

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**MICHAL
ČAPEK**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čapek** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **491558**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití Stirlingova motoru jako alternativy k domácí výrobě elektřiny a tepla

Název bakalářské práce anglicky:

Using the Stirling engine as an alternative to domestic power and heat generation

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši týkající se principu a charakteristických vlastností Stirlingových motorů a přehled jeho využití v energetice.
- 2) Určení tepelné ztráty vybraného objektu a sestavení diagramu trvání potřeby tepla.
- 3) Bilanci spotřeby energií ve vybraném objektu.
- 4) Návrh vhodných variant pro pokrytí potřeby elektřiny a tepla s využitím Stirlingova motoru jako alternativy k navrženým technologiím.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

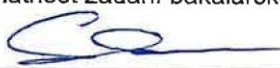
Ing. Pavel Skopec, Ph.D. ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**



Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

25.4.2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

Čapek Michal

Anotační list

Jméno autora:	Michal Čapek
Název BP:	Využití Stirlingova motoru jako alternativy k domácí výrobě elektřiny a tepla
Anglický název:	Using the Stirling engine as an alternative to domestic power and heat generation
Akademický rok:	2022/2023
Ústav/Obor:	Ústav energetiky/Energetika a procesní technika
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 80 Počet obrázků: 30 Počet tabulek: 35
Klíčová slova:	Stirlingův motor, kogenerační jednotka, tepelná ztráta, spotřeba energie
Key words:	Stirling engine, cogeneration unit, heat loss, power consumption
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá principem a vlastnostmi Stirlingova motoru a jeho využitím v oblasti energetiky. Cílem tohoto projektu je zvolit vhodný typ kogenerační jednotky v bytovém domě s ohledem na provozně-technické a ekonomické parametry.
Abstract:	The bachelor's thesis deals with the principle and properties of the Stirling engine and its use in the field of energy. The aim of this project is to choose the appropriate type of cogeneration unit in apartment building with respect to operational-technical and economic parameters.

Poděkování

Touto formou bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Skopcovi, Ph.D., za odborné vedení mé bakalářské práce, za pomoc, cenné profesionální rady, připomínky a ochotu při řešení všech problémů, které se při zpracování této práce vyskytly.

Velký dík patří i mé rodině a přátelům, kteří mi byli velkou oporou nejen při psaní této práce, ale i po celou dobu studia.

Obsah

Seznam ilustrací a obrázků.....	7
Seznam tabulek.....	8
Seznam grafů.....	9
Seznam zkratk a symbolů.....	10
1 Úvod.....	13
2 Stirlingův motor.....	14
2.1 Princip pracovního cyklu.....	14
2.2 Popis základních částí Stirlingova motoru.....	16
2.2.1 Výměník tepla - ohřívač.....	16
2.2.2 Regenerátor.....	18
2.2.3 Výměník tepla (chladič).....	18
2.3 Tři základní varianty provedení Stirlingova motoru.....	19
2.3.1 Varianta Alfa.....	20
2.3.2 Varianta Beta.....	21
2.3.3 Varianta Gama.....	22
2.4 Termomechanický cyklus.....	23
2.4.1 Ideální cyklus.....	23
2.4.2 Fáze ideálního cyklu.....	23
2.4.3 Reálný cyklus.....	29
2.5 Stirlingův motor v praxi.....	32
2.5.1 Aplikace Stirlingových motorů.....	32
2.5.2 Nevýhody využití Stirlingova motoru.....	36
2.5.3 Výhody využití Stirlingova motoru.....	36
3 Výroba tepla v malém měřítku (domácnosti – rodinné domy, bytovky).....	37
4 Výroba elektřiny v malém měřítku (domácnosti – rodinné domy, bytovky).....	37
5 Mikrokogenerace.....	38
5.1 Mikro/kogenerační jednotka se Stirlingem.....	38
6 Popis objektu.....	40
7 Požadavky na teplo a elektrickou energii.....	43
7.1 Výpočet tepelných ztrát bytové jednotky.....	43
7.1.1 Součinitel prostupu tepla.....	43
7.1.2 Tepelné ztráty.....	44
7.2 Výpočet roční potřeby tepla na vytápění.....	46
7.2.1 Výpočet denostupňů.....	47
7.2.2 Výpočet opravného součinitele.....	47
7.2.3 Stanovení účinností systému.....	48
7.2.4 Teoretická roční potřeba tepla na vytápění.....	48
7.3 Výpočet roční potřeby tepla na ohřev teplé vody.....	48
7.3.1 Výpočet denní potřeby.....	48
7.3.2 Výpočet roční potřeby.....	49
7.4 Celková potřeba tepla.....	49

8	Spotřeba energií.....	49
8.1	Spotřeba tepla a potřebný tepelný výkon	49
8.2	Spotřeba elektrické energie a potřebný elektrický výkon	53
9	0. varianta	56
10	Navrhované varianty	57
10.1	I. varianta.....	57
10.1.1	Popis	57
10.1.2	Náklady	59
10.1.3	Ekonomické vyhodnocení	61
10.2	II. varianta	63
10.2.1	Popis	63
10.2.2	Náklady	66
10.2.3	Ekonomické vyhodnocení	67
10.3	III. varianta	68
10.3.1	Popis	68
10.3.2	Náklady	71
10.3.3	Ekonomické vyhodnocení	71
11	Závěr.....	73
11.1	Shrnutí a vyhodnocení práce	73
11.2	Náhled do budoucna.....	74
12	Zdroje	76

Seznam ilustrací a obrázků

Obr. 1 Schéma původního Stirlingova motoru.....	14
Obr. 2 Princip Stirlingova motoru.....	16
Obr. 3 Ohřívák Stirlingova motoru v několika provedeních; vlevo ohřívák Stirlingova motoru United Stirling V160 tvořený dvěma řadami žebrovaných trubek (pohled do spalovací komory na zemní plyn); vpravo ohřívák z hladkých trubek (motor V4X35).....	17
Obr. 4 United Stirling V-160	17
Obr. 5 Chladič Stirlingova motoru Tedom 180V1	19
Obr. 6 Schéma Stirlingova motoru v provedení Alfa.....	21
Obr. 7 Schéma Stirlingova motoru v provedení Beta	22
Obr. 8 Schéma Stirlingova motoru v provedení Gama	22
Obr. 9 p-V a T-s diagram ideálního Stirlingova cyklu.....	24
Obr. 10 První fáze - plochy pod křivkami odpovídají spotřebované práci a odvedenému teplu	24
Obr. 11 Druhá fáze - teplo odebrané regenerátoru.....	25
Obr. 12 Třetí fáze - plochy pod křivkami odpovídají vykonané práci a přivedenému teplu ...	26
Obr. 13 Čtvrtá fáze - teplo předané regenerátoru.....	27
Obr. 14 Ideální Stirlingův cyklus - celková práce, celkové teplo	28
Obr. 15 Schematické znázornění odlišnosti průběhu reálného a ideálního cyklu.....	29
Obr. 16 Schematické znázornění pohybu pístů (β - modifikace): diskontinuální, kontinuální...	31
Obr. 17 Ukázka parabolického zrcadla se Stirlingovým motorem v ohnisku a mechanikou pro sledování slunce	33
Obr. 18 Stirlingova chladnička typu alfa	34
Obr. 19 Ponorka HSWM S Näcken	35
Obr. 20 ASRG.	35
Obr. 21 Schéma Stirlingova motoru (společnost Viessmann)	39
Obr. 22 Stirlingův motor A600	39
Obr. 23 Bytový dům.....	41
Obr. 24 Zjednodušené schéma bytové jednotky v severní části budovy (hodnoty uvedeny v cm).....	42
Obr. 25 Kotel THERM 24 KDNS	56
Obr. 26 Kotel THERM 24 KDNS	57
Obr. 27 Fotovoltaické panely Jinko 460 Wp.....	57
Obr. 28 ÖkoFEN Pellematic Condens_e.....	64
Obr. 29 Eko-Max Slim 16	64
Obr. 30 Vitotwin 300-W	69

Seznam tabulek

Tab. 1 Izolace obvodového zdiva.....	42
Tab. 2 Izolace oken	42
Tab. 3 Izolace podlahy	43
Tab. 4 Izolace střechy.....	43
Tab. 5 Vnitřní výpočtové teploty pro obytné budovy - trvale užívané	44
Tab. 6 Vnější výpočtová teplota pro danou lokaci	44
Tab. 7 Teplosměnná plocha obvodového zdiva pro jednotlivé vytápěné místnosti.....	45
Tab. 8 Teplosměnná plocha oken pro jednotlivé vytápěné místnosti	45
Tab. 9 Potřebné hodnoty pro výpočet denostupňů stanovené pro danou lokaci	47
Tab. 10 Hodnoty pro opravná součinitel e_i	47
Tab. 11 Hodnoty pro opravný součinitel e_t	47
Tab. 12 Hodnoty pro opravný součinitel e_d	47
Tab. 13 Tabulka ke grafu závislosti tepelného výkonu pro vytápění na venkovní teplotě	51
Tab. 14 Tabulka ke grafu závislosti celkového tepelného výkonu na venkovní teplotě.....	52
Tab. 15 Roční spotřeba jednotlivých spotřebičů v 1 domácnosti	54
Tab. 16 Tabulka ke grafu spotřeby elektřiny v jednotlivých měsících	55
Tab. 17 Investiční náklady výchozí koncepce.....	56
Tab. 18 Provozní náklady výchozí koncepce	57
Tab. 19 Bilance tepelné energie (vytápění) pro I. variantu	58
Tab. 20 Bilance tepelné energie (ohřev TV) pro I. variantu	59
Tab. 21 Bilance FVE.....	59
Tab. 22 Investiční náklady I. varianty	60
Tab. 23 Provozní náklady I. varianty	60
Tab. 24 Ekonomické vyhodnocení I. varianty	61
Tab. 25 Hodnocení I. varianty.....	62
Tab. 26 Bilance tepelné energie pro II. variantu	65
Tab. 27 Bilance elektrické energie pro II. variantu	65
Tab. 28 Investiční náklady II. varianty.....	66
Tab. 29 Provozní náklady II. varianty	66
Tab. 30 Ekonomické vyhodnocení II. varianty	67
Tab. 31 Bilance tepelné energie pro III. variantu.....	70
Tab. 32 Bilance elektrické energie pro III. variantu	70
Tab. 33 Investiční náklady III. varianty	71
Tab. 34 Provozní náklady III. varianty	71
Tab. 35 Ekonomické vyhodnocení III. varianty.....	72

Seznam grafů

Graf 1 Univerzální diagram trvání teplot pro otopné období v ČR	50
Graf 2 Závislost tepelného výkonu pro vytápění na venkovní teplotě.....	51
Graf 3 Závislost celkového tepelného výkonu na venkovní teplotě	52
Graf 4 Diagram trvání instalovaného výkonu v průběhu roku.....	53
Graf 5 Měsíční spotřeba elektřiny v ČR pro roky 2021 a 2022	54
Graf 6 Spotřeba elektřiny v jednotlivých měsících.....	55
Graf 7 Ekonomické vyhodnocení I. varianty podle CF	63
Graf 8 Ekonomické vyhodnocení I. varianty podle DCF.....	63
Graf 9 Ekonomické vyhodnocení II. varianty podle CF	67
Graf 10 Ekonomické vyhodnocení II. varianty podle DCF	68
Graf 11 Ekonomické vyhodnocení III. varianty podle CF.....	72
Graf 12 Ekonomické vyhodnocení III. varianty podle DCF	72

Seznam zkratk a symbolů

Zkratka	Veličina	Značka jednotky
D	počet denostupňů	$[d^\circ]$
N	počet pracovních dnů soustavy v roce	$[dny]$
P_{OTV}	výkon na ohřev TV	$[kW]$
P_t	maximální požadovaný tepelný výkon	$[kW]$
Q_c	tepelná ztráta – střecha	$[W]$
Q_C	celková tepelná ztráta	$[W]$
Q_{o1}	tepelná ztráta okny – obytné prostory	$[W]$
Q_{o2}	tepelná ztráta okny – sklep	$[W]$
Q_{o3}	tepelná ztráta okny – koupelna	$[W]$
Q_{o4}	tepelná ztráta okny – vytápěná schodiště	$[W]$
Q_{o4}	tepelná ztráta okny – podkroví	$[W]$
$Q_{OTV,d}$	denní potřeba TV	$[Wh]$
$Q_{OTV,r}$	roční potřeba TV	$[MWh/rok]$
Q_p	tepelná ztráta – podlaha	$[W]$
Q_P	celková potřeba tepla	$[MWh/rok]$
$Q_{VYT,r}$	teoretická roční potřeba tepla na vytápění	$[MWh/rok]$
Q_{z1}	tepelná ztráta obvodovými zdmi – obytné prostory	$[W]$
Q_{z2}	tepelná ztráta obvodovými zdmi – sklep	$[W]$
Q_{z3}	tepelná ztráta obvodovými zdmi – koupelna	$[W]$
Q_{z4}	tepelná ztráta obvodovými zdmi – vytápěná schodiště	$[W]$
S_i	plocha dané části objektu	$[m^2]$
T	termodynamická teplota	$[K]$
V	objem	$[m^3]$
V_p	celková potřeba teplé vody na 1 den	$[m^3/den]$
c	měrná tepelná kapacita vody	$[J/kgK]$
c_v	měrná tepelná kapacita za konstantního objemu	$[J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}]$
d	počet dnů v otopném období	$[dny]$
e_d	opravný součinitel na zkrácení doby provozu	$[-]$

