového období o šířce rovné sumě trvání těchto okamžiků.

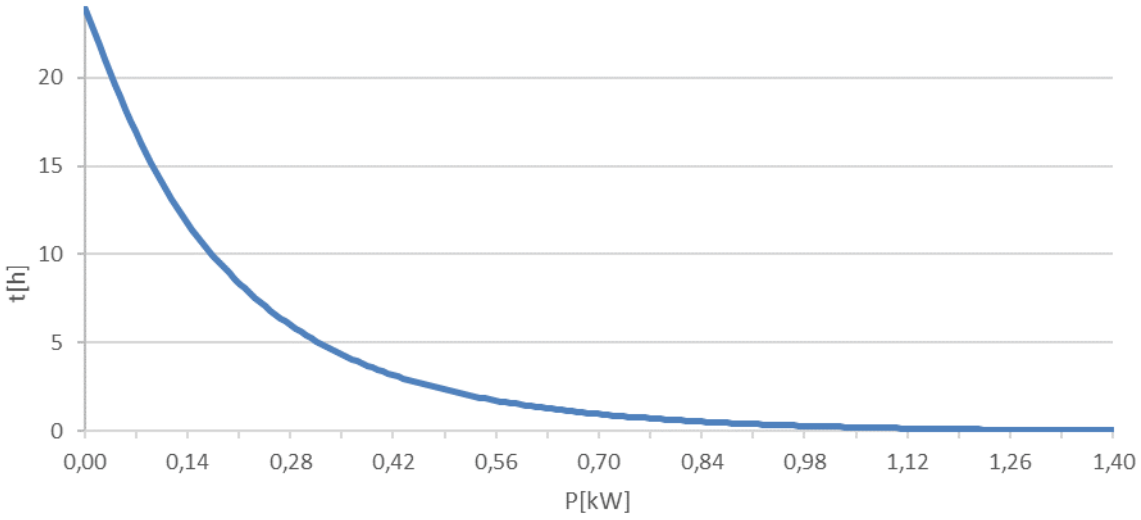


Obrázek 3.9: Doba výskytu výkonu zdroje

Znám-li pravděpodobnost všech stavů (výkonů) pak mohu spočítat střední hodnotu výkonu

$$P_S = \sum_{i=1}^{n} (p_n(P_i) \cdot P_i) \doteq 210W \tag{3.32}$$

Kde n je počet všech normovaných výkonů. Pokud převedu graf dob výkonů na graf trvání výkonů, mohu z plochy pod křivkou určit celkově vyrobenou energii za časové období.



Obrázek 3.10: Doba trvání výkonu zdroje

Plochu pod křivkou můžeme spočítat integrálem. Integrál z křivky (3.30) by však byl velmi náročný na výpočet. Situaci si můžeme zjednodušit zavedení drobné chyby počítáním přes obdélníky pod křivkou. Situace není totožná s výpočtem tepelné ztráty objektu. Integrál je pak přibližně roven (s drobnou chybou) následující rovnici

$$E = \sum_{i=1}^{n} t(P_i) \cdot \Delta P \doteq 0{,}8\, MWh \tag{3.33}$$

Jelikož se vzorec podobá vzorci pro určení středního výkonu, můžeme energii přibližně spočítat i podle následujícího vztahu

$$E = P_S \cdot T \doteq 0{,}84\, MWh \tag{3.34}$$

Kde T je doba celého intervalu. Množství energie je mírně vyšší, jelikož vzorec nerespektuje teplotní závislost výkonu.

3.5 Parametry topné soustavy

Před samotným teoretickým návrhem zdroje tepla je vhodné blíže popsat základní parametry systému a diskutovat jejich vztah s konstrukční (potažmo finanční) realizovatelností

celého projektu. To znamená, jaké systémy jsou objektivně konstrukčně řešitelné. Jedná se o tyto hlavní

- Velikost rotoru
- Spolehlivost
- Výkon soustavy
- Investiční náklady

Technickými parametry se zabývají následující kapitoly. Finančními parametry se zabývám v Kapitole 4. Na tomto místě je nutno zmínit, že parametrů ovlidňujících realizaci je mnohem více 2.2.6.

3.5.1 Velikost plochy rotoru turbíny

Velikost rotoru je prvořadým atributem zdroje tepla. Navrhuji-li zdroj tepla pro rekreační objekt, mohu předpokládat, že velikost a váha turbíny by měla umožňovat její instalaci na střechu objektu (s čímž mimo jiné varianty s vertikální turbínou).

Předpokládám orientační návrh systému s parametry uvedenými v tabulce tabulka 3.3. Betzův parametr byl zvolen jako maximální hodnota, jež dosahují horizontální turbíny. Maximální dosažitelné hodnoty se pohybují maximálně 0,45. Návrh je směřovanám k vysokému parametru k. Otázku investičních nákladů prozatím odsunu stranou a budu se teoretickou velikostí turbíny pro systém o výkon (2.15).

Prvek	Turbína	Přenos M	Generátor	Přenos E	Tepelné čerpadlo
Parametr k	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
Hodnota	0,45	0,999	0,9	0,9	5

Tabulka 3.3: Příklad navrženého systému

Budu předpokládat tyto hodnoty nezávislé na výkonu pro konstatní teplotu rovnu minimální, pro něž by nezálohovaný systém měl býti navržen. Horizontální turbíny a jejich generátory se nalézají na střeše domu. Jejich tepelné ztráty, tak nelze považovat za druhotné teplo. Jediné ztráty jež mohou potenciálně znamenat druhotný příjem tepla by vznikali při úpravě elektrického proudu pro užití tepelným čerpadlem. Jejich velikost

bude minimální, proto je zatím nebudu brát v úvahu a budu se zabývat pouze primárním tokem energie. Z rovnice (3.10) pak spočítám velikosti parametru k.

$$k_c = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 = 1{,}82 \tag{3.35}$$

Potřebný výkon větru pro požadovaný výkon soustavy(2.15) můžu spočítat podle (3.6) jako

$$P_{VA} = \frac{P_O}{k_c} = 4\,395\,W \tag{3.36}$$

Podle rovnice spočítám potřebnou plochu turbíny pro potřebný výkon. Potřebnou plochu nelze přímo počítat z výkonové rovnice větru (3.14). Potřebnou plochu turbíny lze snadno spočítat opačným přístupem. Do výpočtu středního výkonu budu postupně zvyšovat účinnou plochu rotoru do doby, než bude dosaženo výkonu P_{VA}. Výsledná plocha má při povětrnostních podmínkách zkoumaného objektu velikost

$$S_A = 34\,m^2 \tag{3.37}$$

Takto velká plocha představuje rotor a průměru $6,6m^2$. Je jasné, že takto velkou turbínu není možné na střechu domu umístit. V potaz je nutno brát, že systém byl navržen s důrazem na maximální k. V případě jiných navržených systémů bude koeficient k nižší a tím budou růst nároky na plochu rotoru. Je zřejmé, že při průměrné rychlosti větru v lokalitě, je hustota energie větru v ploše rotoru příliš nízká, aby bylo možno zdroj tepla navrhnout na maximální ztrátový výkon. Je proto třeba pro výpočty zvolit plochu menší a zkoumat jejich vlastnosti. Budu-li uvažovat turbínu do velikosti $4m^2$. Je jasné, že zdroj velice pravděpodobně nebude fungovat jako primární, ale spíše může skýtat způsob, jakým dosáhnout úspory oproti současnému stavu.

$$S_T = 4\,m^2 \tag{3.38}$$

3.5.2 Spolehlivost zdroje tepla

Při návrhu je samozřejmě nutno brát ohled na další aspekty. Hlavním nefinančním aspektem pro systémy bez zálohy je spolehlivost. Ta vychází typicky ze vztahu mezi produkovaným teplem a tepelnou ztrátou za určitou jednotku času. Spolehlivost si označím římským písmenem λ a v mém případě jí lze ztotožnit s pravděpodobností, že zdroj tepla dodá 100% ztrátové energie v určitém období. Toto období by nemělo být bráno jako

celé období topné sezóny, ale jako jeho kritická část. Ta by samozřejmě měla být pro systém nekritičtější, jelikož jakýkoliv jiný interval bude mí spolehlivost vyšší. Jako kritická situace se jeví vhodné položit venkovní teplotu rovnu teplotě minimální výpočtové (2.8).

Předpokládejme, že všechny prvky zdroje kromě turbíny mají přibližně neměnný nenáhodný koeficient k. V tomto případě pak výstupní výkon na posledním prvku řetězce přímo závisí na rychlosti větru na vstupu. Kritériem pro návrh soustavy o spolehlivosti λ je následující nerovnice

$$P(P_n = \frac{E_{nT}}{T} \geq P_O) > \lambda \tag{3.39}$$

Kde P_n je okamžitý výstupní výkon na posledním (n-tém) prvku, T je doba kritického intervalu, E_{nT} tepelná energie vyprodukovaná posledním prvkem za dobu T a P_O je maximální okamžitý ztrátový výkon objektu (2.15).

λ mohu snadno určit z výkonové charakteristiky potencionálního záložního zdroje podle následující rovnice

$$\lambda = 1 - \sum_{i=0}^{n} p(P_{Zi}) \tag{3.40}$$

Kde $p(P_{Zi})$ je pravděpodobnost i-tého zálohového výkonu. Jinak řečeno stabilita systému λ je pravděpodobností, že není třeba systém zálohovat.

3.5.2.1 Nezálohovaný systém

Pro objekt bez zálohy elektřinou je situace odlišná. Návrh soustavy, jež by svým topným výkonem korespondovala s tepelnými uníky je těžko řešitelná. Na grafu obr. 2.4 je znázorněna akumulační schopnost zkoumaného objektu. Trvání teplot nemá nezávislý charakter jako intenzita větru. Lze předpokládat, že rizikové období (delší trvání teplot nízko pod nulou) bude mít pravděpodobně dlouhodobější charakter. Nadbytečná tepelná energie se typicky akumuje do hmoty objektu, čímž způsobuje jeho oteplení a zvýšenou tepelnou ztrátu.

Problematiku akumulace se lze pokusit kompenzovat přidáním akumulační baterie. Tato úprava by se následně na energetické bilanci projevila "ztrátovým"tokem do prvku měnícího energii elektrickou na energii chemicky vázanou. V době potřeby by tato uložená energie byla přeměněna na energii elektrickou a následně tepelnou. Samozřejmě tento cyklus není bezeztrátový, jsou zde zřejmé nároky na řízení nabíjení a vybíjení a baterie

s sebou nese další nezanedbatelnou investici. V práci se touto variantou zabývat nebudu, jelikož zhodnocení jejího přínosu na spolehlivost je obtížně kvantifikovatelná a přítomnost akumulačního zařízení je v rozporu s formulací zdroje tepla (3.1), jež budu navrhovat.

