

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd
Obor: Elektrotechnika a management



Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Combined heat and power generation

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Petr Jílek
Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
Rok: 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jílek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **487155**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Název bakalářské práce anglicky:

Combined heat and power generation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Princip kombinované výroby elektřiny a tepla.
- 2) Postup návrhu kogenerační jednotky.
- 3) Návrh kogenerační jednotky pro průmyslový podnik
- 4) Technicko – ekonomické zhodnocení návrhu kogenerační jednotky.

Seznam doporučené literatury:

- 1) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- 2) IBLER, Zdeněk. Technický průvodce energetika. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1.
- 3) IBLER, Zdeněk. Technický průvodce Energetika – 2. díl. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-097-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL


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

Datum zadání bakalářské práce: **07.09.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2023**


Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

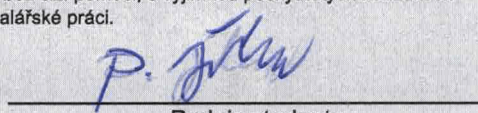

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

14.12.2021
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 4.1.2022

Petr Jílek

Poděkování

Děkuji Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily.

Petr Jílek

Název práce:

**Kombinovaná výroba elektřiny
a tepla**

Autor: Petr Jílek

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.

Abstrakt: Práce se věnuje vytvoření algoritmu pro návrh kogenerační jednotky na základě vstupních dat od uživatele. První kapitola se věnuje popisu principu kombinované výroby elektřiny a tepla. Druhá kapitola se zaměřuje na popis algoritmu pro návrh kogenerační jednotky. V kapitole 3 bude algoritmus z kapitoly 2 aplikován pro návrh kogenerační jednotky pro průmyslový areál. V kapitole 4 bude návrh kogenerační jednotky z kapitoly 3 ekonomicky zhodnocen.

Klíčová slova: kogenerační jednotka, denní diagram, roční diagram, tepelná energie, elektrická energie

Title:

Combined heat and power generation

Author: Petr Jílek

Abstract: The thesis deals with the creation of an algorithm for the design of a cogeneration unit based on input data from the user. The first chapter describes the principle of combined heat and power. The second chapter deals with the description of the algorithm for the design of a cogeneration unit. In Chapter 3, the algorithm from Chapter 2 will be used for design of a cogeneration unit for an industrial area. In Chapter 4, the design of the cogeneration unit from Chapter 3 will be economically assessed.

Key words: cogeneration unit, daily diagram, annual diagram, thermal energy, electricity

Obsah

Seznam použitých zkratk	xiii
Seznam obrázků	xiv
Seznam tabulek	xv
Úvod	1
1 Princip kombinované výroby elektřiny a tepla	3
1.1 Základní princip kogenerace	3
1.2 Výhody a nevýhody kogenerace	4
1.3 Parametry kogeneračních jednotek	5
1.3.1 Energetické parametry	5
1.3.2 Účinnost	6
1.3.3 Závislost elektrické účinnosti na zatížení	7
1.4 Energetický přínos kogenerace	9
1.5 Konstrukční provedení kogenerační jednotky	11
1.5.1 Elektrický generátor	12
1.6 Termodynamika	13
1.6.1 První zákon termodynamiky	13
1.6.2 Druhý zákon termodynamiky	14
1.7 Primární jednotky	14
1.7.1 Parní turbíny	15
1.7.2 Organický Rankinův cyklus	15
1.7.3 Mikroturbíny	16
1.7.4 Stirlingův motor	17
1.8 Paliva pro kogenerační jednotky	18
2 Postup návrhu kogenerační jednotky	19
2.1 Základní popis algoritmu	19
2.2 Vstupní data	20
2.2.1 Seznam kogeneračních jednotek	21
2.2.2 Seznam plynových kotlů	22
2.2.3 Parametry objektu	22
2.3 Transformace vstupních dat	23
2.3.1 Denní průměrný normovaný diagram tepelného a elektrického zatížení	23
2.3.2 Roční diagram tepelného a elektrického zatížení	24
2.4 Předpoklady pro návrh	25
2.5 Návrh varianty s kogenerační jednotkou	26
2.5.1 Návrh denního provozu KJ	26
2.5.2 Návrh ročního provozu KJ	27
2.5.3 Výběr typu kogenerační jednotky	28
2.5.4 Výpočet pokrytí tepelné a elektrické spotřeby KJ	29

2.5.5	Návrh plynových kotlů pro pokrytí tepelného zatížení	31
2.5.6	Spotřeba zemního plynu	31
2.6	Návrh varianty bez kogenerační jednotky	32
2.7	Výpočetní program pro technický návrh KJ	33
2.7.1	Instalace	33
2.7.2	Konfigurace	33
2.7.3	Spuštění	35
2.8	Kritéria ekonomické efektivity	35
2.8.1	Doba splacení – PP	35
2.8.2	Čistá současná hodnota – NPV	36
2.8.3	Vnitřní výnosové procento – IRR	36
3	Návrh kogenerační jednotky pro průmyslový podnik	37
3.1	Vstupní data	37
3.1.1	Seznam kogeneračních jednotek	37
3.1.2	Seznam plynových kotlů	38
3.1.3	Parametry objektu	38
3.2	Transformace vstupních dat	43
3.2.1	Denní průměrný normovaný diagram tepelného a elektrického zatížení	43
3.2.2	Denní spotřeba tepelné a elektrické energie	45
3.3	Návrh varianty s KJ	47
3.3.1	Návrh denního provozu KJ	47
3.3.2	Návrh ročního provozu KJ	48
3.3.3	Výběr typu kogenerační jednotky	48
3.3.4	Pokrytí tepelné a elektrické spotřeby kogenerační jednotkou	49
3.3.5	Výběr plynových kotlů pro pokrytí tepelného zatížení	51
3.4	Návrh varianty bez KJ	51
4	Technicko – ekonomické zhodnocení návrhu kogenerační jednotky	53
4.1	Provozní příjmy a výdaje	54
4.2	Investice	55
4.3	Ekonomické zhodnocení variant	56
	Závěr	57
	Seznam literatury	59
	Seznam příloh	61

Seznam použitých zkratek

ČR	Česká republika
EG	Elektrický generátor
IRR	Vnitřní výnosové procento
KJ	Kogenerační jednotka
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
NPV	Čistá současná hodnota
ORC	Organický Rankinův cyklus
PE	Primární energie
PK	Plynový kotel
PP	Doba splacení
SM	Stirlingův motor

Seznam obrázků

1.1	Princip kogenerace	4
1.2	Závislost elektrické účinnosti a příkonu primárního paliva na elektrickém výkonu	9
1.3	Závislost relativní úspory paliva na účinnosti KJ, $\eta_{el} = 0,3$, $\eta_{vyt} = 0,9$	10
1.4	Závislost relativní úspory paliva na účinnosti KJ, $\eta_{el} = 0,9$, $\eta_{vyt} = 0,9$	11
1.5	Modulové uspořádání kogenerační jednotky	12
1.6	Schéma organického Rankinova cyklu	15
1.7	Ts diagram vody pro organický Rankinův cyklus	16
1.8	Schéma mikroturbíny	16
1.9	Braytonův otevřený cyklus	17
2.1	Algoritmus návrhu kogenerační jednotky	20
3.1	Roční diagram tepelné spotřeby	39
3.2	Roční diagram elektrické spotřeby	40
3.3	Průměrný denní diagram tepelného zatížení	42
3.4	Průměrný denní diagram elektrického zatížení	42
3.5	Denní průměrný normovaný diagram tepelného zatížení	44
3.6	Denní průměrný normovaný diagram elektrického zatížení	44
3.7	Roční diagram denní tepelné spotřeby	45
3.8	Roční diagram denní elektrické spotřeby	46
3.9	Algoritmus návrhu denního provozu	47
3.10	Algoritmus návrhu ročního provozu	48
3.11	Pokrytí tepelné spotřeby	50
3.12	Pokrytí elektrické spotřeby	50

Seznam tabulek

3.1	Parametry kogeneračních jednotek.	37
3.2	Obecné parametry pro kogenerační jednotky.	38
3.3	Seznam plynových kotlů.	38
3.4	Roční diagram tepelné a elektrické spotřeby.	38
3.5	Denní průměrný diagram tepelného a elektrického zatížení.	41
3.6	Denní průměrný normovaný diagram tepelného a elektrického zatížení.	43
3.7	Roční diagram denní tepelné a elektrické spotřeby.	45
3.8	Parametry zvolené KJ.	48
3.9	Pokrytí tepelné a elektrické spotřeby.	49
3.10	Seznam plynových kotlů pro variantu s KJ.	51
3.11	Seznam plynových kotlů pro variantu bez KJ.	51
4.1	Základní parametry	53
4.2	Spotřeba a výroba energie	54
4.3	Provozní příjmy a výdaje	54
4.4	Investice varianty A	55
4.5	Investice varianty B	55
4.6	Investice varianty C	55
4.7	Investice a CF	56
4.8	Výsledky kritérií ekonomické efektivity	56
4.9	Výsledky kritérií ekonomické efektivity	57

Úvod

Poptávka po elektrické energii se ve světě neustále zvyšuje, proto je třeba budovat nové zdroje této energie. Většina elektrické energie vyráběna z neobnovitelných zdrojů. Mezi neobnovitelné zdroje energie řadíme například uhlí, ropu, zemní plyn a uran. Výroba z neobnovitelných zdrojů je poměrně snadná, například uhlí se spaluje v tepelných elektrárnách. Výkon těchto elektráren je snadno regulovatelný podle potřeby poptávky.

Problém neobnovitelných zdrojů spočívá zejména v tom, že při jejich spalování vznikají emise oxidu uhličitého a navíc v dohledné době hrozí jejich vyčerpání. Proto přišla na řadu výroba z obnovitelných zdrojů, jako je například sluneční energie, větrná energie nebo vodní energie. Výroba z těchto zdrojů je sice v jistých mezích ekologicky přijatelná, ale je zde velká náchylnost na okolní podmínky. Například větrné elektrárny fungují pouze tam, kde jsou dobré povětrnostní podmínky. Navíc síla větru se každým okamžikem mění a tím se mění i výkon těchto elektráren. To má za následek obtížnou regulaci výkonu dodávaného do elektrizační soustavy a nejistou dodávku elektrické energie. Stejně tak sluneční elektrárny jsou závislé na tom, jak v daný den svítí slunce.

Stále se hledají nové způsoby výroby elektrické energie. Jednou z efektivních možností je kombinovaná výroba elektřiny a tepla, kterou lze realizovat pomocí kogeneračních jednotek. Výhodou tohoto způsobu je využití tepelné energie. Tyto jednotky se standardně navrhují pro určitý objekt jako například průmyslový areál či menší sídla. Kogenerační jednotky nejsou obecně obnovitelným zdrojem, jelikož spalují například zemní plyn. Díky možnosti využití tepelné energie vznikající při výrobě elektrické energie jsou schopny ušetřit spotřebu primárního paliva a tím dosáhnout vyšší celkové účinnosti.

Při návrhu kogenerační jednotky pro objekt se specifickou spotřebou elektrické a tepelné energie je třeba danou jednotku navrhnout tak, aby její provoz byl efektivní. Pokud by například kogenerační jednotka pracovala v době, kdy je tepelná spotřeba objektu malá, tak by vznikalo velké množství nevyužitého tepla.

Cílem této práce je vytvoření algoritmu, pomocí něhož bude navrhována kogenerační jednotka pro průmyslový areál na základě vstupních parametrů jako je například tepelná a elektrická spotřeba. Tato vstupní data budou v práci podrobně popsána.

V jednotlivých kapitolách bude charakterizován základní princip kombinované výroby elektřiny a tepla. V další části bude podrobně popsán postup (algoritmus) návrhu kogenerační jednotky. Ve třetí kapitole bude proveden technický návrh kogenerační jednotky pro průmyslový areál. Současně s tím budou navrženy plynové kotle pro pokrytí zbylého tepelného zatížení. Čtvrtá kapitola bude věnována ekonomickému zhodnocení technických variant.

Kapitola 1

Princip kombinované výroby elektřiny a tepla

1.1 Základní princip kogenerace

V České republice (dále také „ČR“) je většina výroby elektrické energie vyráběna a dodávána v centralizovaném systému. V tomto systému je výroba elektrické energie centralizovaná do velkých elektráren. Následně je celá soustava propojena a přenos elektrické energie ke konečnému odběrateli je zajištěn přenosovou a distribuční soustavou. V elektrárnách se přeměňuje primární energie (dále také „PE“) na energii elektrickou. PE je energie, kterou nalezneme běžně na naší zemi, a která není jakkoli upravena. Tato energie se dělí na dva hlavní typy.

První typ této energie je obnovitelná energie. Zde se řadí například energie slunečního záření, vodní energie a biomasa. Například Slunce, které produkuje sluneční záření, které poté dopadá na naši planetu zde pravděpodobně bude ještě několik miliard let, což značně převažuje délku lidského života. Tudíž tato energie se považuje za obnovitelnou.

Na druhou stranu existuje energie neobnovitelná. Mezi zdroje neobnovitelné energie řadíme například uhlí, ropu, zemní plyn a jadernou energii. Zde například zásoby ropy je zdroj omezený na naši planetě, jelikož je možné ho ve srovnatelné době s lidským životem vypotřebovat.¹

V elektrárnách v ČR značně dominuje použití neobnovitelné energie. V roce 2019 na výrobě elektřiny měla největší podíl energie z hnědého uhlí (40 %), poté jaderné palivo (35 %) a zemní plyn (6 %). Pouze 12 % celkového podílu na výrobě bylo tvořeno obnovitelnými zdroje. Pokud bychom dali dohromady energii vyrobenou ze spalování v tepelných elektrárnách, tak dosáhneme kolem 45 % celkového podílu výroby elektřiny v ČR.²

Tento centralizovaný systém je doposud v ČR nejrozšířenějším systémem pro výrobu elektrické energie. Představuje stálé a snadné řešení. Naproti tomu skrývá v sobě dlouhodobá rizika nejvíce z hlediska environmentálního problému. Navíc při jejich spalování vzniká velké množství znečišťujících látek, které způsobují další pro-

¹NOVOTNÝ, Jiří. Neobnovitelná primární energie. TZB-info [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vytapani/16491-neobnovitelna-primarni-energie>.

²ERU. Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR. ERU [online]. Jihlava, 2017 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc.

blémy. V poslední době je snaha, co nevíce přesunout výrobu elektrické energie z používání neobnovitelných zdrojů na používání obnovitelných zdrojů, jako například získávání sluneční energie pomocí fotovoltaických panelů nebo solárních elektráren. Dále pak větrné a vodní elektrárny mají čím dál větší zastoupení. Mezi obnovitelnými zdroji by se také nemělo opomenout spalování biomasy. Problém obnovitelných zdrojů spočívá zejména v jejich náchylnosti výroby na vnějších podmínkách, mimo jiné klimatických. Proto stále nejvíce elektrické energie je vyrobeno pomocí tepelných, popřípadě jaderných elektráren.

V tepelných elektrárnách se zpravidla přemění pouze kolem 40 % primární energie na energii elektrickou. Zbytek přeměněné energie je tvořen zejména tepelnou energií, kterou ovšem nelze tak snadno odvést ke konečnému odběrateli, tudíž je většinou řazena mezi ztráty.

Zde nachází uplatnění kombinované výroba elektřiny a tepla (dále také „KVET“), kterou lze realizovat například pomocí kogeneračních jednotek. Kogenerační jednotka (dále také „KJ“) je zařízení, které je schopno vyrábět elektrickou energii a zároveň dodávat tepelnou energii, která je v normální výrobě ztracena. Tyto jednotky používají velmi podobné primární zdroje energie jako tepelné elektrárny, jedná se například o zemní plyn, nebo bioplyn. Stejně tak mají podobnou elektrickou účinnost jako tepelné elektrárny, která standardně dosahuje kolem 40 %. Ovšem díky využití tepelné energie jsou schopny dosáhnout celkové účinnosti až 90 %.³

Obrázek 1.1: Princip kogenerace⁴



Kogenerační jednotky nelze ovšem chápat jako obnovitelný zdroj, jelikož používají primární energii, která se neřadí mezi obnovitelné zdroje, jako například zemní plyn. Ovšem v dnešní době představují ekonomicky a environmentálně výhodné a stabilní řešení.

1.2 Výhody a nevýhody kogenerace

Hlavní výhodou použití kogeneračních jednotek je vyšší využití energie primárního paliva, zejména využití tepelné energie, která zpravidla bývá mnohem náročnější na přenos. Místo ztracení tepelné energie, jako je tomu u většiny tepelných elektráren je tato energie využita k vytápění, ohřevu vody nebo jakýmkoli jiným aplikacím daného objektu. Transport tepelné energie je takto podstatně jednodušší,

³BUDÍN, Jan. Kogenerace - princip, technologie a výhody. O energetice [online]. Nové Dvory, 2015 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody/>.

⁴ČEZ ENEGRO, s.r.o. O kogeneraci. Topenářství instalace [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/o-kogeneraci-detail-4039>.

jelikož zdroj je zpravidla velmi blízko spotřebě, což je při využití tepelné energie velkou výhodou. Tímto způsobem je využito daleko větší procento PE a tím i zvýšena celková účinnost. Díky tomu se dosáhne nižší spotřeby paliva a tím nižších emisí oxidu uhličitého a jiných škodlivých látek. Stejně tak tento způsob může být výhodný z hlediska finančních nákladů na palivo.

Při použití KJ se také subjekt stává méně závislým na centralizované elektrické síti, což může zvýšit spolehlivost dodávky.⁵

Nevýhody a omezení kogenerace může spočívat v dopravě primárního paliva do objektu, kde nemusí být tak vyvinutá infrastruktura a doprava takto může být velmi nákladná. Dále pak nutnost navrhnutí takové jednotky, aby pokryla co nejvíce elektrické a tepelné spotřeby daného objektu, jelikož tepelný cyklus je zpravidla uzavřený pouze mezi KJ a daným objektem. Je také potřeba dbát na to, aby výroba tepla nepřesáhla jeho spotřebu a nevznikaly tak zbytečné ztráty.⁶

1.3 Parametry kogeneračních jednotek

Kogenerační jednotky jsou charakterizovány několika parametry, které určují, zda je daná jednotka výhodná pro instalaci v daném objektu.

1.3.1 Energetické parametry

Mezi hlavní dva energetické parametry patří elektrický a tepelný výkon. Elektrický výkon P_E je okamžitá hodnota elektrické energie, kterou je daná KJ schopna dodat.

Tepelný výkon P_T je okamžitá hodnota tepelné energie, kterou lze z KJ využít. Tepelný výkon bývá zpravidla omezujícím parametrem při instalaci kogenerační jednotky pro daný objekt, jelikož chceme aby bylo pokryto co nejvíce tepelné spotřeby objektu, ale naopak aby produkce tepelné energie z jednotky nepřesáhla danou spotřebu, čímž by vznikaly přebytné ztráty tepla, které by nebylo kam odvést. Tento výkon se stejně jako elektrický výkon udává v kW (kilowattech), neboli kW_T (kilowattech tepelných).

Jedním z hlavních štítkových hodnot je jmenovitý elektrický výkon $P_{E,n}$ a jmenovitý tepelný výkon $P_{T,n}$. Jmenovitý výkon je největší trvalý výkon, na který byl daný stroj nadimenzován. Pokud KJ neběží na jmenovitém výkonu, tak to znamená, že není dostatečně využita.

Modul teplárenské výroby σ je podíl elektrického a tepelného výkonu a charakterizuje možnosti kombinované dodávky elektřiny a tepla. Modul se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$\sigma = \frac{P_E}{P_T} = \frac{E}{Q_{UV}}, \quad [-; W, W; Wh, Wh] \quad (1.1)$$

⁵INPOLEX. Cogeneration Systems Advantages and Disadvantages. Inpoxex [online]. Peregian Beach, 2018 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.inpoxex.com.au/information/cogeneration-systems-advantages-and-disadvantages>.

⁶FIEDLER, Jan. Výhody a omezení malých kogeneračních jednotek. TZB-info [online]. 2011 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek>. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek>.

kde:

σ - modul teplárenské výroby [-],

P_E - elektrický výkon [W],

P_T - tepelný výkon [W],

E - vyrobená elektrická energie [Wh],

Q_{UV} - vyrobená tepelná energie [Wh].

Modul teplárenské výroby vyjadřuje podíl výroby elektrické a tepelné energie, což odpovídá podílu elektrického a tepelného výkonu. Také je důležitým parametrem při dimenzování kogenerační jednotky pro daný objekt, kde je cílem optimalizace vzájemné pokrytí spotřeb elektrické a tepelné energie.⁷

1.3.2 Účinnost

Účinnost je jedním z nejdůležitějších parametrů kogenerační jednotky, jelikož vyjadřuje, jaké procento dodané primární energie je přeměněno v energii elektrickou, nebo tepelnou. U kogeneračních jednotek rozlišujeme celkem 3 typy účinností:

- elektrická účinnost,
- tepelná účinnost,
- celková účinnost.

Elektrická účinnost η_E vyjadřuje účinnost přeměny PE na energii elektrickou. Vypočítá se pomocí vztahu:

$$\eta_E = \frac{E}{Q_{pal}} \cdot 100\%, \quad [\%; Wh, Wh] \quad (1.2)$$

kde:

η_E - elektrická účinnost [%],

E - vyrobená elektrická energie [Wh],

Q_{pal} - energie v primárním palivu [Wh].

Elektrická účinnost se vypočítá tudíž jako podíl vyrobené elektrické energie a dodané PE. Dále je potřeba tento podíl vynásobit 100, tak aby hodnota byla v procentech.

Tepelná účinnost η_T vyjadřuje účinnost přeměny PE na energii tepelnou. Vypočítá se ze vztahu:

$$\eta_T = \frac{Q_{UV}}{Q_{pal}} \cdot 100\%, \quad [\%; Wh, Wh] \quad (1.3)$$

kde:

η_T - tepelná účinnost [%],

Q_{UV} - vyrobená tepelná energie [Wh],

Q_{pal} - energie v primárním palivu [Wh].

⁷KARAFIÁT, Josef. Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. MPO [online]. Praha: ORTEP, 2006 [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>, str: 7.

Celková účinnost η_C vyjadřuje PE, které je přeměněna na energii užitou, jako je elektrická a tepelná energie. Vypočítá se jako součet elektrické a tepelné účinnosti ze vztahu:

$$\eta_C = \eta_E + \eta_Q, \quad [\%; \%, \%] \quad (1.4)$$

kde:

η_C - celková účinnost [%],
 η_E - elektrická účinnost [%],
 η_T - tepelná účinnost [%].⁸

1.3.3 Závislost elektrické účinnosti na zatížení

Závislost elektrické účinnosti na zatížení se dá zjistit pomocí závislosti spotřeby primárního paliva v závislosti na výkonu, čemuž se říká spotřební charakteristika. Tato charakteristika se dá vyjádřit jako funkce elektrického výkonu a doby provozu: $Q_{pal} = f(P_E, T)$. Dále vyrobená elektrická energie se dá zjistit ze vztahu:

$$E = \int_0^T P_E dt, \quad [Wh; h, W] \quad (1.5)$$

kde:

E – vyrobená elektrická energie [Wh],
 T - doba provozu [h],
 P_E - elektrický výkon [W].

Pokud P_E je konstantní a nezávislé pro čas t , tak se dá vztah zjednodušit na:

$$E = P_E T, \quad [Wh; W, h] \quad (1.6)$$

kde:

E – vyrobená elektrická energie [Wh],
 T - doba provozu [h],
 P_E - elektrický výkon [W].

Z toho poté lze vyjádřit vztah pro elektrickou účinnost:

$$\eta_E = \frac{E}{Q_{pal}} = \frac{P_E T}{f(P_E, T)}, \quad [-] \quad (1.7)$$

η_E - elektrická účinnost [-],
 E – vyrobená elektrická energie [Wh],
 Q_{pal} – energie v primárním palivu [Wh],
 T - doba provozu [h],
 P_E - elektrický výkon [W],
 $f(P_E, T)$ - energie v primárním palivu [Wh].

Elektrická účinnost zpravidla není závislá na době provozu T , tudíž vztah $Q_{pal} = f(P_E, T)$, lze dále upravit na vztah: $Q_{pal} = T \cdot g(P_E)$. Dosazením dostaneme vztah:

$$\eta_E(P_E) = \frac{P_E T}{f(P_E, T)} = \frac{P_E T}{T \cdot g(P_E)} = \frac{P_E}{g(P_E)}, \quad [-] \quad (1.8)$$

⁸DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 43.

η_E - elektrická účinnost [-],
 T - doba provozu [h],
 P_E - elektrický výkon [W],
 $f(P_E, T)$ - energie v primárním palivu [Wh],
 $g(P_E)$ - příkon primárního paliva [W].