Zkratka	Veličina	Značka jednotky
e_i	opravný součinitel na nesoučasnost tepelné ztráty větráním a prostupem	[–]
e_t	opravný součinitel na snížení vnitřní teploty	[–]
h	nadmořská výška	[m]
k	koeficient splnění podmínky rezervy tepelného výkonu	[%]
k_i	součinitel prostupu tepla dané části objektu	[W/m ² K]
k_o	součinitel prostupu tepla okny	[W/m ² K]
k_p	součinitel prostupu tepla podlahou	[W/m ² K]
k_s	součinitel prostupu tepla střechou	[W/m ² K]
k_z	součinitel prostupu tepla dané obvodovými zdmi	[W/m ² K]
l_i	tloušťka vrstvy dané izolace	[m]
m	hmotnost	[kg]
p	tlak	[Pa]
r	měrná plynová konstanta	[J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹]
t_e	vnější (venkovní) teplota	[°C]
t_{em}	střední denní venkovní teplota pro začátek a konec otopného období	[°C]
t_{ev}	vnější výpočtová teplota	[°C]
t_{es}	průměrná venkovní teplota v otopném období	[°C]
t_{is}	průměrná vnitřní výpočtová teplota	[°C]
t_i	vnitřní výpočtová teplota	[°C]
t_{svl}	teplota studené vody v létě	[°C]
t_{svz}	teplota studené vody v zimě	[°C]
t_1	teplota studené vody	[°C]
t_2	teplota ohřáté vody	[°C]
z	koeficient energetických ztrát systému	[–]
α_e	součinitel přestupu tepla vnější strany dané izolace	[W/m ² K]
α_i	součinitel přestupu tepla vnitřní strany dané izolace	[W/m ² K]
ε	opravný součinitel pro teoretickou roční potřebu tepla na vytápění	[–]

Zkratka	Veličina	Značka jednotky
λ_i	součinitel tepelné vodivosti vrstvy dané izolace	$[W/mK]$
ρ	měrná hmotnost vody	$[kg/m^3]$

1 Úvod

Energie je základním prvkem pro existenci života na Zemi, je klíčem pro fungování a rozvoj naší společnosti. V dnešní době využíváme energii v mnohonásobně vyšších objemech než kdykoli dříve. To nás činí na energii závislími. Moderní společnost ve vyspělých státech považuje spolehlivé dodávky energií za samozřejmé. I malý výpadek v dodávce elektřiny nás zásadně negativně ovlivní v kterémkoli hospodářském odvětví včetně komunikace. Proto je cílem naší společnosti zvýšit energetickou efektivitu při přeměně primárních energetických zdrojů a podporovat úspory energie v jednotlivých sektorech ekonomiky.

Současná situace na trhu zásobování energií směřuje k implementaci mikro/kogeneračních jednotek. Tyto jednotky jsou všestranné, mohou využívat primární jednotky založené na palivových článcích, fosilních palivech, zemědělském odpadu, skládkových plynech, dřevní štěpce a dalších. Mikro/kogenerační jednotky dokážou efektivně spotřebovat energii obsaženou v palivu a vyrobit příslušnému objektu jak teplo, tak elektrickou energii. Velmi vhodnou aplikací mikro/kogenerační jednotky je použití Stirlingova motoru, který svými charakteristickými vlastnostmi splňuje požadavky potřebné k provozu takové jednotky.

Ve své bakalářské práci se proto zaměřím na různé možnosti vytápění, ohřevu TV a výroby elektrické energie, porovnání jejich výhod a nevýhod, posouzení jejich vhodnosti použití pro vybraný objekt – bytový dům se zaměřením na pokrytí potřeby elektřiny a tepla právě s využitím Stirlingova motoru.

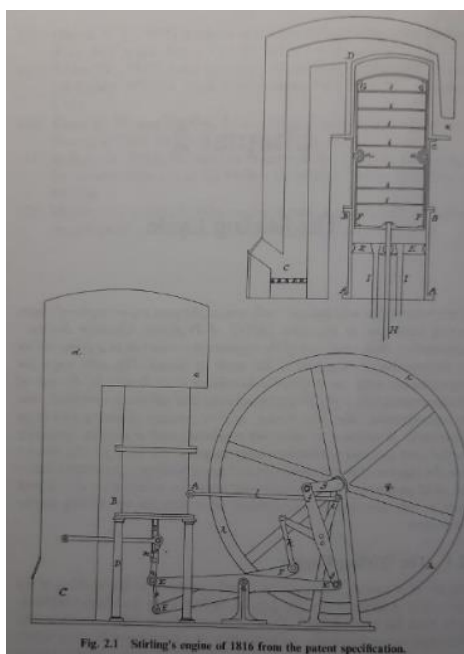
2 Stirlingův motor

2.1 Princip pracovního cyklu

Stirlingův motor je tepelný motor s vnějším spalováním, ve kterém se kapalná nebo plynná pracovní tekutina pohybuje v uzavřeném objemu/válci. Jde o periodický ohřev a chlazení pracovního média s odebráním energie z výsledné změny objemu. Stirlingův motor neobsahuje žádné ventily, což motor zjednodušuje, přesto je jeho termodynamický návrh velmi obtížný. [1, 2]

Stirlingův motor má dlouhou historii vývoje. První fungující tepelný motor s otevřeným cyklem sestrojil Sir George Cayley v roce 1807. Zásadní pokrok přináší patent skotského pastora a inženýra Roberta Stirlinga z roku 1816. Jeho motor jako první obsahoval generátor zvaný ekonomizér (výměník využívající tepla spalin o nízké teplotě k předehřívání napájecí vody), který podstatně zvyšoval účinnost stroje. Cílem bylo sestrojít motor, který by nahradil soudobé parní motory malého výkonu cca do 5 kW. [3]

Dalším průkopníkem Stirlingových motorů se pak stal švédský vynálezce John Ericsson. Postavil například Stirlingův motor poháněný pouze sluneční energií. Kvůli nedokonalosti materiálů a jejich zpracování byly tyto motory koncem 19. století vytlačeny spalovacími zážehovými a vznětovými motory. Na vývoji spalovacích motorů mají hlavní podíl Rudolf Diesel a Nicolaus Otto. O uplatnění Stirlingova motoru se začalo znovu uvažovat během ropné krize v 70. letech 20. století, v současné době zájem o Stirlinga souvisí se znečišťováním životního prostředí a s dopady energetické krize. [3, 4, 5, 6]



Obr. 1 Schéma původního Stirlingova motoru [7]

Stirlingův motor se obecně skládá ze tří hlavních konstrukčních prvků: regenerátor (zásobník tepla), teplá (kontinuálně ohřívaná) strana motoru a studená (kontinuálně ochlazovaná) strana motoru. Uzavřený čtyřdobý oběh je postaven na dvou základních principech: [8]

1. izotermické kompresi stálého množství pracovního média při současném odvodu tepla na studené straně,
2. izotermické expanzi při současném přívodu tepla na teplé straně motoru.

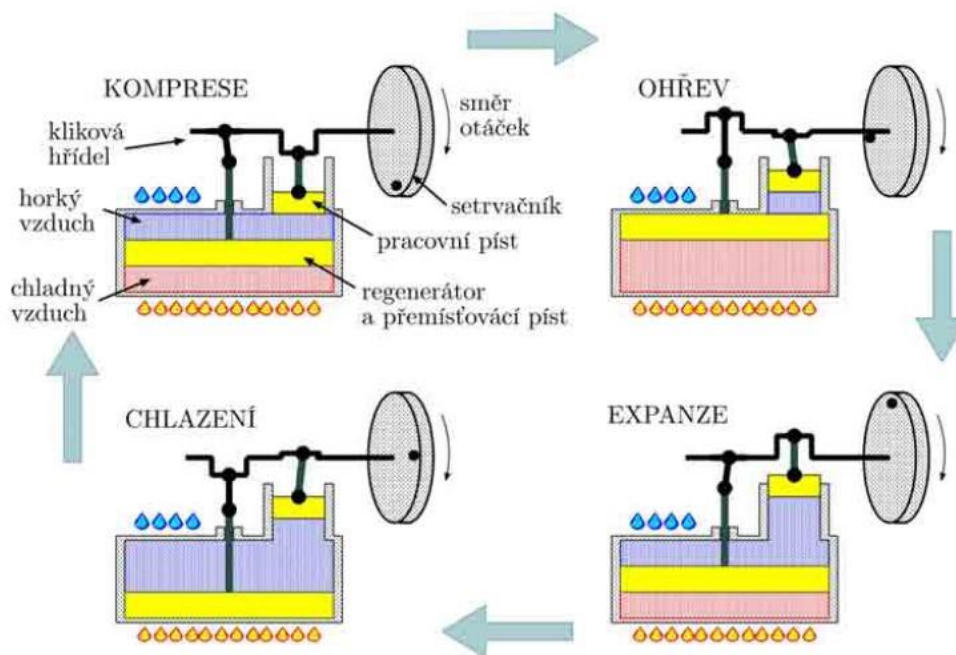
Stirlingův motor je objemový motor. Práci koná změnou objemu, tlaku a teploty pracovního plynu. Ty jsou vzájemně propojeny a řídí se zákonem ideálních plynů. To znamená, že při zahřívání plynu se jeho objem zvětšuje a při ochlazování se zmenšuje. Mezi běžná pracovní média řadíme vzduch, helium, vodík nebo dusík. [2, 8]

Pracovní plyn je přesouván pomocí pístů mezi teplou a studenou stranou motoru přes regenerátor. U běžných pístových Stirlingových motorů se tento proces přecherpávání řeší dvěma způsoby: [8]

1. dvojice pracovních pístů,
2. kombinace přemísťovacího (přesunuje pracovní plyn z teplého prostoru do studeného a naopak) a pracovního pístu.

Posuvem pístů, které jsou ve vzájemné kinematické vazbě, se mění pracovní objem. Současně přesouváním pracovního plynu mezi teplou a studenou stranou dochází ke změně střední teploty pracovního plynu a tlaku. Velmi důležitý je vzájemný pohyb obou pístů. Je nezbytné zajistit, aby nedocházelo současně ke kompresi a expanzi, neboť změny objemů v obou pracovních prostorech motoru nesmí probíhat ve fázi. [8]

Výsledkem změny tlaku za současné změny pracovního objemu, resp. teploty je mechanická práce cyklu. V případě, že míra práce pro expanzi je větší, než míra práce nutná pro kompresi generujeme užitečnou práci a výkon. [8]



Obr. 2 Princip Stirlingova motoru [9]

2.2 Popis základních částí Stirlingova motoru

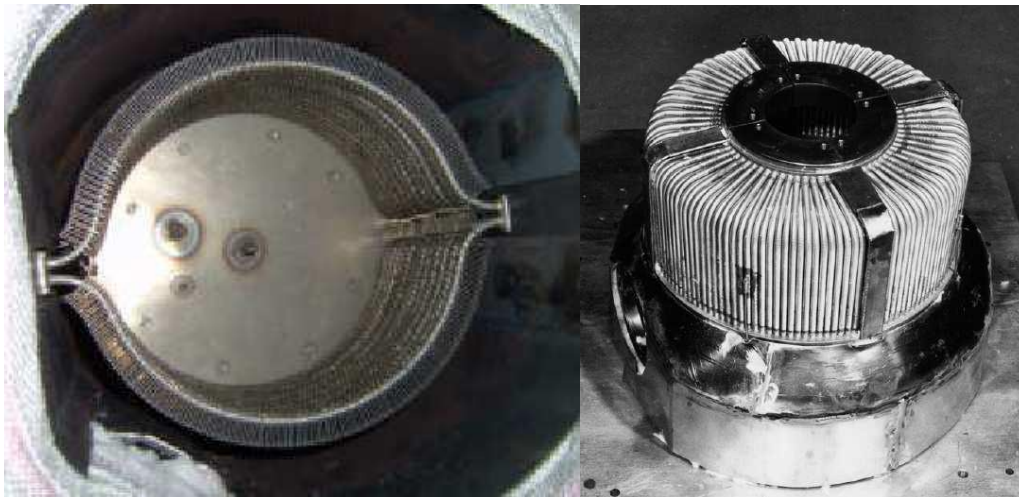
2.2.1 Výměník tepla - ohříváč

Ohříváč je povrchový tepelný výměník motoru, kterým se do motoru přivádí teplo z okolí, a to nejčastěji ze spalin nebo z koncentrovaných slunečních paprsků, může však pracovat i s jinými zdroji – skládkové plyny, odpadní teplo. Teplo se nepřivádí pracovnímu plynu kontinuálně, ale střídavě (podobně jako v regenerátoru). Teplota pracovního plynu se během oběhu mění ve větším rozsahu než teplota vnitřního povrchu ohříváče. Pokud je teplota pracovního plynu nižší než teplota vnitřního povrchu ohříváče, tak pak teplo přestupuje z ohříváče do pracovního plynu a naopak. To znamená, že vnitřní povrch pracuje jako regenerátor, který více tepla do pracovního plynu předá, než z něj získá. Teplo dodané do motoru se přivádí přes vnější povrch ohříváče. Na vnějším povrchu ohříváče se prakticky neprojevují velké změny teploty pracovního plynu, na vnitřním povrchu však ano. Je to dáno vysokým tlumením teplotních změn v materiálu ohříváče. Proto se při výpočtu potřebné přestupní plochy vychází ze střední teploty pracovního plynu v ohříváči a střední teploty vnějšího povrchu ohříváče nebo střední teploty spalin při průchodu ohříváčem. [1, 10, 11]