Vrátím se k minimální ploše navržené na velikost (3.37) a podle vztahu (3.40) je spolehlivost systému pro teplotu (2.8)

$$\lambda_{-18} = 0{,}36 \tag{3.41}$$

Takový systém je v kritických situacích velmi nespolehlivý. Pokud bychom chtěli docílit spolehlivosti například $\lambda = 0,95$, musela by mít účinná plocha rotoru turbíny velikost

$$S_{A0,95} = 401\,m^2 \tag{3.42}$$

Střední výkon takto velké turbíny by pak přesáhl 95kW. Z těchto výsledků mohu s jistotou říci, že návrh nezálohovaného zdroje tepla s vysokou spolehlivostí založeném na větru je technicky neřešitelný. Systémy s nižší spolehlivostí jsou pro nezálohové systémy nevhodné, jelikož poklesem teploty pod teplotu kritickou je systém nenávratně poškozován. Nemá proto smysl se nadále zabývat otázkou návrhu systému pro výrobu dostatečného množství energie, ale spíše zkoumat, jaké množství energie může systém o rozumných parametrech vyrobit a z toho plynoucí úsporu.

3.5.2.2 Zálohovaný systém

V objektu s připojením na elektrické sítě lze snadno řešit zálohu v případě bezvětří, či větší spotřeby tepla než zdroj tepla v daném okamžiku produkuje. Teoretický průběh záložního zdroje je relativně náročným problémem. Oproti zdroji tepla, výkon záložního zdroje není závislý na okamžité hodnotě náhodné veličiny (rychlosti větru), ale je závislá na vnitřní teplotě objektu. V ideálním případě by záložní zdroj měl být sepnut v době, kdy vnitřní teplota začíná klesat pod 5 °C (2.1). Správné ohodnocení takového průběhu by představovalo analýzu diferenciálních rovnic, které obsahují náhodnou veličinu. Méně přesným, avšak pro teoretický výpočet snažším způsobem je vyjití ze stochastické rovnice spolehlivosti (3.39).

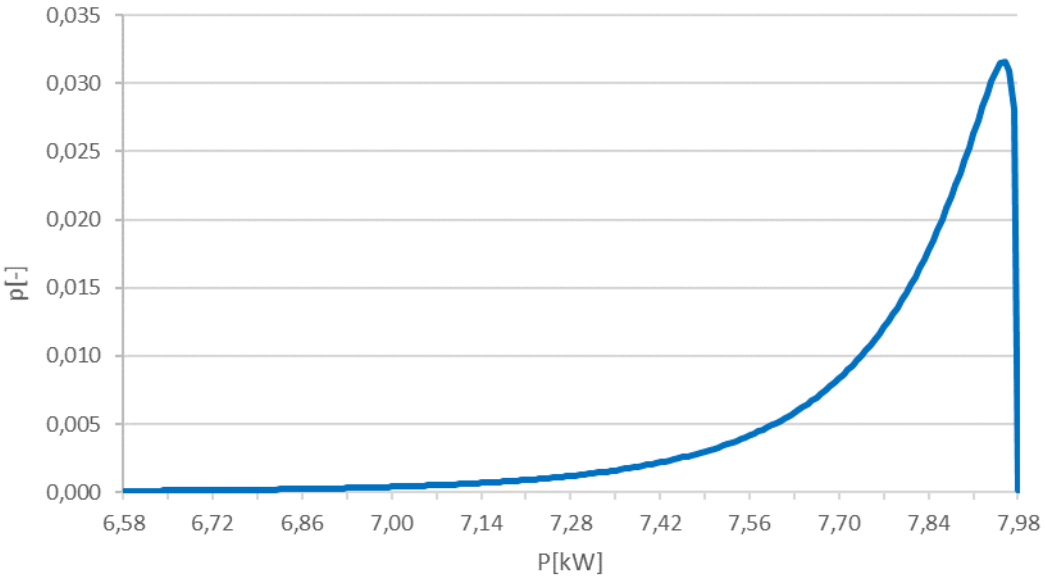
U zálohovaného systému předpokládáme hodnotu λ rovnu jedné. Aby byla splněna rovnice spolehlivosti s hodnotou λ rovno jedné, je nutno zajistit, aby platilo

$$P_n \geq P_O \tag{3.43}$$

P_n je okamžitý výkon zdroje. Ten s určitou pravděpodobností disponuje s jistou nenulovou pravděpodobností výkonem nižším než je výkon P_O. Aby byla splněna podmínka (**??**) musí záložní zdroj vyprodukovat chybějící tepelný výkon. Jeho výkon je pak možno popsat rovnicí

$$P_n + P_Z = P_O \tag{3.44}$$

Podle této rovnice můžeme každému výkonu, nižšímu než výkon P_O přiřadit hodnotu okamžitého záložního výkonu. Tato okamžitá hodnota nastane se stejnou pravděpodobností jako výkon, jenž kompenzuje. Pravděpodob-nostní průběh záložního je pak zobrazen na obrázku obr. 3.11.



Obrázek 3.11: Výkonová charakteristika záložního zdroje

Vyrobená záložní energie a střední výkon pak lze vypočítat podle stejného principu jako výkon zdroje. Jelikož větrný zdroj je primárním zdrojem tepla, energie vyrobená zdrojem tepla by měla být vyšší za celou topnou sezónu. Záložní zdroj při nenulovém výkonu primárního nevyrobí více energie než je předpokládaná ztráta.

Kapitola 4

Zhodnocení temperace větrem

Teoretickým rozborem jsem odhalil komplexnost a problematiku návrhu. Každá z částí by mohla být dále zkoumána a rozvíjena. Mě však zajímá, jaká je předběžná ekonomická užitečnost celého projektu. Určitě by bylo nevhodné problém dále zkoumat a testovat, kdyby nemohl principiálně být funkční a ekonomicky výhodný. Proto jsem si položil základní otázky, bez jejichž zodpovězení je projekt nerealizovatelný.

1. Lze sestavit zařízení o požadovaném topném výkonu?
2. Za jakých podmínek se temperace větrem vyplatí?

Odpověď na první otázku jsem nalezl v předchozích kapitolách. Systém navrženého za účelem minimalizace plochy rotoru (maximalizace parametru k) by pro požadovaný topný výkon musel mít plochu rotoru $34\,m^2$ (3.37). Takto veliký rotor není konstrukčně možno nainstalovat. Výsledkem je, že takové zařízení sestavit nelze při průměrné rychlosti větru, kterou zkoumaná oblast disponuje.

Zodpovězením druhé otázky se zabývá tato kapitola. Problematika náhodnosti výkonu zdroje tepla byla řešena v předchozí kapitole. V rámci této kapitoly budu pracovat pouze se středními výkony, tak jak jsou počítány v Kapitole 3. Díky tomu budou výsledky snáze porovnatelné a kvantifikovatelné.

4.1 Hodnota vyrobené energie

Zdroji tepla klademe za cíl udržet teplotu v otopné zóně nad temperační teplotou 5°C (2.1). Pokud systém bude mít topný výkon nenulový, bude systém vždy v určitém období topné

sezóny vyrábět teplo navíc[1]. Základním problémem ekonomického hodnocení je ohodnocení tohoto nadbytečného tepla. Jeho hodnotu můžeme kvalifikovat několikero způsoby.

Prvním výkladem je, že temperační účel zdroje již byl naplněn (dosažení 5°C) a nadbytečné teplo tak má nulový užitek.

$$c_{QN1} = 0 K\check{c}GJ^{-1} \tag{4.1}$$

Přesně opačným vyčíslením hodnoty této energie může být její ohodnocení plnou cenou ušetřené energie. Samozřejmě představa, že veškeré nadbytečné teplo se opravdu užitečně spotřebuje není příliž reálná. Jedná se spíše o období využívání objektu majitelem. Existují však způsoby jak energii uložit a použít v jiném časovém období. Příkladem může být systém s generátorem. Nadbytečná elektrická energie může být uložena do baterií ve formě elektrické. Způsoby využití této energie ponechme prozatím stranou. Faktem je, že s jistou účinností může být část elektrické energie uložena na později [2].

$$c_{QN2} = c_Q \tag{4.2}$$

Nabízí se myšlenka, že i teplo jako takové nemá úplně nulovou hodnotu. Napadá mě několik možných pozitivních důsledků plynoucích z nadvýroby.

- Menší zálohové energie, vyšší stabilita
- Rychlejší ohřátí objektu na obytnou teplotu
- Ohřev teplé užitkové vody

V takovém případě nemá cena energie ani nulovou ani maximální hodnotu.

$$0 < c_{QN2} < c_Q \tag{4.3}$$

Jelikož ohodnocení této nadvyrobené energie může způsobit nesprávné nadhodnocení systémů s velkou nadvýrobou elektrické energie budu nadbytečné teplo hodnotit jako c_{QN1}. V mém výpočtovém Excelovém sešitě je s ním počítáno, takže zanícený čtenář může zkoumat možnosti této nadvyrobené energie.

Mimo temperační období je problematika ohodnocení ceny energie ještě palčivější, jelikož nadvyrobená energie je všechna vyrobená. Pokud se jedná o malý zdroj, může být jeho výkon přiveden na ohřev teplé užitkové vody. Jelikož však rekreační objekty nebývají

[1] Teplo, které zvýší teplotu uvnitř objektu na 5°C)

[2] Ztráty při tomto procesu se víceméně přemění na teplo

celoročně využívány, je hodnota této energie opět spekulativní. Celoroční připojení zdroje tepla na otopnou soustavu bude mít v letních měsících navíc kontraproduktivní efekt, jelikož v tomto období má nižší teplota vyšší užitkovou hodnotu. V takovém případě je nutné systém minimálně odpojit od otopné soustavy, aby k tomuto negativnímu efektu nedocházelo. Problémem tak zůstává, že nadbytečnou energii nelze jednoznačně ohodnotit a jedná se spíše o plusové faktory v případě ekonomické rovnováhy varianty případně mírné nerovnováhy.

Hodnota této energie je závislá i na jejím množství. Nízký poměr nadvyrobené energie vůči efektivní (což vzhledem k malé ploše a nižší průměrné rychlosti větru je očekávané) vede k poklesu důrazu na přesnost ohodnocení této energie.