Pro další kroky budeme považovat funkci účinnosti pouze na intervalu od minimálního elektrického výkonu, neboli nulového výkonu, a jmenovitého výkonu, který je kladný a větší než nula. V reálu je funkce účinnosti z počátku prudce rostoucí, dokud účinnost nedosáhne maxima, poté funkce účinnosti mírně klesá. V dalších výpočtech provedeme analýzu, kdy tento extrém maximální účinnosti nastane a jak bude vypadat funkce příkonu primárního paliva $g(P_E)$. Tudíž provedeme derivaci funkce účinnosti v závislosti na elektrické výkonu, kterou položíme rovnu nule:

$$\frac{d\eta_E(P_E)}{dP_E} = \frac{1}{g(P_E)} - \frac{P_E \cdot g'(P_E)}{g^2(P_E)} = 0.$$

Nyní vyřešíme tuto diferenciální rovnici pro funkci $g(P_E)$, čímž zjistíme podezřelý bod z extrému funkce účinnosti. Část rovnice si převedeme na druhou stranu, čímž dostaneme:

$$\frac{1}{g(P_E)} = \frac{P_E \cdot g'(P_E)}{g^2(P_E)}.$$

Dále rovnici vynásobíme funkcí $g^2(P_E)$, čímž dostaneme:

$$g(P_E) = P_E \cdot g'(P_E).$$

V dalším kroku nahradíme derivaci rozepsaným diferenciálem:

$$g(P_E) = P_E \frac{dg(P_E)}{dP_E}.$$

Jedná se o rovnici se separovatelnými proměnnými, tudíž převedeme proměnou P_E na stranu levou a proměnou $g(P_E)$ na stranu pravou a obě strany rovnice zintegrujeme:

$$\int \frac{1}{P_E} dP_E = \int \frac{1}{g(P_E)} dg(P_E).$$

Spočítáme integrály a dostaneme:

$$\ln(P_E) + c = \ln(g(P_E)) + d, \text{ kde } : c, d \in \mathbb{R}.$$

Konstanty c a d převedeme na pravou stranu, a nahradíme je konstantou k . Dále použijeme exponenciální funkci na obou stranách:

$$e^{\ln(P_E)} = e^{\ln(g(P_E))+k}.$$

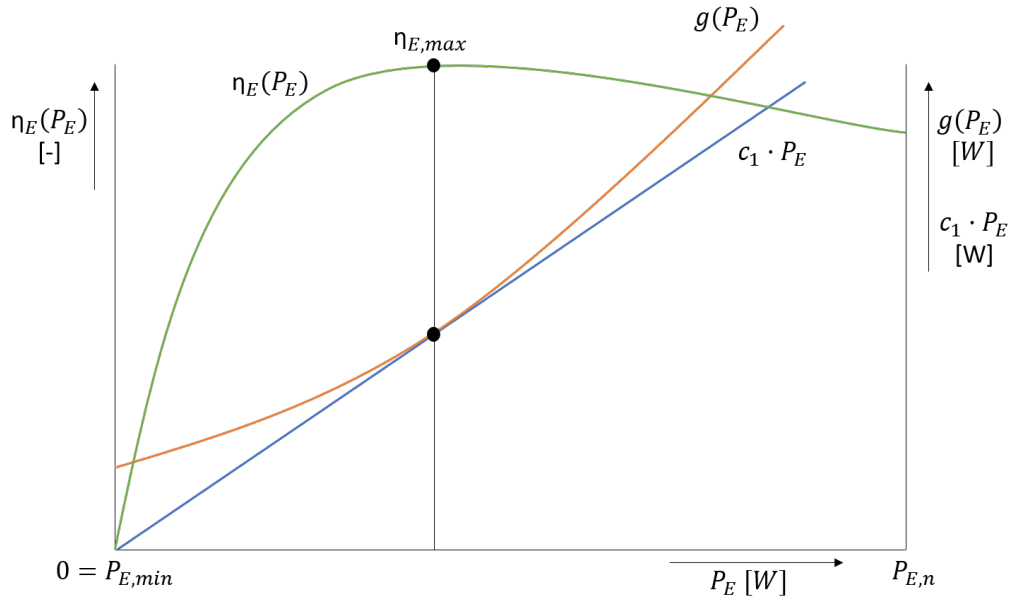
Nyní rozdělíme konstantu k na člen e^k , který je stále konstanta, kterou nazveme c_1 a pro kterou platí, že: $c_1 > 0$, jelikož exponenciální funkce je vždy kladná. Dále víme, že logaritmus a exponenciála jsou navzájem inverzní funkce, tudíž se pouze zkrátí a zbude:

$$g(P_E) = c_1 \cdot P_E, \quad c_1 > 0. \quad [W] \quad (1.9)$$

c_1 je zde reálná konstanta větší než nula. Z toho vyplývá, že pokud funkce $g(P_E)$ bude lineární rostoucí se středem v počátku, tak derivace funkce účinnosti bude

nulová a tento bod je tedy podezřelý z extrému. Tento proces je i očividný, pokud tuto lineární funkci dosadíme do rovnice (1.8), tak se nám elektrické výkony pokrátí a zůstane pouze konstanta, po níž je derivace nulová. Dále pokud uděláme předpoklad, že funkce $g(P_E)$ je taková, že derivace funkce účinnosti nalevo od podezřelého bodu je kladná, tudíž funkce účinnosti je rostoucí a napravo záporná, tudíž funkce účinnosti klesající, tak v tomto podezřelém bodě dosahuje účinnost maximální hodnoty.

Obrázek 1.2: Závislost elektrické účinnosti a příkonu primárního paliva na elektrickém výkonu⁹



Obrázek 1.2 představuje příklad závislosti elektrické účinnosti na elektrickém výkonu. Zde účinnost nejprve roste v závislosti na výkonu. Poté dosáhne maxima v bodě, kde derivace funkce g je tečna, která protíná střed souřadné soustavy. Dále pak účinnost mírně klesá.¹⁰ Standardně jsou točivé stroje dimenzovány, tak aby bod maximální účinnosti byl při zatížení rovno 80-90 % jmenovitého zatížení.

1.4 Energetický přínos kogenerace

Energetický přínos kogenerace můžeme vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$q_u = \frac{Q_u}{Q} = \left(\frac{1}{\eta_{výt}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) + e \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right), \quad [-; Wh, Wh; -, -, -, -, -] \quad (1.10)$$

kde:

q_u - relativní úspora tepla [-],

Q_u - úspora tepla [Wh],

Q - dodané teplo [Wh],

⁹DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 42.

¹⁰DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 42.

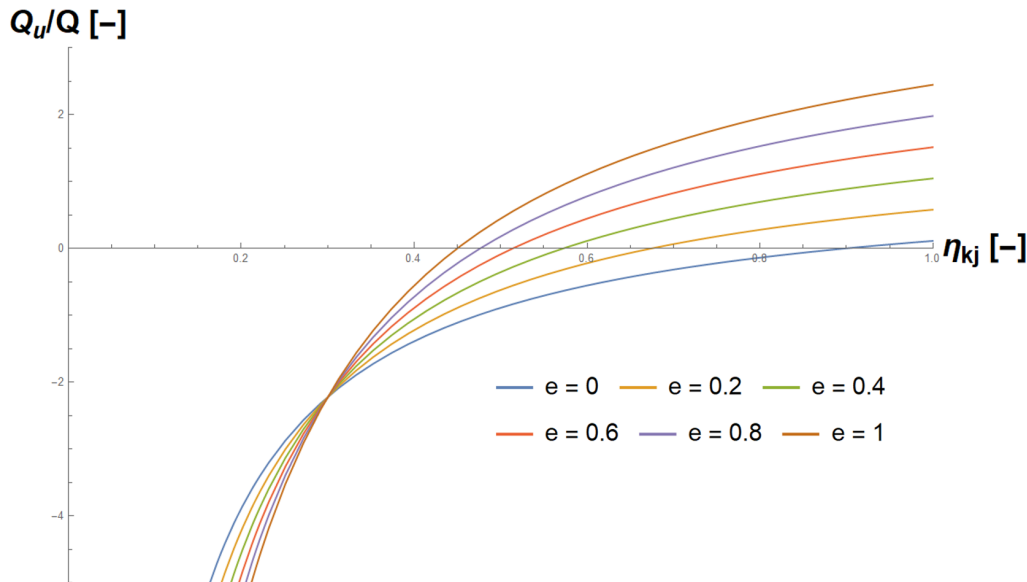
$\eta_{výt}$ – účinnost výtopny při oddělené dodávce elektřiny a tepla [-],
 η_{el} – účinnost elektrárny při oddělené dodávce elektřiny a tepla [-],
 η_{kj} – celková účinnost KJ [-],
 e – teplotní modul [-].¹¹

Podíl úspory tepla a dodaného tepla vyjadřuje relativní úsporu energie na jednotku energie. Teplotní modul e je podíl vyrobené elektrické energie E a tepla Q . Závisí na konstrukčním provedení KJ. Vypočítá se ze vztahu:

$$e = \frac{E}{Q}.^{12} \quad [-; Wh, Wh] \quad (1.11)$$

Pro větší analýzu této úspory vykreslíme několik křivek této funkce v závislosti na účinnosti kogenerační jednotky, při ostatních parametrech konstantních, které zvolíme tak, že: $\eta_{výt} = 0.3$ (30 %), $\eta_{el} = 0.9$ (90 %).

Obrázek 1.3: Závislost relativní úspory paliva na účinnosti KJ, $\eta_{el} = 0,3$, $\eta_{vyt} = 0,9$



Na obrázku 1.3 je vidět, že kladná úspora paliva dosahuje od jisté účinnosti KJ, v závislosti na teplotním modulu e . Zde, čímž vyšší je teplotní modul, tím nižší účinnost KJ je zapotřebí, aby dosáhla kladné úspory. Dále lze odvodit vzorec, který nám řekne, jakou minimální účinnost kogenerační jednotky je potřebná pro kladnou energetickou úsporu, jinak řečeno, kdy křivka protíná osu x ($y = 0$). Vytvořme tedy rovnici, tak, že položíme rovnici (1.10) rovnu nule:

$$\left(\frac{1}{\eta_{výt}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) + e \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) = 0,$$

Tuto rovnici vyřešíme pro η_{kj} . Pomocí algebraických úprav se dostaneme na vztah:

$$\eta_{kj} = \frac{1 + e}{\frac{1}{\eta_{výt}} + \frac{e}{\eta_{el}}}. \quad [-; -, -, -, -] \quad (1.12)$$

¹¹KRBK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky zřizování a provoz. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-80-7328-151-9., str: 9.

¹²KRBK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky zřizování a provoz. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-80-7328-151-9., str: 8.

Vztah (1.12) nám říká, jaká minimální účinnost kogenerační jednotky je potřeba pro dosažení kladné úspory energie.

Na obrázku 1.3, je dále bod, kde se všechny křivky, lišící se teplotním modulem, protínají. V tomto bodě také nastává změna výhodnosti podle teplotního modulu. Například varianta, kde $e = 1$, což znamená, že se vyrobí stejné množství elektřiny jako tepla, je za tímto bodem nejvýhodnější, naopak před tímto bodem představuje největší ztrátu. Z rovnice (1.10) lze analyzovat, kde se tento bod nachází. To se provede tak, že se dají do rovnosti dvě varianty s různými teplotními moduly e_1 a e_2 a vypočte se, pro jaké hodnoty účinnosti KJ se jejich hodnoty rovnají:

$$\left(\frac{1}{\eta_{vyt}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) + e_1 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) = \left(\frac{1}{\eta_{vyt}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right) + e_2 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{kj}} \right).$$

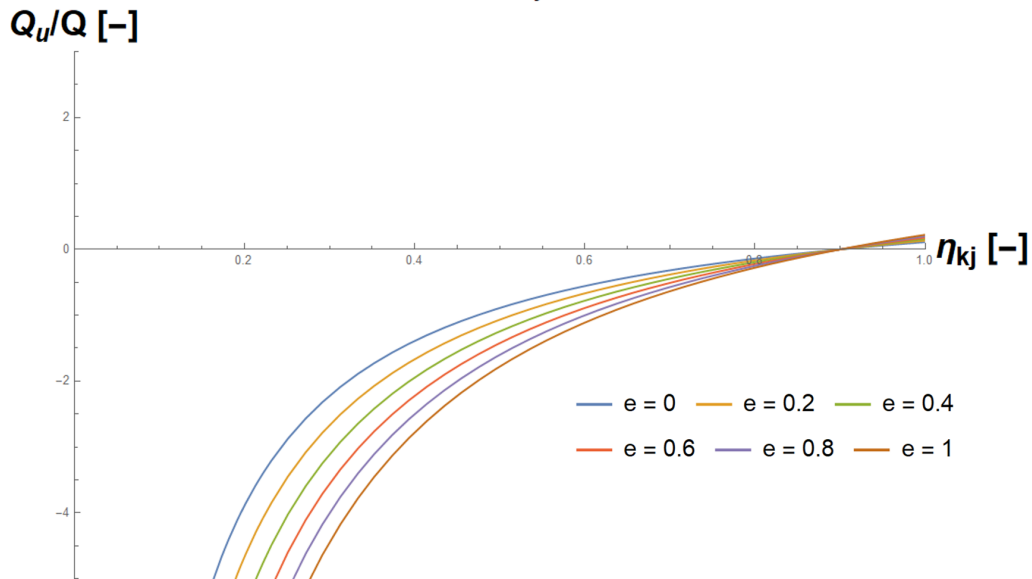
Po úpravách se dostaneme pro vztah:

$$\eta_{kj} = \eta_{el}. \quad [-; -] \quad (1.13)$$

Toto znamená, že v bodě, kde se účinnost KJ rovná účinnosti elektrárny, tak zde nastává bod, kdy se výhodnost variant převrátí.

Pokud bychom chtěli zjistit, kdy tento bod bude mít nulovou hodnotu, tak stačí rovnici (1.13) dosadit do rovnice (1.10), a opět položit rovno nule, což nakonec vyjde, že toto nastane, pokud $\eta_{vyt} = \eta_{el}$.

Obrázek 1.4: Závislost relativní úspory paliva na účinnosti KJ, $\eta_{el} = 0,9$, $\eta_{vyt} = 0,9$



Z obrázku 1.4 je případ, kdy $\eta_{vyt} = \eta_{el} = 0.9$. Jedná se spíše o teoretický případ, který by znamená, že varianty, které by měly největší ztráty před bodem účinnosti KJ rovným 0.9, by ihned za překlopením tohoto bodu přešly v úspory se současným prohozením výhodností variant.

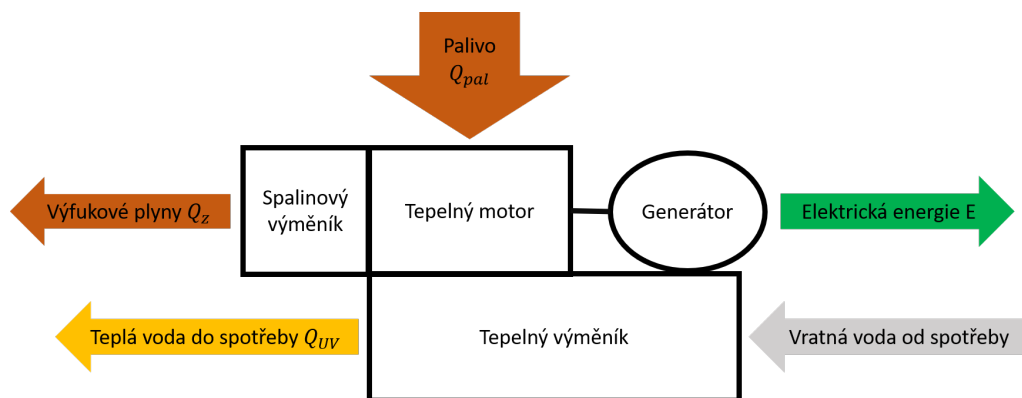
1.5 Konstrukční provedení kogenerační jednotky

Výrobci kogeneračních jednotek je dnes mnoho. Tím také vznikají stále nové technologie jejich výroby. Stále ovšem konstrukční provedení kogeneračních jednotek se celkově moc neliší. V zásadě rozeznáváme dva typy konstrukčního provedení kogenerační jednotky, které jsou:

1. modulové uspořádání,
2. stavebnicové uspořádání.

Modulové uspořádání se používá u jednotek menších a středních výkonů, kde všechny jednotky jsou umístěny v jednom modulu. Mezi hlavní jednotku patří tepelný motor společně spojený na hřídeli s elektrickým generátorem. Tepelný motor zde spotřebovává primární palivo v podobě například zemního plynu a dodanou energii převádí na energii mechanickou, která roztáčí generátor. Elektrický generátor (dále také EG) bývá zpravidla synchronní stroj, nebo stroj asynchronní pro menší výkony, který převádí mechanickou energii vytvořenou tepelným motorem na energii elektrickou. Tímto způsobem je zařízena dodávka elektrické energie. Dále poté modul obsahuje tepelný výměník, který bere vratnou vodu od spotřeby, které dodá tepelnou elektrickou energii vytvořenou z tepelných ztrát tepelného motoru a elektrického generátoru. Poté je tato voda dodána do spotřeby. Mezi další komponenty modulu patří spalínový výměník, který přijímá spaliny z tepelného motoru a zajišťuje jejich výfuk. Součástí modulu může být také řídicí jednotka.¹³

Obrázek 1.5: Modulové uspořádání kogenerační jednotky¹⁴



Stavebnicové uspořádání je uspořádání několika modulů kogeneračních jednotek pracujících společně. Toto uspořádání se tady používá spíše pro jednotky větších výkonů, které zásobují větší objekty s velkou spotřebou energie. Při stavebnicovém uspořádání již je potřeba počítat s většími stavebními úpravami a tím i s možnými většími celkovými investičními výdaji.¹⁵

1.5.1 Elektrický generátor

Elektrický generátor patří mezi nejzásadnější jednotku kogenerační jednotky, jelikož jsou zodpovědný za výrobu elektrické energie. V zásadě se používá buď asynchronní stroj, nebo synchronní stroj. Asynchronní stroje se používají pouze pro jednotky malých výkonů. Nejčastěji se ale používají synchronní stroje.

¹³RAEN, spol. s r.o. Návrh a provoz kogeneračních jednotek. MPO [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/008153.pdf>.

¹⁴DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 31.

¹⁵DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 30.

Stator synchronního stroje je složen z izolovaných plechů, které obsahují drážky, v nichž je umístěno nejčastěji trojfázové vinutí. Rotor může být buď tvořen z permanentních magnetů, které zajišťují vznik magnetického pole, nebo je tvořen z oceli s vinutím, kde probíhá stejnosměrný proud, který vytváří magnetické pole. Jelikož proud na rotoru není střídavý, tak nemusí být rotor tvořen z plechů, protože zde nevznikají ztráty vířivými proudy.

Podle konstrukce rotoru se synchronní stroje rozdělují na stroje s hladkým rotorem (turboalternátory) a stroje s vyniklými póly (hydroalternátory).

Turboalternátory se vyznačují malým průměrem rotoru, který zpravidla nebývá větší než 1.2 m, naopak mají velkou délku, která je až 6krát větší než průměr. Turboalternátory se nejčastěji vyrábějí dvoupólové, někdy čtyř a šestipólové. Rotor dosahuje zpravidla vysokých otáček, aby se dosáhlo frekvence 50 Hz.

Hydroalternátory jsou čtyř, šesti a více pólové. Rotor obsahuje tzv. vyniklé póly, do nichž je umístěno budící vinutí. Hydroalternátory se nejčastěji používají ve vodních elektrárnách. Jejich průměr bývá větší než u turboalternátorů, naopak délka je menší. Hydroalternátory dosahují menších otáček.¹⁶

1.6 Termodynamika

Pro porozumění základních principů funkce primárních jednotek v KJ je důležité popsat některé termodynamické principy a zákony, které tyto primární jednotky využívají.

1.6.1 První zákon termodynamiky

První zákon termodynamiky popisuje princip zachování energie v soustavě. Tento zákon říká, že změna vnitřní energie v soustavě je rovna dodanému teplu do systému mínus práce vykonaná systémem a lze ho vyjádřit vztahem:

$$dU = dQ - dW, \quad [J; J, J] \quad (1.14)$$

kde:

dU - změna vnitřní energie systému,

dQ - dodané teplo do systému,

dW - práce vykonaná systémem.

dW je kladná pokud práce pokud systém koná práce a záporná, pokud je práce konaná na systému. dW se dále dá vyjádřit jako:

$$dW = p dV, \quad [J; Nm^{-2}, m^3] \quad (1.15)$$

kde:

p - tlak v systému,

dV - změna objemu systému.

Tepelné děje dále rozdělujeme na hlavní 2 jenž jsou:

1. Izobarický děj, kde tlak je konstantní (p = konst.).

¹⁶VOŽENÍLEK, Petr a Vladimír NOVOTNÝ. Elektromechanické měniče. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7., str: 101 - 104.

2. Adiabatický děj, kde neprobíhá tepelná výměna s okolím ($dQ = 0$)¹⁷.

1.6.2 Druhý zákon termodynamiky

Druhý zákon termodynamiky definuje veličinu zvanou entropie s , která je definovaná vztahem:

$$\Delta s = s_f - s_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}, \quad [Jkg^{-1}K^{-1}; Jkg^{-1}K^{-1}, Jkg^{-1}K^{-1}, Jkg^{-1}, K] \quad (1.16)$$

kde:

Δs - změna entropie,

i - počáteční stav děje (initial state),

f - koncový stav děje (final state),

s_i - entropie v počátečním stavu,

s_f - entropie v konečném stavu,

dQ - změna tepla,

T - teplota systému.¹⁸

Entropie se někdy nazývá jako míra neuspořádanosti. Její vzrůst probíhá samovolně, ale naopak pro její pokles je potřeba dodat energii.

1.7 Primární jednotky

Primární jednotka je nejdůležitější částí celé KJ, jelikož zde probíhá transformace primární energie na energii mechanickou, která se dále pomocí EG transformuje na energii elektrickou. Primární jednotky se zpravidla dělí na primární jednotky s přímou transformací, s vnitřním spalováním a primární jednotky s vnějším spalováním.

Mezi primární jednotky s přímou transformací patří zejména palivové články, které se dále dělí do několika skupin podle použitého elektrolytu, typu iontové vodivosti a podle pracovní teploty. Tyto palivové články přeměňují primární energii přímo na energii elektrickou. Zde je nejčastějším zdrojem primární energie vodík.¹⁹

U primární jednotky s vnitřním spalováním dochází k hoření paliva většinou ve válci motoru. Mezi primární jednotky s vnitřním spalováním patří spalovací motory, které se dále dělí na vznětové a zážehové.

U primárních jednotek s vnějším spalováním dochází ke spalování paliva mimo primární jednotku. Do této skupiny patří parní turbíny, kondenzační turbíny, protitlaké turbíny, organický Rankinův cyklus (dále také „ORC“), mikroturbíny, paroplynový cyklus a Stirlingův motor.²⁰

¹⁷HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. Fundamentals of Physics Extended, 10th edition. Toronto: John Wiley, 2014. ISBN 1118230612., str: 528.

¹⁸HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. Fundamentals of Physics Extended, 10th edition. Toronto: John Wiley, 2014. ISBN 1118230612., str: 585.

¹⁹DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 113.

²⁰POVÝŠIL, Roman. Mikrokogenerace - efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie. MPO [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>.

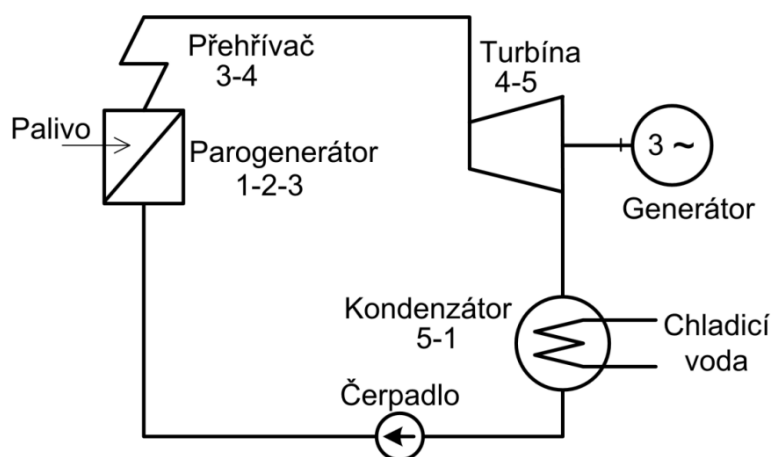
1.7.1 Parní turbíny

Parní turbíny fungují na principu přeměny tepelné energie na energii mechanickou. Při parním cyklu v elektrárně se ohřeje vodní pára, která poté s vysokým tlakem putuje do turbíny, která pohání EG. V turbíně probíhá expanze páry a jedná se o adiabatický děj, který je charakterizován tím, že nedochází k výměně tepla s okolím, ale dochází k poklesu tlaku a konání mechanické práce.²¹

1.7.2 Organický Rankinův cyklus

Organický Rankinův cyklus je jedním z nejznámějších tepelných cyklu, který se hojně využívá v tepelných elektrárnách. Cyklus se skládá z čerpadla, parogenerátoru, přehřívače, turbíny a kondenzátoru.