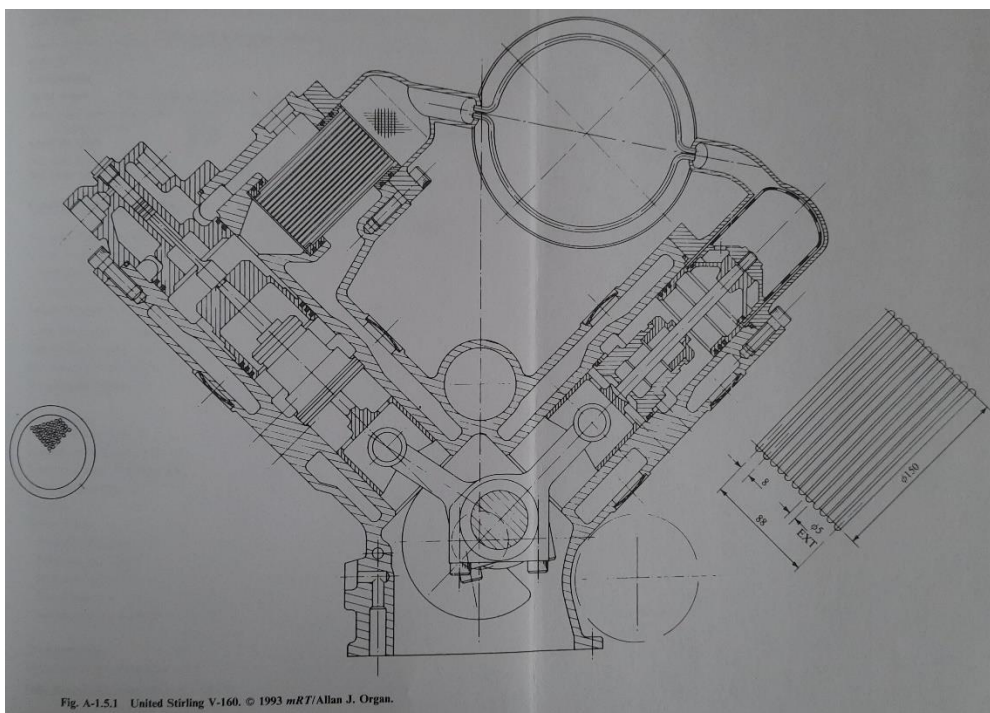
U agregátů s nízkými výkonovými parametry nám stačí jako ohříváč stěny válce teplého prostoru a případně hlava válce. Na zajištění efektivní tepelné výměny se využívá žebrování plochy (např. příčného, podélného nebo mnoho malých trubic). Pro přenos tepla je důležitá

geometrie válce, tedy jeho výška a průměr. U motorů s vyšším výkonem bývá zpravidla používán ohříváč v trubkovém provedení. [1, 10, 11]

Při návrhu tepelného výměníku Stirlingova stroje je potřeba najít kompromis mezi velkou plochou pro zajištění vysokého tepelného přenosu s malými tlakovými ztrátami a malým škodlivým prostorem – mrtvý objem (vnitřní prostor nevyužitý pro zdvih pístů). Materiál pro výrobu tepelného výměníku (zejména u vysokovýkonných strojů) musí být dostatečně odolný vůči teplotě, korozi, mechanickému napětí a deformaci. [1, 10, 11]



Obr. 3 Ohřívák Stirlingova motoru v několika provedeních; vlevo ohřívák Stirlingova motoru United Stirling V160 tvořený dvěma řadami žebrovaných trubek (pohled do spalovací komory na zemní plyn); vpravo ohřívák z hladkých trubek (motor V4X35) [1]



Obr. 4 United Stirling V-160 [7]

2.2.2 Regenerátor

Jedním ze základních konstrukčních prvků Stirlingova motoru je regenerátor. V podstatě se jedná o zásobník tepla. V regenerátoru probíhá regenerace tepla s využitím teplotního rozdílu mezi teplou a studenou stranou, pracovní plyn jím střídavě proudí v obou směrech. Při průchodu plynu z teplé strany na studenou stranu se plyn ochlazuje o studenou hmotu (matrice regenerátoru), kterou regenerátor obsahuje (jedná se převážně o objem vyplněný velmi jemnými drátky z oceli). Zatímco teplota plynu klesá, teplota matrice regenerátoru roste, což označujeme jako nabíjení regenerátoru. Při proudění plynu ze studené strany na teplou stranu se plyn ohřívá o matrici regenerátoru. Plyn se tedy ohřívá a matrice regenerátoru ochlazuje, což představuje vybíjení regenerátoru. Přínos regenerace je v tom, že teplo, které studený plyn získá při vybíjení regenerátoru nemusí být na teplé straně přivedeno a naopak teplo, které plyn ztratí při nabíjení regenerátoru nemusí být odvedeno v chladiči. Regenerace tudíž zvyšuje tepelnou účinnost motoru. Účelem regenerátoru je omezení tepelné výměny s okolím ve snaze přiblížit se co nejvíce k účinnosti Carnotova cyklu. Zjednodušeně řečeno jde o to, aby rozdíl teplot oběhu (Δt) byl co největší. [1, 10, 11]

Hlavním požadavkem na konstrukci regenerátoru je dosažení dostatečného tepelného výkonu a kapacity při omezení přidaného objemu (škodlivý prostor) a odporu proudění. [1, 10, 11]

Konstrukce regenerátoru je tvořena jeho tělesem a náplní. Současně je na této konstrukci závislý i tvar celého motoru. [1, 10, 11]

2.2.3 Výměník tepla (chladič)

Chladič stejně jako ohříváč je povrchový tepelný výměník, kterým se z motoru odvádí teplo, nejčastěji pomocí chladicí kapaliny nebo okolního vzduchu. U motoru s malým výkonem je chladič tvořen stěnami válce chladného prostoru. Tento prostor může být případně žebrován (příčné nebo podélné žebrování). Z chladiče se neodvádí teplo pracovnímu plynu kontinuálně, ale střídavě jako v regenerátoru. Teplota pracovního plynu v chladiči se během oběhu mění ve větším rozsahu než teplota vnitřního povrchu chladiče. Pokud je teplota pracovního plynu nižší než teplota vnitřního povrchu chladiče, potom teplo přestupuje z chladiče do pracovního plynu a naopak. To znamená, že vnitřní povrch pracuje jako regenerátor, který ale více tepla z pracovního plynu odebere, než z něj získá. Teplo odvedené z motoru se odvádí přes vnější povrch ohříváku do chladicího média. [1, 10, 11]

Mechanismus přestupu tepla je stejný jako u ohříváče, pouze střední teplota pracovního plynu v chladiči je větší než teplota vnitřního povrchu chladiče. [1, 10, 11]

U motorů s velkým výkonem je chlazení řešeno trubkovým výměníkem. Dosažení většího výkonu a vyšší účinnosti je podmíněno větším rozdílem teplot (Δt) mezi chladičem a ohříváčem. Proto se jako chladící medium užívají zejména kapaliny - voda. Chladící kapalina se ohřívá vlivem tepla odebraného z plynu a takto získané teplo lze dále využít např. pro vytápění rodinných domů – kogenerace. [1, 10, 11]



Obr. 5 Chladič Stirlingova motoru Tedom 180V1 [1]

2.3 Tři základní varianty provedení Stirlingova motoru

Pro základní kategorizaci Stirlingových motorů byly zavedeny tři základní konstrukční varianty: α , β , γ , které se od sebe liší zejména postavením pístů. Kombinace jednotlivých konstrukčních variant je umožněna principem, jednoduchostí a variabilitou konstrukce Stirlingova motoru. [9]

V Beta a Gama konfiguraci Stirlingova stroje se používá speciální píst zvaný přemísťovací. V závislosti na konfiguraci stroje může být přemísťovací píst umístěn ve stejném válci jako pracovní píst, nebo může mít vlastní válec. Přemísťovací píst může být ve válci s vůlí a umožňovat tak pracovnímu plynu proudit kolem sebe, nebo může být utěsněn a přesunovat plyn přes výměníky a regenerátor. [10]

2.3.1 Varianta Alfa

Tato modifikace je konstrukčně nejjednodušší - má dva pracovní písty (prostory), které jsou v oddělených válcích. Jeden je ohříván (přijímá teplo) a druhý je chlazen (odevzdává teplo). Oba prostory dělí regenerátor - píst na teplé straně ovlivňuje změnu objemu pouze v teplém prostředí a zároveň píst na studené straně ovlivňuje změnu objemu na studené straně motoru. [2, 12]

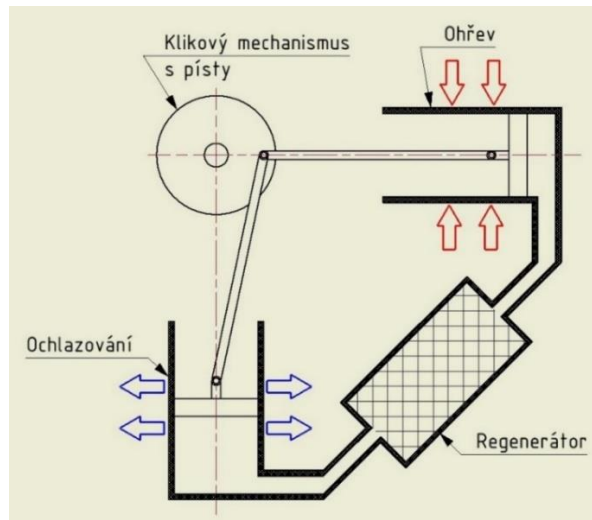
Teplý válec ohříváme a důsledkem kontaktu plynu s jeho horkými stěnami dochází k nárůstu tlaku, který vyvolá pohyb teplého pístu od horké hlavy válce. Dochází k expanzi plynu v teplém válci, která prostupuje do studeného válce, jehož píst je v cyklu klikového mechanismu pozadu za teplým pístem o 90° . Z horkého válce proudí plyn, jehož teplo postupně přebírá studený válec. [2, 12]

V této fázi dosahuje plyn svého největšího objemu. Následně teplý píst klesá a plyn se přesouvá do studeného válce, začíná se ochlazovat, a tím dochází k poklesu tlaku. [2, 12]

Nyní se plyn ve studeném válci dále ochlazuje. Vlivem pohybu klikového mechanismu začíná studený píst stlačovat ochlazený pracovní plyn. Ochlazený plyn má menší tlak, tudíž práce nezbytná k jeho stlačení je menší než práce uvolněná expanzí horkého plynu. [2, 12]

Plyn dosáhl minimálního objemu, v teplém válci se začne opět ohřívát a postupně expandovat, tím dojde ke zdvihu teplého pístu. [2, 12]

Poměr výkonu a k tomu potřebného objemu je u této modifikace velmi výhodný. Jako nevýhoda se jeví mazání pístu v teplém válci z důvodu vysokých teplot. Dalším možným problémem této modifikace je utěsnění prostoru mezi teplým pístem a válcem, kdy při zvyšujících se teplotách tento problém narůstá. K netěsnosti pístních kroužků dochází kvůli drsnosti povrchu válce, rozdílu průměru válce a kroužku a v důsledku vibrací při chodu stroje. [2, 12]



Obr. 6 Schéma Stirlingova motoru v provedení Alfa

2.3.2 Varianta Beta

Tato varianta oproti Alfě má pouze jeden jediný válec (na jednom konci horký, na druhém studený). Ve válci jsou uloženy dva písty na společné ose. Jeden píst je pouze přemísťovací a nijak se nepodílí na přeměně tepelné energie na mechanickou. [2, 12]

Pracovní píst stlačí plyn, přemísťovací píst přesune plyn na teplý konec válce, kde dojde k jeho ohřátí a nárůstu tlaku. [2, 12]

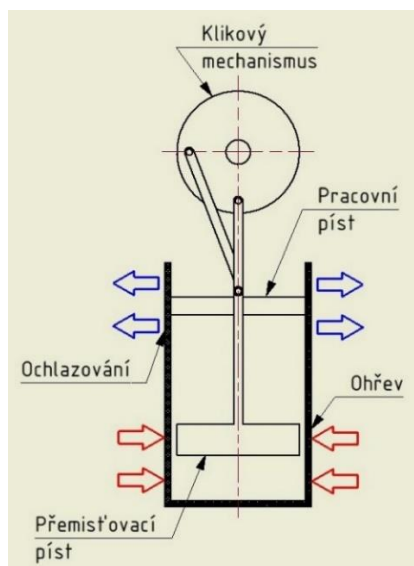
Přemísťovací píst je zatlačen na dno válce a pracovní píst provede pracovní zdvih. [2, 12]