4.2 Množství vyrobené energie

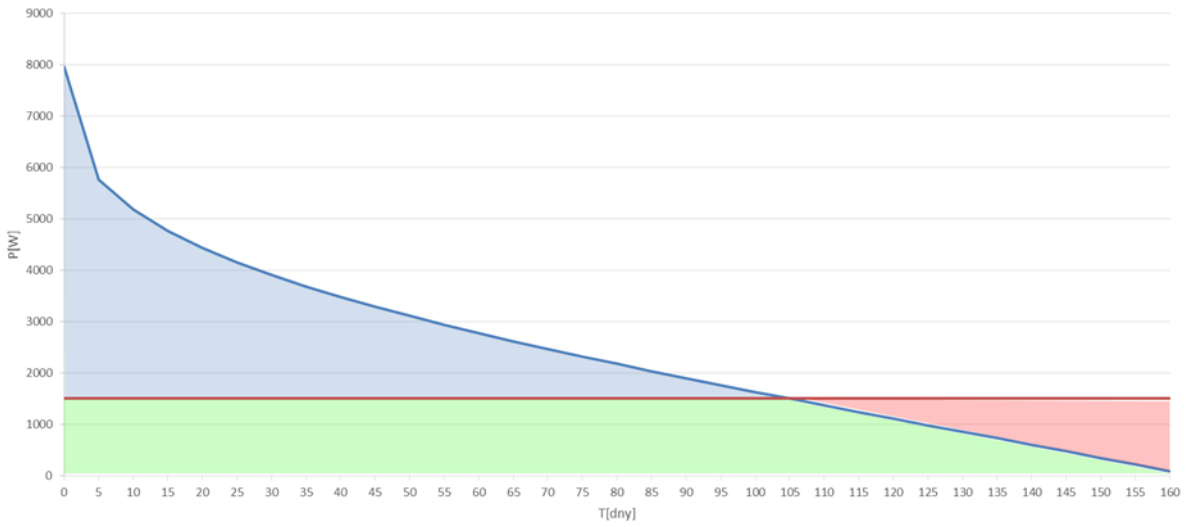
Pro ekonomické zhodnocení je stěžejním vstupním údajem množství ztracené/ušetřené energie. Všechny toky energie v systému nejsou ekvivalentní. Musím tedy rozlišit a kvantifikovat jednotlivá množství energie. Kvanta energie pak mohu rozdělit podle užitku z nich plynoucí. Rozličné kategorie jsou vzájemně provázané.

- Tepelná ztráta
- Vyrobená tepelná energie
- Zálohová energie
- Ušetřená energie
- Elektrická vyrobená energie

Energii ztracenou jsem určil už v kapitole 2 (2.20). Při výpočtu ostatních typů energie vyjdu opět ze vztahu pro výpočet obecné energie za temperační období (2.18).

Smysl dělení na jednotlivé energie je znázorněn na obrázku obr. 4.1. Křivka vyznačená modrou barvou představuje dobu trvání ztrátového výkonu soustavy, červená křivka představuje dobu trvání středního výkonu obecného zdroje nezávislého na venkovní teplotě. Výkon zdroje samozřejmě nabývá náhodných hodnot výkonu a jeho křivka trvání výkonu obr. 3.10. Porovnání obou dob trvání by však vedlo k mylným závěrů. Slabý zdroj tepla by podle tohoto porovnání nikdy nevyráběl větší množství energie než

je aktuální ztráta, což při nenulovém středním výkonu zdroje a teplotě blízké teplotě temparace (2.1) nemůže být pravda.



Obrázek 4.1: Porovnání tepelných ztrát a tepelných zisků objektu

Zelená oblast grafu představuje efektivně vyrobenou tepelnou energii. Plocha označuje množství energie, jež kryje okamžitou tepelnou ztrátu a znamená tak úsporu nákladu na ostatní druhy temperace. Modře označená oblast je zálohovou energií, která musí být dodána záložním zdrojem. Červená oblast představuje energii nadvyrobenou zdrojem tepla. Ta je hlavním problémem při hodnocení ekonomické efektivity systému jak již bylo naznačeno výše. Pro ekonomické zhodnocení je třeba stanovit jednotlivé plochy těchto oblastí.

4.2.1 Vyrobená tepelná energie

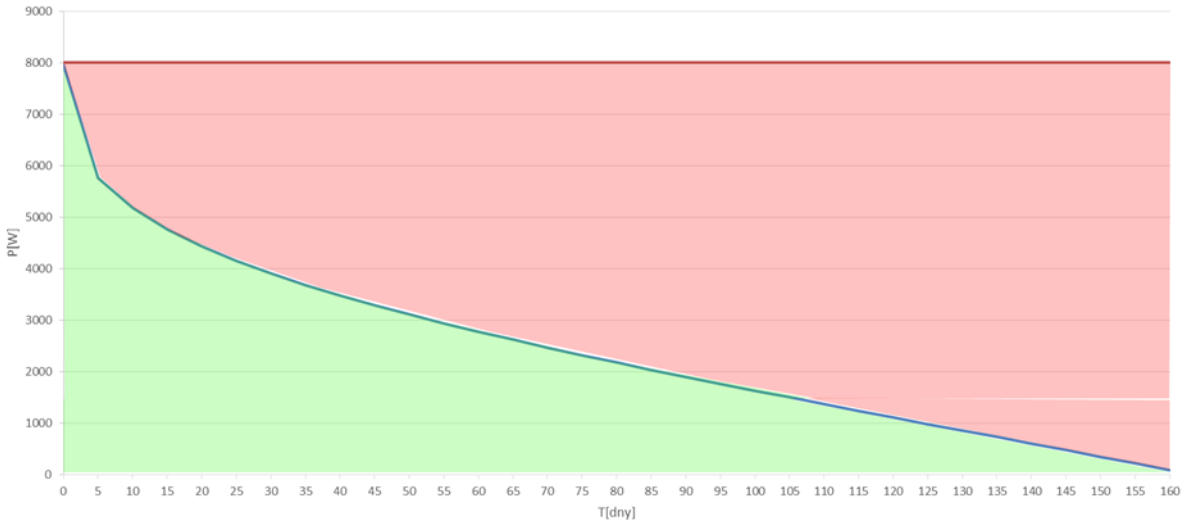
Tepelná energie dodaná do topného prostoru zdrojem tepla za dobu temperačního období je základní informací o užitku systému. Znám-li okamžitý výkon pro každou teplotu a výkon, mohu použít obecný vztah (2.18) k výpočtu vyrobené energie. Jelikož funkční závislosti výkonu zdroje tepla jsou známé, označím vyprodukované teplo značkou Q_{DOD} a pro jeho výpočet použiji vztah

$$Q_{DOD} = \sum_{\tau=0}^{d_5} P_O(\tau, P) \tag{4.4}$$

Kde $P_O(\tau, P)$ je okamžitý výstupní výkon zdroje tepla závislý na venkovní teplotě a výstupním výkonu.

4.2.2 Zálohová energie

Energie zálohová vychází ze středního výkonu zálohového zdroje. Z grafu by se mohlo zdát, že energie zálohová vychází z velikostí energie efektivní a energie ztracené. To by však mohlo být zavádějící. Důvod je vidět na obrázku obr. 4.2. Jelikož výkon zdroje tepla je náhodnou veličinou, existuje v každém okamžiku temperačního období pravděpodobnost, že zdroj nebude dodávat dostatek tepla a zálohový zdroj tak bude disponovat určitým (na ztrátě a výkonu zdroje) výkonem. Což se děje i v případě, kdy střední výkon soustavy je vyšší než výkon ztrátový. V reálu se jedná o situaci, kdy za delší období dodá systém energie dostatek, ale během kratšího úseku bude rychlost větru nižší a výkon tak bude nedostatečný.



Obrázek 4.2: Porovnání tepelných ztrát a výkonu naddimenzovaného zdroje

Z obecného vztahu pro výpočet energie (2.18) se zálohová energie spočte

$$Q_B = \sum_{\tau=0}^{d_5} P_B(\tau, P) \tag{4.5}$$

Kde $P_B(\tau, P)$ je okamžitý vstupní příkon záložního zdroje tepla závislý na venkovní teplotě a vstupním výkonu a k_n je koeficient elektrického zařízení, přeměňující elektrickou

energii na teplo či 1 v případě řetězců, jež nepracují s elektrickou energií v žádném okamžiku. To vyplývá z úvahy, že záložní zdroj nebude mít svůj vlastní řetězec a vlastní investiční náklady, pokud již část podřetězce může tuto funkci plnit. Markantní je tento rozdíl v případě řešení, kdy následující podřetězec má hodnotu parametru k větší než jedna. V takovém případě je množství zálohové energie rovno množství energie na vstupu tohoto podřetězce (prvku).

4.2.3 Ušetřená energie

Ušetřená energie určuje fyzicky ušetřené teplo. K jeho určení mohu přistoupit několika způsoby. Chci-li dosáhnout bilanční vyrovnanosti, mohu vyjít z následujícího vztahu.

$$Q_u = Q_Z - Q_B \tag{4.6}$$

Tento přístup je dosti přímočarý. Lze ho interpretovat následovně: "Efektivně vyrobená energie je rozdíl mezi tepelnou ztrátou a zálohovou energií.". Velikost ušetřené energie je množství zálohového ekvivalentu, jež nemusí být použit a zaplacen.

4.2.4 Elektrická vyrobená energie

Tepelná energie nadvyrobená má velice spekulativní a těžko kvalifikovatelný užitek. V systémech, jejichž tok primární energie v některé části řetězce má formu elektrické energie, může být nadvyrobená energie skladována v bateriích. Omezím-li se na situaci, kdy okamžitá nadvyrobená elektrická energie je uložena do baterie, může být tato energie dále využita. Nelze předpokládat její plnou hodnotu, avšak nadvyrobené teplo samotné má hodnotu obtížně kvalifikovatelnou. Cenou, způsobem uložení a využitím se zabývat nebudu (viz Kapitola 3).

Odpojením zařízení navazujících na generátor, pokud jím varianta disponuje a následný výpočet parametru k této podsoustavy představuje účinnost, s jakou je energie větrná přeměňována na energii elektrickou. Pro správné rozdělení energie na energii elektrickou a tepelnou je nutno vzít v potaz, že energie, jež protéká z turbíny až do úložiště může během svého průchodu systémem generovat druhotné teplo. Přeměna energie pouze na elektřinu, tak ve většíně situací ústí v nenulový tepelný výkon soustavy. Správné rozdělení energie mezi tyto dva toky je pak řešením soustavy rovnic.

Je nutno mít na mysli, že tato nadbytečná energie je doplňkem energie ušetřené.

$$E_c = E_u + E_n \tag{4.7}$$

Kde E_c je průtok elektrické energie na vstupu elektrického zařízení, E_u elektrická energie ušetřená (tj. ekvivalentní množství energie před přeměnou na teplo) a E_n elektrická energie nadbytečná.