Obrázek 1.6: Schéma organického Rankinova cyklu²²



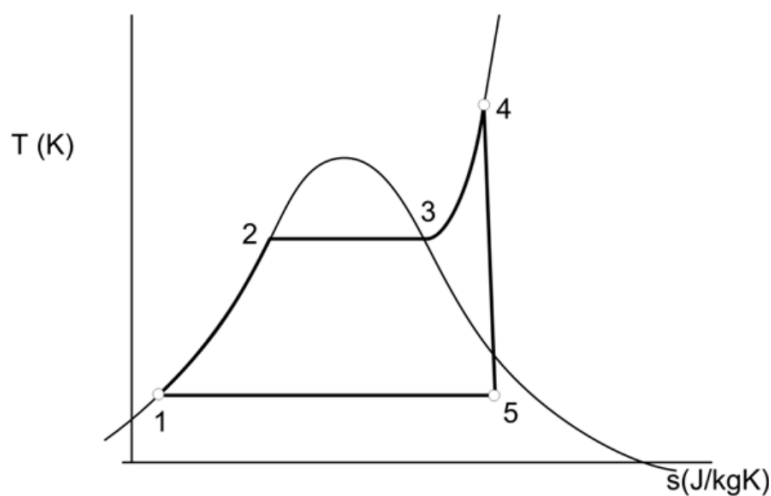
Na obrázku 1.6 je zobrazen ORC v Ts diagramu vody, kde cyklus začíná načerpáním zkondenzované vody čerpadlem na daný tlak. Toto značí bod 1. Poté mezi bodem 1, 2 a 3 se dodává teplo do oběhu a probíhá izobarický děj (tlak je konstantní), kde se voda přeměňuje v páru. Následně mezi bodem 3 a 4 se tato pára přehřeje v přehřívači a vznikne tzv. sytá pára. Tento děj je opět izobarický. V bodě 4 poté pára putuje do turbíny a probíhá adiabatická expanze do bodu 5. Tento děj vytváří mechanickou energii, která následně pohání EG. Velikost vytvořené mechanické energie je dána rozdílem entalpii mezi bodem 4 a bodem 5. Poté mezi bodem 5 a 1 pára prochází kondenzátorem, kde proudí chladicí médium a pára kondenzuje na vodu, která je poté opět čerpána čerpadlem a cyklus se opakuje²³.

²¹KORNIA, Libor. Parní turbíny. ENERGETICKÝ ÚSTAV FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Kudela/files/2019_Parn%C3%AD%20turb%C3%ADny_Skripta_Kornia.pdf, str: 32.

²²MOLEK, Tomáš. O kogeneraci. O energetice [online]. Nové Dvory, 2015 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/uhelne-kondenzacni-elektrarny>, str:

²³QUOILIN, Sylvain. An introduction to thermodynamics applied to Organic Rankine Cycles. Thermodynamics Laboratory Université de Liège [online]. Allée de la Découverte, 2008 [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: http://www.labohtap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/ORC_thermodynamics_SQ081126.pdf.

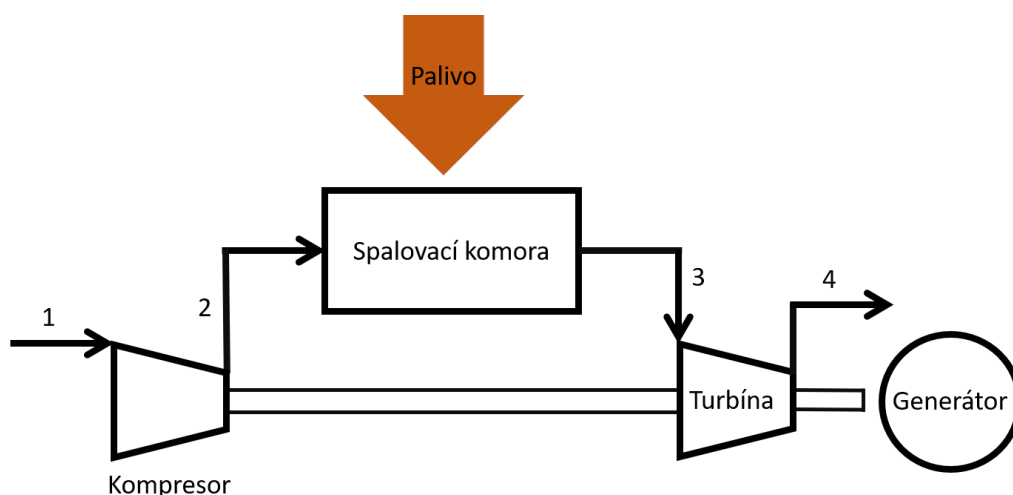
Obrázek 1.7: Ts diagram vody pro organický Rankinův cyklus²⁴



1.7.3 Mikroturbíny

Mikroturbíny jsou tvořeny z několika základních částí, jež je kompresor, spalovací komora a samotná turbína. Na obrázku 1.8 je znázorněno zjednodušené schéma mikroturbíny, jedná se o Braytonův otevřený cyklus, kde v kompresoru probíhá stlačování vzduchu. Poté tento stlačený vzduch probíhá spalovací komorou, kde přijme teplotu od přivedeného primárního paliva a dojde k jeho ohřátí. Poté je dopraven do turbíny, kde dojde k expanzi a tím se daná turbína pohání a roztáčí EG. Nakonec je vzduch vypuštěn ven.²⁵

Obrázek 1.8: Schéma mikroturbíny²⁶



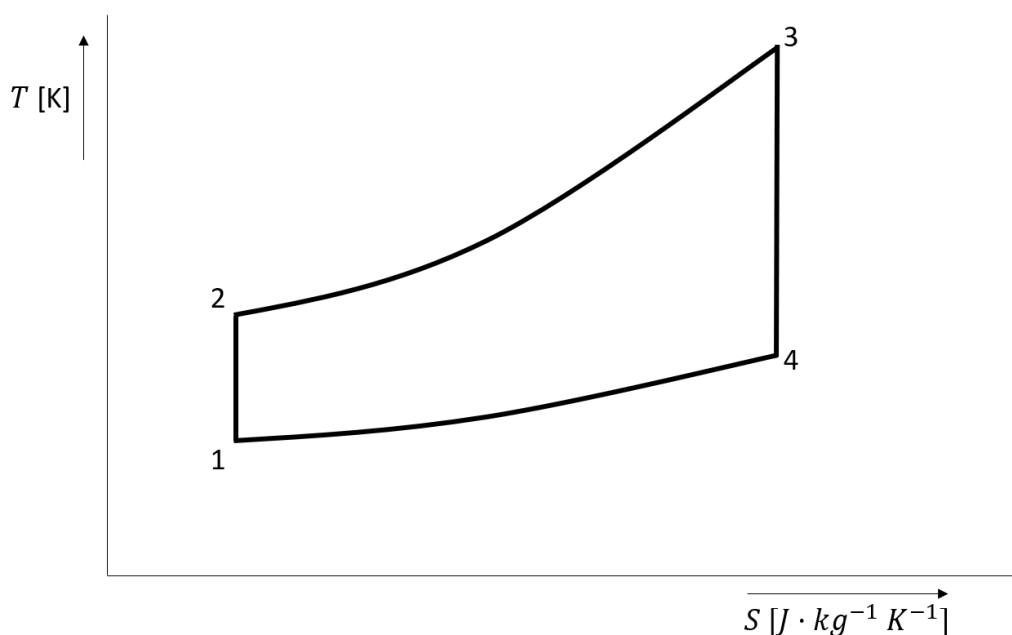
²⁴MOLEK, Tomáš. O kogeneraci. O energetice [online]. Nové Dvory, 2015 [cit. 2021-11-15]., str:

²⁵NASCIMENTO, Marco, a kolektiv. Micro Gas Turbine Engine. IntechOpen [online]. London, 2013 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/45114>.

²⁶NASCIMENTO, Marco, a kolektiv. Micro Gas Turbine Engine. IntechOpen [online]. London, 2013 [cit. 2021-10-09].,

Na obrázku 1.8 je ukázka Braytonova otevřeného cyklu, který probíhá v turbíně. Cyklus začíná v bodě 1, kde je kompresorem adiabaticky (neprobíhá tepelná výměna s okolím) stlačen a tím se dostáváme na vyšší tlak, neboli vyšší izobaru do bodu 2. Poté ve spalovací komoře se vzduch izobaricky (tlak je konstantní) ohřeje, čímž se zvýší jeho entalpie. Tímto způsobem se dostaneme z bodu 2 do bodu 3. Z bodu 3 do bodu 4 probíhá adiabatická expanze v turbíně, kde se tepelná energie přeměňuje na energii mechanickou, která pohání turbína a následně EG. Výsledná mechanická energie je dána rozdílem entalpií v bodě 3 a bodě 4. Nakonec je vzduch vyfouknut a stav se vrací do bodu 1, kde se děj opakuje.²⁷

Obrázek 1.9: Braytonův otevřený cyklus



1.7.4 Stirlingův motor

Stirlingův motor (dále také SM) je tepelný motor, který používá Stirlingův cyklus, při kterém plyny uvnitř motoru neopustí daný motor, jelikož neexistuje zde výfukový ventil pro odvod vysokotlakých plynů. Z tohoto důvodu bývá SM velmi tichý stroj.

V základu SM obsahuje dva válce, kde první válec je ohříván externím zdrojem tepla a druhý je ochlazován. Plynové komory obou těchto válců jsou spojeny mechanickou vazbou, zde písty. Tento cyklus pracuje na principu, kdy ohříváný plyn má tendenci zvětšovat svůj objem a naopak chlazený plyn se smršťovat. Tímto způsobem uvnitř vyhříváného válce dochází k nárůstu tlaku, což nutí píst pohybovat se dolů. Toto tlačí horký plyn do ochlazovaného válce, kde se nadále ochladí a tím klesne jeho tlak. Tento ochlazený plyn má dále tendenci se smršťovat a posune opět píst nahoru. Poté přejde ochlazený plyn do vyhříváného válce, kde dojde opět k jeho ohřátí a proces se opakuje.²⁸

²⁷MEYERS, Robert A. Encyclopedia of Physical Science and Technology. California, USA: Elsevier Science, 2001. ISBN 978-0-12-227410-7. 978-0-12-227410-7, str: 33.

²⁸NICE, Karim. How Stirling Engines Work. HowStuffWorks [online]. Atlanta, 2021 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/stirling-engine.html>.

1.8 Paliva pro kogenerační jednotky

Paliva pro kogenerační jednotky se dělí zejména podle fyzikálních vlastností, původu vzniku a energetického obsahu. Nebo také podle vlivu na životní prostředí. Paliva pro KJ se zpravidla rozdělují podle:

1. typu paliva,
2. druhu paliva.

Rozdělení typu paliva bere v úvahu zejména původ daného paliva. Podle tohoto rozdělení dostaneme tyto typy:

1. fosilní paliva,
2. biopaliva,
3. alternativní paliva.

Fosilní paliva mají vysoký energetický obsah, řadí se mezi ně například uhlí, ropa, zemní plyn. Biopaliva jsou rostlinného původu vznikající z biomasy. Nemají tak vysoký energetický obsah jako fosilní paliva, jelikož obsahují v sobě značné množství vody. Jako poslední skupina jsou alternativní paliva, což jsou například vodík a jaderné palivo.

Rozdělení podle druhu paliva je podle fyzikálních vlastností, čímž dostaneme tyto skupiny:

1. tuhá,
2. kapalná,
3. plynná.

Tuhá paliva mají malý energetický obsah na jednotku objemu. Obsahují také velké množství znečišťujících látek. Mezi tuhá paliva patří:

1. černé uhlí,
2. hnědé uhlí,
3. biomasa.

Kapalná paliva mají vysoký energetický obsah, a při jejich využívání nevzniká tolik škodlivých látek jako u tuhých paliv. Nevýhoda kapalných paliv může spočívat v jejich manipulaci, jelikož mnoho z nich jsou tzv. nebezpečné hořlaviny, které mají nízkou teplotu vznícení. Mezi kapalná paliva můžeme zařadit plynový olej, střední olej, těžký topný plyn, methanol a ethanol.

Plynná paliva vytvářejí málo emisí při jejich použití. Mezi plynná paliva řadíme zemní plyn, propan či butan, koksárenský plyn.²⁹

²⁹DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str: 77.

Kapitola 2

Postup návrhu kogenerační jednotky

2.1 Základní popis algoritmu

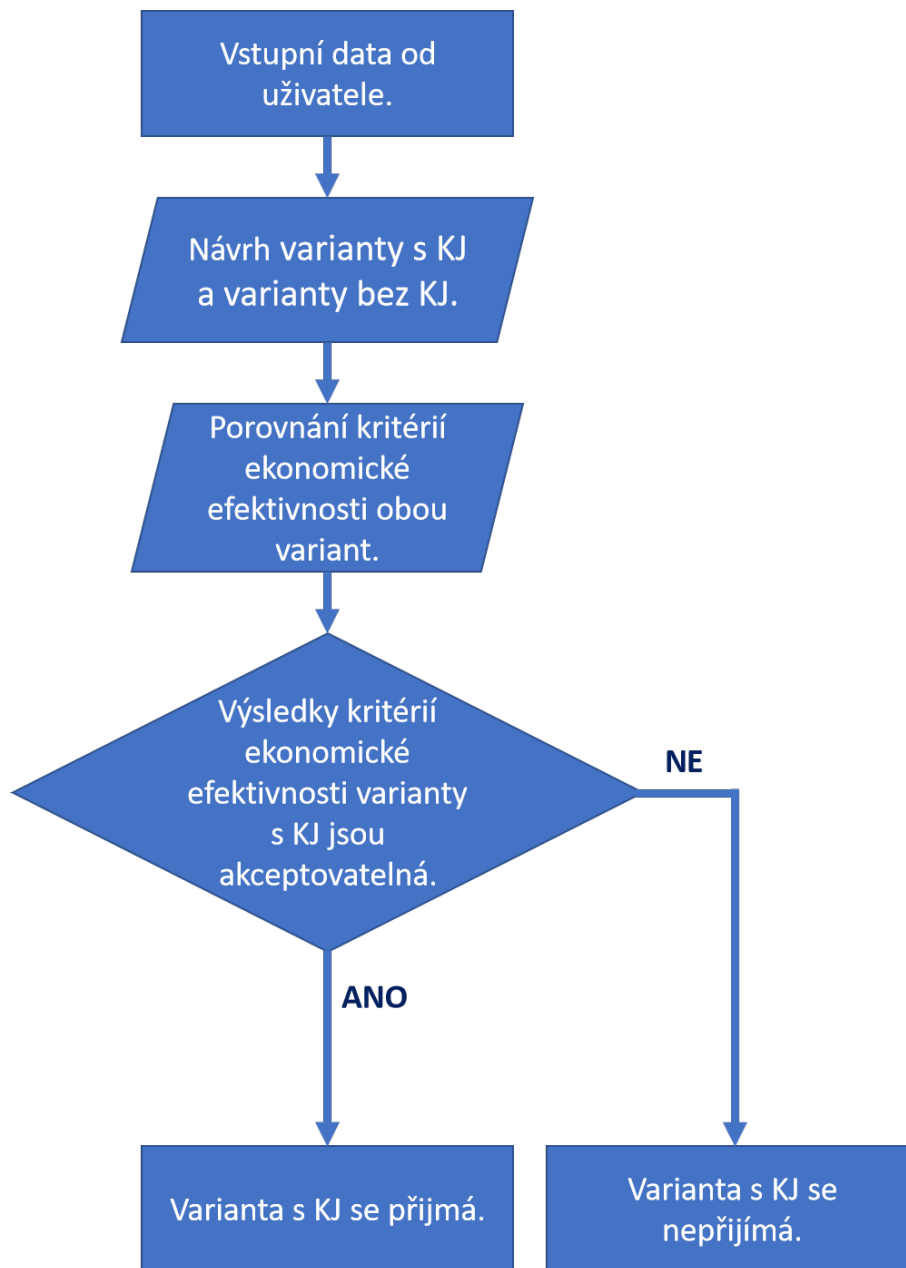
V této kapitole bude detailně popsán algoritmus, pomocí něhož lze navrhnout kogenerační jednotku pro konkrétní objekt na základě vstupních dat, které si daný uživatel sám zvolí. Algoritmus bude také implementován v jazyce Python pro praktické použití. Výsledná implementace algoritmu bude následně aplikována pro návrh konkrétní kogenerační jednotky pro průmyslový areál v kapitole 3 a 4.

Obrázek 2.1 velmi zjednodušeně ukazuje algoritmus, podle kterého se provede výsledný návrh KJ. Celý proces začíná od získání vstupních dat od uživatele. Vstupním datům a jejich podrobnému popisu bude věnována celá podkapitola 2.2. Pro návrh KJ je to jedna z nejdůležitějších částí a je potřeba, aby vstupní data co nejpřesněji popisovala realitu. Pokud by vstupní data neodpovídala realitě, tak návrh kogenerační jednotky a odhadované ekonomické zhodnocení budou oproti reálnému použití velice zkresleny.

Po získání vstupních dat se provede návrh dvou variant. První varianta bude varianta s KJ. V této variantě bude figurovat KJ jako zdroj elektrické energie a tepla. Nepokryté elektrické zatížení bude nakoupeno ze sítě a nepokrytá spotřeba tepla bude pokryta pomocí plynových kotlů spalující zemní plyn. Tato varianta je pro tuto práci klíčová a jejímu návrhu bude věnována podstatná část této práce. Dále bude tato varianta označována jako varianta A. Ovšem při následném technickém a ekonomickém posuzování je potřeba mít protivariantu, kde KJ nebude figurovat, a která bude sloužit jako opačná varianta proč nekoupit KJ. V této variantě bude veškeré tepelné zatížení pokryto plynovými kotli spalující zemní plyn a veškeré elektrické zatížení pokryto nákupem elektrické energie ze sítě. Dále bude tato varianta označována jako varianta B.

Nakonec budou obě varianty ekonomicky zhodnoceny některými známými kritérii ekonomické efektivity, jako je například čistá současná hodnota (dále také „NPV“), nebo vnitřní výnosové procento (dále také „IRR“). Na základě výsledků kritérií ekonomické efektivity a daným podmínkám bude doporučeno, zda varianta s KJ (varianta A) bude vhodná k realizaci, a nákup KJ je ekonomicky výhodný. Nebo zda tato varianta není vhodná k realizaci a nákup KJ není ekonomicky výhodný. Na základě těchto výsledků konečný uživatel rozhodne, zda se přikloní k realizaci nákupu KJ, nebo zda nikoli.

Obrázek 2.1: Algoritmus návrhu kogenerační jednotky



2.2 Vstupní data

Vstupní data algoritmu jsou jedna z nejzásadnějších věcí pro správný návrh KJ. Čím jsou data přesnější, tím se daný model více blíží realitě. Tato data jsou zadána uživatelem. Vstupní data jsou členěna celkem do 4 bloků.:

1. seznam kogeneračních jednotek,
2. seznam plynových kotlů,
3. parametry objektu,
4. ekonomické parametry.

Bloky seznam kogeneračních jednotek, seznam plynových kotlů a parametry objektu jsou použity při technickém návrhu variant. Blok ekonomické parametry je následně použit při ekonomickém zhodnocení již navrhnutých variant.

2.2.1 Seznam kogeneračních jednotek

První část vstupních data je seznam kogeneračních jednotek. V této části dat se nachází seznam kogeneračních jednotek: $\{KJ_1, KJ_2, \dots, KJ_n\}$, kde n je celkový počet kogeneračních jednotek v seznamu. Z tohoto seznamu bude následně vybírána optimální KJ pro daný objekt. Primárním palivem pro každou kogenerační jednotu je zemní plyn. Mezi parametry každé KJ patří:

1. název jednotky,
2. jmenovitý elektrický výkon - $P_{E,n}$ [kW],
3. jmenovitý tepelný výkon - $P_{T,n}$ [kW],
4. elektrická účinnost - η_E [-],
5. tepelná účinnost - η_T [-],
6. cena jednotky (bez DPH) - N_c [Kč],
7. výdaje na připojení (bez DPH) - N_{pr} [Kč],
8. servisní výdaje na kWh vyrobené tepelné energie (bez DPH) - n_{sr} [Kč·kWh⁻¹],
9. doba do generální opravy T_g [hod.],
10. cena generální opravy N_g [Kč].

Účinnosti kogeneračních jednotek jsou při jmenovitém zatížení. Doba do generální opravy je udávána v hodinách provozu KJ. Dále jsou v tomto bloku parametry, které jsou zadány uživatelem. Mezi tyto parametry patří:

1. doba denního provozu - T_d [hod.],
2. doba ročního provozu - T_r [hod.],
3. počet kogeneračních jednotek n_{kj} [-].

T_d vyjadřuje počet hodin práce kogeneračních jednotek denně. T_r vyjadřuje počet hodin práce kogeneračních jednotek ročně. n_{kj} je počet kogeneračních jednotek, které se budou vzájemně podílet na pokrytí T_d a T_r . V práci budu při popisu algoritmu použity výrazy jako „návrh kogenerační jednotky“, „návrh typu kogenerační jednotky“, „návrh kogeneračních jednotek“ atd. Mezi výrazy jsou patrné rozdíly, ovšem v této práci bude uvažováno, že se vybere pouze jeden typ kogenerační jednotky a počet těchto jednotek je pak dán n_{kj} .

2.2.2 Seznam plynových kotlů

V tomto bloku vstupních dat se nachází seznam kondenzačních plynových kotlů $\{KO_1, KO_2, \dots, KO_n\}$, kde n je celkový počet plynových kotlů v seznamu. Z tohoto seznamu bude vybíráno při návrhu varianty proti variantě s KJ. Navíc z nich bude také vybíráno u varianty s KJ pro dorovnání tepelného zatížení. Primárním palivem každého kotle je zemní plyn. Mezi parametry plynového kotle patří:

1. název jednotky,
2. jmenovitý výkon - P_n [kW],
3. cena jednotky (bez DPH) - N_c [Kč],
4. výdaje na připojení (bez DPH) - N_{pr} [Kč].

Mezi parametry, které platí pro každý kotel obecně a jsou tudíž stejné pro každý plynový kotel v seznamu patří pouze účinnost η [-].

2.2.3 Parametry objektu

Třetím blokem parametrů jsou parametry objektu. Tento blok je zpravidla nejnáročnější na získání, jelikož vyžaduje přesné dlouhodobé měření spotřeby elektrické a tepelné energie v průběhu roku a také v průběhu samotného dne. Pro tato data je klíčové, aby co nejvíce odpovídala realitě objektu, pro který se daná KJ navrhuje. Pokud se data o průbězích spotřeby budou značně lišit od reality, tak výsledný návrh KJ může být značně zkreslený a při následné realizaci projektu to může přinést značné energetické ztráty. Mezi parametry objektu jsou řazeny následující data:

1. Roční diagram tepelné spotřeby, což je vektor \vec{Q} s prvky tepelné spotřeby pro každý měsíc v roce definovaný jako:

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{12} \end{pmatrix}, \quad [kWh] \quad (2.1)$$

kde: Q_i je tepelná spotřeba v i -tém měsíci, $\{i \in \mathbb{N} : 1 \leq i \leq 12\}$.

2. Roční diagram elektrické spotřeby, což je vektor \vec{E} s prvky elektrické spotřeby pro každý měsíc v roce definovaný jako:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_{12} \end{pmatrix}, \quad [kWh] \quad (2.2)$$

kde: E_i je elektrická spotřeba v i -tém měsíci, $\{i \in \mathbb{N} : 1 \leq i \leq 12\}$.

3. Denní průměrný diagram tepelného zatížení, což je vektor \vec{P}_T s prvky průměrného tepelného zatížení pro každou hodinu v dni definovaný jako:

$$\vec{P}_T = \begin{pmatrix} P_{T,1} \\ P_{T,2} \\ \vdots \\ P_{T,24} \end{pmatrix}, \quad [kW] \quad (2.3)$$

kde $P_{T,i}$ je průměrné tepelné zatížení v i -té hodině, $\{i \in \mathbb{N} : 1 \leq i \leq 24\}$.

4. Denní průměrný diagram elektrického zatížení, což je vektor \vec{P}_E s prvky průměrného elektrického zatížení pro každou hodinu v dni definovaný jako:

$$\vec{P}_E = \begin{pmatrix} P_{E,1} \\ P_{E,2} \\ \vdots \\ P_{E,24} \end{pmatrix}, \quad [kW] \quad (2.4)$$

kde $P_{E,i}$ je průměrné elektrické zatížení v i -té hodině, $\{i \in \mathbb{N} : 1 \leq i \leq 24\}$.

Denní průměrný diagram tepelného zatížení a denní průměrný diagram elektrického zatížení vyjadřují, jak je průměrně rozděleno tepelné, respektive elektrické zatížení objektu přes den. U těchto diagramů primárně záleží na jejich tvaru a rozložení. Naopak nezáleží na velikostech konkrétních hodnot, ty jsou pouze pro názornost. V další kapitole budou tyto dva diagramy pro jejich další použití normovány.

Tepelná energie z KJ bývá standardně využívána k různým účelům, jako vytápění objektu, ohřev teplé vody, nebo pro různé technologie. Pro ohřev teplé vody bude jiný diagram jako pro vytápění objektu. Zde záleží na uživateli, jestli tepelnou energii z KJ bude využívat například pouze pro ohřev vody, nebo zda bude tuto energii využívat k vytápění objektu, nebo zda tepelnou energii z KJ bude využívat jak pro ohřev teplé vody, tak k vytápění objektu, či ještě k něčemu. Všechny tyto skutečnosti jsou promítnuty ve výsledných diagramech tepelného zatížení a spotřeby.