Plyn je přemísťovacím pístem přesunut na studený konec válce. [2, 12]

Pracovní píst poháněný setrvačnickem klikové hřídele stlačuje pracovní plyn, k čemuž je zapotřebí méně energie, protože v ochlazeném plynu klesne tlak. [2, 12]

Tato modifikace je mnohem náročnější na konstrukci pohonného mechanismu, naopak problém s těsněním teplé části válce zde nehraje žádnou roli, protože přemísťovací píst není těsněný, ale musí být dost velký, aby se zajistila účinná izolace teplého a studeného prostoru a zároveň přesun dostatečného množství pracovního plynu. [2, 12]

Protože se pracovní píst pohybuje výhradně v chlazené části válce, není zde na rozdíl od varianty alfa problém s mazáním. [2, 12]



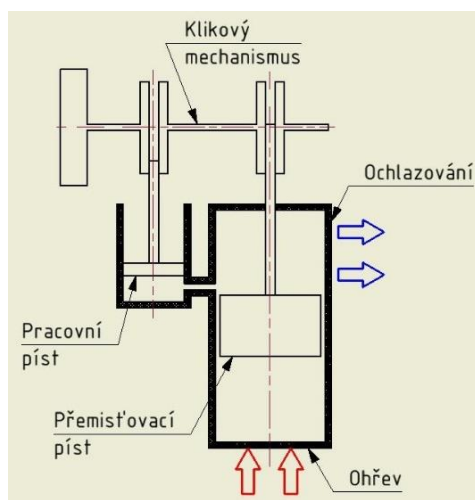
Obr. 7 Schéma Stirlingova motoru v provedení Beta

2.3.3 Varianta Gama

U této modifikace je pracovní píst oddělen od přemísťovacího. Každý z pístů má vlastní komoru a nepracují tedy na stejné ose. Oba válce jsou u tohoto uspořádání rovnoběžné. Jedná se kombinaci Alfa (dva samostatné válce) a Beta (klikový mechanismus). [2, 12]

Konstrukčně se jedná o nenáročný mechanismus, ale protože přidává do motoru škodlivý objem, má tento motor nižší účinnost než modifikace Beta. [2, 12]

Tato varianta má menší kompresní poměr. [2, 12]



Obr. 8 Schéma Stirlingova motoru v provedení Gama

Modifikací je samozřejmě mnohem více. Jde například o modifikaci Essex: tento Stirling je vlastně typu Beta, což znamená, že pracovní a přemísťovací píst jsou ve společném válci,

ovšem tyč přemísťovacího pístu je skrz těsnění vyvedena druhým čelem. Válec se zahřívá uprostřed a chlazené jsou oba jeho konce. Pohyb přemísťovacího pístu je ovládán prostřednictvím táhla přes celou délku motoru. [13]

2.4 Termomechanický cyklus

Tepelný cyklus motoru lze popsat velice jednoduše v jeho ideální podobě, ale praxe ukazuje, že reálný cyklus se od ideálního značně liší. Znalosti v oblasti termodynamiky jsou základem pro pochopení reálného oběhu Stirlingova motoru a návrhu jeho konstrukce. Oběh Stirlingova motoru nelze rozdělit na více částí, které by se řešily odděleně a snadněji jako např. u pracovního cyklu pístového parního motoru. [1]

2.4.1 Ideální cyklus

Ideální cyklus je vzorem účinnosti a výkonu agregátu. Jeho výpočet ale nelze brát jako alfu – omegu konstrukce reálného motoru nebo jeho případných analýz. Slouží vlastně pro zjednodušení, pochopení a popis reálného termodynamického děje. [14]

Ideální Stirlingův oběh [14]:

- pracuje s ideálním plynem (ideálně stlačitelným bez vnitřního tření), plyn zaplňuje celý objem válců,
- účinnost regenerátoru je 100%,
- tlak a teplota jsou v daný okamžik stejné po celém objemu,
- pohyb pístů je diskontinuální,
- prostup tepla probíhá jen mezi pracovním plynem (stěny válce a písty teplo nepřenáší).

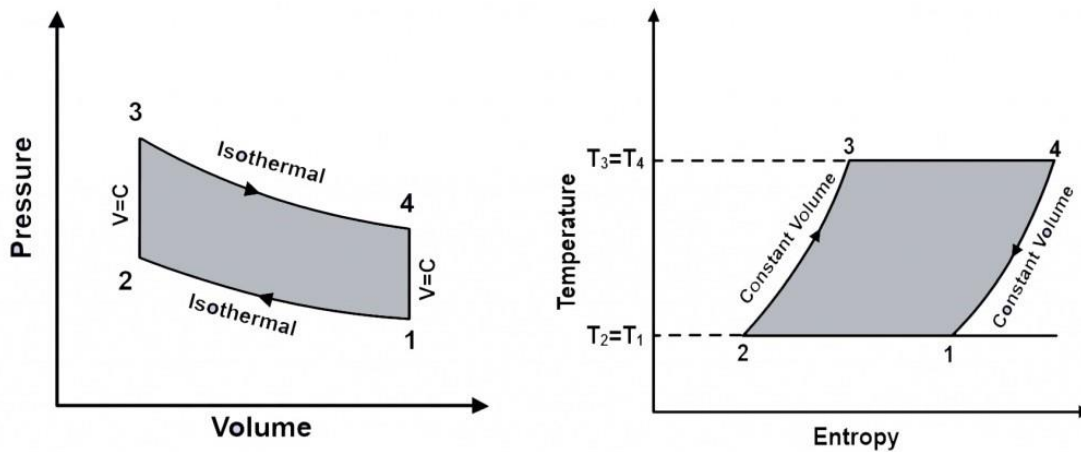
Účinnost ideálního Stirlingova motoru dosahuje termodynamicky nejvyšší možné účinnosti – Carnotova účinnost. [14]

2.4.2 Fáze ideálního cyklu

Stirlingův termodynamický ideální cyklus je složen ze čtyř fází – dvou izoterm a dvou izochor. Z diagramů Stirlingova cyklu plyne, že se jedná o proces vratný, uzavřený. Pracovní látka je skupenství plynného a její skupenství se nemění.

Ideální cyklus pracuje s ideálním plynem, pro který platí stavová rovnice:

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T$$



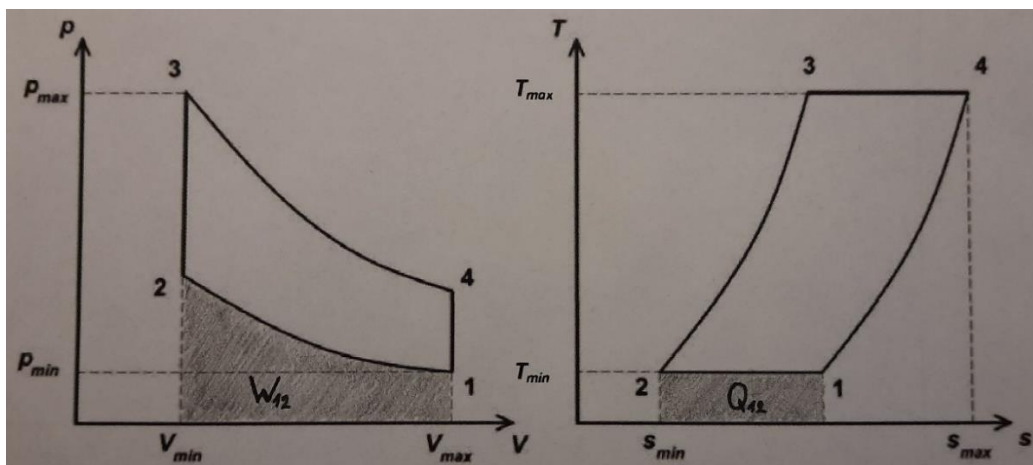
Obr. 9 p-V a T-s diagram ideálního Stirlingova cyklu [15]

➤ **První fáze – izotermická komprese (křivka mezi body 1 – 2)**

Mechanicky je tento děj realizován stlačováním plynu pracovním pístem ve válci. V této fázi je skoro všechn plyn ve studeném válci. Studený píst hnaný klikovým mechanismem začíná stlačovat ochlazený pracovní plyn. Plyn má menší tlak, a současně k jeho stlačení pracovním pístem proto stačí vykonat menší práci. Následně přehřátý plyn zvyšuje tlak za konstantní teploty, která je minimální teplotou cyklu. [11]

Výchozí tlak v bodě (1):

$$p_1 = \frac{m \cdot r \cdot T_1}{V_1} = p_{min}$$



Obr. 10 První fáze - plochy pod křivkami odpovídají spotřebované práci a odvedenému teple

Pro určení tlaku v bodě (2) pracujeme s faktem, že při izotermickém ději jsou teploty na jeho začátku a konci stejné ($T_1 = T_2 = T_C$):

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{V_2}$$

Průběžně odváděné teplo do okolí je ekvivalentní spotřebované mechanické práci [J]:

$$Q_{12} = W_{12} = Q_C = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = m \cdot r \cdot T_1 \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

Výsledek integrace rovnice:

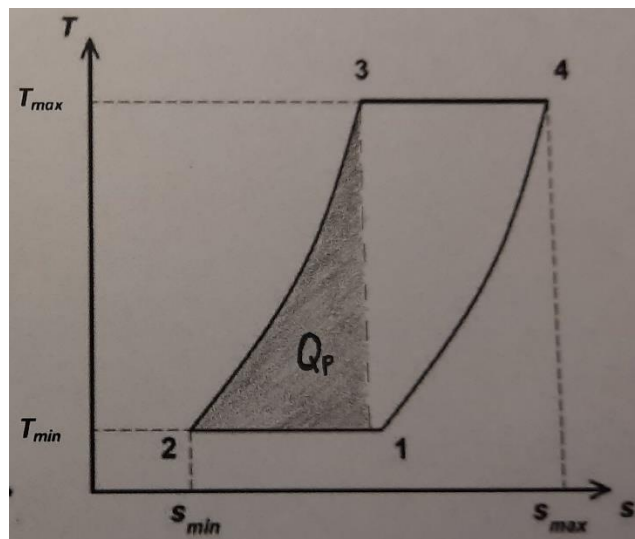
$$Q_C = m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Na konci děje dosahuje entropie [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$] své minimální hodnoty a pro její změnu platí:

$$\Delta s_{12} = \frac{1}{m} \cdot \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_1} = r \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

➤ Druhá fáze – izochorický ohřev (křivka mezi body 2 – 3)

Plyn dosáhl minimálního objemu. Stlačenému plynu je za konstantního objemu $V_2 = V_3 = V_{min}$ předána energie ve formě tepla dodaného z regenerátoru. Bude se v teplém válci ohřívat a expandovat. Přitom bude pohánět teplý píst při pracovním zdvihu. Teplota a tlak média rostou na své maximální hodnoty. [11]



Obr. 11 Druhá fáze - teplo odebrané regenerátoru

Tlak v bodě (3):

$$p_3 = \frac{p_2 \cdot T_3}{T_2} = p_{max}$$

Vynaložená práce je rovna nule $W = 0$ a pro teplo odebrané regenerátoru [J], resp. nárůst vnitřní energie, platí:

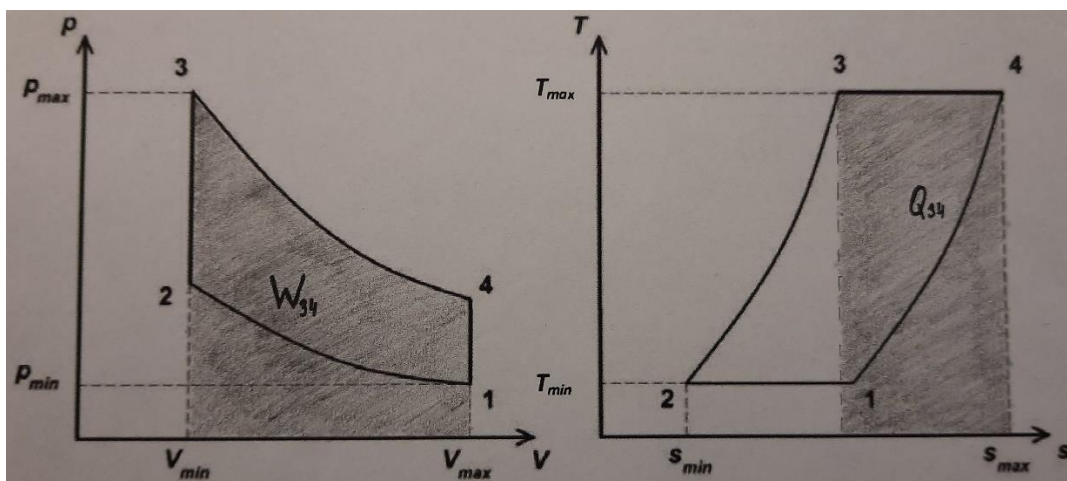
$$Q_p = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