4.3 Cena zálohové energie

Pokusím se přibližně spočítat hodnotu elektrické energie. Vyjdu ze současných sazeb pro rok 2015 uváděných v ceníku EON, jež do objektu elektrickou energii dodává. Jelikož neznám ostatní spotřebu objektu, omezím se pouze na celoroční využití pouze pro temperaci objektu. Pokud i při nejhorších podmínkách klesne teplota v objektu z temperační teplot (2.1) na teplotu kritickou (2.2) za dobu delší než jeden den, což zkoumaný objekt splňuje, je temperace většinou realizována zapnutím přímotopů v době nízkého tarifu a ohřátí otopné zóny na teplotu temperace (2.1). Hodnota ušetřené energie pak představuje právě cenu energie v době nízkého tarifu.

V objektu je instalován jistič o jmenovité hodnotě 3x32A. Společnost EON dodává do objektu energii v tarifu D25d. Dle aktuálního ceníku se cena v nízkém tarifu pohybuje mezi 1,9 - 2 Kč/kWh (E.ON, 2015) v závislosti na zvoleném produktu. Dle faktury za dodávku energie v objektu je se tato cena blíží k 2 korunám. Nadále tedy budu používat tuto cenu

$$c_Q = 2\,\frac{Kč}{kWh} = 556\,\frac{Kč}{GJ} \tag{4.8}$$

S touto hodnotou ušetřené energie budu pracovat při hodnocení ekonomického užitku.

4.4 Hodnocení ekonomické efektivity

Teoretický rozbor problematiky návrhu by neměl význam, kdybych si neuměl udělat alespoň hrubou představu o rentabilitě celého potencionálního investičního záměru. Tím je koupě či sestrojení turbíny a případných dalších zařízení v závislosti na finální realizaci.

Již dříve jsem se rozhodl nesnažit se odhadovat náklady na údržbu 3.4. Budu se tedy zabývat pouze investičními náklady a z realizace investice plynoucí úsporou. V nultém roce tedy budu předpokládat investiční náklady a v dalších letech úsporu.

Pro ohodnocení investičního projektu je nutno stanovit dobu životnosti. Typicky se doba životnosti větrných turbín pohybuje v rozmezí 15-20 ti let. Hodnocené období by mělo být pro všechny varianty identické z důvodu lepší transparentnosti. Varianty s verikálními turbínami předpokládají možnost realizace vlastní výrobou. Budu tedy raději předpokládat kratší dobu životnosti.

$$T_Z = 15\,let \tag{4.9}$$

Při hodnocení budoucích finančních toků musím zohlednit jejich hodnotu v čase. Ekonomickou efektivitu mohu nejsnáze hodnotit pomocí čisté současné hodnoty. Ta vychází ze součtu všech diskontovaných toků za celou dobu životnosti.

$$NPV = \sum_{j=0}^{T_Z} \frac{CF_j}{(1+i)^j} \tag{4.10}$$

Neznámá i představuje diskont, neboli meziroční procentní pokles hodnoty peněz. Jeho hodnotu zvolím jako v současné přibližné maximum nerizikové možnosti zisku z cenných papírů

$$i = 0,03 \tag{4.11}$$

V hodnocení je vhodné zohlednit budoucí růst cen. Během hodnocení budu tento růst označovat jako r a jeho hodnotu odhadnu rovnu inflaci. Samozřejmě odhadnot inflaci na příštích 15 let (4.9) není možné. Vyjdu proto z inflačního plánu české národní banky (citace) a budu předpokládat velikost růstu rovnu

$$r = 0,02 \tag{4.12}$$

Vliv růstu cen na budoucí peněžní toky mohu popsat vztahem

$$CF_r = CF \cdot (1+r)^T \tag{4.13}$$

kde T představuje budoucí čas v letech.

Výsledným vztahem pro hodnocení efektivity při sloučení vztahů pro výpočet čisté současné hodnoty (4.10) a vztahu pro zohlednění růstu cen (4.13)

$$NPV = \sum_{j=0}^{T_Z} \frac{CF_j \cdot (1+r)^j}{(1+i)^j} \tag{4.14}$$

Čistá současná hodnota mi dává informaci o rentabilitě projektu. Pohybuje-li se její velikost v okolí nuly, lze považovat projekt za přibližně vyrovnaný. Tím myslím, že projekt je rentabilní pouze ve smyslu zhodnocení investovaných prostředků hodnotou diskontu. Se zvyšující se kladnou hodnotou současné hodnoty je projekt nejen rentabilní, ale plynou z něj navíc výnosy a je tak vhodný k realizaci. V průběhu textu jsem však identifikoval některé faktory, jejichž hodnotu nelze kvantifikovat, ale které se nedílnou měrou podílí na celkovém výsledku té které varianty. Příkladem může být situace, kdy vyjde rentabilní systém založený na vyrobené vertikální turbíně, pokud investor není schopen turbínu vyrobit, je celá varianta nerealizovatelná ač teoreticky rentabilní.

4.5 Návrh variant řetězce

V kapitole 3 jsem analyzoval jednotlivé typy transformací a jejich prostředníky. Pokusím se o přibližný návrh několika variant, jež by mohly svými ekonomickými vlastnostmi snížit náklady na vyrobené teplo. Varianty mají různé vlastnosti a rozdíly mezi nimi se pokusím stručně nastínit. Všechny navržené systémy budou mít společné údaje, které obsahuje tabulka 4.1.

Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka
Plocha rotoru	S	4	m^2
Rychlost větru	v	3,5	ms^{-1}
Ztrátový výkon	P_Z	347	WK^{-1}
Tepelná ztráta	Q_Z	33,4	GJ
Cena energie	c_Q	2	$Kč \cdot kWh^{-1}$
Diskont	i	0,03	–
Růst cen	r	0,02	–

Tabulka 4.1: Základní údaje pro hodnocení

Záměrně se nebudu v průběhu hodnocení zabývat konkrétní volbou komponent. Kladu si za cíl určit, při jakých podmínkách je ta která varianta ekonomicky řešitelná. Samotný princip je založený na vyšší či nižší míře ruční práce. Návrh, výroba a výsledná cena komponent je čistě v režii investora a nelze jí pak exaktně určit. Výsledky a přístup k teoretickému řešení by mělo být snadné aplikovat pro jiné realizace. Pokud tabulka 4.1

uvádí jiné hodnoty než v jiném zkoumaném případě, řešení se bude lišit a výsledky referenčního případu by měly dát návod před konkrétním dosazením, jakého užitku lze dosáhnout.

Parametry variant jsou ohodnoceny stejnými výpočty pro větší transparentnost a možnost porovnání výsledků. Prakticky se liší pouze výpočtem ušetřené energie a způsobem realizace. Odhady parametrů k pro jednotlivé varianty jsou řešeny pro venkovní teplotu -18°C. Samozřejmě výsledná vyrobená energie respektuje jejich závislosti na ostatních proměnných.

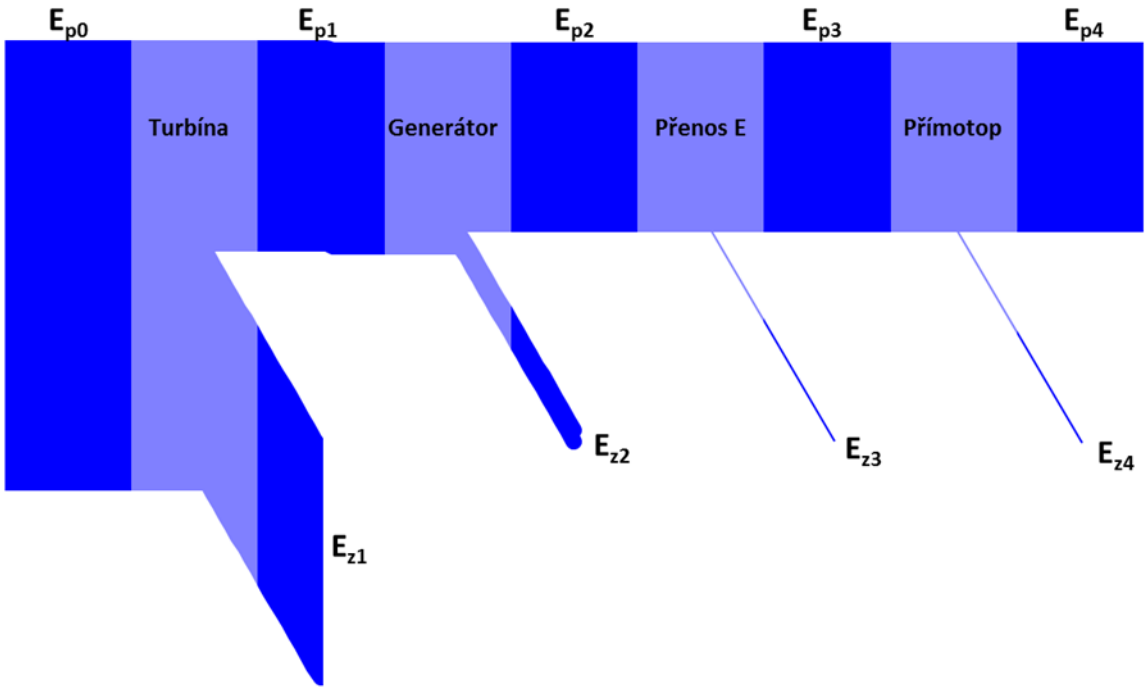
4.5.1 Kombinace horizontální turbíny a přímotopu

Základní variantu, jež budu hodnotit je typicky nejjednoduším a nejsnáze realizovatelným způsobem. Hlavní výhodou jsou minimální vícepráce. Fyzická realizace probíhá pouze montáží turbíny a jejích vývodů připojených k přímotopům. Díky přímotopům je realizace jednoduchá, jelikož jsou méně závislé na vstupním napětí a frekvenci. Parametr k soustavy je nezávislý na venkovní teplotě a výkonu soustavy. Navržený systém bude disponovat přibližně hodnotami, které obsahuje tabulka 4.2. Za nevýhodu této variantu považuji nerealizovatelnost svépomocí.

Tato varianta je jednodušší svou aplikací. Většina v současnosti temperovaných objektů je temperována elektrickým proudem. Proto část vnitřních přeměn elektřiny na teplo není většinou zatížen investičními náklady.