2.3 Transformace vstupních dat

V minulé kapitole byly představeny vstupní data, která budou zadaná uživatelem. Nyní se přesuneme k první fázi návrhu KJ, což je transformace a upravení těchto dat pro další použití.

2.3.1 Denní průměrný normovaný diagram tepelného a elektrického zatížení

V návrhu bude výhodné používat tzv. normované denní diagramy tepelného a elektrického zatížení. Diagram má stejný tvar jako zadaný průměrný denní diagram. Pouze je normován tak, aby součet všech hodnot daného diagramu byl roven 1. To lze matematicky zapsat jako:

$$\sum_{i=1}^{24} y_i = 1, \quad (2.5)$$

kde: y_i je hodnota normovaného zatížení v i -tou hodinu.

Tento vztah je analogií integrálu funkce představující denní normované zatížení:

$$\int_0^{24} y(t) dt = 1. \quad (2.6)$$

Pro vektor \vec{Y}_{norm} představující vektor normovaných hodnot diagramu zatížení, musí platit:

$$\langle \vec{1}, \vec{Y}_{norm} \rangle = 1, \quad (2.7)$$

kde:

$\vec{1}$ je vektor samých jedniček se stejnou dimenzí jako vektor \vec{Y}_{norm} , značka $\langle \vec{1}, \vec{Y}_{norm} \rangle$ značí skalární součin vektoru $\vec{1}$ s vektorem \vec{Y}_{norm} .

Pokud tedy máme k dispozici vektor \vec{Y} představující hodnoty průměrného denního diagramu, tak vektor \vec{Y}_{norm} představující hodnoty průměrného normovaného denního diagramu získáme podle vztahu:

$$\vec{Y}_{norm} = \frac{1}{\langle \vec{1}, \vec{Y} \rangle} \cdot \vec{Y}. \quad (2.8)$$

Transformace vektoru \vec{P}_T , představující denní průměrné tepelné zatížení, na vektor $\vec{P}_{T,norm}$, představující denní normované průměrné tepelné zatížení, by vypadalo následovně:

$$\vec{P}_{T,norm} = \frac{1}{\langle \vec{1}, \vec{P}_T \rangle} \cdot \vec{P}_T = \begin{pmatrix} P_{T,norm,1} \\ P_{T,norm,2} \\ \vdots \\ P_{T,norm,24} \end{pmatrix}. \quad [-] \quad (2.9)$$

Pro vektor \vec{P}_E , představující denní průměrné elektrické zatížení, na vektor $\vec{P}_{E,norm}$, představující denní normované průměrné elektrické zatížení, je postup obdobný:

$$\vec{P}_{E,norm} = \frac{1}{\langle \vec{1}, \vec{P}_E \rangle} \cdot \vec{P}_E = \begin{pmatrix} P_{E,norm,1} \\ P_{E,norm,2} \\ \vdots \\ P_{E,norm,24} \end{pmatrix}. \quad [-] \quad (2.10)$$

2.3.2 Roční diagram tepelného a elektrického zatížení

V této podkapitole bude vytvořena matice ročního diagramu tepelného a elektrického zatížení. Před vytvořením této matice je potřeba vytvořit vektor \vec{d} , jehož složky budou představovat počet dní v daném měsíci. Vektor bude vypadat následovně:

$$\vec{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 31 \\ 28 \\ 31 \\ 30 \\ 31 \\ 30 \\ 31 \\ 31 \\ 30 \\ 31 \\ 30 \\ 31 \\ 30 \\ 31 \\ 30 \\ 31 \end{pmatrix}, \quad [den] \quad (2.11)$$

kde d_i je počet dní v i -tém měsíci.

V této práci bude zanedbán přestupný rok, tudíž pro vektor \vec{d} musí platit:

$$\langle \vec{1}, \vec{d} \rangle = 365 \quad (2.12)$$

Dále bude vytvořen vektor \vec{Q}_d , jehož složky budou představovat denní spotřebu tepla v daném měsíci. Vektor lze vyjádřit ze vztahu:

$$\vec{Q}_d = \begin{pmatrix} \frac{Q_1}{d_1} \\ \frac{Q_2}{d_2} \\ \vdots \\ \frac{Q_{12}}{d_{12}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{d,1} \\ Q_{d,2} \\ \vdots \\ Q_{d,12} \end{pmatrix}, \quad [kWh] \quad (2.13)$$

kde $Q_{d,i}$ je denní spotřeba tepla v i -tém měsíci.

Obdobně lze takto vyjádřit vektor \vec{E}_d , jehož složky budou představovat denní spotřebu elektřiny v daném měsíci:

$$\vec{E}_d = \begin{pmatrix} \frac{E_1}{d_1} \\ \frac{E_2}{d_2} \\ \vdots \\ \frac{E_{12}}{d_{12}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{d,1} \\ E_{d,2} \\ \vdots \\ E_{d,12} \end{pmatrix}, \quad [kWh] \quad (2.14)$$

kde $E_{d,i}$ je denní spotřeba elektřiny v i -tém měsíci.

Dále lze vytvořit matici \mathbb{P}_T , jejíž i -tý sloupec bude vektor respektující denní diagram tepelného zatížení pro i -tý měsíc. Matice lze vyjádřit ze vztahu:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_T &= \vec{P}_{T,norm} \cdot \vec{Q}_d^T = \begin{pmatrix} P_{T,norm,1} \\ P_{T,norm,2} \\ \vdots \\ P_{T,norm,24} \end{pmatrix} (Q_{d,1}, Q_{d,2}, \dots, Q_{d,12}) = \\ &= \begin{pmatrix} P_{T,norm,1} \cdot Q_{d,1} & \dots & P_{T,norm,1} \cdot Q_{d,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{T,norm,24} \cdot Q_{d,1} & \dots & P_{T,norm,24} \cdot Q_{d,12} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad [kW] \quad (2.15)$$

kde $P_{T,norm,i} \cdot Q_{d,j}$ je tepelné zatížení v i -té hodině a j -tém měsíci.

Obdobně lze vytvořit matici \mathbb{P}_E , jejíž i -tý sloupec bude vektor respektující denní diagram elektrického zatížení pro i -tý měsíc:

$$\mathbb{P}_E = \vec{P}_{E,norm} \cdot \vec{E}_d^T. \quad [kW] \quad (2.16)$$

2.4 Předpoklady pro návrh

Většinou je obtížné až nemožné, aby model zcela odpovídal realitě, jelikož by vyžadoval enormní množství výpočtů. Proto se zavádějí jistá zjednodušení, po kterých budou výpočty lépe realizovatelné. V tomto modelu pro návrh KJ se bude předpokládat s několika zjednodušeními, která jsou nutná udělat, jinak by byl výpočet velmi náročný. Mezi zjednodušení bude patřit:

1. kogenerační jednotka běží vždy na jmenovitý výkon, nebo je vypnuta,
2. v danou hodinu běží pouze jedna kogenerační jednotka a ostatní jsou vypnuté,

3. účinnost plynových kotlů je jednotná,
4. servisní výdaje na kWh vyrobeného výkonu u plynových kotlů jsou jednotné,
5. plynový kotel má maximální dobu denního provozu 24 hodin (celý den), může tedy běžet celý den bez přerušení,
6. plynový kotel má maximální dobu ročního provozu 8760 hodin (celý rok) může tedy běžet celý rok bez přerušení,
7. kogenerační jednotky a plynové kotle spalují zemní plyn,
8. generální oprava kogeneračních jednotek proběhne pouze jednou za dobu životnosti.

Zjednodušení pro plynové kotle jsou přijata z důvodu, že až budou navrhovány plynové kotle pro pokrytí tepelné spotřeby, tak jich zpravidla bude navrženo více druhů pro danou variantu. Tudíž by bylo obtížné pro každý plynový kotel vytvářet jeho denní a roční průběh a počítat s rozdílnými účinnostmi. Tudíž se zavedly některé zjednodušující předpoklady, jelikož v návrhu jde primárně o návrh kogenerační jednotky.

2.5 Návrh varianty s kogenerační jednotkou

Tato sekce patří k jedné z nejdůležitějších, jelikož právě zde bude popsán postup, jak ze zadaných a transformovaných vstupních dat navrhnout optimální KJ. Návrh KJ se bude primárně řídit tepelnými diagramy, tudíž ročním diagramem tepelné spotřeby a denním průměrným normovaným diagramem tepelného zatížení. Typ kogenerační jednotky a provoz bude vybrán tak, aby byla pokryta co největší část tepelných diagramů, ale aby nevznikalo žádné přebytečné teplo.

V první fázi návrhu bude navržen denní průběh (hodiny, kdy KJ bude v provozu) a roční průběh KJ (měsíce, kdy bude KJ v provozu). Na základě toho bude proveden výběr jednotky, tak aby daná jednotka dosahovala co nejvyššího tepelného výkonu, ale naopak aby nedocházelo k tepelným ztrátám.

Výstupem návrhu bude daný typ kogenerační jednotky a množství tepelné a elektrické energie, které bude touto KJ pokryto. Pokud například v některých časech bude elektrický výkon KJ větší, než elektrický výkon potřebný pro daný objekt, tak KJ dodává energii do sítě. Zbylé tepelné zatížení, které nebude pokryto KJ, bude pokryto plynovými kotli.

Ve vstupních datech byly uvedeny hodnoty T_d , T_r a n_{kj} . Ve variantě bude figurovat pouze jeden typ KJ, který bude zvolen jako optimální. Počet kogeneračních jednotek n_{kj} poté říká, kolik jednotek tohoto zvoleného typu bude nakoupeno pro celkové pokrytí běhu celkem T_d hodin denně a T_r hodin ročně.

2.5.1 Návrh denního provozu KJ

V této části bude navrženo v jakých konkrétních hodinách přes den bude kogenerační jednotka v provozu. Návrh se provede na základě denního průměrného normovaného diagramu tepelného zatížení, který představuje vektor: $\vec{P}_{T,norm}$ a doby

denního provozu T_d . Cílem bude vytvořit nepřerušovaný denní běh kogenerační jednotky tak, aby pokryla co největší část tepelného zatížení, ale zároveň aby denní provoz této KJ nepřesáhl T_d . Návrh denního provozu se provede následovně:

1. Zvolí se hodnota $\max\{\vec{P}_{T,norm}\}$, což je maximální hodnota, která je obsažena v daném vektoru. Zvolí se index i , který je roven pozici této maximální hodnoty. Toto lze také interpretovat jako maximální hodnota denního průměrného normovaného tepelného zatížení. Příslušná hodina tohoto maxima je značena poté indexem i .
2. Porovná se hodnota nalevo $P_{T,norm,i-1}$ s hodnotou napravo hodnotou $P_{T,norm,i+1}$ od posledního zvoleného indexu i , Pokud například index $i - 1$ byl již zvolen, tak je nahrazen indexem $i - 2$ a tak dále. Pokud index $i + 1$ byl již zvolen je nahrazen indexem $i + 2$ a tak dále. Pokud $i - 1 < 1$, tak se místo $i - 1$ porovnává index $i + 23$. Pokud $i + 1 > 24$, tak se porovnává index $i - 23$. Pokud $P_{T,norm,i-1} > P_{T,norm,i+1}$, tak zvolený index je $i - 1$, jinak $i + 1$.
3. Pokud je počet zvolených indexů roven T_d , tak se pokračuje dalším bodem. Jinak se vrací k bodu 2, kde výchozí index i nyní bude nově zvolený index.
4. Vytvoří se vektor denního provozu KJ:

$$\vec{w}_d = \begin{pmatrix} w_{d,1} \\ w_{d,2} \\ \vdots \\ w_{d,24} \end{pmatrix}, \quad [-] \quad (2.17)$$

kde: $w_{d,i}$ je 1 (KJ je v tuto hodinu v provozu), pokud index i byl zvoleným indexem z bodu 1 a 2. Pokud index i nebyl zvoleným indexem je tato hodnota 0 (KJ nebude v tuto hodinu v provozu).

5. Vytvoří se vektor $\vec{P}_{T,norm,w}$, který je definován jako:

$$\vec{P}_{T,norm,w} = \begin{pmatrix} P_{T,norm,1} \cdot w_{d,1} \\ P_{T,norm,2} \cdot w_{d,2} \\ \vdots \\ P_{T,norm,24} \cdot w_{d,24} \end{pmatrix}. \quad [-] \quad (2.18)$$

6. Zvolí se minimální nenulová hodnota obsažena ve vektoru $\vec{P}_{T,norm,w}$, která se označí jako $P_{T,norm,w,min}$.

2.5.2 Návrh ročního provozu KJ

V této části bude navrženo v jakých měsících kogenerační jednotka bude v provozu. Návrh se provede na základě ročního diagramu denní tepelné spotřeby, který představuje vektor: \vec{Q}_d a doby ročního a denního provozu T_d a T_r . Cílem bude vytvořit nepřerušovaný denní běh kogenerační jednotky tak, aby pokryla co největší část tepelné spotřeby, ale zároveň aby roční provoz této KJ nepřesáhl T_r . Návrh ročního provozu se provede následovně:

1. Zvolí se hodnota $\max\{\vec{Q}_d\}$, což je maximální hodnota, která je obsažena v daném vektoru. Zvolí se index i , který je roven pozici této maximální hodnoty. Toto lze také interpretovat jako maximální hodnota denní spotřeby v roce. Příslušný měsíc tohoto maxima je značen poté indexem i .
2. Zkontroluje se podmínka:

$$T_d \cdot \sum_{\text{Zvolené indexy}} d_i < T_r, \quad (2.19)$$

kde d_i je počet dní v i -tém měsíci.

Pokud je podmínka platná, tak se proces přesouvá do dalšího bodu. Pokud je podmínka neplatná, tak je výběr indexů ukončen, odebere se naposledy zvolený index a proces se přesune do bodu 4.

3. Porovná se hodnota nalevo $Q_{d,i-1}$ s hodnotou napravo hodnotou $Q_{d,i+1}$ od posledního zvoleného indexu i . Pokud například index $i-1$ byl již zvolen, tak je nahrazen indexem $i-2$ a tak dále. Pokud index $i+1$ byl již zvolen je nahrazen indexem $i+2$ a tak dále. Pokud $i-1 < 1$, tak se místo $i-1$ porovnává index $i+11$. Pokud $i+1 > 12$, tak se porovnává index $i-11$. Pokud $Q_{d,i-1} > Q_{d,i+1}$, tak zvolený index je $i-1$, jinak $i+1$. Poté se pokračuje bodem 2.
4. Vytvoří se vektor ročního provozu KJ:

$$\vec{w}_r = \begin{pmatrix} w_{r,1} \\ w_{r,2} \\ \vdots \\ w_{r,12} \end{pmatrix}, \quad [-] \quad (2.20)$$

kde: $w_{r,i}$ je 1 (KJ je v tento měsíc v provozu), pokud index i byl zvoleným indexem. Pokud index i nebyl zvoleným indexem je tato hodnota 0 (KJ nebude v tento měsíc v provozu).

5. Vytvoří se vektor $\vec{Q}_{d,w}$, který je definován jako:

$$\vec{Q}_{d,w} = \begin{pmatrix} Q_{d,1} \cdot w_{r,1} \\ Q_{d,2} \cdot w_{r,2} \\ \vdots \\ Q_{d,12} \cdot w_{r,12} \end{pmatrix}. \quad [kWh] \quad (2.21)$$

6. Zvolí se minimální nenulová hodnota obsažena ve vektoru $\vec{Q}_{d,w}$, která se označí jako $Q_{d,w,min}$.

2.5.3 Výběr typu kogenerační jednotky

Ze známých hodnot $P_{T,norm,w,min}$ a $Q_{d,w,min}$ vypočteme maximální přípustný výkon KJ:

$$P_{T,kj,max} = P_{T,norm,w,min} \cdot Q_{d,w,min}. \quad [kW] \quad (2.22)$$

Dále bude ze seznamu kogeneračních jednotek vybrána taková jednotka, jejíž jmenovitý tepelný výkon $P_{T,n}$ bude menší, nebo roven $P_{T,kj,max}$ a hodnota $|P_{T,kj,max} -$

$P_{T,n}$ bude minimální. Pokud se v seznamu kogeneračních jednotek nachází taková KJ, která má jmenovitý tepelný výkon $P_{T,n}$ menší, nebo roven $P_{T,kj,max}$, tak se zvolí KJ s nejmenším jmenovitým tepelným výkonem $P_{T,n}$. Jmenovitý tepelný výkon zvolené KJ označíme jako $P_{T,kj}$ a jmenovitý elektrický výkon označíme jako $P_{E,kj}$.

2.5.4 Výpočet pokrytí tepelné a elektrické spotřeby KJ

Pro výpočet pokrytí tepelného a elektrického zatížení navržené KJ, bude potřeba vytvořit matici $\mathbb{W}_{d,r}$, která bude reprezentovat roční a denní provoz zvolené KJ. Pro i -tý řádek a j -tý sloupec se nachází buď hodnota 1, která říká, že v i -tou hodinu a j -tý měsíc je KJ v provozu a nebo hodnota 0, což znamená, že v tuto dobu je KJ v odstávce. Tato matice se vypočte ze vzorce:

$$\mathbb{W} = \vec{w}_d \cdot \vec{w}_r^T. \quad [-] \quad (2.23)$$

Poté matice reprezentující roční diagram tepelného výkonu KJ je:

$$\mathbb{P}_{T,kj} = P_{T,kj} \cdot \mathbb{W}. \quad [kW] \quad (2.24)$$

Obdobně matice reprezentující roční diagram elektrického výkonu KJ je:

$$\mathbb{P}_{E,kj} = P_{E,kj} \cdot \mathbb{W}. \quad [kW] \quad (2.25)$$

Z toho lze vypočítat matici reprezentující roční diagram nepokrytého tepelného zatížení:

$$\mathbb{P}_{T,zb} = \mathbb{P}_T - \mathbb{P}_{T,kj}. \quad [kW] \quad (2.26)$$

Obdobně lze vyjádřit matici reprezentující roční diagram nepokrytého elektrického zatížení:

$$\mathbb{P}_{E,zb} = \mathbb{P}_E - \mathbb{P}_{E,kj}. \quad [kW] \quad (2.27)$$

V matici $\mathbb{P}_{E,zb}$ se můžou vyskytovat jak kladné, tak záporné hodnoty. Kladná hodnota znamená, že je potřeba pokrýt elektrické zatížení dokoupením elektrické energie ze sítě. Záporná hodnota znamená, že elektrický výkon KJ je větší, než spotřebovaný výkon a tudíž se výkon dodává do sítě.

Dále bude potřeba z matic výkonů vyjádřit matice energií, kde v i -tém řádku a j -tém sloupci bude hodnota energie v i -tou hodinu a v j -tém měsíci, sečteno pro všechny dny v j -tém měsíci. Matice reprezentující vyrobenou tepelnou energii KJ \mathbb{Q}_{kj} se vypočítá podle vztahu:

$$\begin{aligned} \mathbb{Q}_{kj} &= \mathbb{P}_{T,kj} \cdot \text{diag}(\vec{d}) = \\ &= \begin{pmatrix} P_{T,kj,1,1} & \dots & P_{T,kj,1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{T,kj,24,1} & \dots & P_{T,kj,24,12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & d_{12} \end{pmatrix} = [kWh] \quad (2.28) \\ &= \begin{pmatrix} P_{T,kj,1,1} \cdot d_1 & \dots & P_{T,kj,1,12} \cdot d_{12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{T,kj,24,1} \cdot d_1 & \dots & P_{T,kj,24,12} \cdot d_{12} \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

kde:

$diag(\vec{d})$ - diagonální matice, kde hodnoty na diagonále jsou složky vektoru \vec{d} .

Obdobným způsobem lze vytvořit matici $\mathbb{Q}_{T,zb}$, \mathbb{E}_{kj} a \mathbb{E}_{zb} podle vzorce:

$$\mathbb{Q}_{zb} = \mathbb{P}_{T,zb} \cdot diag(\vec{d}), \quad [kWh] \quad (2.29)$$

$$\mathbb{E}_{kj} = \mathbb{P}_{E,kj} \cdot diag(\vec{d}), \quad [kWh] \quad (2.30)$$

$$\mathbb{E}_{zb} = \mathbb{P}_{E,zb} \cdot diag(\vec{d}). \quad [kWh] \quad (2.31)$$

Matici \mathbb{Q}_{kj} lze převést na vektor \vec{Q}_{kj} , jehož složky jsou hodnoty vyrobeného tepla kogeneračními jednotkami v daném měsíci. Vektor \vec{Q}_{kj} vypočítáme podle vztahu:

$$\vec{Q}_{kj} = (\vec{1}^T \cdot \mathbb{Q}_{kj})^T. \quad [kWh] \quad (2.32)$$

Obdobně lze takto vypočítat vektory \vec{Q}_{zb} , \vec{E}_{kj} , \vec{E}_{kup} a \vec{E}_{prod} podle vzorce:

$$\vec{Q}_{zb} = (\vec{1}^T \cdot \mathbb{Q}_{zb})^T, \quad [kWh] \quad (2.33)$$

$$\vec{E}_{kj} = (\vec{1}^T \cdot \mathbb{E}_{kj})^T, \quad [kWh] \quad (2.34)$$

$$\vec{E}_{kup} = (\vec{1}^T \cdot \mathbb{E}_{kup})^T, \quad [kWh] \quad (2.35)$$

$$\vec{E}_{prod} = (\vec{1}^T \cdot \mathbb{E}_{prod})^T. \quad [kWh] \quad (2.36)$$

Dále vypočítáme celkové hodnoty Q_{kj} a Q_{zb} a E_{kj} , což jsou součty všech hodnot příslušných maticí \mathbb{Q}_{kj} , \mathbb{Q}_{zb} a \mathbb{E}_{kj} . Q_{kj} je celková vyrobená tepelná energie zvolenou KJ za rok a Q_{zb} je celková nepokrytá (zbylá) tepelná energie, která bude pokryta plynovými kotly. E_{kj} je celková vyrobená elektrická energie zvolenou KJ za rok. Hodnoty se vypočítají podle vzorce:

$$Q_{kj} = \vec{1}^T \mathbb{Q}_{kj} \cdot \vec{1}, \quad [kWh] \quad (2.37)$$

$$Q_{zb} = \vec{1}^T \mathbb{Q}_{zb} \cdot \vec{1}. \quad [kWh] \quad (2.38)$$

$$E_{kj} = \vec{1}^T \mathbb{E}_{kj} \cdot \vec{1}. \quad [kWh] \quad (2.39)$$

U matice \mathbb{E}_{zb} je potřeba použít trochu jiný postup, jelikož tato matice může obsahovat jak kladné hodnoty (elektrická energie je potřeba dokoupit), tak hodnoty záporné (elektrická energie je dodávána do sítě). Proto je potřeba tuto matici rozdělit na matici \mathbb{E}_{kup} , která je rovna matici \mathbb{E}_{zb} , ale všechny hodnoty, které jsou záporné jsou nahrazeny hodnotou 0. Tato matice vyjadřuje elektrickou energii, která je potřeba dokoupit. A na matici \mathbb{E}_{prod} , která je rovna matici \mathbb{E}_{zb} , ale všechny kladné hodnoty nahradí hodnotou 0 a všechny záporné hodnoty nahradí jejich absolutní

hodnotou. Z těchto matic poté lze vyjádřit hodnotu elektrické energie, která je potřeba dokoupit ze sítě za rok E_{kup} a hodnotu elektrické energie, která je do sítě dodána za rok E_{prod} . Hodnoty lze vypočítat podle vzorce:

$$E_{kup} = \vec{1}^T \mathbb{E}_{kup} \cdot \vec{1}, \quad [kWh] \quad (2.40)$$

$$E_{prod} = \vec{1}^T \mathbb{E}_{prod} \cdot \vec{1}. \quad [kWh] \quad (2.41)$$

2.5.5 Návrh plynových kotlů pro pokrytí tepelného zatížení

Již byl navrhnout typ kogenerační jednotky a její provoz. Ovšem tato KJ pokryje pouze část tepelné a elektrické spotřeby. U nepokryté elektrické spotřeby je situace poměrně jednoduchá, jelikož se nepokrytá elektřina dokoupí ze sítě. U nepokrytého tepelného zatížení je situace trochu složitější, jelikož je potřeba navrhnout plynové kotle tak, aby dohromady jejich výkony dávaly maximální nepokryté tepelné zatížení, které se vyjádří jako:

$$P_{T,zb,max} = \max\{\mathbb{P}_{T,zb}\}. \quad [kW] \quad (2.42)$$

Nyní je potřeba vybrat seznam plynových kotlů tak, aby dohromady byly schopny pokrýt $P_{T,zb,max}$. Postup je následující:

1. zvolí se seznam vybraných plynových kotlů, který je z počátku prázdný,
2. zvolí se podseznam plynových kotlů, jejichž jmenovitý výkon P_n je menší, nebo roven $P_{T,zb,max}$,
3. z podseznamu se vybere kotel s nejvyšším jmenovitým výkonem P_n , tento kotel se přidá do seznamu zvolených plynových kotlů. Pokud v podseznamu není žádný kotel, přidá se plynový kotel z původního seznamu, který má nejnižší jmenovitý výkon P_n .
4. Pokud součet jmenovitých výkonů kotlů ze seznamu vybraných plynových kotlů je větší, nebo roven $P_{T,zb,max}$, tak proces končí a pokračuje se bodem 5. Pokud není, tak ponížíme hodnotu $P_{T,zb,max}$ o jmenovitý výkon posledního zvoleného kotle. Programátorsky toto můžeme napsat jako: $P_{T,zb,max} = P_{T,zb,max} - P_n$. Dále pokračujeme bodem 2.
5. Dostaneme seznam zvolených plynových kotlů $\{KO_1, \dots, KO_n\}$.