V průběhu děje entropie roste [$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$] a pro její změnu platí:

$$\Delta s_{23} = \frac{1}{m} \cdot \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} = c_v \cdot \int_2^3 \frac{\delta T}{T} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_H}{T_C}\right)$$

➤ **Třetí fáze – izotermická expanze** (křivka mezi body 3 – 4)

Většina pracovního plynu je v teplém válci v kontaktu s jeho horkými stěnami. Plyn se zahřívá, rozpíná, jeho tlak roste a odtlačuje teplý píst od horké hlavy válce. Expanze pokračuje ve studeném válci, jehož píst je 90° pozadu za teplým pístem v cyklu klikového mechanismu. Plyn proudí skrz regenerátor, kterému odevzdá část svého tepla. Pracovní médium expandující do studeného válce vyvolá tlak na pracovní píst, který přes hřídel mechanismu roztočí setrvačnick a vykoná práci. Děj probíhá za konstantní maximální teploty oběhu, která je udržována teplem přiváděným z ohřivaného teplého válce. [11]



Obr. 12 Třetí fáze - plochy pod křivkami odpovídají vykonané práci a přivedenému teplu

Pro stanovení tlaku v bodě (4) lze opět využít faktu, že při izotermickém ději jsou teploty na jeho začátku a konci stejné ($T_3 = T_4 = T_H$):

$$p_4 = \frac{p_3 \cdot V_3}{V_4}$$

Teplo přivedené ohříváčem je ekvivalentní vykonané práci [J]:

$$Q_{34} = W_{34} = Q_H = \int_{V_3}^{V_4} p \cdot dV = m \cdot r \cdot T_3 \cdot \int_{V_3}^{V_4} \frac{dV}{V}$$

Výsledek integrace rovnice:

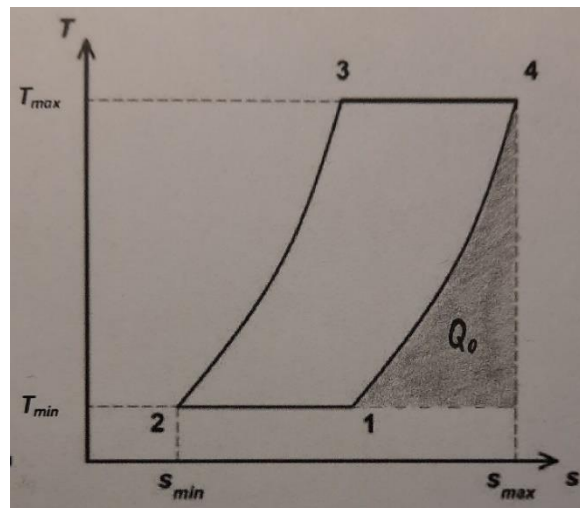
$$Q_H = m \cdot r \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = p_3 \cdot V_3 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

Na konci děje dosahuje entropie [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$] své maximální hodnoty a pro její změnu platí:

$$\Delta s_{34} = \frac{1}{m} \cdot \int_3^4 \frac{\delta Q}{T_3} = r \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

➤ Čtvrtá fáze – izochorické ochlazení (křivka mezi body 4 – 1)

V poslední fázi má plyn největší objem a píst teplého válce začíná klesat. Plyn se přesouvá za konstantního objemu do chladného válce, kde je mu odebrán zbytek tepla a tím klesá jeho tlak na minimální hodnotu. [11]



Obr. 13 Čtvrtá fáze - teplo předané regenerátoru

Práce je v tomto ději rovna nule $W = 0$ a pro teplo předané regenerátoru, resp. pokles vnitřní energie, platí [J]:

$$Q_0 = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4)$$

V průběhu děje dochází k poklesu entropie [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$] a pro její změnu platí:

$$\Delta s_{41} = \frac{1}{m} \cdot \int_4^1 \frac{\delta Q}{T} = c_v \cdot \int_4^1 \frac{\delta T}{T} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_C}{T_H}\right)$$

➤ Práce a účinnost Stirlingova oběhu

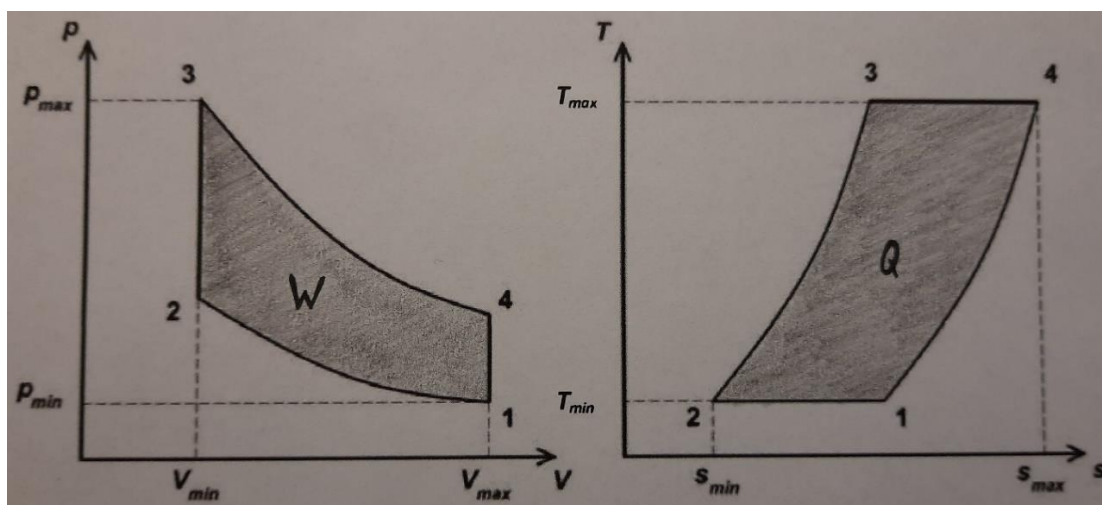
Množství práce, kterou je třeba vynaložit na stlačení plynu při teplotě T_C je menší než množství práce, kterou expandující plyn vytvoří při teplotě T_H . Výsledkem termomechanického cyklu je tak užitečná mechanická práce. [11]

Výsledná práce ideálního Stirlingova cyklu:

$$W = W_{12} + W_{34}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = v$$

$$W = -m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln(v) + m \cdot r \cdot T_3 \cdot \ln(v)$$



Obr. 14 Ideální Stirlingův cyklus - celková práce, celkové teplo

Při ideálním oběhu se přivedené teplo rovná vykonané práci a teplo odvedené spotřebované práci, protože nedochází k tepelným ztrátám. Tím splňuje podmínky teorie Carnotova cyklu. [11]

Vnitřní tepelná účinnost [-]:

$$\eta_t = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = \frac{m \cdot r \cdot T_3 \cdot \ln(v) - m \cdot r \cdot T_1 \cdot \ln(v)}{m \cdot r \cdot T_3 \cdot \ln(v)}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

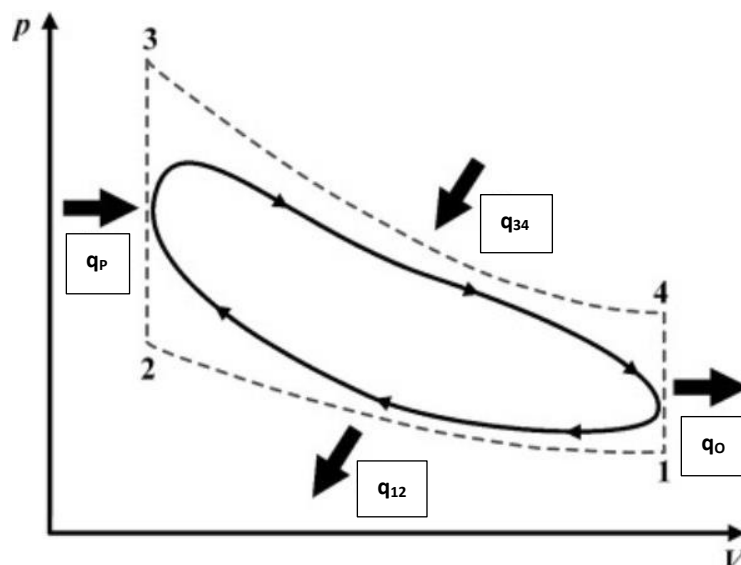
Z uvedeného vzorečku vyplývá, že tepelná účinnost závisí pouze na poměru teplot. Proto se technologický vývoj bude ubírat směrem ke zvětšení rozdílu teplot v cyklu ($\downarrow T_1$ a $\uparrow T_3$).

2.4.3 Reálný cyklus

Reálný cyklus je od ideálního značně odlišný. Realizace termomechanického oběhu je spojena s mechanickými a termodynamickými faktory. [14]

V reálném motoru [14]:

- vznikají hydraulické a třecí ztráty,
- vlivem nedokonalé těsnosti dochází k úniku pracovního média,
- expanze a komprese probíhá někde mezi izotermickým a adiabatickým dějem,
- existuje škodlivý prostor,
- má kontinuální pohyb pístů: nesouvislý a trhavý pohyb sledující ideální cyklus by velmi namáhal celý systém, vznikal by hluk a vibrace a tím by se snížila i životnost celého stroje.



Obr. 15 Schematické znázornění odlišnosti průběhu reálného a ideálního cyklu [16]

Existuje celá řada faktorů, které ovlivňují reálný děj motoru.

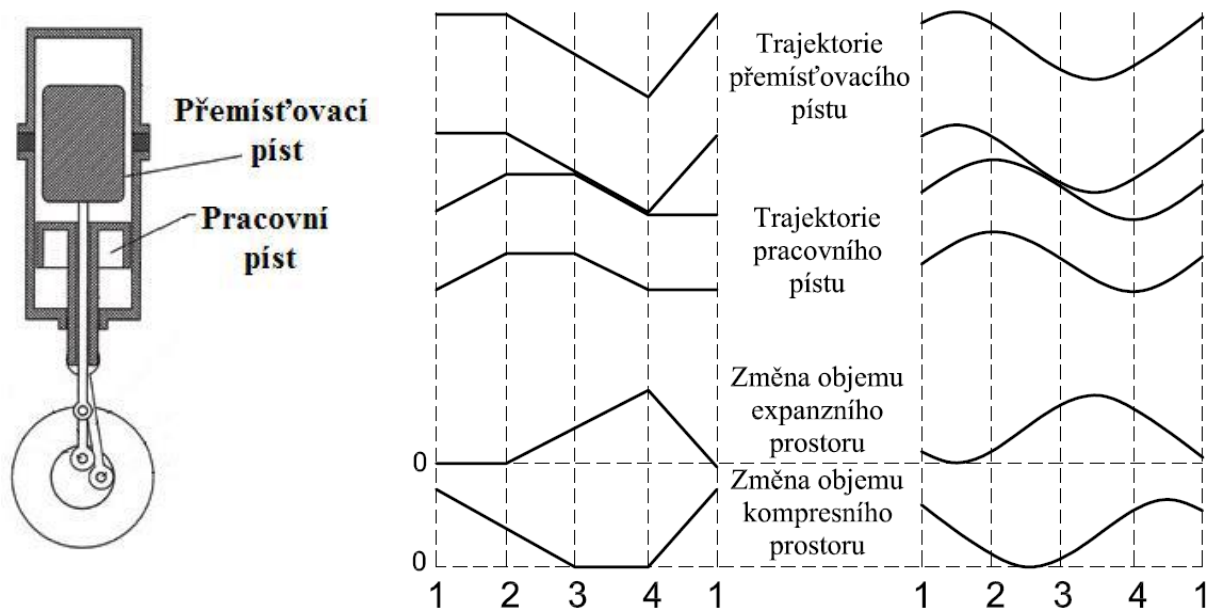
Prvním z nich je **škodlivý prostor**; prostory – regenerátor, tepelné výměníky a vnitřní objem připojených potrubí – snižují kompresní poměr a představují tlakové ztráty. Důsledkem toho je úbytek výkonu motoru. [8, 9]

Pokud konstrukce motoru dokonale netěsní (**únik plynu**), uniká tlak pracovního média, snižuje se tlakový poměr p_{\max}/p_{\min} a agregát výrazně ztrácí svůj výkon. [8, 9]

Rychlým průchodem média tělesem regenerátoru vzniká další ovlivňující faktor, a to **nedokonalá regenerace**. Regenerátor působí nárůst škodlivého prostoru a ztráty třením. Není možné, aby regenerátor ohřál/ochladil pracovní médium, aniž by se změnila jeho vlastní teplota. Dále vzniká také teplotní rozdíl mezi pracovním plynem a materiálem regenerátoru. Proto není možné u regenerátoru dosáhnout 100% účinnosti, v praxi je realizovatelná účinnost regenerátoru přibližně 95 %. [8, 9]

Ve skutečném motoru **neplatí, že je komprese a expanze izotermická**, protože doba pro přestup tepla je velmi krátká. Proto se prakticky jedná o děje adiabatické, při nichž dochází ke změně teplot a tlaků během cyklu a tím i ke snížení výkonu agregátu. Poissonovou konstantou κ a polytropickým exponentem n je definována míra přiblížení reálného děje k ideálnímu izotermickému ději. [8, 9]