Prvek	Turbína	Generátor	Přenos E	Přímotop
Primární k	0,45	0,9	0,9	1
Sekundární k	0	0	0,1	-

Tabulka 4.2: Návrh parametrů pro horizontální turbínu a přímotop

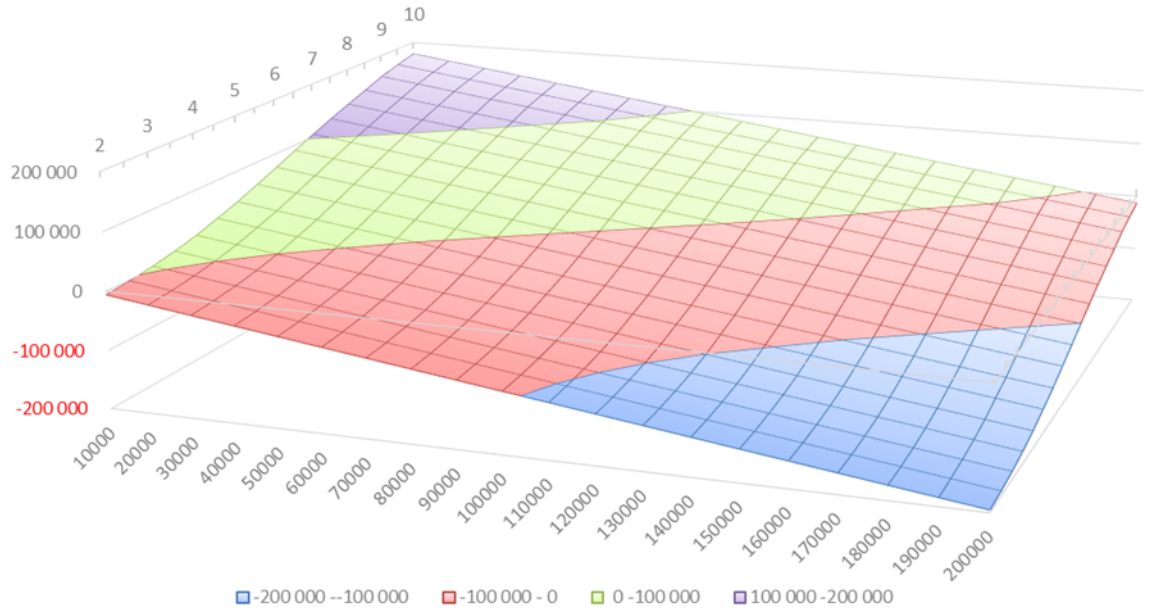


Obrázek 4.3: Energetická bilance pro horizontální turbínu a přímotop

Jelikož turbína i generátor jsou umístěny venku, většina sekundárních tepelných ztrát je vyzářena mimo otopný prostor. Varianta je charakteristická vyšší účinností turbíny. Zbytek systému obsahuje minimální ztráty.

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Parametr k	k_{C-18}	0,41	-
Teplo vyrobené	Q_{DOD}	2,9	GJ
Energie ušetřená	Q_u	2,7	GJ
Energie zálohová	Q_B	31,5	GJ
Úspora	C_U	1 518	Kč

Tabulka 4.3: Spočtené energie a úspory pro horizontální turbínu a přímotop



Obrázek 4.4: Plocha NPV pro horizontální turbínu a přímotop

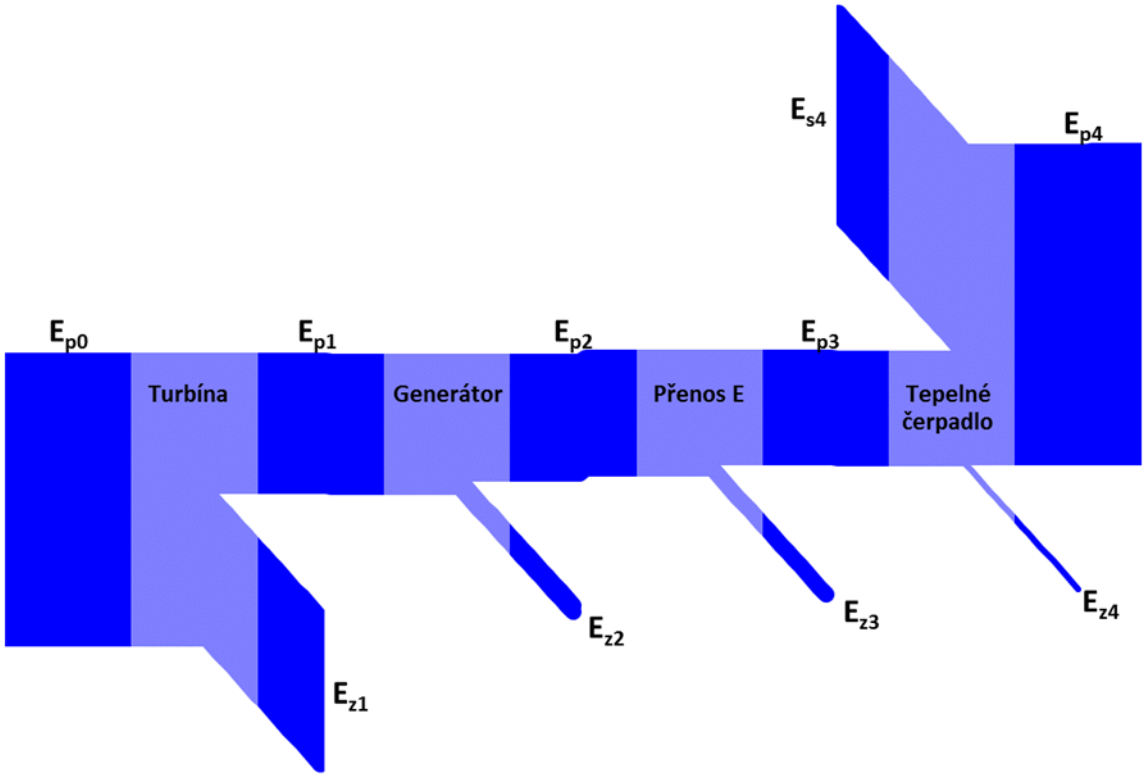
Navržený zdroj tepla pokryje přibližně 8 % tepelné ztráty. Z toho plynoucí úspora pokryje investiční náklady do hodnoty 20 000Kč. Z grafu čisté současné hodnoty lze odhadnout rentabilitu projektu pro různé rychlosti větru při stejných parametrech. To nebude příliš reálné, protože turbína o průměru rotoru 1,12 m se pohybuje kolem 20 000 Kč.

4.5.2 Kombinace horizontální turbíny a tepelného čerpadla

Jelikož velikost turbíny limituje možnosti úspory (maximální výkony), dává smysl se zabývat možnostmi jak docílit vyšších výkonů zdroje tepla. Takovou možnost skýtá tepelné čerpadlo. Zvýšením parametru k vzroste podíl zdroje tepla na krytí celkové spotřeby.

Prvek	Turbína	Generátor	Přenos E	Tepelné čerpadlo
Primární k	0,45	0,9	0,9	2,4-3,5
Sekundární k	0	0	0,1	-

Tabulka 4.4: Návrh parametrů pro horizontální turbínu a tepelné čerpadlo



Obrázek 4.5: Energetická bilance pro horizontální turbínu a přímotop

Pozor je třeba dát při správném ohodnocené úspory. V případě systémů primárně založených na větrné energie (energie vyrobená je více než energie zálohové), se můžu do jisté míry spokojit s ohodnocení zálohového tepla cenou elektrické energie. V reálu tepelné čerpadlo nemůže krýt 100% tepelné ztráty (může, avšak bývá poddimenzováno). Bohužel systém o zvolené ploše rotoru $4\,m^2$ (3.38) nevyrobí pro zkoumané rychlosti větru dostatek energie, aby byl primárním.

Mohu předpokládat, že v takovém případě nebude tepelné čerpadlo dimenzováno na výstupní výkon generátoru, ale na tepelnou ztrátu objektu. Realizace takového projektu povede i na snížení množství zálohové energie, jelikož energie elektrická bude místo přes přímotopy vedena skrze tepelné čerpadlo. To povede k netransparentnosti jednotlivých variant. Je třeba tedy chápat, že celkové vyhodnocení určuje užitek z tepelného čerpadla o elektrickém výkonu zdroje tepla (tj. výkonu na výstupních svorkách generátoru), či užitek té části výkonu tepelného čerpadla, jež právě elektrický výkon využívá.

Porovnáním se stejným rozložením končícím přímotopy je úspora větší. Zdroj tepla

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Parametr k	k_{C-18}	1,32	-
Teplo vyrobené	Q_{DOD}	8,5	GJ
Energie ušetřená	Q_u	7,1	GJ
Energie zálohová	Q_B	27,2	GJ
Úspora	C_U	3 959	Kč

Tabulka 4.5: Spočtené energie a úspory pro horizontální turbínu a tepelné čerpadlo

pokryje téměř čtvrtinu tepelné ztráty objektu. Teoreticky vychází úspora plynoucí z tepelného čerpadla přibližně 50 000 Kč. Je však nutno vzít v potaz, že v reálné aplikaci by se k této úspoře přidaly i úspory ze zálohové energie. Tato úspora platí v případě, že jsou splněny požadavky na investiční náklady větrné turbíny z podkapitoly 4.5.1

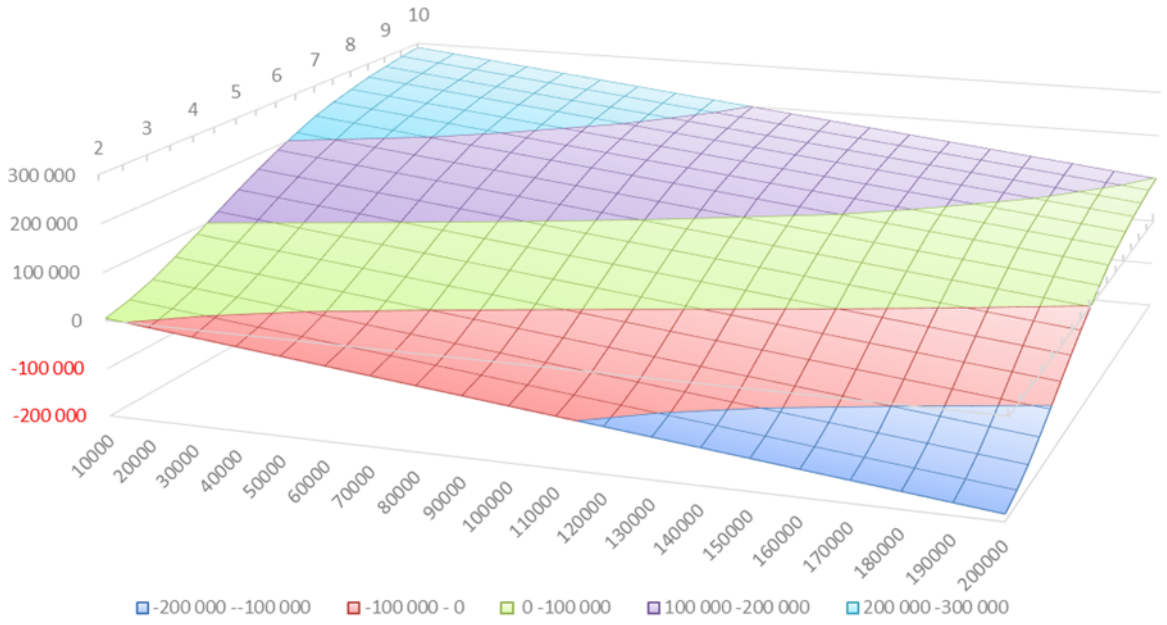
Důležitým aspektem, na který je nutno brát ohled je vstupní příkon tepelného čerpadla. Je jasné, že čerpadlo potřebuje určitý, ideálně konstantnní výkon. Výstup generátoru tudíž nemůže být přímo napojen na tepelné čerpadlo. Během zkoumání přenosových prvků energie jsem odhadl velikost ztráty při úpravě signálu pro tepelné čerpadlo $k = 0,9$. Chybějící výkon by musel být dodávan zálohovým zdrojem a to i v případě vysokého tarifu, kdy je cena 3x vyšší. Budu-li předpokládat, že záložní energie bude spínat pouze v době nízkého tarifu, bude výsledná ušetřená energie nižší.