2.5.6 Spotřeba zemního plynu

Kogenerační jednotky stejně jako plynové kotle spalují jako primární palivo zemní plyn. Celková spotřeba zemního plynu lze vypočítat podle vzorce:

$$Q_{zp} = Q_{zp,kj} + Q_{zp,ko} = \frac{Q_{kj}}{\eta_{T,kj}} + \frac{Q_{zb}}{\eta_{ko}}, \quad [kWh] \quad (2.43)$$

kde:

$Q_{zp,kj}$ - spotřeba zemního plynu kogeneračními jednotkami - spalné teplo za rok [kWh],

$Q_{zp,ko}$ - spotřeba zemního plynu plynovými kotli - spalné teplo za rok [kWh],
 Q_{zp} - spotřeba zemního plynu - spalné teplo za rok [kWh],
 Q_{kj} - teplo vyrobené kogeneračními jednotkami za rok [kWh],
 Q_{zb} - teplo vyrobené kondenzačními plynovými kotli za rok [kWh],
 $\eta_{T,kj}$ - tepelná účinnost zvoleného typu KJ [kWh],
 η_{ko} - účinnost plynových kotlů [kWh].

2.6 Návrh varianty bez kogenerační jednotky

Výběr plynových kotlů bude obdobný jako výběr plynových kotlů u varianty s KJ. Jediný rozdíl je, že zde zvolené plynové kotle musí být dohromady schopné pokrýt maximální tepelné zatížení, které dostaneme ze vzorce:

$$P_{T,max} = \max\{P_T\} \quad [kW] \quad (2.44)$$

Nyní je potřeba vybrat seznam plynových kotlů tak, aby dohromady byly schopny pokrýt $P_{T,max}$. Postup je obdobný jako při výběru plynových kotlů u varianty s KJ a je následující:

1. zvolí se seznam vybraných plynových kotlů, který je z počátku prázdný,
2. zvolí se podseznam plynových kotlů, jejichž jmenovitý výkon P_n je menší nebo roven $P_{T,max}$,
3. z podseznamu se vybere kotel s nejvyšším jmenovitým výkonem P_n , tento kotel se přidá do seznamu zvolených plynových kotlů. Pokud v podseznamu není žádný kotel, přidá se plynový kotel z původního seznamu, který má nejnižší jmenovitý výkon P_n .
4. Pokud součet jmenovitých výkonů kotlů ze seznamu vybraných plynových kotlů je větší nebo roven $P_{T,max}$, tak proces končí a pokračuje se bodem 5. Pokud není, tak ponížíme hodnotu $P_{T,max}$ o jmenovitý výkon posledního zvoleného kotle. Programátorsky toto můžeme napsat jako: $P_{T,max} = P_{T,zb,max} - P_n$. Dále pokračujeme bodem 2.
5. Dostaneme seznam zvolených plynových kotlů $\{KO_1, \dots, KO_n\}$.

Jelikož v této variantě je veškeré tepelné zatížení pokryto plynovými kotli, tak se spotřeba zemního plynu bude odvíjet od celkové spotřeby tepelné energie, která se vypočítá podle vztahu:

$$Q = \langle \vec{1}, \vec{Q} \rangle. \quad [kWh] \quad (2.45)$$

Poté spotřebu zemního plynu vypočítáme podle vzorce:

$$Q_{zp} = Q_{zp,ko} = \frac{Q}{\eta_{ko}}. \quad [kWh] \quad (2.46)$$

Veškerá spotřeba elektrické energie v této variantě bude pokryta nakoupenou energií ze sítě. Celková elektrická energie, která bude potřeba dokoupit se vypočítá podle vztahu:

$$E_{kup} = E = \langle \vec{1}, \vec{E} \rangle. \quad [kWh] \quad (2.47)$$

2.7 Výpočetní program pro technický návrh KJ

Celý algoritmus, který byl popsán v této kapitole byl implementován v jazyce Python. Program je bez terminálového a grafického rozhraní. Parametry kogeneračních jednotek, plynových kotlů, parametry objektu a ekonomické parametry je možné měnit úpravou JSON souborů ve složce user/in. Po spuštění program vygeneruje výsledky do složky user/out a nejdůležitější údaje se vypíší do konzole (terminálu). Ve složce user/out jsou data v podobě grafů a příkazů ke generování tabulek pro LaTeX.

2.7.1 Instalace

Pro spuštění je nutné mít nainstalován Python verze 3.9 a vyšší. Po instalaci je nutné doinstalovat potřebné knihovny jako numpy, matplotlib a numpy-financial. Pro systém správy knihoven pip se to provede otevřením příkazové řádky a postupným zadáním příkazů:

1. `pip install numpy`
2. `pip install matplotlib`
3. `pip install numpy-financial`

Příkazy nainstalují automaticky nejnovější verze knihoven. Může se stát, že program nebude kompatibilní s některou verzí těchto knihoven. Proto konkrétní verze knihoven jsou:

1. `numpy==1.19.4`
2. `numpy-financial==1.0.0`
3. `matplotlib==3.4.1`

Instalace konkrétních verzí se provede pomocí příkazů:

1. `pip install numpy==1.19.4`
2. `pip install numpy-financial==1.0.0`
3. `pip install matplotlib==3.4.1`

Program byl testován v systému Windows 10 pomocí Python verze 3.9.

2.7.2 Konfigurace

Vstupní data se zadávají do JSON souborů, které se nacházejí ve složce user/in. V této složce se nacházejí soubory:

1. `kj_params.json`
2. `kotle_params.json`
3. `objekt_params.json`

Soubor `kj_params.json` obsahuje objekt s následujícími atributy:

1. `doxa_denni_provoz` = doba denního provozu - T_d [hod.],
2. `doxa_rocni_provoz` = doba ročního provozu - T_r [hod.],
3. `pocet_jednotek` = počet kogeneračních jednotek n_{kj} [-],
4. `jednotky` = pole obsahující objekty reprezentující KJ jednotky s následujícími atributy:
 - (a) `nazev` = název jednotky,
 - (b) `elektricky_vykon` = jmenovitý elektrický výkon - $P_{E,n}$ [kW],
 - (c) `tepelny_vykon` = jmenovitý tepelný výkon - $P_{T,n}$ [kW],
 - (d) `elektricka_ucinnost` = elektrická účinnost - η_E [-],
 - (e) `tepelna_ucinnost` = tepelná účinnost - η_T [-],
 - (f) `cena_jednotky` = cena jednotky (bez DPH) - N_c [Kč],
 - (g) `vydaje_na_pripojeni` = výdaje na připojení (bez DPH) - N_{pr} [Kč],
 - (h) `servisni_vydaje_na_kwh_teplo` = servisní výdaje na kWh vyrobené tepelné energie (bez DPH) - n_{sr} [Kč · kWh⁻¹],
 - (i) `doxa_do_generalni_opravy` = doba do generální opravy T_g [hod.],
 - (j) `cena_generalni_opravy` = cena generální opravy N_g [Kč].

Soubor `kotle_params.json` obsahuje objekt s následujícími atributy:

1. `ucinnost` = účinnost - η [-],
2. `servisni_vydaje_na_kwh` = servisními výdaje na kWh vyrobené energie (bez DPH) - n_{sr} [Kč · kWh⁻¹],
3. `mu` = parametr μ , který je 0, nebo 1,
4. `jednotky` = pole obsahující objekty reprezentující plynové kotle s následujícími atributy:
 - (a) `nazev` = název jednotky,
 - (b) `vykon` = jmenovitý výkon - P_n [kW],
 - (c) `cena_jednotky` = cena jednotky (bez DPH) - N_c [Kč],
 - (d) `vydaje_na_pripojeni` = výdaje na připojení (bez DPH) - N_{pr} [Kč].

Soubor `objekt_params.json` obsahuje objekt s následujícími atributy:

1. `rocni_diagram_tepelne_spotreby_mesic` = pole reprezentující roční diagram tepelné spotřeby, což je vektor \vec{Q} ,
2. `rocni_diagram_elektricke_spotreby_mesic` = pole reprezentující roční diagram elektrické spotřeby, což je vektor \vec{E} ,
3. `denni_prumerny_diagram_tepelneho_zatizeni_hodina` = pole reprezentující denní průměrný diagram tepelného zatížení, což je vektor \vec{P}_T ,
4. `denni_prumerny_diagram_elektrickeho_zatizeni_hodina` = pole reprezentující denní průměrný diagram elektrického zatížení, což je vektor \vec{P}_E .

2.7.3 Spuštění

Spuštění se provede v kořenové složce pomocí příkaz:

```
python main.py
```

Některé výsledky se vypíší přímo do konzole. Většina výsledku se ale vygeneruje do složky user/out. V této složce se poté nachází složka figures, ve které jsou vygenerované grafy ve tvaru PNG. Poté ve složce latex v souboru figures_import lze nalézt příkazy pro importování obrázku do softwaru LaTeX. Vedle tohoto souboru se nachází soubor tables_import, ve kterém jsou poté příkazy pro vytvoření tabulek, taktéž pro software LaTeX.

2.8 Kritéria ekonomické efektivity

V této sekci budou dvě navržené varianty ohodnoceny podle kritérií ekonomické efektivity. Jedná se o kritéria:

1. doba splacení (dále také „PP“),
2. čistá současná hodnota (NPV),
3. vnitřní výnosové procento (IRR).

Výpočty těchto kritérií budou provedeny za následujících podmínek:

1. ceny jsou bez DPH,
2. není zohledněn vliv daně z příjmu,
3. není zohledněn vliv inflace.

Těmito kritérii budou porovnány dvě navržené varianty. Jedná se o variantu s KJ (varianta A) a variantu bez KJ (varianta B). K tomu ještě bude zhodnocena varianta C, kde bude pouze provedena investice do kogenerační jednotky stejně jako u varianty A. Investice do plynových kotlů u varianty C provedena nebude. Všechny tyto varianty budou porovnány oproti výchozímu stavu, kde veškerá elektrická energie je nakoupena ze sítě a teplo je nakoupeno z teplárny.

2.8.1 Doba splacení – PP

Doba splacení PP vyjadřuje, za jak dlouho se investice vrátí s ohledem na diskont. Vzorec pro PP vypadá následovně:

$$-I + \sum_{t=1}^{PP} \frac{CF_t}{(1+r)^t} > 0, \quad (2.48)$$

kde:

I - počáteční investice, neboli hotovostní tok v nultém roce [Kč],

CF_t - hotovostní tok v roce t [Kč],

PP - doba splacení [rok],

r - diskont [-].

Při rozhodování chceme, aby PP existovalo a aby bylo co nejmenší. Zejména je požadováno, aby PP bylo než doba životnosti investice T .

2.8.2 Čistá současná hodnota – NPV

NPV je součet diskontovaných hotovostních toků za dobu investice. Vzorec pro NPV vypadá následovně:

$$NPV = -I + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad [K\check{c}] \quad (2.49)$$

kde:

I - počáteční investice, neboli hotovostní tok v nultém roce $[K\check{c}]$,

CF_t - hotovostní tok v roce t $[K\check{c}]$,

T - doba investice $[rok]$,

r - diskont $[-]$.

Při rozhodování, chceme aby NPV bylo maximální kladné.

2.8.3 Vnitřní výnosové procento – IRR

IRR zkoumá při jakých hodnotách diskontu je NPV rovno 0. Vzorec pro IRR vypadá následovně:

$$-I + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0. \quad (2.50)$$

Zde dostaneme polynom T -tého stupně, který často nelze řešit analyticky. Nicméně se můžeme například pomocí Newtonovy metody dopracovat alespoň k přibližnému určení IRR.

Kapitola 3

Návrh kogenerační jednotky pro průmyslový podnik

V této kapitole bude použit algoritmus, který byl popsán v minulé kapitole pro návrh konkrétního typu kogenerační jednotky pro průmyslový areál na základě vstupních dat. Objekt pro který bude navrhována kogenerační jednotka je anonymizovaný průmyslový areál, který předal data o spotřebě tepelné a elektrické energie. Teplo je využíváno k vytápění hal průmyslového objektu. V technickém návrhu bude používáno zaokrouhlování na celá čísla.

3.1 Vstupní data

3.1.1 Seznam kogeneračních jednotek

Tato část bude věnována představení vstupních dat. Seznam kogeneračních jednotek s parametry je v tabulce 3.1. Všechny uvedené kogenerační jednotky jsou od firmy TEDOM. Parametr výdaje na připojení byl odhadnut podle vzdálenosti plynového potrubí, ke kterému bude kogenerační jednotka připojena.

Tabulka 3.1: Parametry kogeneračních jednotek.

Název	Micro 20	Micro 30
$P_{T,n}$ [kW]	41,8	58,1
$P_{E,n}$ [kW]	20	30
η_T [-]	0,641	0,628
η_E [-]	0,307	0,324
N_c [Kč]	1 250 000	1 300 000
N_{pr} [Kč]	200 000	200 000
n_{sr} [Kč · kWh ⁻¹]	0,575	0,396
T_g [hod.]	60 000	60 000
N_g [Kč]	850 000	900 000

$P_{T,n}$ - jmenovitý tepelný výkon KJ [kW],

$P_{E,n}$ - jmenovitý elektrický výkon KJ [kW],

η_T - tepelná účinnost při jmenovitém zatížení [-],

η_E - elektrická účinnost při jmenovitém zatížení [-],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč],
 n_{sr} - servisní výdaje na kWh vyrobené tepelné energie (bez DPH) [Kč],
 T_g - doba do generální opravy [hod.],
 N_g - cena generální opravy (bez DPH) [Kč].

Obecné parametry pro kogenerační jednotky zobrazuje tabulka 3.2.

Tabulka 3.2: Obecné parametry pro kogenerační jednotky.

Denní doba provozu T_d [hod.]	14
Roční doba provozu T_r [hod.]	3000
Počet jednotek n_{kj} [-]	1

3.1.2 Seznam plynových kotlů

Seznam plynových kotlů s parametry je v tabulce 3.3. Parametr výdaje na připojení je odhadnut. Účinnost plynových kotlů je stanovena jako $0,93 = 93\%$.

Tabulka 3.3: Seznam plynových kotlů.

Název	P_n [kW]	N_c [Kč]	N_{pr} [Kč]
BAXI LUNA DUO-TEC	65,0	90 000	30 000
IMMERGAS VICTRIX PRO 100	100,0	115 000	40 000
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000

P_n - jmenovitý výkon KJ [kW],
 N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],
 N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč].

3.1.3 Parametry objektu

Data roční tepelné a elektrické spotřeby objektu jsou v tabulce 3.4.

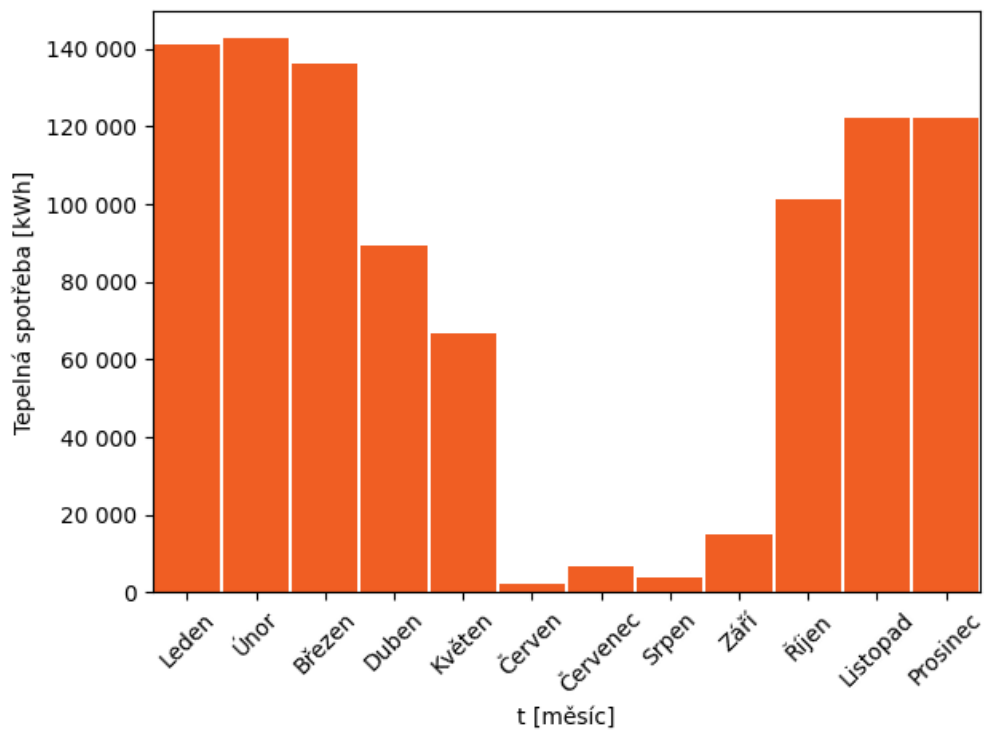
Tabulka 3.4: Roční diagram tepelné a elektrické spotřeby.

Měsíc	Q [kWh]	E [kWh]
Leden	141 181	206 539
Únor	142 639	191 476
Březen	136 111	202 953
Duben	89 306	182 200
Květen	66 875	189 014
Červen	2 361	193 073
Červenec	6 806	201 487
Srpen	3 889	157 189
Září	14 861	190 301
Říjen	101 111	197 620
Listopad	122 222	191 944
Prosinec	122 431	146 782
Celkem	949 793	2 250 578

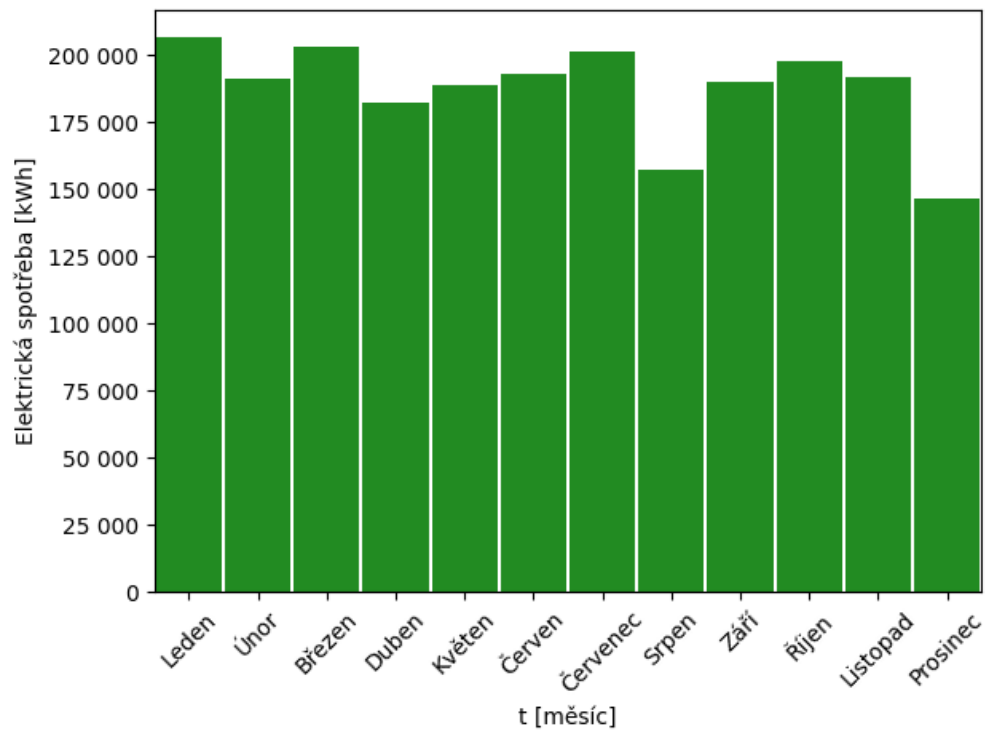
Q - tepelná spotřeba [kWh],
 E - elektrická spotřeba [kWh].

Grafické zobrazení ročního diagramu tepelné spotřeby je na obrázku 3.1. Stejně tak grafické zobrazení ročního diagramu elektrické spotřeby je na obrázku 3.2.

Obrázek 3.1: Roční diagram tepelné spotřeby



Obrázek 3.2: Roční diagram elektrické spotřeby



Hodnoty denního průměrného diagramu tepelného a elektrického zatížení jsou v tabulce 3.5. Zde P_T je průměrné tepelné zatížení v příslušné hodině. P_E je průměrné elektrické zatížení v příslušné hodině. Průměrné denní diagramy nebyly dodány, tudíž bylo potřeba je odhadnout. Průběhy průměrného denního tepelného a elektrického diagramu jsou stejné. Zde byly vytvořeny, tak že průmyslový podnik pracuje v nepřetržitém provozu. Nejvyšší zatížení je dosaženo mezi 7 a 17 hodinou.

Tabulka 3.5: Denní průměrný diagram tepelného a elektrického zatížení.

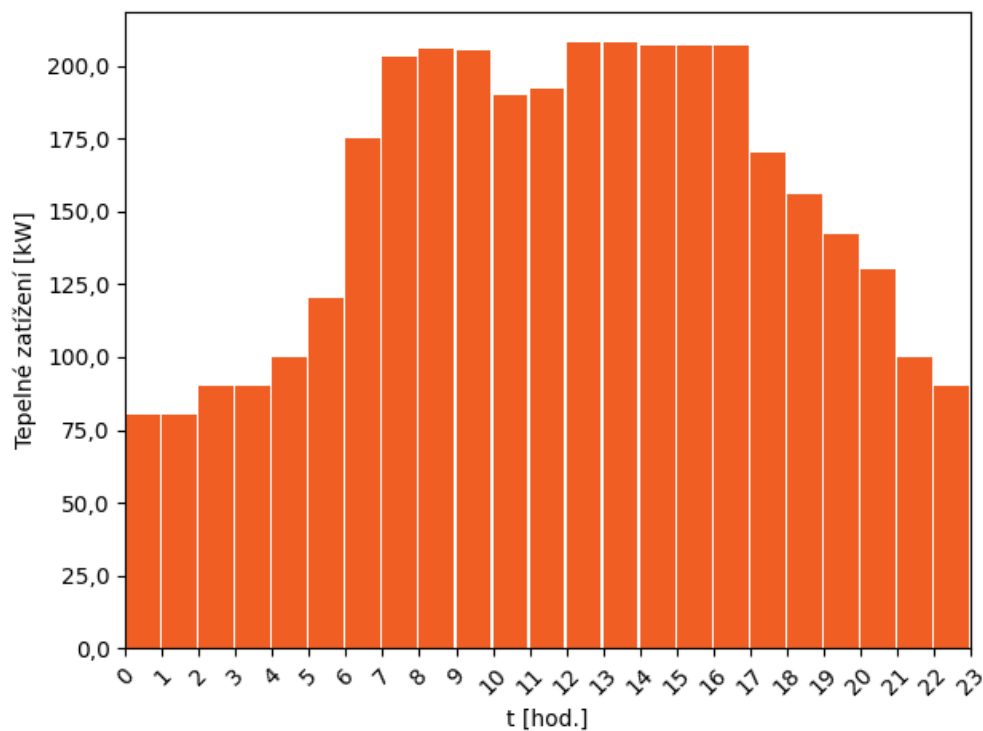
Hodina	P_T [kW]	P_E [kW]
0	80	80
1	80	80
2	90	90
3	90	90
4	100	100
5	120	120
6	175	175
7	203	203
8	206	206
9	205	205
10	190	190
11	192	192
12	208	208
13	208	208
14	207	207
15	207	207
16	207	207
17	170	170
18	156	156
19	142	142
20	130	130
21	100	100
22	90	90
23	80	80

P_T - průměrné tepelné zatížení objektu [kW],

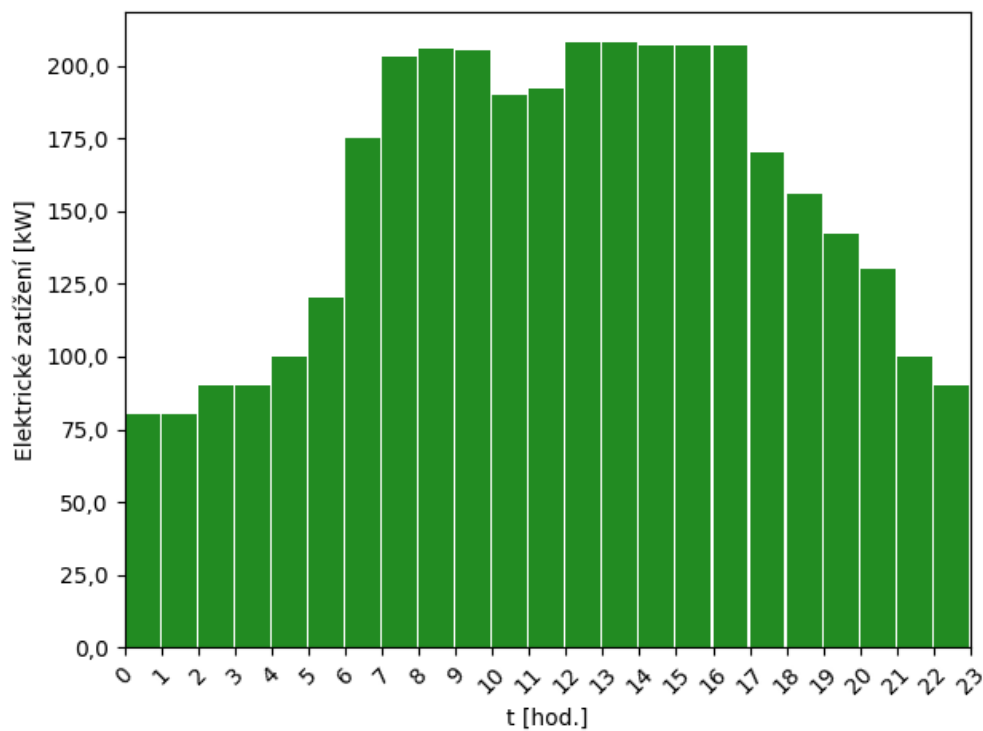
P_E - průměrné elektrické zatížení objektu [kW].