Reálný motor je také ovlivněn **kontinuálním, resp. diskontinuálním pístovým pohybem**. K ideální změně pracovních objemů by bylo potřeba velké zrychlení pístů, což je prakticky nerealizovatelné. Z konstrukčního hlediska je diskontinuální průběh sice možný, ale nevýhodný. Pohyb pístu je obvykle řízen jednoduchým klikovým mechanismem. V důsledku těchto mechanických omezení je obtížné rozlišit jednotlivé probíhající termodynamické procesy. V prostoru teplé strany motoru nedochází k úplné expanzi a v prostoru studené strany k úplné kompresi. Plocha uzavřená cyklem v p-V diagramu je zmenšena vlivem sinusoidního pohybu. Redukcí zmíněné plochy se snižuje i výsledná užitečná práce. [8, 9]



Obr. 16 Schematické znázornění pohybu pístů (β -modifikace): diskontinuální, kontinuální [8]

Dalším faktorem ovlivňujícím reálné hodnoty jsou **ztráty prouděním, resp. tlakové ztráty**, které vznikají, když pracovní plyn proudí výměníkem tepla a regenerátorem. Tím je tlak plynu v každém pracovním prostoru rozdílný. Vlivem silných oscilací přemísťování pracovního média mezi výměníky je možné jeho proudění označit za turbulentní. [8, 9]

Tepelné ztráty také ovlivňují reálný chod agregátu. V reálném motoru dochází k vedení tepla podél stěn válce a pístu, což způsobuje tepelné ztráty. Aby se tyto ztráty kompenzovaly, je nutné dodat dostatečné množství tepla. Jedná se o ztráty kondukcí, konvekcí a vyzařováním tepla. [8, 9]

Posledním a poměrně významným faktorem, který ovlivňuje reálnost motoru, jsou **třecí mechanické ztráty**. Patří sem smykové/Coulombovské tření (vlivem nerovností povrchu a adhezí povrchových atomů působí třecí síly proti tendenci ploch proklouznout) a viskózní/kapalinové tření (v tomto případě nás zajímá pouze objem motoru; na hmotnosti nezáleží). [8, 9]

Všechny výše popsané ztráty jsou poměrně významné, protože snižují plochu $p - V$ v diagramu expanzního prostoru, což vede ke snížení výstupní práce a tím pádem účinnosti motoru.

2.5 Stirlingův motor v praxi

2.5.1 Aplikace Stirlingových motorů

Aplikovat Stirlingův motor do praxe není vždy jednoduché, má svá omezení. Jedná se o náročnou technicko-ekonomickou úlohu, jejíž výsledky nám ne vždy ukáží vhodnost využití Stirlingova motoru v té které oblasti. V takových případech volíme jiné (klasické) zdroje energie. Jako vhodnější zdroj výroby energie lze uvést běžný spalovací motor. Díky své vysoké flexibilitě má však Stirlingův motor významné místo na trhu.

2.5.1.1 Kogenerační jednotka – mikrokogenerace

Využití Stirlingova motoru jako kogenerační jednotky je v České republice zastoupeno mnohem méně než ve světě. Mezi úspěšné realizace a funkční využití patří kogenerační jednotky v Nizozemí, u nichž se jako zdroj tepla uplatňuje zejména biomasa (tepelný výkon 105 kW a elektrický výkon 35 kW). S dalším výzkumem uplatnění se setkáváme zejména ve Švédsku, Velké Británii, Německu, s rozsáhlejším výzkumem se můžeme setkat v USA a Japonsku. [9]

Jako mikrokogenerace se označuje kombinovaná výroba elektřiny a tepla v zařízeních do 50 kW elektrického výkonu. Mikrokogenerační jednotky využívají různé technologie, z nichž nejpoužívanější jsou na bázi spalovací motorů. Jedná se o jednotky určené pro domácnosti/maloodběratele. Podrobnější rozbor je uveden v kapitole 5 (viz 5.1 Mikro/kogenerační jednotka se Stirlingem) [9]

2.5.1.2 Sluneční motor

Sluneční záření je v současnosti významným zdrojem výroby elektrické energie se značným potenciálem. Nainstalovaná zrcadla jsou sestavená a orientovaná tak, aby soustředila sluneční paprsky do ohniska parabolického koncentrátoru, kde je umístěn přijímač tepla. Z něj je energie odváděna do termoelektrického generátoru. Soustředěnou sluneční energii lze přímo využít k ohřevu teplé strany výměníku Stirlingova motoru. Stirlingův motor je přímo upevněn na vlastní tříosí sledovací heliostat, jenž je ve třech osách orientován na okamžitou polohu slunce. Cílem vývoje Stirlingova motoru je bezporuchový a bezúdržbový provoz po dobu 50 až 100 tisíc provozních hodin tj. 6 -12 let. [9]

Příkladem je systém Dish Stirling švédského vývojáře Rispasso Energy, který byl testován v roce 2015 v poušti Kalahari v Jižní Africe. Jde o jednu z mála provozovaných solárních elektráren, kdy 34 % energie dopadající na zrcadla je převedeno na elektřinu dodávanou do elektrizační soustavy, což je zhruba dvakrát vyšší účinnost než u standardních

solárních panelů. Jedná se o obrovská zrcadla o průměru 12 m na ploše přes 100 m², která se neustále přizpůsobují tak, aby zachytila maximální množství slunečního záření. Tento systém je vhodný pouze v oblastech s konzistentním a jasným slunečním svitem. [9]



Obr. 17 Ukázka parabolického zrcadla se Stirlingovým motorem v ohnisku a mechanikou pro sledování slunce [17]

Dalším příkladem jsou tzv. sluneční farmy v pouštních oblastech USA – projekt Stirling Solar 2 PV Park se nachází v okrese Mohave, Arizona, přibližně 1,5 mil východně od Golden Shores a 2,5 mil východně od Topocku. Jde o projekt solárního parku o výkonu 225 MW na ploše téměř 9 km², součástí je i bateriové úložiště. [18]

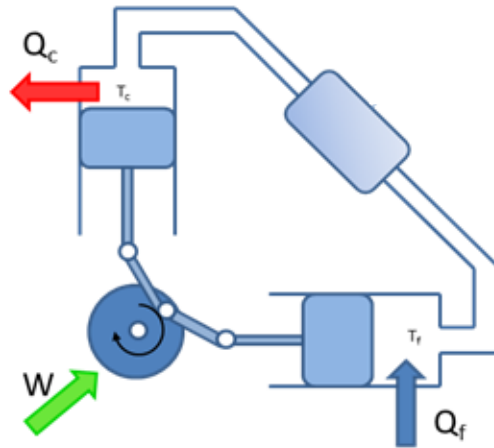
2.5.1.3 Čerpadlo (studniční čerpadlo)

Zdrojem energie je voda ohřívána ve slunečních kolektorech. Motor pohání čerpadlo na čerpání studniční vody z hloubkových vrtů. Ojedinelé případy jsou známé v USA, Brazílii a Indii. [9]

2.5.1.4 Tepelné čerpadlo

Při zvláštních příležitostech lze Stirlingův cyklus realizovat v opačném modu - jako tepelné čerpadlo, kdy je energie (mechanická nebo elektrická) využívána k ohřevu, nebo chladicí stroj. Motor by se však musel točit opačně, aby pracoval v čerpadlovém cyklu. Jedná se o technicky velmi složité řešení. [9]

Reverzibilita Stirlingova cyklu se používá i ke generování chladu – zejména v kryogenice, kde má Stirlingův cyklus obrovské výhody. Příkladem může být horkovzdušná chladnička s názvem Stirlingova lednice. [9]



Obr. 18 Stirlingova chladnička typu alfa [19]

Existují snahy využít Stirlingova cyklu ve vzduchotechnice nebo jako klimatizační jednotky. [9]

2.5.1.5 Pohon ponorek

Speciální aplikace Stirlingova motoru je součástí vojenských dielelektrických ponorek švédského námořnictva (má tichý chod a hůře odhalitelnou zvukovou stopu). V letech 1987 až 1988 byla ponorka Näcken stejnojmenné třídy rozdělena a mezi zadní energetickou řídicí místnost a strojovnu osazena 8 metrů dlouhou částí trupu obsahující prototyp Air-independent propulsion (AIP – na vzduchu nezávislá pohonná jednotka) využívající Stirlingův motor s uzavřeným cyklem. Tato jednotka není určena přímo k pohonu ponorky. Stirlingův motor v jednotce AIP slouží k nabíjení baterií. Elektrická energie z baterie napájí elektromotor pohánějící lodní šroub a také je využita pro chod podpůrných elektrických systémů ponorky. Dále se používá také pro přečerpávání kapaliny balastní nádrže ovládající hloubku ponoru. Tato technologie zvýšila dobu ponoření pod hladinou na 14 dní a byla přijata v následujících švédských ponorkách. [9, 20, 21]



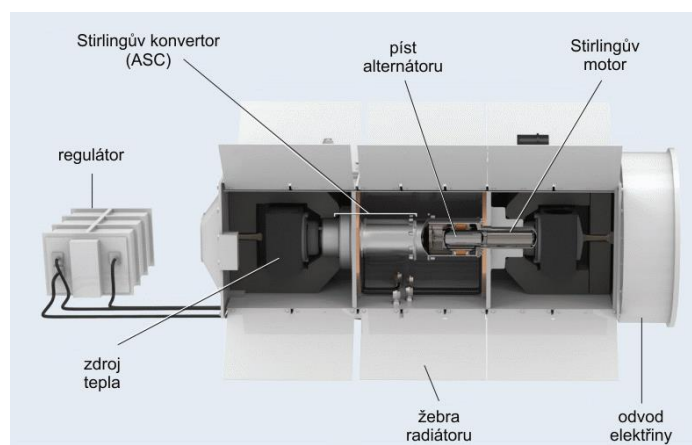
Obr. 19 Ponorka HSwMS Näcken [21]

2.5.1.6 Advanced Stirling radioisotope generator (ASRG)

Další oblastí možné aplikace je ASRG. Jedná se o radioizotopový energetický systém poprvé vyvinutý v NASA v Glenn Research Center. Využívá technologii přeměny energie na základě Stirlingova cyklu k přeměně tepla z radioaktivního rozpadu na elektřinu pro použití v kosmických lodích. Proces přeměny energie používaný ASRG je asi čtyřikrát účinnější než v předchozích radioizotopových termoelektrických systémech. [22, 23]

Jako zdroj tepelné energie se nejčastěji používá izotopu plutonia-238 ve formě oxidu plutoničitého PuO_2 slisovaného do tvaru velkých tablet (nízkeho válce), které jsou zahřátím na vysokou teplotu slinuty do bloků podobných keramice. Z bezpečnostních důvodů jsou uzavřeny do kovových pouzder, a ještě jsou opatřeny tepelnou ochranou z uhlíkového laminátu. [22, 23]

Navzdory ukončení vývoje ASRG v roce 2013 NASA pokračuje v dalším testování. Jednotky na bázi Stirlingova cyklu připravené k vyslání do vesmíru se neočekávají dříve než v roce 2028. [22, 23]



Obr. 20 ASRG [24]

2.5.2 Nevýhody využití Stirlingova motoru

Nevýhody/negativní vlastnosti se projeví zejména tehdy, pokud technické řešení motoru a jeho aplikace nejsou náležitě zvládnuté. [2, 8, 9, 11]

Nevýhody a potíže při využití Stirlingova motoru jsou:

- nutnost spouštění externím zdrojem,
- pomalejší start (motor je nutné nejprve zahřát na pracovní teplotu a až poté podává plný výkon, tento proces trvá u Stirlinga déle než u většiny ostatních jednotek),
- nevýhodný průběh točivého momentu a nízké otáčky,
- problém regulace výkonu (pokud aplikace vyžaduje schopnost motoru měnit výkon, musí tomu být uzpůsobena jeho konstrukce – pro změnu výkonu se využívá změna tlaku, změna fázového úhlu přemístovacího a pracovního pístu nebo změna přiváděného tepla),
- problémy s regenerací,
- utěsnění pracovního média,
- velikost a hmotnost,
- vysoká pořizovací cena (drahé materiály a náročnost výroby),
- není znám široké veřejnosti (pokud nevíte, co je Stirlingův motor, nemůžete jej propagovat). [2, 8, 9, 11]

2.5.3 Výhody využití Stirlingova motoru

- vysoká spolehlivost (jeho technologie je velmi jednoduchá, ale efektivní),
- tichý a hospodárný chod (pro některé činnosti, kde je vyžadováno větší ticho, je tento typ motoru dobrou volbou, rovněž se snadno vyvažuje a vytváří malé vibrace),
- je ekologičtější - žádné nebo nízké emise škodlivých plynů,
- chladicí vodu lze využít pro vytápění – ideální pro kogenerační jednotky,
- možnost využití odpadního tepla ze spalování,
- možnost pracovat s různými zdroji tepla (k ohřevu plynu může mít zdroje tepla jako je dřevo, piliny, sluneční nebo geotermální energie, odpad apod.),
- dosahovaná účinnost motoru se pohybuje v rozmezí od 25% do 40 %, což představuje velmi dobrou účinnost u agregátů s výkonem 1 až 25 kW,
- spaliny se nedostávají do kontaktu s pohyblivými částmi motoru,