4.5.3 Kombinace vertikální turbíny a přímotopu

Jedná se o alternativní řešení k horizontální turbíně a přímotopům. Ač verikální turbíny nemohodu dosahovat stejných účinností jako turbíny horizontální, jejich konstrukce je principielně jednodušší a vyrobitelná svépomocí. Předpokládám svedení hřídele z rotoru turbíny dovnitř temperovaného prostoru. Kromě ztrát při přeměně energie větru na energii mechanickou by velká část ztrát měla být vyzářena uvnitř vytápěné oblasti. Ztrátová energie by se přímo či vícekrát přeměnit až na energii tepelnou a tudíž se nejedná o ztrátu. Návrh jednotlivých koeficientů ukazuje tabulka 4.6. Energetická bilance je naznačena na obrázku (obr. 4.7)

Opět se jedná o způsob, jehož část už je většinou (minimálně v mnou zkoumaném objektu) realizována a tak lze předpokládat nižší investičních nákladů.

Jelikož velká část "ztrát"se nachází uvnitř vytápěné zóny, není třeba brát přílišný



Obrázek 4.6: Plocha NPV pro horizontální turbínu a tepelné čerpadlo

Prvek	Turbína	Přenos M	Generátor	Přenos E	Přímotop
Primární k	0,2	0,999	0,9	0,999	1
Sekundární k	0	0,001	0,1	0,001	-

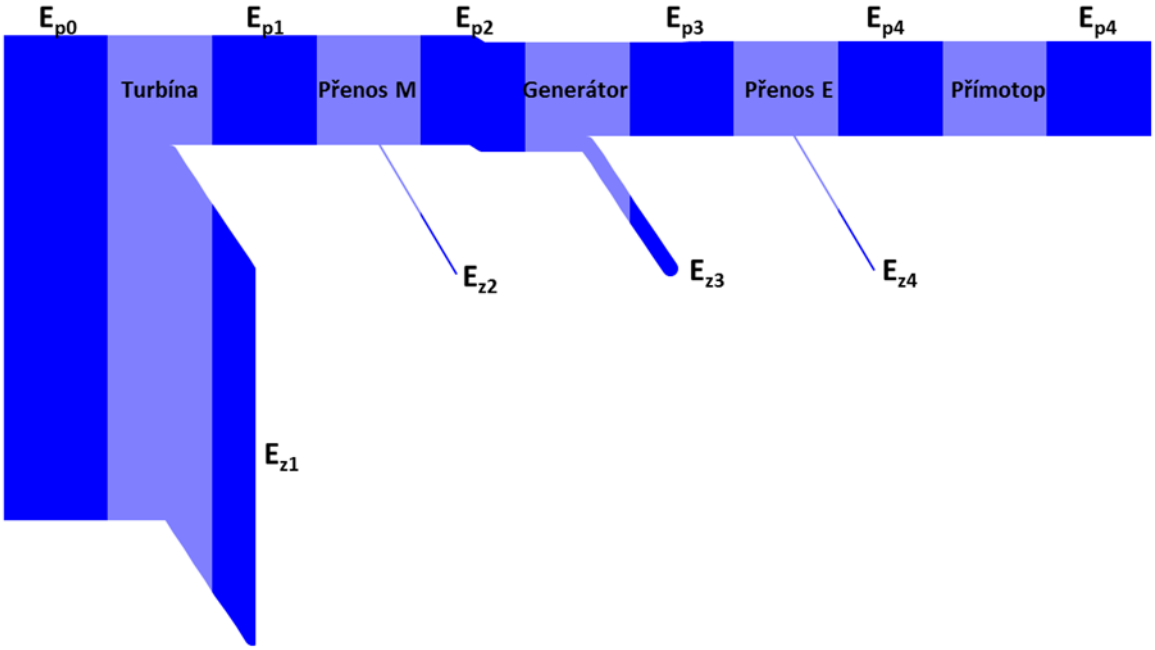
Tabulka 4.6: Návrh parametrů pro vertikální turbínu a přímotop

ohled na parametry vnitřních prvků a při samotné realizaci je možno se soustředit jen a pouze na zrealizování přeměny na teplo.

Vhledem k nízké účinnosti větrné turbíny je úspora minimální. Zdroj tepla pokryje pouze 4 % tepelné ztráty objektu. Projekt by byl realizovatelný pouze v případě, že výroba turbíny, hřídele a generátoru by stála méně než 10 000 Kč (obr. 4.8). Jelikož úspora je minimální, variantu nedoporučuji k realizaci pro oblasti se stejnou nebo nižší průměrnou rychlostí větru.

4.5.4 Kombinace vertikální turbíny a tepelného čerpadla

Již při hodnocení varianty s horizontální turbínou a přímotopem 4.5.1 bylo řečeno, že horizontální turbíny nemohou být vyráběny svépomocí. Pokusím se vyhodnotit celkový užitek při použití tepelného čerpadla místo přímotopů. Konstrukčně a technicky je vari-



Obrázek 4.7: Energetická bilance pro vertikální turbínu a přímotop

anta shodná s variantou horizontální turbíny a tepelného čerpadla. Budu proto hodnotit hlavně vypozorované rozdíly mezi těmito dvěma variantami.

Vzhledem k menšímu výslednému tepelnému výkonu zdroje tepla vynikají problémy, týkající se technické realizace ještě výrazněji. Elektrická energie větru bude využívat ještě menší část výkonu čerpadla.

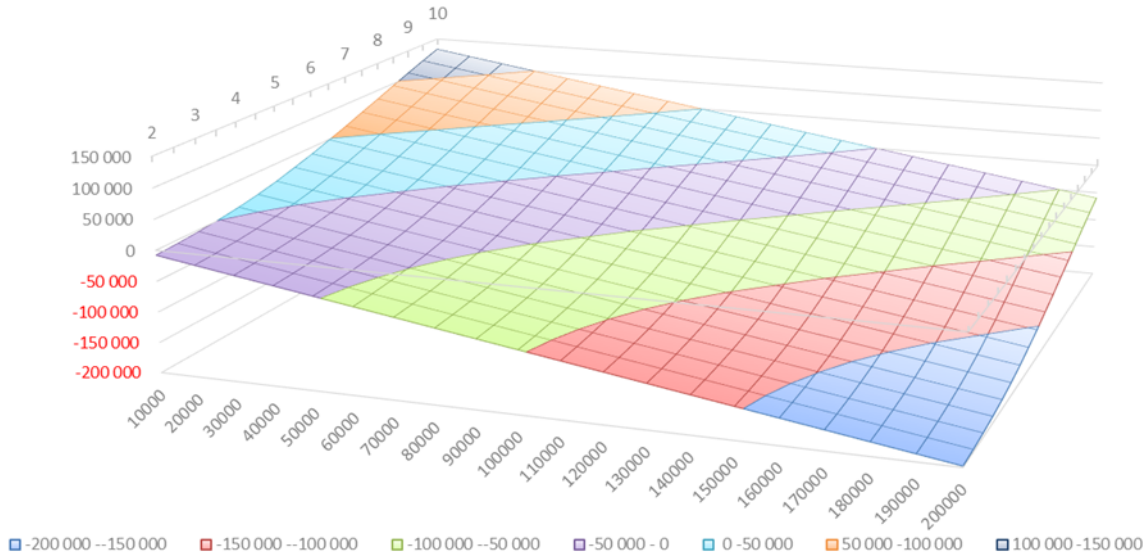
Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Parametr k	k_{C-18}	0,60	-
Teplo vyrobené	Q_{DOD}	3,8	GJ
Energie ušetřená	Q_u	3,5	GJ
Energie zálohová	Q_B	30,8	GJ
Úspora	C_U	1 936	Kč

Tabulka 4.9: Spočtené energie a úspory pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo

Vertikální turbíny mají nižší účinnost. Oproti obdobné variantě s horizontální turbínou je úspora nižší. Zdroj tepla kryje pouze desetinu tepelné ztráty. Úspora kryje investiční náklady využité kapacity tepelného čerpadla do 23 000 Kč.

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Parametr k	k_{C-18}	0,2	-
Teplo vyrobené	Q_{DOD}	1,4	GJ
Energie ušetřená	Q_u	1,4	GJ
Energie zálohová	Q_B	32,9	GJ
Úspora	C_U	775	Kč