Grafické zobrazení průměrného denního diagramu tepelného zatížení je na obrázku 3.3. Stejně tak grafické zobrazení průměrného denního diagramu elektrického zatížení je na obrázku 3.4.

Obrázek 3.3: Průměrný denní diagram tepelného zatížení



Obrázek 3.4: Průměrný denní diagram elektrického zatížení



3.2 Transformace vstupních dat

3.2.1 Denní průměrný normovaný diagram tepelného a elektrického zatížení

Hodnoty normovaných denních diagramů tepelného a elektrického zatížení jsou v tabulce 3.6. Hodnoty jsou normovány podle vzorců 2.9 a 2.10.

Tabulka 3.6: Denní průměrný normovaný diagram tepelného a elektrického zatížení.

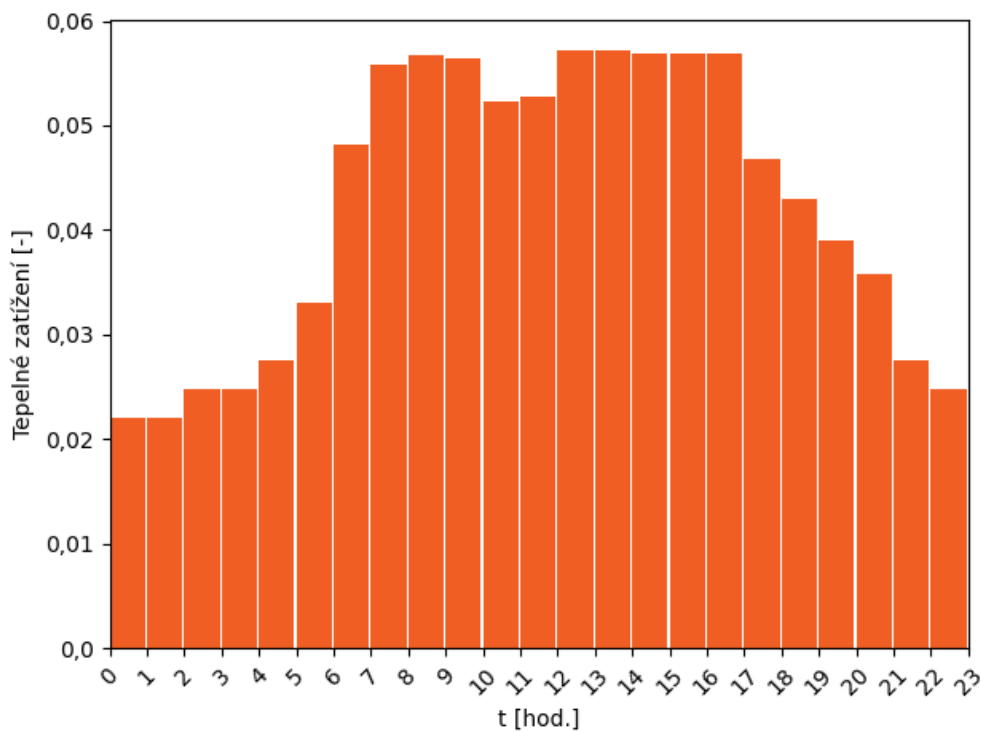
Hodina	$P_{T,norm}$ [-]	$P_{E,norm}$ [-]
0	0,022	0,022
1	0,022	0,022
2	0,025	0,025
3	0,025	0,025
4	0,028	0,028
5	0,033	0,033
6	0,048	0,048
7	0,056	0,056
8	0,057	0,057
9	0,056	0,056
10	0,052	0,052
11	0,053	0,053
12	0,057	0,057
13	0,057	0,057
14	0,057	0,057
15	0,057	0,057
16	0,057	0,057
17	0,047	0,047
18	0,043	0,043
19	0,039	0,039
20	0,036	0,036
21	0,028	0,028
22	0,025	0,025
23	0,022	0,022

$P_{T,norm}$ - normované tepelné zatížení [-],

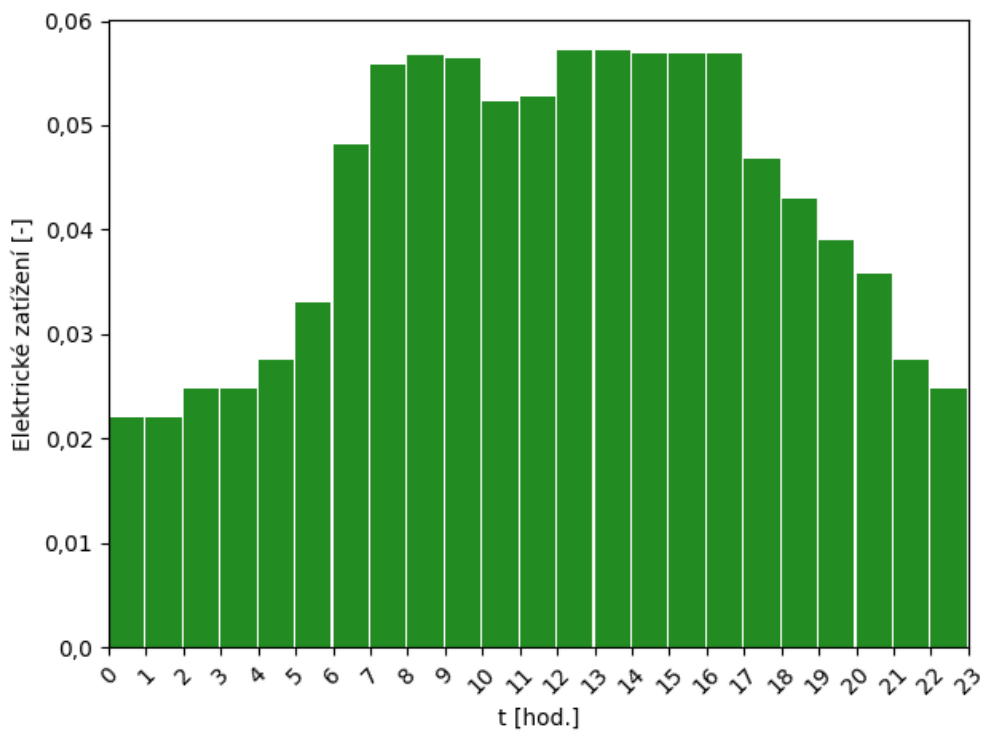
$P_{E,norm}$ - normované elektrické zatížení [-].

Grafické zobrazení průměrného normovaného denního diagramu tepelného zatížení je na obrázku 3.5. Stejně tak grafické zobrazení průměrného normovaného denního diagramu elektrického zatížení je na obrázku 3.6.

Obrázek 3.5: Denní průměrný normovaný diagram tepelného zatížení



Obrázek 3.6: Denní průměrný normovaný diagram elektrického zatížení



3.2.2 Denní spotřeba tepelné a elektrické energie

Hodnoty denní tepelné a elektrické spotřeby v příslušném měsíci jsou v tabulce 3.7. Zde Q_d je denní tepelná spotřeba v příslušném měsíci. E_d je denní elektrická spotřeba v příslušném měsíci.

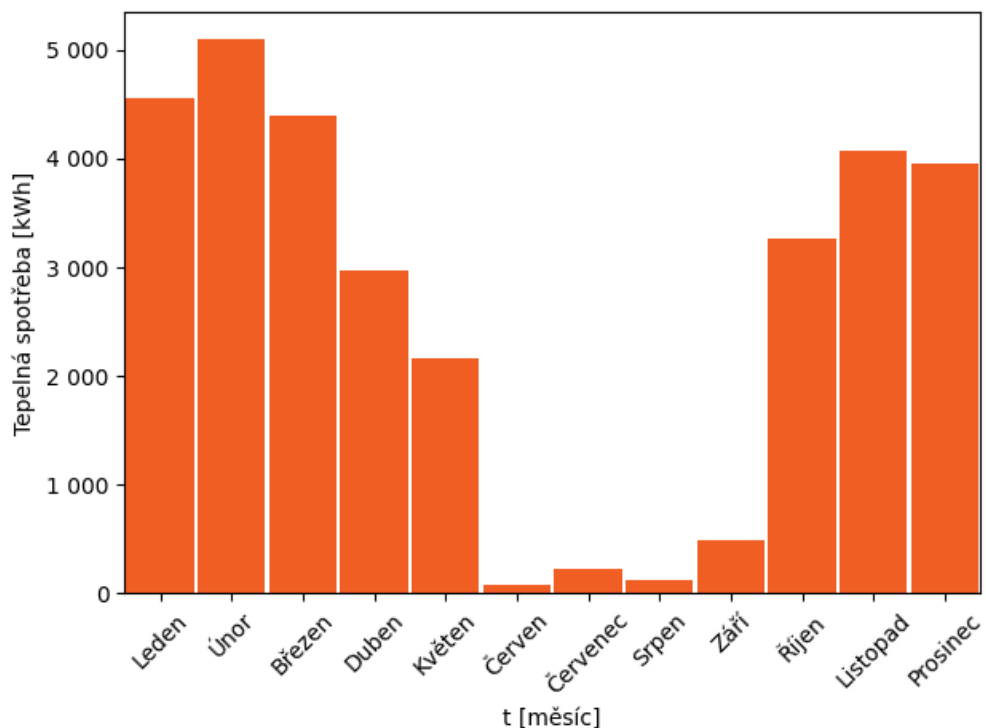
Tabulka 3.7: Roční diagram denní tepelné a elektrické spotřeby.

Měsíc	Q_d [kWh]	E_d [kWh]
Leden	4 554	6 663
Únor	5 094	6 838
Březen	4 391	6 547
Duben	2 977	6 073
Květen	2 157	6 097
Červen	79	6 436
Červenec	220	6 500
Srpen	125	5 071
Září	495	6 343
Říjen	3 262	6 375
Listopad	4 074	6 398
Prosinec	3 949	4 735

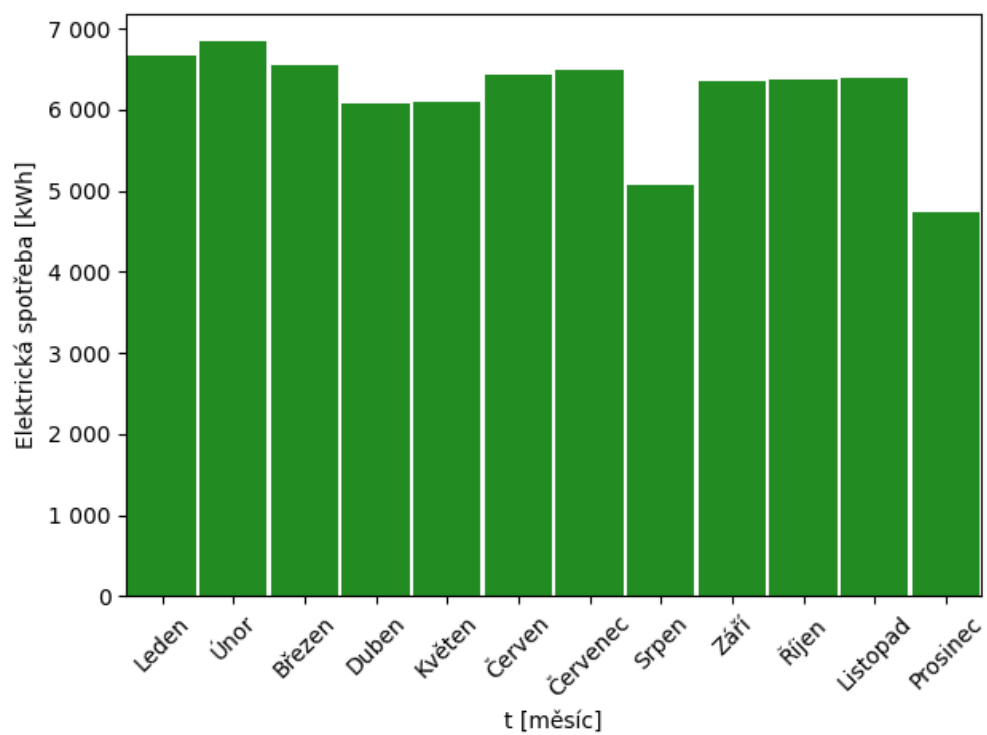
Q_d - denní tepelná spotřeba [kWh],
 E_d - denní elektrická spotřeba [kWh].

Grafické zobrazení ročního diagramu denní tepelné spotřeby je na obrázku 3.7. Grafické zobrazení ročního diagramu denní elektrické spotřeby je na obrázku 3.8.

Obrázek 3.7: Roční diagram denní tepelné spotřeby



Obrázek 3.8: Roční diagram denní elektrické spotřeby

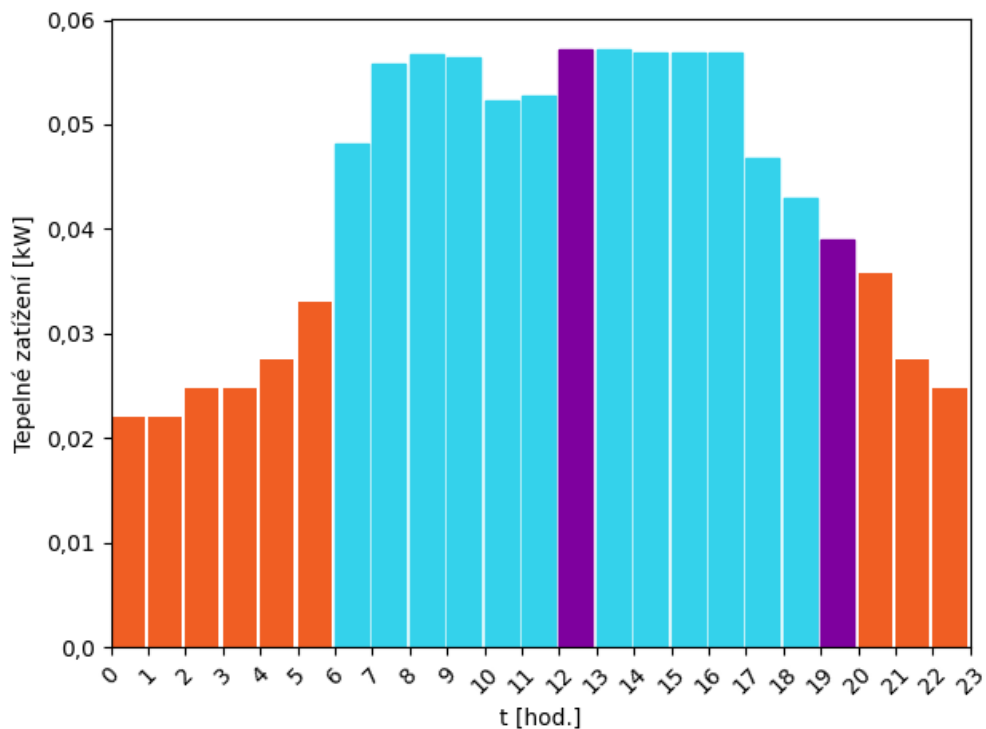


3.3 Návrh varianty s KJ

3.3.1 Návrh denního provozu KJ

Návrh denního provozu je graficky zobrazen na obrázku 3.9. Zde fialový sloupec mezi 12 a 13 hodinou představuje maximální denní normované tepelné zatížení. Světle modré čáry představují vybraný rozsah, který je ukončen fialovým sloupcem mezi 19 a 20 hodinou. Tento fialový sloupec představuje normované zatížení podle kterého bude vybrán typ kogenerační jednotky. V kapitole 2 je tato hodnota označena jako $P_{T,norm,w,min}$. Denní provoz kogenerační jednotky je tedy od 6 do 20 hodiny.

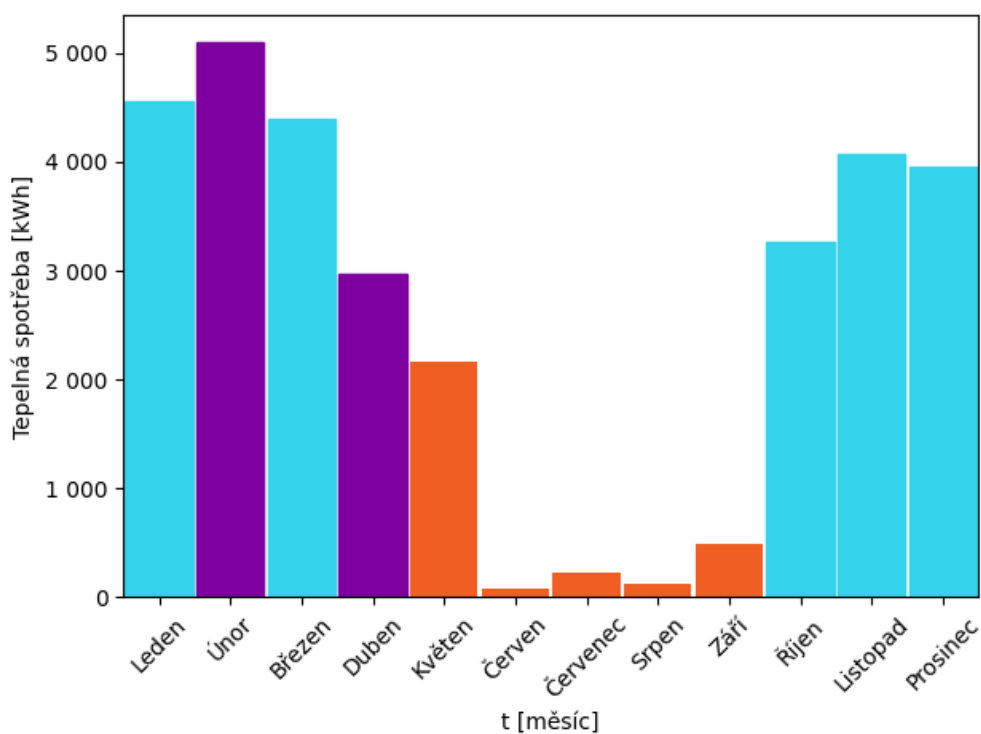
Obrázek 3.9: Algoritmus návrhu denního provozu



3.3.2 Návrh ročního provozu KJ

Návrh denního provozu je graficky zobrazen na obrázku 3.10. Zde fialový sloupec v měsíci únor představuje maximální denní spotřebu tepelné energie. Světle modré čáry představují vybraný rozsah, který je ukončen fialovým sloupcem v měsíci Duben. Tento fialový sloupec představuje denní spotřebu, podle které bude navrhován typ kogenerační jednotky. V kapitole 2 je tato hodnota označena jako $Q_{d,w,min}$. Roční provoz kogenerační jednotky je tedy od října do dubna.

Obrázek 3.10: Algoritmus návrhu ročního provozu



3.3.3 Výběr typu kogenerační jednotky

Parametry zvoleného typu kogenerační jednotky jsou v tabulce C.1.

Tabulka 3.8: Parametry zvolené KJ.

Název	Micro 30
$P_{T,n}$ [kW]	58,1
$P_{E,n}$ [kW]	30
η_T [—]	0,628
η_E [—]	0,324
N_c [Kč]	1 300 000
N_{pr} [Kč]	200 000
n_{sr} [Kč · kWh ⁻¹]	0,396
T_g [rok]	10
N_g [Kč]	900 000
n_{kj} [—]	1

$P_{T,n}$ - jmenovitý tepelný výkon KJ [kW],
 $P_{E,n}$ - jmenovitý elektrický výkon KJ [kW],
 η_T - tepelná účinnost při jmenovitém zatížení [-],
 η_E - elektrická účinnost při jmenovitém zatížení [-],
 N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],
 N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč],
 n_{sr} - servisní výdaje na kWh vyrobené tepelné energie (bez DPH) [Kč],
 T_g - doba do generální opravy [hod.],
 N_g - cena generální opravy (bez DPH) [Kč].

3.3.4 Pokrytí tepelné a elektrické spotřeby kogenerační jednotkou

Výsledky pokrytí tepelné a elektrické spotřeby kogenerační jednotkou jsou v tabulce 3.9.

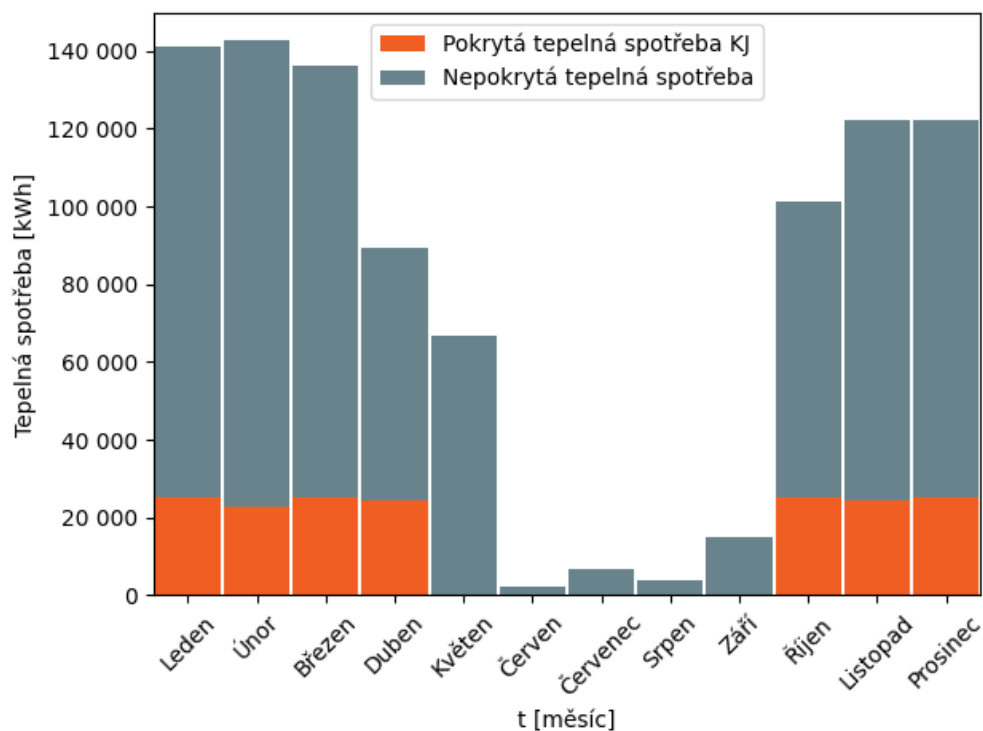
Tabulka 3.9: Pokrytí tepelné a elektrické spotřeby.