- provoz motoru nevyžaduje náročnou údržbu, pouze doplňování pracovního plynu (díky vysoké spolehlivosti),
- dlouhá životnost (na rozdíl od konvenčních motorů je jednodušší a díky své konstrukci vydrží delší roky),
- ve srovnání s ostatními solárními technologiemi dosahuje Stirlingův motor nejvyšší účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou. [2, 8, 9, 11]

3 Výroba tepla v malém měřítku (domácnosti – rodinné domy, bytovky)

Výroba tepla v domácnostech není technologicky náročná, a je především u rodinných domů rozšířená. Hospodárnost a ekologičnost výroby tepla nejvíce ovlivňuje správný výběr zařízení pro jeho výrobu – princip a výkon. [25]

Nejčastěji se **teplo** v domácnostech vyrábí spalováním paliva v kotlích. Palivem je:

- zemní plyn (je rozváděn hustou sítí plynovodů), současný vývoj na světových trzích v důsledku energetické krize znamená, že vláda ČR musela v roce 2022 svádět boj s časem při hledání zdrojů k naplnění zásobníků zemního plynu a nových dodavatelů průběžných dodávek této suroviny, aby vše stačila před začátkem zimy 2022/2023. To se jí podařilo. Příští zima 2023/2024 bude obtížnější. V roce 2022 ještě přitékal plyn z Ruska, byť omezeně, v roce 2023 se s ním počítat nedá. [25, 26]
- tuhá fosilní paliva: uhlí, koks a rašelina. [25]
- v posledních letech je významným zdrojem biomasa: palivové dříví, brikety a peletky. [25, 27]

V zatím menší míře se pro vytápění využívá *sluneční energie*, kterou zachytáváme slunečními kolektory. Tento způsob však souvisí s akumulací tepla, protože sluneční záření je neregulovatelné. [25]

4 Výroba elektřiny v malém měřítku (domácnosti – rodinné domy, bytovky)

Elektřinu v domácnostech nelze vyrábět hospodárně, ekologicky a bezpečně pomocí zmenšených variant velkých elektráren. Jednak se jedná o menší výkony a jednak požadavky pro výrobu v domácnostech jsou mnohem různorodější, protože se jedná o technologie umístěné v oblasti určené primárně pro bydlení s přísnými hygienickými limity. [25]

Elektřinu lze v domácnostech vyrábět pomocí: [25]

- fotovoltaického systému, který však využívá k výrobě elektřiny přírodní zdroje proměnné intenzity,
- větrných elektráren závislých na povětrnostních podmínkách,
- elektrocentrál se spalovacím motorem na zemní plyn nebo kapalná paliva.

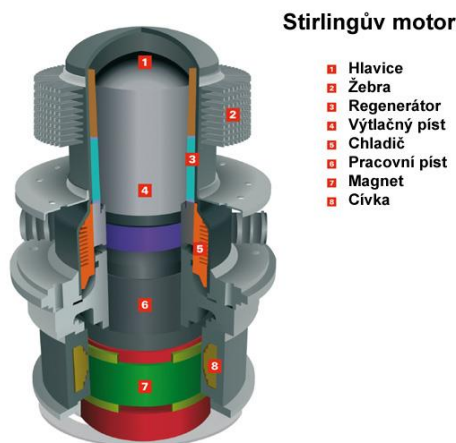
5 Mikrokogenerace

Každý z nás potřebuje ke svému životu nemalé množství energie. Každý objekt (od malých rodinných domů až po velké objekty – obchodní domy, hotely apod.) je potřeba vytápět a zásobovat elektrickou energií. K tomu lze využít malé kogenerační jednotky – řeší obě oblasti zároveň, propojí výrobu tepla (plynové kondenzační kotle, tepelná čerpadla, solární kolektory) a výrobu elektřiny (fotovoltaické panely, malé vodní a větrné elektrárny). [28, 29, 30, 31]

Jejich přínos spočívá v tom, že teplo a větší část elektrické energie jsou spotřebovány v místě jejich výroby. Odpadají tak ztráty vznikající při transportu energie na delší vzdálenost. [29]

5.1 Mikro/kogenerační jednotka se Stirlingem

Významným evropským výrobcem kogeneračních jednotek na bázi Stirlingova motoru současné doby (nynější století) je firma Viessmann. Mikrokogenerace Viessmann je kombinací Stirlingova motoru s volným pístem a vysoce efektivního plynového kondenzačního kotle. Stirling s volným pístem pracuje bez klikové hřídele v hermeticky uzavřeném systému, ve kterém se jako pracovní médium používá hélium. Pohyb pístu se v integrovaném lineárním generátoru přeměňuje na elektrickou energii, odpadní teplo motoru se využívá k vyhřívání obytné místnosti a ohřevu pitné vody. Přitom se dosahuje celkové účinnosti 97% (Hs). Základní tepelný výkon 6 kWt a elektrický výkon 1 kWe přitom zcela odpovídá využití této jednotky v rodinných domech. [29, 32]



Obr. 21 Schéma Stirlingova motoru (společnost Viessmann) [33]

Dalším příkladem je motor A600 od rakouské společnosti Frauscher Thermal Motors (FTM), jehož výzkum vrcholí prvním osvědčeným motorem alfa designu. Jde o zařízení připravené k připojení na Stirlingův modul s integrovaným asynchronním generátorem, který je přímo připojen k třífázové síti 400 V. Expanzní zdvihový objem je téměř 600 cm³, mechanický výkon je 5,5 kW a elektrický výkon šestipólového generátoru při rychlosti 1000 ot./min. je 5 kW_e. Procesní plyn, helium, má průměrný procesní tlak 30 barů ve zcela uzavřeném stroji. Tento relativně nízký procesní tlak zajišťuje extrémně nízké zatížení pohyblivých částí a dlouhou životnost. Modul běží bez oleje, a proto může být použit v libovolné montážní orientaci. Protože firma umí přizpůsobit vysokoteplotní výměníky příslušným požadavkům svých zákazníků, výsledkem je řada možných aplikací. Modul A600 Stirling je uvolněn pro aplikace výzkumu a vývoje. [34]



Obr. 22 Stirlingův motor A600 [34]

Další technologii se Stirlingovým motorem produkuje rakouská firma ÖkoFEN. Významným palivovým zdrojem jsou pelety - jsou nejpohodlnější verzí přirozeně obnovitelného zdroje energie, kterým je dřevo. Odpadní materiál vznikající při zpracování dřeva ve formě pilin je stlačován do malých dřevěných válečků, které jsou ideálním palivem pro spalování. To chrání životní prostředí, šetří klima a šetří zdroje. Vyznačují se vysokým obsahem energie, vynikající výhřevností (výhřevnost pelet je standardizována na 4,9 kWh/kg) a do jisté míry ekologickým spalováním. Na rozdíl od ropy a uranu budou stále dostupné pro budoucí generace, jejich spalování je CO₂ neutrální, ve srovnání s fosilními palivy, jako je topný olej a zemní plyn jsou dřevěné pelety výrazně levnější. Základem systému vytápění peletami na výrobu elektřiny je Pellematic Condens, jeden z nejúčinnějších kotlů na pelety s kondenzační technologií. Ten je pak doplněn o Stirlingův motor pro výrobu elektřiny. Díky průkopnické kondenzační technologii Condens dosahuje Pellematic Condens_e o 15 % vyšší účinnosti v kombinaci s nejnižšími emisemi. Díky kompaktní technologii kotle s integrovaným Stirlingovým motorem vyžaduje Pellematic Condens_e výšku místnosti pouze 2,15 m a je na špičce z hlediska účinnosti a úspory místa, výkon je 10 -16 kW, účinnost 107,1 – 109,5 %. Pellematic Condens_e jako obvykle poskytuje potřebné teplo pro teplou vodu a vytápění, které je dočasně akumulováno ve vyrovnávacím zásobníku. Díky tomu lze individuálně nastavit dobu chodu systému a zvýšit vlastní spotřebu elektřiny vyrobené na místě. [35, 36]

6 Popis objektu

Bytový dům se nachází v Plzeňském kraji v obci Strážov v okrese Klatovy. Jedná o dvoupodlažní budovu s přízemím a dvěma vchody. Celkem jde o 8 bytů velikosti 3+1 (obývací pokoj s velikostí 18,75 m², ložnice 13 m², dětský pokoj 9,75 m², kuchyně 8,90 m², koupelna 3,75 m², samostatné sociální zařízení 1,50 m², chodba 10,85 m²). Dům stojí v kopcovité oblasti, na okraji městysu, z žádné strany není krytý významnou překážkou. Celková užitná plocha jednoho bytu je 66,50 m². Dům je opatřen plastovými okny a vstupními dveřmi a je celý zateplen. Byty jsou orientovány tak, že okna obývacího pokoje a kuchyně směřují na západ, okna obou pokojů na východ. V rámci jednoho vchodu jsou byty vzhledem ke vstupnímu schodišti uspořádány zrcadlově. V dolních částech bytového domu je kotelna, prádelna a prostor pro úschovu kol, kočárků apod.



Obr. 23 Bytový dům

Tento bytový dům je z energetického hlediska charakterizován svými energetickými nároky (potřebami energie) a svou energetickou náročností (spotřebami energie). Energetické nároky jsou dány množstvím energie, které objekt pro svou funkci objektivně potřebuje. Energetická náročnost je faktické množství nakupované energie, které spotřebují pro svou činnost systémy, kryjící tyto energetické potřeby.

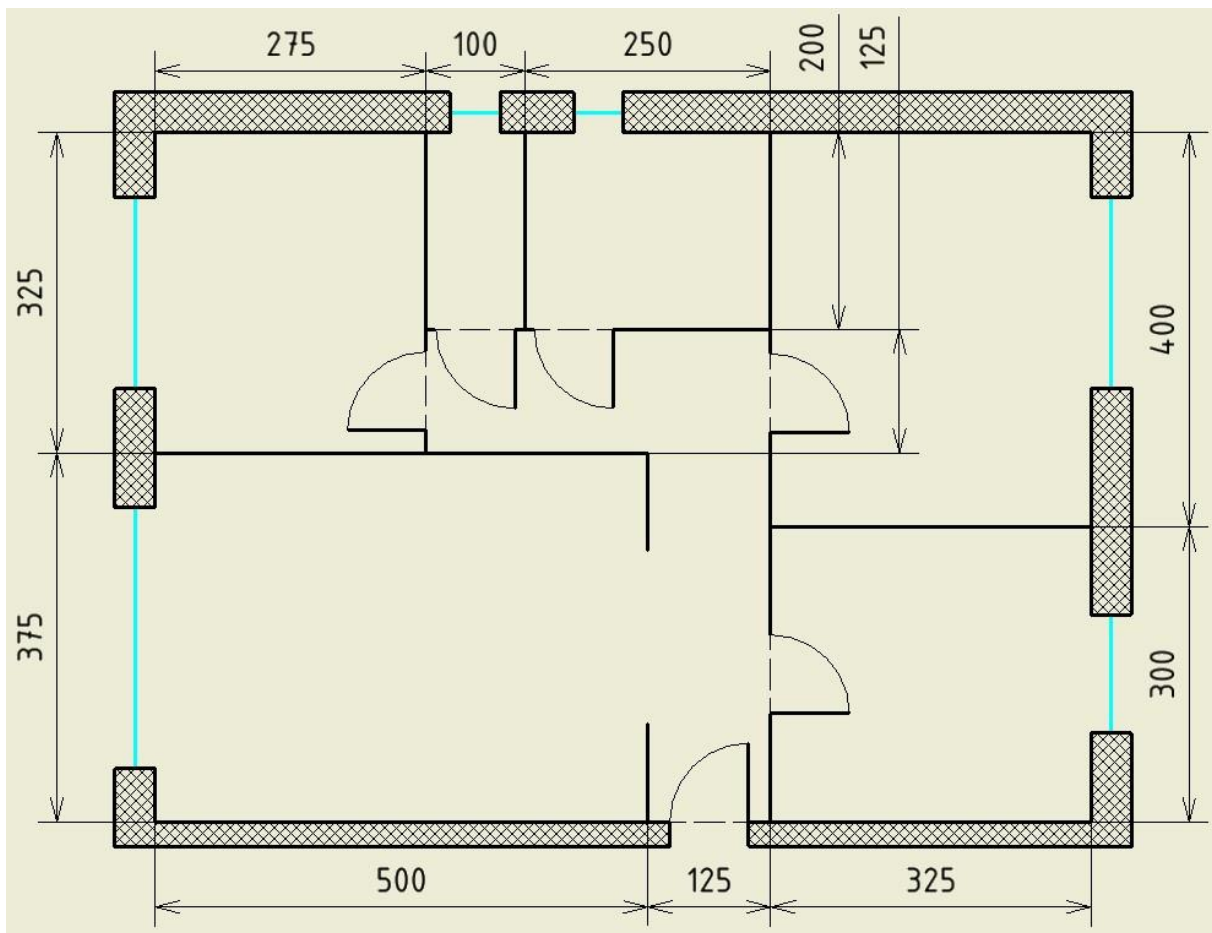
U výpočtu plochy střechy objektu bylo zanedbáno zkosení střechy.