Tabulka 4.7: Spočtené energie a úspory pro vertikální turbínu a přímotop



Obrázek 4.8: Plocha NPV pro vertikální turbínu a přímotop

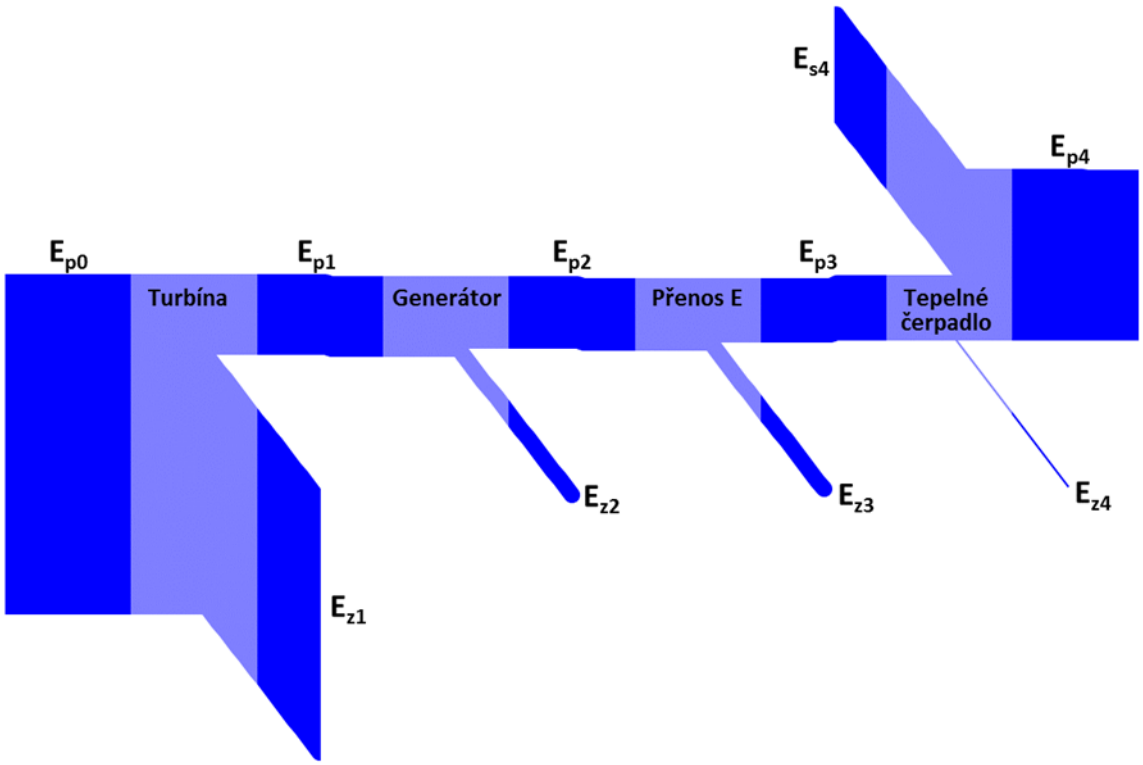
4.5.5 Kombinace vertikální turbíny a vrtule

Konstrukčně a fyzikálně nejjednodušší avšak na svépomoc nejnáročnější variantou je připojení horizontální turbíny hřídelí na vrtuli uvnitř vodní lázně. Energie větrná je přeměna na mechanickou a následně na energii tepelnou. Díky absenci jednoho typu přeměny odpadá v řetězci generátorový člen a případné ztráty při úpravě parametrů elektrické energie pro potřeby tepelného čerpadla.

Pro tento systém vychází parametr k stejně jako pro variantu s vertikální turbínou a přímotopem. Jelikož oba systémy jsou nezávislé na vstupním výkonu a venkovní teplotě, bude vyrobená energie a z toho plynoucí úspora totožná (tabulka 4.7). Taktéž plocha čisté současné hodnoty obr. 4.8 bude stejná, protože jsem nekvalifikoval, žádné rozdíly v struktuře nákladů (pouze počáteční investice).

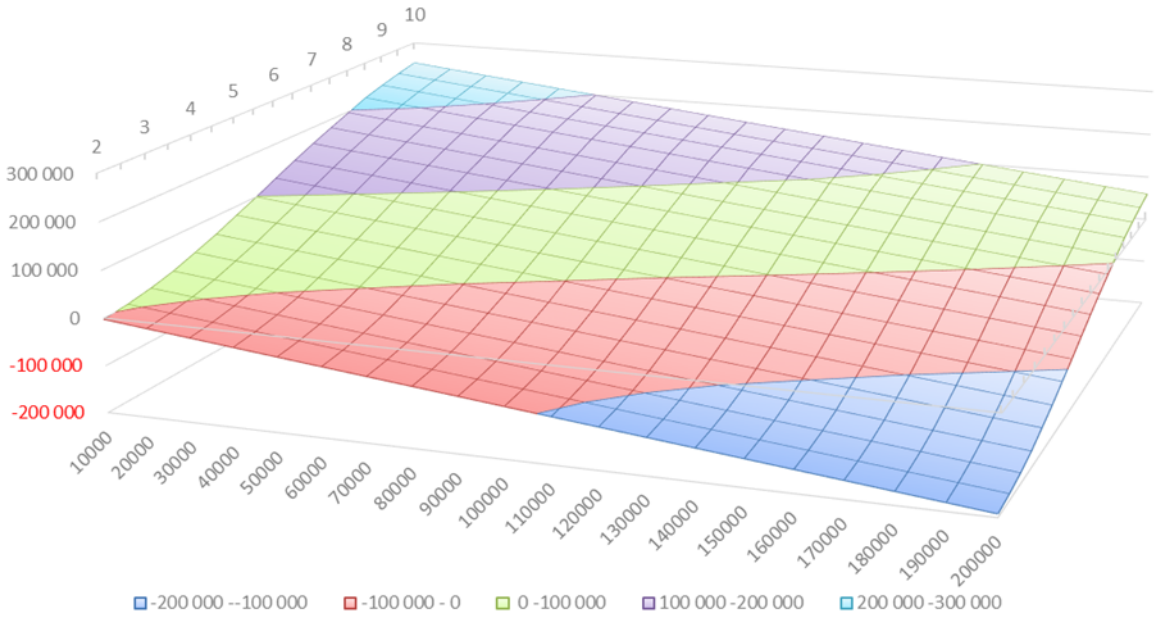
Prvek	Turbína	Přenos M	Generátor	Přenos E	Tepelné čerpadlo
Primární k	0,2	0,999	0,9	0,9	2,4-3,5
Sekundární k	0	0,001	0,1	0,1	-

Tabulka 4.8: Návrh parametrů pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo



Obrázek 4.9: Energetická bilance pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo

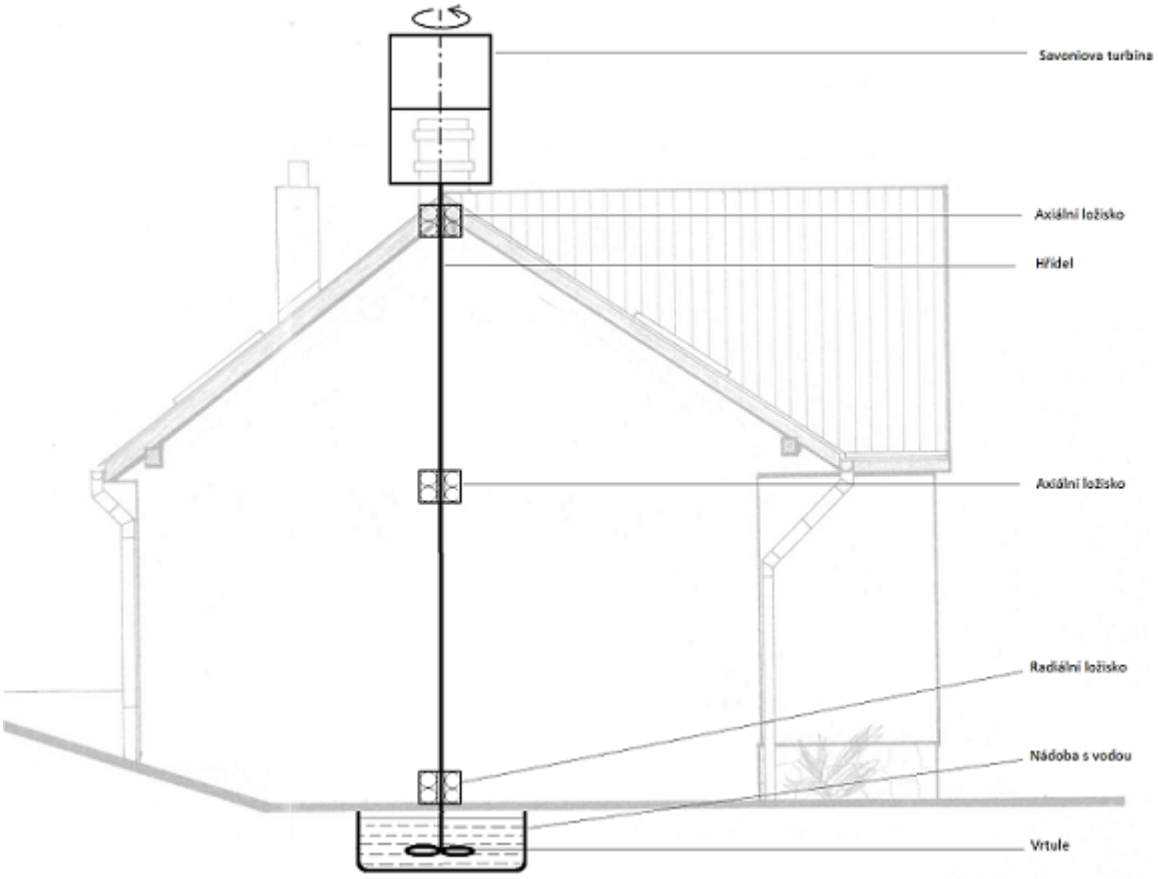
Varianta je tedy opět rentabilní při investičních nákladech nižších než 10 000 Kč. Při již existujícím vytápění přímotopy lze považovat tyto dvě varianty investičně za přibližně ekvivalentní (cena generátoru vůči vrtuli s vodní nádobou). Při nákladech nižších než stanovená hranice je při současné rychlosti větru nutno brát v úvahu další vlastnosti systému.



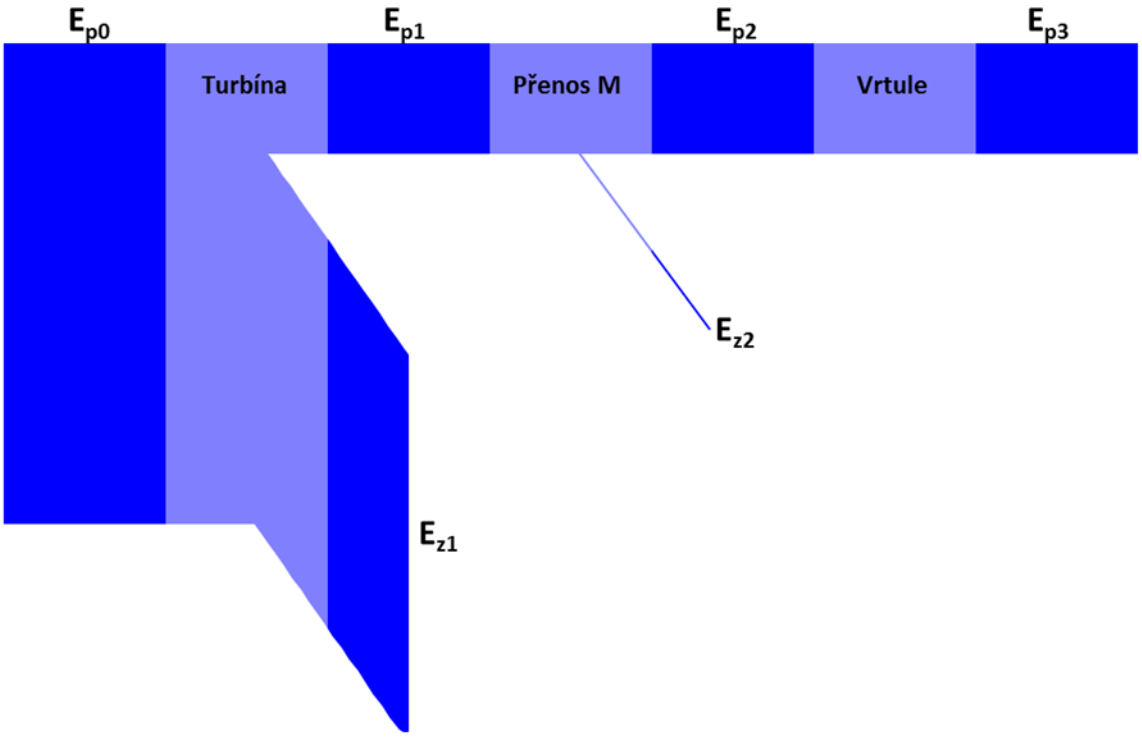
Obrázek 4.10: Plocha NPV pro vertikální turbínu a tepelné čerpadlo