Měsíc	Q_{kj} [kWh]	Q_{zb} [kWh]	E_{kj} [kWh]	E_{kup} [kWh]	E_{prod} [kWh]
Leden	25 215	115 959	13 020	193 533	0
Únor	22 775	119 857	11 760	179 704	0
Březen	25 215	110 906	13 020	189 937	0
Duben	24 402	64 908	12 600	169 590	0
Květen	0	66 867	0	189 007	0
Červen	0	2 370	0	193 080	0
Červenec	0	6 820	0	201 500	0
Srpen	0	3 875	0	157 201	0
Září	0	14 850	0	190 290	0
Říjen	25 215	75 907	13 020	184 605	0
Listopad	24 402	97 818	12 600	179 340	0
Prosinec	25 215	97 204	13 020	133 765	0
Celkem	172 441	777 339	89 040	2 161 552	0

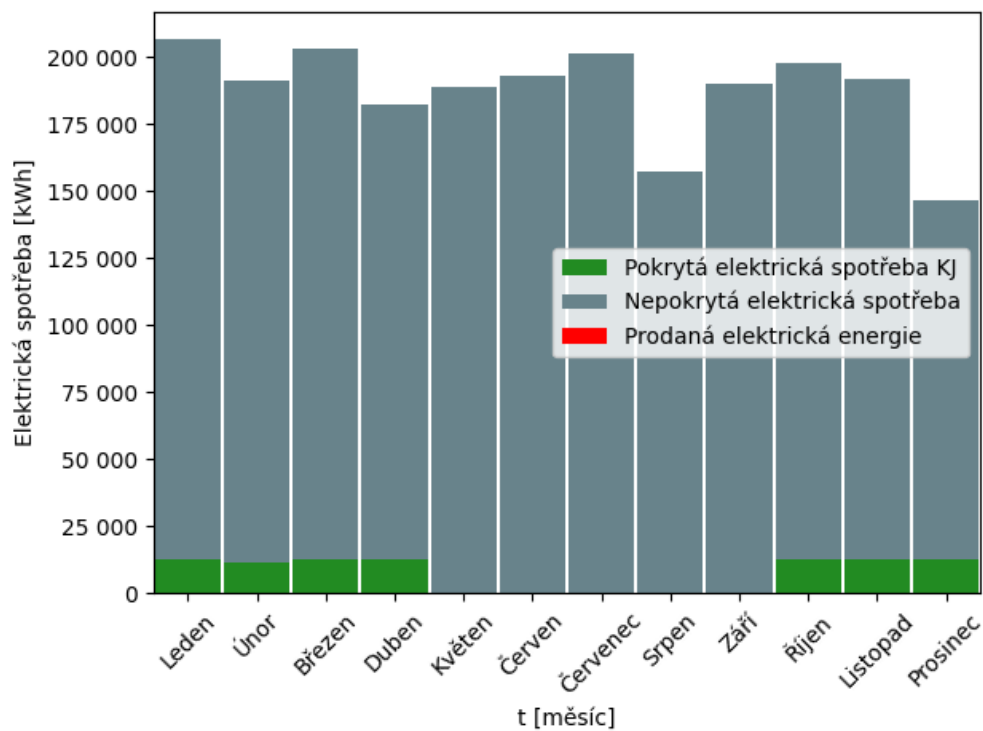
Q_{kj} - tepelná energie vyrobená kogenerační jednotkou [kWh],
 Q_{zb} - tepelná energie vyrobená plynovými kotli [kWh],
 E_{kj} - elektrická energie vyrobená kogenerační jednotkou [kWh],
 E_{kup} - nakoupená elektrická energie ze sítě [kWh],
 E_{prod} - prodaná elektrická energie do sítě [kWh].

Grafické zobrazení pokrytí tepelné spotřeby kogenerační jednotkou je na obrázku 3.11. Grafické zobrazení pokrytí elektrické spotřeby kogenerační jednotkou je na obrázku 3.12.

Obrázek 3.11: Pokrytí tepelné spotřeby



Obrázek 3.12: Pokrytí elektrické spotřeby



3.3.5 Výběr plynových kotlů pro pokrytí tepelného zatížení

Seznam vybraných plynových kotlů s parametry pro variantu s KJ je v tabulce A.2.

Tabulka 3.10: Seznam plynových kotlů pro variantu s KJ.

Název	P_n [kW]	N_c [Kč]	N_{pr} [Kč]
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000
IMMERGAS VICTRIX PRO 100	100,0	115 000	40 000
BAXI LUNA DUO-TEC	65,0	90 000	30 000

P_n - jmenovitý výkon KJ [kW],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč].

3.4 Návrh varianty bez KJ

Seznam vybraných plynových kotlů s parametry pro variantu bez KJ je v tabulce B.1.

Tabulka 3.11: Seznam plynových kotlů pro variantu bez KJ.

Název	P_n [kW]	N_c [Kč]	N_{pr} [Kč]
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000
BAXI LUNA DUO-TEC	65,0	90 000	30 000

P_n - jmenovitý výkon KJ [kW],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč].

Kapitola 4

Technicko – ekonomické zhodnocení návrhu kogenerační jednotky

V této kapitole budou ekonomicky zhodnoceny následující 3 varianty:

1. varianta A - varianta s KJ a plynovými kotli,
2. varianta B - varianta s plynovými kotli,
3. varianta C - varianta s KJ.

U varianty A bude provedena investice do kogeneračních jednotek a plynových kotlů navrhnuté v předešlé kapitole. U varianty B bude provedena investice pouze do plynových kotlů navrhnutých v předchozí kapitole. Varianta C bude zohledňovat investici pouze do kogenerační jednotky.

Varianty budou následně ekonomicky zhodnoceny oproti stávajícímu stavu, kde veškerá elektrická energie je nakoupena ze sítě a veškerá tepelná energie je nakoupena z teplárny.

V ekonomickém zhodnocení bude používáno zaokrouhlování na celá čísla. Všechny cenové údaje jsou bez DPH. Dále nebude zohledněn vliv daně z příjmu a vliv inflace.

Informace o ceně elektřiny a zemního plynu je od Centropolu Energy.

Základní technicko-ekonomické parametry zobrazuje tabulka 4.1.

Tabulka 4.1: Základní parametry

Tepelná účinnost KJ [-]	0,628
Účinnost kotlů [-]	0,93
Spotřeba tepla za rok [kWh]	949 793
Spotřeba elektřiny za rok [kWh]	2 250 578
Eskalace ceny tepla pro rok 2022	1,1
Cena tepla [Kč/kWh]	1,457
Cena zemního plynu [Kč/kWh]	1,3
Cena elektřiny [Kč/kWh]	3

4.1 Provozní příjmy a výdaje

Data o spotřebě a výrobě energií pro danou variantu jsou v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Spotřeba a výroba energie

Varianta	Výchozí	A	B	C
Teplo vyrobené KJ [kWh/rok]	0	172 441	0	172 441
Teplo vyrobené plynovými kotli [kWh/rok]	0	777 352	949793	0
Teplo nakoupené zw SZT [kWh/rok]	949 793	0	0	777 352
Výrobena elektřina KJ [kWh/rok]	0	89 040	0	89 040
Nakoupena elektřina [kWh/rok]	2 250 578	2 161 538	2 250 578	2 161 538

Na základně spotřeby zemního plynu, elektrické energie a tepla budou určeny provozní příjmy a výdaje. Zde příjem dané varianty znamená úspora výdajů oproti výchozí variantě. Provozní příjmy a výdaje jsou zobrazeny v tabulce 4.3. V tabulce je záporný výdaj příjmem, neboli úsporou oproti výchozímu stavu. Výdaje na zemní plyn, elektřinu a teplo byly stanoveny na základě spotřeb a ceny těchto energií. Servisní výdaje za KJ jsou stanoveny na základě množství vyrobené tepelné energie od KJ. Servisní výdaje za plynové kotle byly odborně odhadnuty jako 36 000 Kč/rok. Doba do generální opravy u zvoleného typu kogenerační jednotky je 60 000 hodin. Při provozu 3 000 hodin ročně vyháží generální oprava za 20 let, což je delší doba, než doba životnosti (porovnání), která je 15 let. Tudíž výdaje za generální opravu KJ nebudeme uvažovat. Všechna vyrobená elektrická energie od kogenerační jednotky je využita k pokrytí elektrického zatížení objektu, tudíž není uvažován příjem z prodeje elektrické energie do sítě.

Tabulka 4.3: Provozní příjmy a výdaje

Varianta	Výchozí	A	B	C
Výdaje za zemní plyn [Kč/rok]	0	1 443 585	1 327 668	356 964
Výdaje za elektřinu [Kč/rok]	6 751 734	-267120	0	-267 120
Výdaje za teplo [Kč/rok]	1 383 848	-1 383 848	-1 383 848	-251 247
Servisní výdaje za KJ [Kč/rok]	0	68 287	0	68 287
Servisní výdaje za plynové kotle [Kč/rok]	0	36 000	36 000	0

4.2 Investice

Počáteční investice jednotlivých variant jsou zobrazeny v následujících tabulkách. Položka výdaje na připojení byla odborně odhadnuta na základě vzdálenosti od nejbližšího plynovodu.

Tabulka 4.4: Investice varianty A

Položka	Cena jednotky [Kč]	Výdaje na připojení [Kč]	Množství [ks]	Celkem [Kč]
KJ - Micro 30	1 300 000	200 000	1	1 500 000
PK - Vaillant	150 000	50 000	1	200 000
PK - Immergas	115 000	40 000	1	155 000
PK - Baxi	90 000	30 000	1	120 000
Celkem [Kč]				1 975 000

Tabulka 4.5: Investice varianty B

Položka	Cena jednotky [Kč]	Výdaje na připojení [Kč]	Množství [ks]	Celkem [Kč]
PK - Vaillant	150 000	50 000	2	400 000
PK - Baxi	90 000	30 000	1	120 000
Celkem [Kč]				520 000

Tabulka 4.6: Investice varianty C

Položka	Cena jednotky [Kč]	Výdaje na připojení [Kč]	Množství [ks]	Celkem [Kč]
KJ - Micro 30	1 300 000	200 000	1	1 500 000
Celkem [Kč]				1 500 000

4.3 Ekonomické zhodnocení variant

Počáteční investice a CF jednotlivých variant zobrazuje tabulka 4.7. CF je pro každý rok stejné. Doba životnosti (posouzení) projektu je 15 let. Diskont byl zvolen jako 0,1. Investice proběhne v nultém roce. Provoz ovšem začne až v následujícím roce.

Tabulka 4.7: Investice a CF

Varianta	A	B	C
Investice [Kč]	1 975 000	520000	1 500 000
CF [Kč]	103 096	20 181	93 116

Výsledky kritérií ekonomické efektivity jsou zobrazeny v tabulce 4.8. NPV u každé varianty vyšlo záporné, stejně tak IRR. PP je větší, než doba životnosti (porovnání). Tudíž na základě těchto výsledků je investice do kogenerační jednotky nedoporučena. Stejně tak investice do plynových kotlů není doporučena. Kompletní ekonomický rozpis je poté v příloze.

Tabulka 4.8: Výsledky kritérií ekonomické efektivity

Varianta	A	B	C
NPV [Kč]	-1 190 840	-366 503	-791 755
IRR [%]	-3	-6	-1
PP [rok]	více než 15 let	více než 15 let	více než 15 let

Závěr

V předložené práci byl vytvořen algoritmus pro návrh kogenerační jednotky, který byl následně implementován v jazyce Python jako výpočetní program. Algoritmus realizuje návrh kogenerační jednotky na základě ročního diagramu tepelné spotřeby a průměrného denního diagramu tepelného zatížení. Kogenerační jednotka je navržena tak, aby pokryla co největší část tepelné spotřeby, zároveň aby při jejím provozu nevznikaly tepelné ztráty. Denní a roční provoz kogenerační jednotky je navržen tak, aby byl kontinuální. Část vyrobené elektrické energie se využije k pokrytí elektrické spotřeby daného objektu. Pokud je v daném čase elektrický výkon kogenerační jednotky větší než elektrické zatížení objektu, tak je zbylý výkon dodáván do sítě a tím vznikají příjmy z prodeje elektrické energie. Algoritmus umožňuje návrh plynových kotlů pro pokrytí zbylého tepelného zatížení, které nebylo pokryto kogenerační jednotkou, dále je umožňuje navrhnout plynové kotle tak, aby byly schopny pokrýt veškeré tepelné zatížení objektu bez kogenerační jednotky.

Pomocí výpočetního programu byl proveden technický návrh kogenerační jednotky a plynových kotlů pro průmyslový podnik na základě vstupních dat reprezentujících tento objekt. Byly vytvořeny tři varianty A, B a C. U varianty A je provedena investice do kogenerační jednotky a plynových kotlů pro pokrytí zbylého tepelného zatížení. Varianta B neuvažuje nákup kogenerační jednotky, zde je pouze provedena investice do plynových kotlů, které pokrývají veškerou tepelnou spotřebu. C představuje variantu, kde je nakoupena kogenerační jednotka stejně jako u varianty A, ale investice do plynových kotlů provedena není. Navržené varianty byly ekonomicky porovnány oproti výchozímu stavu, kde je tepelná energie nakoupena z teplárny a elektrická spotřeba pokryta nákupem ze sítě.

Ekonomické porovnání je provedeno při ceně elektřiny 3 Kč/kWh, ceně zemního plynu 1,3 Kč/kWh a ceně tepla 1,457 Kč/kWh. Všechny ceny jsou bez DPH. Není zohledněn vliv daně z příjmu a inflace. Výsledky pro dané varianty zobrazuje tabulka 4.9.

Tabulka 4.9: Výsledky kritérií ekonomické efektivity

Varianta	A	B	C
NPV [Kč]	-1 190 840	-366 503	-791 755
IRR [%]	-3	-6	-1
PP [rok]	více než 15 let	více než 15 let	více než 15 let

Výsledkem propočtu ekonomické efektivity je nedoporučení investice ani do kogenerační jednotky, ani do plynových kotlů. U varianty A vyšlo NPV -1 190 840 Kč. U koupě pouze plynových kotlů je NPV -366 503 Kč. U každé varianty NPV, IRR a PP ukazují, že investice je ekonomicky nevýhodná. Ekonomická neefektivnost investic je však způsobena předpokladem nízké ceny tepla a nízké ceny elektřiny.

Práce posuzuje návrh jednoho konkrétního případu, kde jsou fixní ceny elektrické energie, zemního plynu a tepla. Na základě citlivostní analýzy, jejíž výsledky jsou zobrazeny v příloze této práce je vidět, že ekonomická efektivnost je silně závislá zejména na ceně tepla a ceně zemního plynu. Přínosem práce je vytvoření algoritmu (modelu), pomocí něhož lze simulovat návrh kogenerační jednotky při změnách vstupních dat.

Je velmi důležité, aby vstupní data popisující tepelnou a elektrickou spotřebu byla co nejpřesnější. Pokud by byla tato data nepřesná, může to vést ke špatnému návrhu kogenerační jednotky a jejího denního a ročního provozu. To může vést k velkým tepelným ztrátám a tím vysokým výdajům na palivo.

Seznam literatury

- [1] BUDÍN, Jan. Kogenerace - princip, technologie a výhody. O energetice [online]. Nové Dvory, 2015 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody/>.
- [2] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. ČR: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- [3] ERU. Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR. ERU [online]. Jihlava, 2017 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc.
- [4] FIEDLER, Jan. Výhody a omezení malých kogeneračních jednotek. TZB-info [online]. 2011 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek>. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek>.
- [5] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. Fundamentals of Physics Extended, 10th edition. Toronto: John Wiley, 2014. ISBN 1118230612.
- [6] IBLER, Zdeněk a Robert A. MEYERS. Technický průvodce energetika. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1.
- [7] IBLER, Zdeněk a Robert A. MEYERS. Technický průvodce energetika – 2. díl. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-097-0.
- [8] INPOLEX. Cogeneration Systems Advantages and Disadvantages. Inporex [online]. Peregian Beach, 2018 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.inporex.com.au/information/cogeneration-systems-advantages-and-disadvantages>.
- [9] KARAFIÁT, Josef. Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. MPO [online]. Praha: ORTEP, 2006 [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>.
- [10] KORNIA, Libor. Parní turbíny. ENERGETICKÝ ÚSTAV FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Kudela/files/2019_Parn%C3%AD%20turb%C3%ADny_Skripta_Kornia.pdf.
- [11] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky zřizování a provoz. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-80-7328-151-9.
- [12] MEYERS, Robert A. Encyclopedia of Physical Science and Technology. California, USA: Elsevier Science, 2001. ISBN 978-0-12-227410-7. 978-0-12-227410-7.

- [13] MOLEK, Tomáš. O kogeneraci. O energetice [online]. Nové Dvory, 2015 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/uhelne-kondenzacni-elektrarny>.
- [14] NASCIMENTO, Marco, a kolektiv. Micro Gas Turbine Engine. IntechOpen [online]. London, 2013 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/45114>.
- [15] NICE, Karim. How Stirling Engines Work. HowStuffWorks [online]. Atlanta, 2021 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/stirling-engine.html>.
- [16] NOVOTNÝ, Jiří. Neobnovitelná primární energie. TZB-info [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vytapani/16491-neobnovitelna-primarni-energie>.
- [17] POVÝŠIL, Roman. Mikrokogenerace - efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie. MPO [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>.
- [18] QUOILIN, Sylvain. An introduction to thermodynamics applied to Organic Rankine Cycles. Thermodynamics Laboratory Université de Liège [online]. Allée de la Découverte, 2008 [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: http://www.labothap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/ORC_thermodynamics_SQ081126.pdf.
- [19] RAEN, spol. s r.o. Návrh a provoz kogeneračních jednotek. MPO [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/008153.pdf>.
- [20] VOŽENÍLEK, Petr a Vladimír NOVOTNÝ. Elektromechanické měniče. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [21] ČEZ ENEGRO, s.r.o. O kogeneraci. Topenářství instalace [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/o-kogeneraci-detail-4039>.

Seznam příloh

Příloha A: Výsledovka varianty A

Příloha B: Výsledovka varianty B

Příloha C: Výsledovka varianty C

Příloha D: Citlivostní analýza NPV na cenu elektřiny

Příloha E: Citlivostní analýza NPV na cenu zemního plyn

Příloha F: Citlivostní analýza NPV na cenu tepla

Příloha G: Výpočetní program pro technický návrh

Příloha H: Výpočetní program pro ekonomické zhodnocení

Příloha A

Výsledovka varianty A

Varianta, kde je provedena investice do kogenerační jednotky a plynových kotlů.

Tabulka A.1: Parametry zvolené KJ.

Název	Micro 30
$P_{T,n}$ [kW]	58,1
$P_{E,n}$ [kW]	30
η_T [-]	0,628
η_E [-]	0,324
N_c [Kč]	1 300 000
N_{pr} [Kč]	200 000
n_{sr} [Kč · kWh ⁻¹]	0,396
T_g [rok]	10
N_g [Kč]	900 000
n_{kj} [-]	1

$P_{T,n}$ - jmenovitý tepelný výkon KJ [kW],

$P_{E,n}$ - jmenovitý elektrický výkon KJ [kW],

η_T - tepelná účinnost při jmenovitém zatížení [-],

η_E - elektrická účinnost při jmenovitém zatížení [-],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč],

n_{sr} - servisní výdaje na kWh vyrobené tepelné energie (bez DPH) [Kč],

T_g - doba do generální opravy [hod.],

N_g - cena generální opravy (bez DPH) [Kč].

Tabulka A.2: Seznam plynových kotlů.

Název	P_n [kW]	N_c [Kč]	N_{pr} [Kč]
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000
IMMERGAS VICTRIX PRO 100	100,0	115 000	40 000
BAXI LUNA DUO-TEC	65,0	90 000	30 000

P_n - jmenovitý výkon KJ [kW],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč].

Tabulka A.3: Investice

Položka	Cena jednotky [Kč]	Výdaje na připojení [Kč]	Množství [ks]	Celkem [Kč]
KJ - Micro 30	1 300 000	200 000	1	1 500 000
PK - Vaillant	150 000	50 000	1	200 000
PK - Immergas	115 000	40 000	1	155 000
PK - Baxi	90 000	30 000	1	120 000
Celkem [Kč]				1 975 000

Tabulka A.4: Výsledovka, 1. část

Rok	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Příjmy [Kč]	0	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968
Z toho elektřina [Kč]	0	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120
Z toho teplo [Kč]	0	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848
Provozní výdaje [Kč]	0	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872
Z toho za zemní plyn [Kč/rok]	0	1 443 585	1 443 580	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585
Z toho servisní výdaje za KJ [Kč/rok]	0	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287
Z toho servisní výdaje za plynové kotle [Kč/rok]	0	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000
Investiční výdaje [Kč]	1 975 000	0	0	0	0	0	0	0
Hotovostní tok běžného roku [Kč]	-1 975 000	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096
Kumulovaný CF	-1 975 000	-1 871 904	-1 768 807	-1 665 711	-1 562 614	-1 459 518	-1 356 421	-1 253 325
Odúročitel	1,000	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513
Diskontovaný CF	-1 975 000	93 724	85 204	77 458	70 416	64 015	58 195	52 905
Kumulovaný diskontovaný CF	-1 975 000	-1 881 276	-1 796 072	-1 718 614	-1 648 198	-1 584 183	-1 525 988	-1 473 083

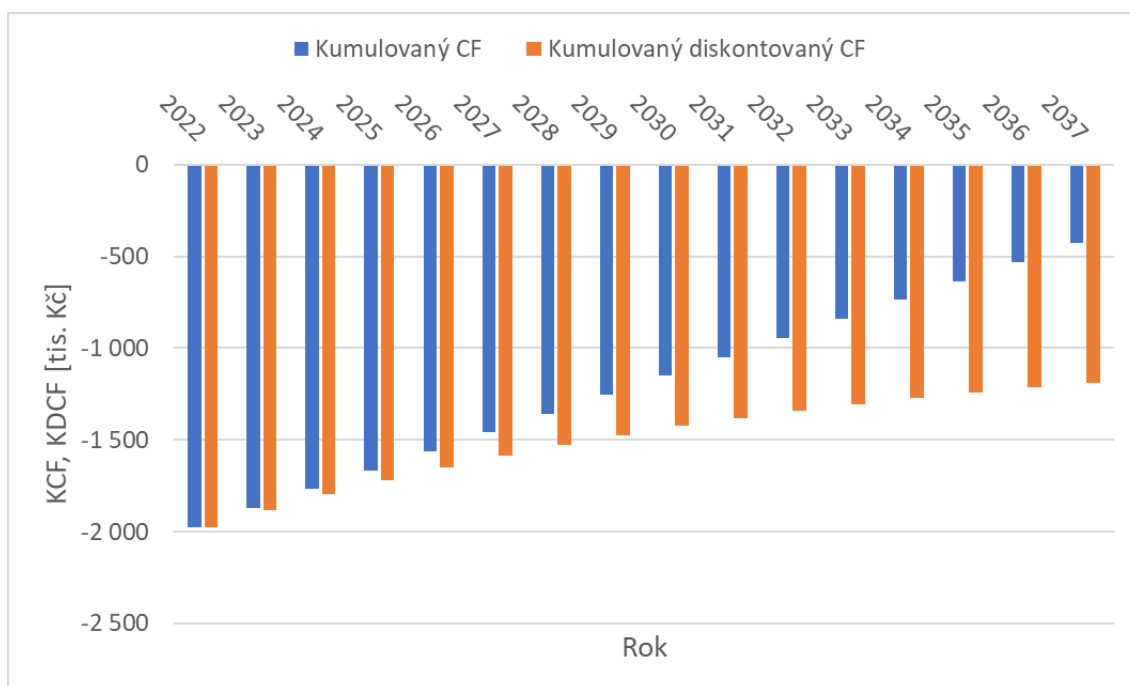
Tabulka A.5: Výsledovka, 2.část

Rok	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Příjmy [Kč]	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968	1 650 968
Z toho elektřina [Kč]	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120
Z toho teplo [Kč]	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848
Provozní výdaje [Kč]	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872	1 547 872
Z toho za zemní plyn [Kč/rok]	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585	1 443 585
Z toho servisní výdaje za KJ [Kč/rok]	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287
Z toho servisní výdaje za plynové kotle [Kč/rok]	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000
Investiční výdaje [Kč]	0	0	0	0	0	0	0	0
Hotovostní tok běžného roku [Kč]	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096	103 096
Kumulovaný CF	-1 150 228	-1 047 132	-944 035	-840 939	-737 842	-634 746	-531 649	-428 553
Odúročitel	0,467	0,424	0,386	0,350	0,319	0,290	0,263	0,239
Diskontovaný CF	48 095	43 723	39 748	36 135	32 850	29 863	27 149	24 680
Kumulovaný diskontovaný CF	-1 424 988	-1 381 265	-1 341 517	-1 305 382	-1 272 532	-1 242 669	-1 215 521	-1 190 840

Tabulka A.6: Výsledky kritérií ekonomické efektivity

Doba životnosti (porovnání)	15 let
Diskont [%]	10
NPV [Kč]	-1 190 840
IRR [%]	-3
PP [rok]	více než 15 let

Obrázek A.1: Kumulovaný CF a kumulovaný diskontovaný CF varianty A



Příloha B

Výsledovka varianty B

Varianta, kde je provedena investice do plynových kotlů.

Tabulka B.1: Seznam plynových kotlů.

Název	P_n [kW]	N_c [Kč]	N_{pr} [Kč]
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000
VAILLANT VU 1206/5-5 ECOTEC PLUS	123,4	150 000	50 000
BAXI LUNA DUO-TEC	65,0	90 000	30 000

P_n - jmenovitý výkon KJ [kW],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč].

Tabulka B.2: Investice

Položka	Cena jednotky [Kč]	Výdaje na připojení [Kč]	Množství [ks]	Celkem [Kč]
PK - Vaillant	150 000	50 000	2	400 000
PK - Baxi	90 000	30 000	1	120 000
Celkem [Kč]				520 000

Tabulka B.3: Výsledovka, 1.část

Rok	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Příjmy [Kč]	0	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848
Z toho teplo [Kč]	0	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848
Provozní výdaje [Kč]	0	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668
Z toho za zemní plyn [Kč/rok]	0	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668
Z toho servisní výdaje za plynové kotle [Kč/rok]	0	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000
Investiční výdaje [Kč]	520 000	0	0	0	0	0	0	0
Hotovostní tok běžného roku [Kč]	-520 000	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181
Kumulovaný CF	-520 000	-499 819	-479 638	-459 458	-439 277	-419 096	-398 915	-378 735
Odúročitel	1,000	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513
Diskontovaný CF	-520 000	18 346	16 678	15 162	13 784	12 531	11 392	10 356
Kumulovaný diskontovaný CF	-520 000	-501 654	-484 976	-469 813	-456 030	-443 499	-432 108	-421 752

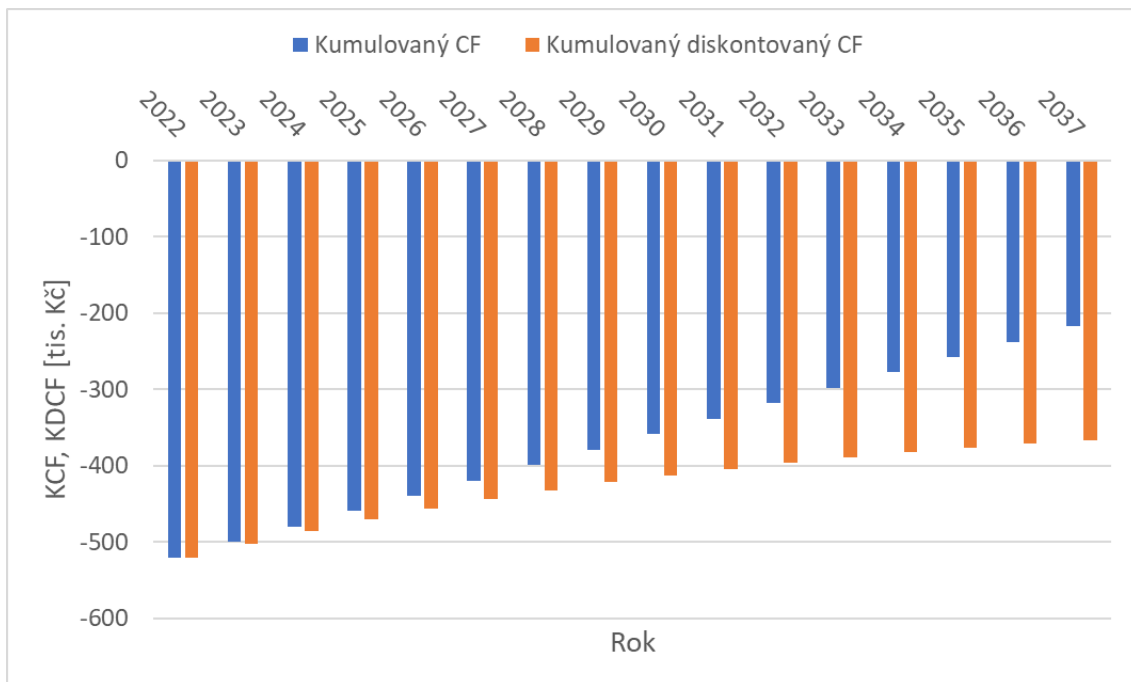
Tabulka B.4: Výsledovka, 2.část

Rok	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Příjmy [Kč]	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848
Z toho teplo [Kč]	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848	1 383 848
Provozní výdaje [Kč]	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668	1 363 668
Z toho za zemní plyn [Kč/rok]	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668	1 327 668
Z toho servisní výdaje za plynové kotle [Kč/rok]	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000	36 000
Investiční výdaje [Kč]	0	0	0	0	0	0	0	0
Hotovostní tok běžného roku [Kč]	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181	20 181
Kumulovaný CF	-358 554	-338 373	-318 192	-298 012	-277 831	-257 650	-237 469	-217 289
Odúročitel	0,467	0,424	0,386	0,350	0,319	0,290	0,263	0,239
Diskontovaný CF	9 414	8 559	7 781	7 073	6 430	5 846	5 314	4 831
Kumulovaný diskontovaný CF	-412 337	-403 778	-395 998	-388 925	-382 494	-376 649	-371 335	-366 503

Tabulka B.5: Výsledky kritérií ekonomické efektivity

Doba životnosti (porovnání)	15 let
Diskont [%]	10
NPV [Kč]	-366 503
IRR [%]	-6
PP [rok]	více než 15 let

Obrázek B.1: Kumulovaný CF a kumulovaný diskontovaný CF



Příloha C

Výsledovka varianty C

Varianta, kde je provedena investice do kogenerační jednotky.

Tabulka C.1: Parametry zvolené KJ.

Název	Micro 30
$P_{T,n}$ [kW]	58,1
$P_{E,n}$ [kW]	30
η_T [-]	0,628
η_E [-]	0,324
N_c [Kč]	1 300 000
N_{pr} [Kč]	200 000
n_{sr} [Kč · kWh ⁻¹]	0,396
T_g [rok]	60 000
N_g [Kč]	900 000
n_{kj} [-]	1

$P_{T,n}$ - jmenovitý tepelný výkon KJ [kW],

$P_{E,n}$ - jmenovitý elektrický výkon KJ [kW],

η_T - tepelná účinnost při jmenovitém zatížení [-],

η_E - elektrická účinnost při jmenovitém zatížení [-],

N_c - cena jednotky (bez DPH) [Kč],

N_{pr} - výdaje na připojení (bez DPH) [Kč],

n_{sr} - servisní výdaje na kWh vyrobené tepelné energie (bez DPH) [Kč],

T_g - doba do generální opravy [hod.],

N_g - cena generální opravy (bez DPH) [Kč].

Tabulka C.2: Investice

Položka	Cena jednotky [Kč]	Výdaje na připojení [Kč]	Množství [ks]	Celkem [Kč]
KJ - Micro 30	1 300 000	200 000	1	1 500 000
Celkem [Kč]				1 500 000

Tabulka C.3: Výsledovka, 1.část

Rok	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Příjmy [Kč]	0	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367
Z toho elektrina [Kč]	0	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120
Z toho teplo [Kč]	0	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247
Provozní výdaje [Kč]	0	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251
Z toho za zemní plyn [Kč/rok]	0	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964
Z toho servisní výdaje za KJ [Kč/rok]	0	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287
Investiční výdaje [Kč]	1 500 000	0	0	0	0	0	0	0
Hotovostní tok běžného roku [Kč]	-1 500 000	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116
Kumulovaný CF	-1 500 000	-1 406 884	-1 313 769	-1 220 653	-1 127 537	-1 034 422	-941 306	-848 190
Odtůčitel	1,000	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513
Diskontovaný CF	-1 500 000	84 651	76 955	69 959	63 599	57 818	52 561	47 783
Kumulovaný diskontovaný CF	-1 500 000	-1 415 349	-1 338 394	-1 268 435	-1 204 836	-1 147 018	-1 094 457	-1 046 674

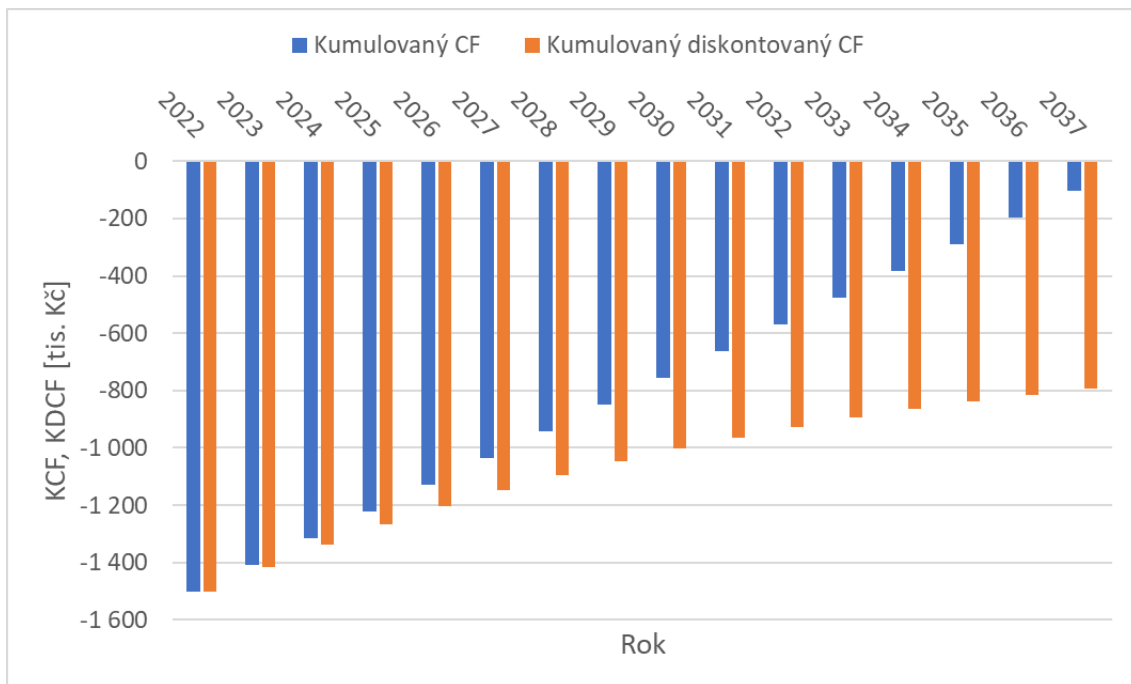
Tabulka C.4: Výsledovka, 2. část

Rok	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Příjmy [Kč]	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367	518 367
Z toho elektrina [Kč]	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120	267 120
Z toho teplo [Kč]	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247	251 247
Provozní výdaje [Kč]	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251	425 251
Z toho za zemní plyn [Kč/rok]	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964	356 964
Z toho servisní výdaje za KJ [Kč/rok]	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287	68 287
Investiční výdaje [Kč]	0	0	0	0	0	0	0	0
Hotovostní tok běžného roku [Kč]	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116	93 116
Kumulovaný CF	-755 075	-661 959	-568 843	-475 727	-382 612	-289 496	-196 380	-103 265
Odtřočitel	0,467	0,424	0,386	0,350	0,319	0,290	0,263	0,239
Diskontovaný CF	43 439	39 490	35 900	32 636	29 670	26 972	24 520	22 291
Kumulovaný diskontovaný CF	-1 003 235	-963 745	-927 844	-895 208	-865 538	-838 566	-814 046	-791 755

Tabulka C.5: Výsledky kritérií ekonomické efektivity

Doba životnosti (porovnání)	15 let
Diskont [%]	10
NPV [Kč]	-791 755
IRR [%]	-1
PP [rok]	více než 15 let

Obrázek C.1: Kumulovaný CF a kumulovaný diskontovaný CF



Příloha D

Citlivostní analýza NPV na cenu elektřiny

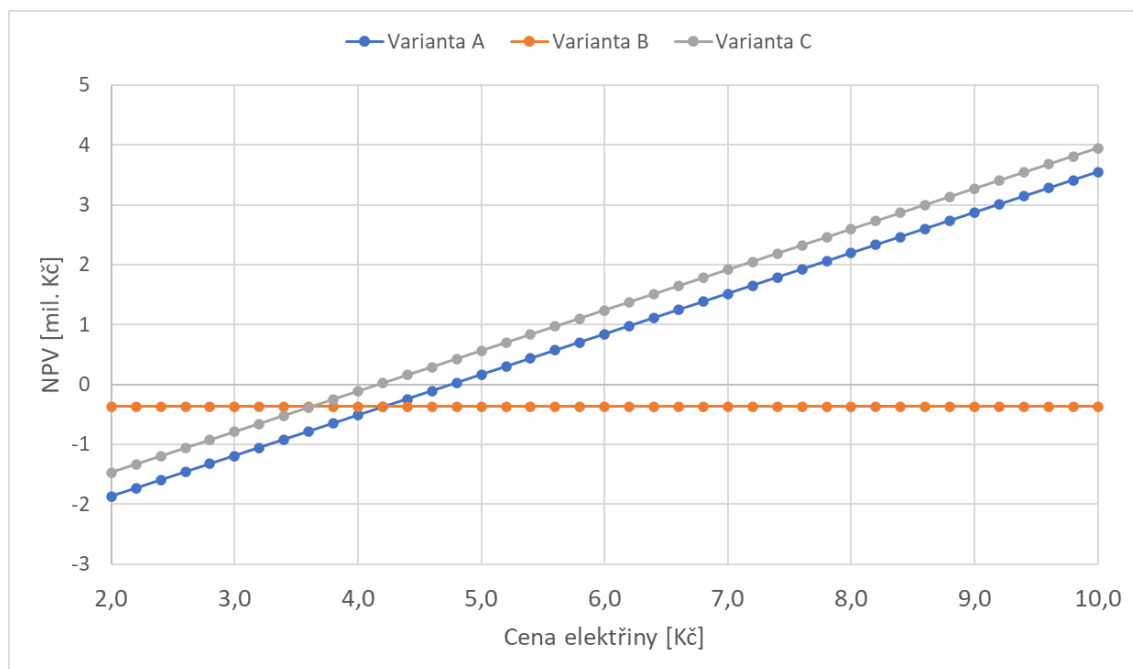
Tabulka D.1: Závislost NPV na ceně elektřiny, 1.část

Varianta	A	B	C
Cena elektřiny [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]
2	-1 868 085	-366 503	-1 469 000
2,2	-1 732 636	-366 503	-1 333 551
2,4	-1 597 187	-366 503	-1 198 102
2,6	-1 461 738	-366 503	-1 062 653
2,8	-1 326 289	-366 503	-927 204
3	-1 190 840	-366 503	-791 755
3,2	-1 055 391	-366 503	-656 306
3,4	-919 942	-366 503	-520 857
3,6	-784 493	-366 503	-385 408
3,8	-649 044	-366 503	-249 958
4	-513 595	-366 503	-114 509
4,2	-378 146	-366 503	20 940
4,4	-242 697	-366 503	156 389
4,6	-107 248	-366 503	291 838
4,8	28 202	-366 503	427 287
5	163 651	-366 503	562 736
5,2	299 100	-366 503	698 185
5,4	434 549	-366 503	833 634
5,6	569 998	-366 503	969 083
5,8	705 447	-366 503	1 104 532
6	840 896	-366 503	1 239 981
6,2	976 345	-366 503	1 375 430
6,4	1 111 794	-366 503	1 510 879
6,6	1 247 243	-366 503	1 646 328
6,8	1 382 692	-366 503	1 781 778
7	1 518 141	-366 503	1 917 227

Tabulka D.2: Závislost NPV na ceně elektřiny, 2.část

Varianta	A	B	C
Cena elektřiny [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]
7,2	1 653 590	-366 503	2 052 676
7,4	1 789 039	-366 503	2 188 125
7,6	1 924 488	-366 503	2 323 574
7,8	2 059 937	-366 503	2 459 023
8	2 195 387	-366 503	2 594 472
8,2	2 330 836	-366 503	2 729 921
8,4	2 466 285	-366 503	2 865 370
8,6	2 601 734	-366 503	3 000 819
8,8	2 737 183	-366 503	3 136 268
9	2 872 632	-366 503	3 271 717
9,2	3 008 081	-366 503	3 407 166
9,4	3 143 530	-366 503	3 542 615
9,6	3 278 979	-366 503	3 678 064
9,8	3 414 428	-366 503	3 813 513
10	3 549 877	-366 503	3 948 963

Obrázek D.1: Závislost NPV na ceně elektřiny



Příloha E

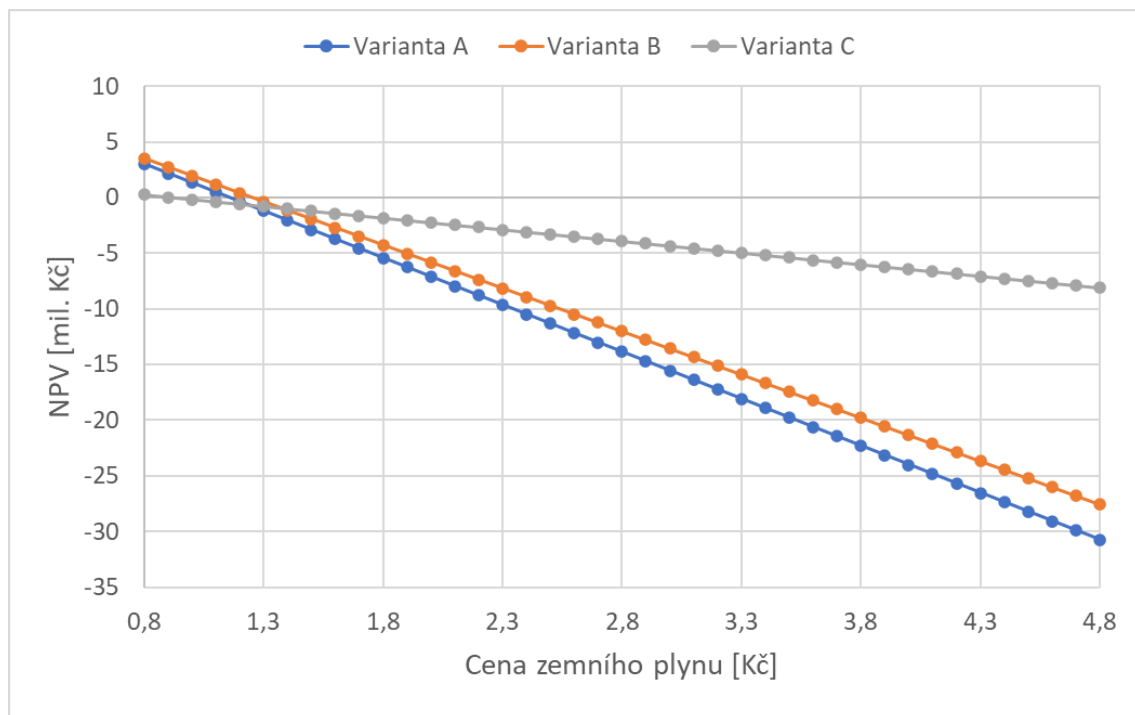
Citlivostní analýza NPV na cenu zemního plyn

Tabulka E.1: Závislost NPV na ceně zemního plynu

Varianta	A	B	C
Cena zemního plynu [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]
0,8	3 032 245	3 517 476	252 513
0,9	2 187 628	2 740 680	43 659
1	1 343 011	1 963 884	-165 194
1,1	498 394	1 187 088	-374 048
1,2	-346 223	410 292	-582 901
1,3	-1 190 840	-366 503	-791 755
1,4	-2 035 457	-1 143 299	-1 000 608
1,5	-2 880 074	-1 920 095	-1 209 462
1,6	-3 724 691	-2 696 891	-1 418 315
1,7	-4 569 308	-3 473 687	-1 627 169
1,8	-5 413 925	-4 250 483	-1 836 022
1,9	-6 258 542	-5 027 278	-2 044 876
2	-7 103 159	-5 804 074	-2 253 729
2,1	-7 947 776	-6 580 870	-2 462 583
2,2	-8 792 394	-7 357 666	-2 671 436
2,3	-9 637 011	-8 134 462	-2 880 290
2,4	-10 481 628	-8 911 257	-3 089 143
2,5	-11 326 245	-9 688 053	-3 297 997
2,6	-12 170 862	-10 464 849	-3 506 850
2,7	-13 015 479	-11 241 645	-3 715 704
2,8	-13 860 096	-12 018 441	-3 924 557
2,9	-14 704 713	-12 795 237	-4 133 411
3	-15 549 330	-13 572 032	-4 342 264
3,1	-16 393 947	-14 348 828	-4 551 118
3,2	-17 238 564	-15 125 624	-4 759 971
3,3	-18 083 181	-15 902 420	-4 968 825

Varianta	A	B	C
Cena zemního plynu [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]
3,4	-18 927 798	-16 679 216	-5 177 678
3,5	-19 772 415	-17 456 011	-5 386 532
3,6	-20 617 032	-18 232 807	-5 595 385
3,7	-21 461 649	-19 009 603	-5 804 239
3,8	-22 306 266	-19 786 399	-6 013 092
3,9	-23 150 884	-20 563 195	-6 221 946
4	-23 995 501	-21 339 990	-6 430 799
4,1	-24 840 118	-22 116 786	-6 639 653
4,2	-25 684 735	-22 893 582	-6 848 506
4,3	-26 529 352	-23 670 378	-7 057 360
4,4	-27 373 969	-24 447 174	-7 266 213
4,5	-28 218 586	-25 223 970	-7 475 067
4,6	-29 063 203	-26 000 765	-7 683 920
4,7	-29 907 820	-26 777 561	-7 892 774
4,8	-30 752 437	-27 554 357	-8 101 627

Obrázek E.1: Závislost NPV na ceně zemního plynu



Příloha F

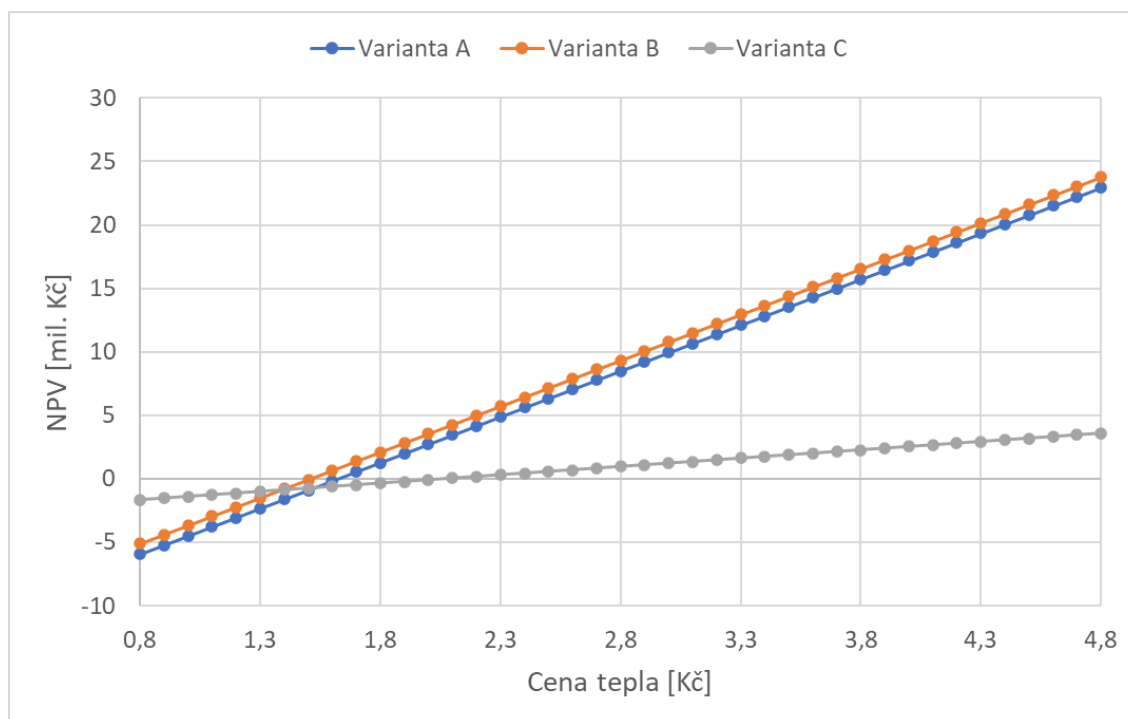
Citlivostní analýza NPV na cenu tepla

Tabulka F.1: Závislost NPV na ceně tepla

Varianta	A	B	C
Cena tepla [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]
0,8	-5 937 140	-5 112 804	-1 653 476
0,9	-5 214 720	-4 390 383	-1 522 316
1	-4 492 300	-3 667 963	-1 391 156
1,1	-3 769 880	-2 945 543	-1 259 996
1,2	-3 047 460	-2 223 123	-1 128 836
1,3	-2 325 040	-1 500 703	-997 676
1,4	-1 602 619	-778 283	-866 516
1,5	-880 199	-55 863	-735 356
1,6	-157 779	666 557	-604 196
1,7	564 641	1 388 977	-473 036
1,8	1 287 061	2 111 397	-341 876
1,9	2 009 481	2 833 818	-210 716
2	2 731 901	3 556 238	-79 556
2,1	3 454 321	4 278 658	51 604
2,2	4 176 741	5 001 078	182 764
2,3	4 899 161	5 723 498	313 924
2,4	5 621 582	6 445 918	445 084
2,5	6 344 002	7 168 338	576 244
2,6	7 066 422	7 890 758	707 404
2,7	7 788 842	8 613 178	838 564
2,8	8 511 262	9 335 599	969 724
2,9	9 233 682	10 058 019	1 100 884
3	9 956 102	10 780 439	1 232 044
3,1	10 678 522	11 502 859	1 363 204
3,2	11 400 942	12 225 279	1 494 364
3,3	12 123 363	12 947 699	1 625 524

Varianta	A	B	C
Cena tepla [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]	NPV [Kč]
3,4	12 845 783	13 670 119	1 756 684
3,5	13 568 203	14 392 539	1 887 844
3,6	14 290 623	15 114 959	2 019 004
3,7	15 013 043	15 837 380	2 150 164
3,8	15 735 463	16 559 800	2 281 324
3,9	16 457 883	17 282 220	2 412 484
4	17 180 303	18 004 640	2 543 644
4,1	17 902 723	18 727 060	2 674 804
4,2	18 625 144	19 449 480	2 805 964
4,3	19 347 564	20 171 900	2 937 124
4,4	20 069 984	20 894 320	3 068 284
4,5	20 792 404	21 616 740	3 199 444
4,6	21 514 824	22 339 160	3 330 604
4,7	22 237 244	23 061 581	3 461 764
4,8	22 959 664	23 784 001	3 592 924

Obrázek F.1: Závislost NPV na ceně tepla



Příloha G

Výpočetní program pro technický návrh

viz CD

Příloha H

Výpočetní program pro ekonomické zhodnocení

viz CD