Prvek	Turbína	Přenos M	Vrtule
Primární k	0,2	0,999	1
Sekundární k	0	0,001	-

Tabulka 4.10: Návrh parametrů pro vertikální turbínu a vrtuli



Obrázek 4.11: Koncept kontrukce pro vertikální turbínu a vrtuli



Obrázek 4.12: Energetická bilance pro vertikální turbínu a vrtuli

Kapitola 5

Vyhodnocení

V práci jsem se pokusil nastínit problematiku návrhu zdroje tepla založeném na větru. Rychlost větru má povahu náhodné veličiny a výstup zdroje tepla tuto vlastnost přejímá. Řešil jsem z toho plynoucí problém v určování množství vyrobené energie a z toho plynoucí úspory. Pro snazší představitelnost jsem se pokusil problém teoretického návrhu řešit na reálném objektu.

Z rozboru a výpočtů vyplynul základní problém návrhu. Při rychlostech větru v oblasti, není možné navrhnout zdroj o dostatečném výkonu, aby byl primární. Potencionální instalovaná turbína má limitace na plochu turbíny, které znemožňují vytvoření zdroje tepla o dostatečném výkonu. Systém navržený pro maximalizaci parametru k by měl vrtuli o průměru $6{,}5\,m^2$. Což je u referenčního objektu přibližně jeho výška.

Průzkum spolehlivosti systému ukázal, že i systém s velkou větrnou turbínou nezaručuje vysokou spolehlivost systému. Pro průměr vrtule rotoru $6{,}5\,m^2$ je spolehlivost při nejnižších teplotách rovna přibližně 0,36 pro mnou navržený systém. Takto nízká spolehlivost činí systém přímé přeměny na teplo nepoužitelný jako spolehlivý off-grid systém. Dostatečně spolehlivý systém by potřeboval plochu rotoru turbíny v řádech stovek metrů čtverečnách, což má hned několik nevýhod. Systém bude investičně nerealizovatelný, množství nadvyrobené energie bude obrovské a celková smysluplnost takového projektu se limitně blíží nule.

Díky sjednocení různých typů účinnostních, ztrátových a ziskových parametrů jsem mohl zkoumat účinnosti jednotlivých přeměn. Zkoumal jsem případné ztráty a jejich povahu. Z těchto teoretických parametrů jednotlivých typů přeměn a přenosů jsem vyšel při návrhnu několika typů zdrojů tepla.

Vzhledem k nízké hustotě energie v ploše rotoru je při volbě menší turbíny úspora nízká. Bez zisků ze sekundární energie není možno ušetřit více než 8% tepelné ztráty zkou-

maného objektu. Podíl krytí tepelné ztráty zdrojem tepla lze zvýšit použitím sekundárních typů energie (například přečerpání tepelným čerpadlem). Pro takto malé zdroje tepla je použití tepelného čerpadla technicky náročné, jelikož tepelné čerpadlo nemění energii přímo na teplo a má vlastní požadavky na vlastnosti elektrické energie (frekvence, napětí, proud).

O úsporu na vytápění použitím větrné energie se vyplatí uvažovat v případě splněných omezení na investiční nároky pro jednotlivé varianty. Ty nejsou vzhledem k nízké úspoře příliš vysoké. Je nutno vzít v potaz i další nepeněžní aspekty realizace takového projektu. Turbíny realizované svépomoci se mohou v obydlených oblastech setkat s menším pochopením spoluobčanů. Průměrné rychlosti větru rostou s klesající venkovní teplotou. Existuje tak předpoklad, že v zimě budou finální úspory vyšší než je počítáno. Pozitivním efektem plynoucím z větrného zdroje tepla je potencionální výkon v době vysokého tarifu. V případě déletrvajících pásem vysokého tarifu, tak může systém pomoci překlenout toto období.

Vzhledem k nízké hodnotě úspory bych investici do větrné turbíny doporučil spíše pro vyšší průměrné rychlosti v oblasti. Pro zkoumanou oblast bych instalaci turbíny nedoporučil.

Literatura

4u-therm s.r.o. (2015), Jak je to s výkonem a účinností TČ? [online]. [cit. 2015-03-15], ⟨http://www.4u-therm.cz/zakladni-informace-jak-je-to-s-vykonem-TC.php?str=6⟩.

E.ON (2015), Oficiální stránky e.on [online]. [cit. 2015-5-1], ⟨http://www.eon.cz/⟩.

Grygarová, J. (2014), Využití větru k vytápění, Master's thesis, České vysoké učení technické v praze.

Hanslian D., Hošek J., Chládová Z., Pop L. (2013*a*), 'Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem i', *TZB-info / Obnovitelná energie a úspory energie / Větrná energie* . [cit. 2015-05-1], ⟨http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i⟩.

Hanslian D., Hošek J., Chládová Z., Pop L. (2013*b*), 'Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem ii', *TZB-info / Obnovitelná energie a úspory energie / Větrná energie* . [cit. 2015-04-17], ⟨http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9800-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-ii⟩.

Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů [online] (2015). [cit. 2015-01-25], ⟨http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu⟩.

Hustota suchého vzduchu [online] (2015). [cit. 2015-05-3], ⟨http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/70-hustota-sucheho-vzduchu⟩.

Čičmanec, P. (1980), *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetizmus*, Alfa a SNTL, Bratislava.

Beranovský J., Kašparová M., Macholda F., Srdečný K., Truxa J. (2007), 'Energie větru'. [cit. 2015-05-02], ⟨http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru⟩.

Klečka, J. (2009), Větrná elektrárna se savoniovým rotorem pro výrobu elektrické energie, Master's thesis, Vysoké učení technické v Brně.

Kopecký, L. (2005), Úvahy o účinnosti elektrických strojů. [cit. 2015-05-02], ⟨http://free-energy.xf.cz/teorie/elmot.pdf⟩.

Krainer, R. (2011), Efektivní energietický region jižní čechy - dolní bavorsko, *in* 'Tepelná čerpadla'. [cit. 2015-05-01], ⟨http://www.energetickyregion.cz/download_akce/1334126597cs__7_06_tepelna_cerpadla.pdf⟩.

Kreutzer, U. (2013), 'Eco energy takes the floor', *Pictures of the Future* [online] **Fall 2013**. [cit. 2015-03-28], ⟨http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-fall-2013/_html_en/wind-heating.html⟩.

Kučera, P. (2006), Tepelný odpor a tepelná jímavost cihelného zdiva, *in* 'příspěvek ve sborníku z celostátní odborné konference Zděné objekty v Hradci Králové', René Růžička.

Limity hluku [online] (2015). [cit. 2015-04-16], ⟨http://hluk.eps.cz/hluk/limity/⟩.

Mollison, B. (1981), *Designing for permaculture*, number VIII *in* 'Permaculture Design Course Series', Yankee permaculture.

Novák, J. (2008), 'Návrhové hodnoty činitele teplotní redukce podle Čsn 73 0540-3', p. 1. SF2.

Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů (2012). [cit. 2015-04-02], ⟨http://www.mpo.cz/assets/cz/2012/11/NAP.pdf⟩.

Pivrnec, J. (1995), *Finační management*, Grada Publisher, a.s.

Reinberk Z., Šubrt R., Zelená L. (2009), 'On-line kalkulačka úspor a dotací zelená úsporám', *Stavba / Tabulky a výpočty* . [cit. 2015-04-03], ⟨http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/128-on-line-kalkulacka-uspor-a-dotaci-zelena-usporam⟩.

Sankey Diagrams [online] (2009). [cit. 2015-05-01], ⟨http://www.sankey-diagrams.com/tag/building/⟩.

Siemens (2015), Účinnost nízkonapěťových asynchronních motorů podle nových norem a nové třídy účinnosti [online]. [cit. 2015-05-01],

⟨http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/reseni/uspora-energie/brochure_energeticky-efektivni-motory_2010_cz.pdf⟩.

Steffes, P. (2008), Wind assisted heating, *in* 'A Distributive Electric Storage Technology that is a Low Cost, Long Life "Renewable Thermal Battery"', Steffes Corporation. [cit. 2015-04-03], ⟨http://www.simplyeff.com/pdf/WindAssistedHeating.pdf⟩.

Tyrbach, J. (2008), Výkon, příkon a účinnost elektrického zařízení, SPŠ SaE Ústní nad labem, Resslova 5.

Tywoniak, J. (2005), *Nízkoenergetické domy - Principy a příklady*, Grada Publisher, a.s.

Valenta, V. (2010), Základní topenářské termíny a de?nice [online]. [cit. 2015-05-01], ⟨http://www.cechtop.cz/nazvoslovi-1/⟩.

Venkovní výpočtové teploty a otopná období dle lokalit [online] (2015). [cit. 2015-05-05], ⟨http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/25-venkovni-vypoctove-teploty-a-otopna-obdobi-dle-lokalit⟩.

Vítek, M. (2008), *Ekonomika dopravních enenergietický systémů*, Sriptum FEL ČVUT.

Větrné elektrárny: Nejčastější typy, experimentální projekty a zajímavosti [online] (2015). [cit. 2015-03-15], ⟨http://www.ekobonus.cz/vetrne-elektrarny-nejcastejsi-typy-experimentalni-projekty-a-zajimavosti/⟩.

Wikipedia: Off-the-grid [online] (2015). [cit. 2015-03-19], ⟨http://en.wikipedia.org/wiki/Off-the-grid⟩.

Wikipedia: Topný faktor [online] (2015). [cit. 2015-03-20], ⟨http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_performance⟩.

Wikipedia: Weibullovo rozdělení 2 [online] (2015). [cit. 2015-05-01], ⟨http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADtr⟩.

Wikipedia: Weibullovo rozdělení [online] (2015). [cit. 2015-05-01], ⟨http://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution⟩.