Energetická bilance objektu má dvě základní složky:

- potřeba tepla na vytápění a ohřev teplé vody
- potřeba elektrické energie

Půdorys domu:

- Plocha podlahy: 371,30 m²
- Plocha střechy: 419,58 m²
- Plocha obvodového zdiva: 548,80 m²
- Plocha oken: 130,88 m² + 22,08 m² (okna po obvodu + střešní okna)



Obr. 24 Zjednodušené schéma bytové jednotky v severní části budovy (hodnoty uvedeny v cm)

Složení konstrukcí

Pro obvodové zdivo je součinitel přestupu pro vnější a vnitřní stranu zdi roven $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Složení obvodového zdiva je uvedeno v následující tabulce:

Tloušťka	Typ izolace	Vlastnosti izolace
10 mm	Omítka perlitová	$\lambda = 0,15 \text{ W/mK}$
200 mm	Betonové tvárnice	$\lambda = 0,11 \text{ W/mK}$
100 mm	Polystyren pěnový - EPS, ČSN EN 13163+A2	$\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$
10 mm	Omítka akrylátová – zatíraná	$\lambda = 0,80 \text{ W/mK}$

Tab. 1 Izolace obvodového zdiva

Pro okna je součinitel prostupu uveden v následující tabulce:

	Typ izolace	Vlastnosti izolace
	Plastová okna, izolační dvojsklo (fólie)	$k = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tab. 2 Izolace oken

Pro podlahu je součinitel přestupu pro vnější a vnitřní stranu podlahy roven $\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Složení podlahy je uvedeno v následující tabulce:

Tloušťka	Typ izolace	Vlastnosti izolace
6 mm	Linoleum	$\lambda = 0,19 \text{ W/mK}$
100 mm	Polystyrénová izolace	$\lambda = 0,037 \text{ W/mK}$
250 mm	Betonová směs	$\lambda = 1,36 \text{ W/mK}$

Tab. 3 Izolace podlahy

Pro střechu je součinitel přestupu pro vnější a vnitřní stranu střechy roven $\alpha_i = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Složení střechy je uvedeno v následující tabulce:

Tloušťka	Typ izolace	Vlastnosti izolace
10 mm	Dřevotřískové desky	$\lambda = 0,11 \text{ W/mK}$
100 mm	Minerální vata	$\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$
60 mm	Střešní krytina - panely	$\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$

Tab. 4 Izolace střechy

7 Požadavky na teplo a elektrickou energii

Pro adekvátní výběr kogenerační jednotky je nezbytné znát potřebu elektrické energie, potřebu tepla na vytápění a ohřev teplé vody. Součástí výpočtu jsou i tepelné ztráty objektu vyvolané úniky tepla kondukcí a konvekcí danými částmi konstrukce (obvodové zdivo, okna, podlaha, střecha).

7.1 Výpočet tepelných ztrát bytové jednotky

Pro výpočet tepelných ztrát je zvolena obálková metoda podle normy ČSN 73 0540. Nejprve je nutné určit součinitele prostupu tepla k pro jednotlivé části konstrukce. Následuje výpočet samotných tepelných ztrát. V něm využijeme již známé hodnoty ploch S jednotlivých částí bytové jednotky, součinitele tepelných ztrát, nově získanou vnější výpočtovou teplotu t_e stanovenou pro nedaleko ležící město Klatovy (viz. Tab. 6) a vnitřní výpočtové teploty pro jednotlivé místnosti v bytě, resp. budov (viz. Tab. 5).

7.1.1 Součinitel prostupu tepla

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Obvodové zdi

$$k_z = \frac{1}{\frac{1}{7,7} + \frac{0,01}{0,15} + \frac{0,2}{0,11} + \frac{0,1}{0,04} + \frac{0,01}{0,8} + \frac{1}{25}} = 0,219 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Okna

$$k_o = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Podlaha

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{7,7} + \frac{0,006}{0,19} + \frac{0,1}{0,037} + \frac{0,25}{1,36} + \frac{1}{25}} = 0,324 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Střecha

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,01}{0,11} + \frac{0,1}{0,039} + \frac{0,06}{0,022} + \frac{1}{25}} = 0,181 \text{ W/m}^2\text{K}$$

7.1.2 Tepelné ztráty

Druh vnitřní vytápěné místnosti	Vnitřní výpočtová teplota t_i [°C]
Obývací místnosti, tj. obývací pokoje, ložnice, jídelny, jídelny s kuchyňským koutem, pracovny, dětské pokoje	20
Kuchyně	20
Koupelny	24
Klozety	20
Vytápěné vedlejší místnosti (předsín, chodby aj.)	15
Vytápěná schodiště	10

Tab. 5 Vnitřní výpočtové teploty pro obytné budovy - trvale užívané

Místo	Nadmořská výška [m]	Vnější výpočtová teplota t_{ev} [°C]
Klatovy	409	-15 (větrná oblast)

Tab. 6 Vnější výpočtová teplota pro danou lokaci

$$Q_i = k_i \cdot S_i \cdot (t_i - t_{ev}) \quad [W]$$

Pro přesnější stanovení tepelných ztrát je uvažována rozdílná vnitřní výpočtová teplota daná druhem vnitřní vytápěné místnosti. Proto je teplosměnná plocha obvodového zdiva a oken rozdělena pro jednotlivé obvodové místnosti.

7.1.2.1 Obvodové zdivo

Druh vytápěné místnosti	Teplosměnná plocha [m ²]	Vnitřní výpočtová teplota [°C]
Obývací místnosti, tj. obývací pokoje, ložnice, pracovny, dětské pokoje, kuchyně	402,941	20
Sklep (částečně vyčnívající nad úroveň terénu)	96,467	10
Koupelny	25,48	24
Vytápěná schodiště	23,912	10

Tab. 7 Teplosměnná plocha obvodového zdiva pro jednotlivé vytápěné místnosti

$$Q_{z1} = 0,219 \cdot 402,941 \cdot (20 + 15) = 3\,088,543\,W$$

$$Q_{z2} = 0,219 \cdot 96,467 \cdot (10 + 15) = 528,157\,W$$

$$Q_{z3} = 0,219 \cdot 25,48 \cdot (24 + 15) = 217,625\,W$$

$$Q_{z4} = 0,219 \cdot 23,912 \cdot (10 + 15) = 130,918\,W$$

7.1.2.2 Okna

Druh vytápěné místnosti	Teplosměnná plocha [m ²]	Vnitřní výpočtová teplota [°C]
Obývací místnosti, tj. obývací pokoje, ložnice, pracovny, dětské pokoje, kuchyně	105,18	20
Sklep (částečně vyčnívající nad úroveň terénu)	4,02	10
Koupelny	1,6	24
Vytápěná schodiště	20,08	10
Podkroví	22,08	10

Tab. 8 Teplosměnná plocha oken pro jednotlivé vytápěné místnosti

$$Q_{o1} = 1,5 \cdot 105,18 \cdot (20 + 15) = 5\,521,950\,W$$

$$Q_{o2} = 1,5 \cdot 4,02 \cdot (10 + 15) = 150,750\,W$$

$$Q_{o3} = 1,5 \cdot 1,6 \cdot (24 + 15) = 93,600\,W$$

$$Q_{o4} = 1,5 \cdot 20,08 \cdot (10 + 15) = 753,000\,W$$

$$Q_{os} = 1,5 \cdot 22,08 \cdot (10 + 15) = 828,000\,W$$

7.1.2.3 Podlaha

$$Q_p = 0,324 \cdot 371,3 \cdot (10 + 15) = 3\,007,530\,W$$

7.1.2.4 Střecha

$$Q_s = 0,181 \cdot 419,58 \cdot (10 + 15) = 1\,898,600\,W$$

7.1.2.5 Celková tepelná ztráta

$$Q_C = Q_{z1} + Q_{z2} + Q_{z3} + Q_{z4} + Q_{o1} + Q_{o2} + Q_{o3} + Q_{o4} + Q_{os} + Q_p + Q_s$$

$$Q_C = 16\,218,673\,W$$

7.2 Výpočet roční potřeby tepla na vytápění

Při výpočtu roční potřeby tepla na vytápění jsou využita data získaná dlouhodobým pozorováním otopných období, proto lze využít denostupňovou metodu. Počet denostupňů je pro každou lokalitu jiný, je dán délkou otopného období, průměrnou vnitřní výpočtovou teplotou a průměrnou venkovní teplotou během topné sezóny (viz Tab. 9). Potřeba tepla na vytápění je rovněž závislá na opravném součiniteli, který zohledňuje nesoučasnost tepelné ztráty větráním a prostupem, snížení vnitřní teploty a zkrácení doby provozu (viz Tab. 10, 11, 12).

Rozdílná potřeba tepla na vytápění, závislejší i na tepelných ztrátách daných různou izolací, je příčinou rozdílné délky otopných období pro jednotlivé budovy. Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 194/2007 Sb. stanovuje u bytových jednotek napojených na CZT začátek a konec otopného období. Topná sezóna může být zahájena nejdříve 1. září a ukončena nejpozději 31. května. Tento interval je spíše orientační, protože je závislý i na venkovní teplotě. Klesne-li venkovní teplota v dané lokalitě 2 dny po sobě pod $t_{em} = 13^\circ\text{C}$ bez výhledu na její zvýšení je zahájena dodávka tepelné energie. V případě, že průměrná teplota v dané lokalitě vystoupá 2 dny po sobě nad 13°C bez výhledu na pokles, je dodávka ukončena.

7.2.1 Výpočet denostupňů

$$D = d \cdot (t_{is} - t_{es}) \quad [d^\circ]$$

Místo	h [m]	t_{em} [°C]	d [dny]	t_{is} [°C]	t_{es} [°C]
Klatovy	409	13	247	20	3,9

Tab. 9 Potřebné hodnoty pro výpočet denostupňů stanovené pro danou lokaci

$$D = 247 \cdot (20 - 3,9) = 3\,976,7 \text{ d}^\circ \cong 3\,977 \text{ d}^\circ$$

7.2.2 Výpočet opravného součinitele

$$\varepsilon = e_i \cdot e_t \cdot e_d \quad [-]$$

Objekt	e_i
Rodinný dům	0,6
Velké bytové domy, školy	0,9

Tab. 10 Hodnoty pro opravná součinitel e_i

Objekt	e_t
Nemocnice	1
Obytné budovy s nepřeruš. vytápěním	0,95
Obytné budovy s nočním přeruš. vytápěním	0,9
Správní budovy	0,65 až 0,9
Školy	0,8 až 0,85

Tab. 11 Hodnoty pro opravný součinitel e_t

Objekt	e_d
Nemocnice a jiné trvale vytápěné budovy	1
Budovy s jednodenním klidem	0,9
Budovy s dvoudenním klidem	0,8
Školy	0,7

Tab. 12 Hodnoty pro opravný součinitel e_d

Jelikož se jedná o menší bytový dům, byl zvolen opravný součinitel $e_i = 0,85$. Obytná budova je obývána trvale, resp. trvale vytápěna bez přerušování. Proto byly vybrány opravné součinitele $e_t = 0,95$ a $e_d = 1$.

$$\varepsilon = 0,85 \cdot 0,95 \cdot 1 = 0,8075$$

7.2.3 Stanovení účinností systému

Při určování potřeby tepla pro vytápěcí účely je dále nutné zohlednit účinnost rozvodu vytápění, která byla stanovena jako $\eta_r = 0,98$, a účinnost obsluhy, resp. možnosti regulace soustavy určenou jako $\eta_o = 1$.

7.2.4 Teoretická roční potřeba tepla na vytápění

$$Q_{VYT,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_r \cdot \eta_o} \cdot \frac{24 \cdot Q_C \cdot D}{t_{is} - t_{ev}}$$
$$Q_{VYT,r} = \frac{0,8075}{0,98 \cdot 1} \cdot \frac{24 \cdot 16\,218,673 \cdot 3\,977}{20 - (-15)} = 36\,444\,379,58 \text{ Wh/rok}$$
$$Q_{VYT,r} = 36,44 \text{ MWh/rok} = 131,18 \text{ GJ/rok}$$

7.3 Výpočet roční potřeby tepla na ohřev teplé vody

Spotřeba vody, resp. teplé vody, je v každé domácnosti jiná. Závisí na mnoha faktorech – režimu praní, použití sprchy nebo vany, mytí nádobí v myčce nebo ručně apod. Proto je přesné empirické stanovení potřebného tepla pro ohřev teplé vody velmi obtížné.

Je však možné určit alespoň přibližnou potřebu tepla. K výpočtu denní potřeby je nezbytné znát teplotu studené vody $t_l = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, požadovanou teplotu ohřáté vody $t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$, měrnou tepelnou kapacitu vody $c = 4\,186 \text{ J/kgK}$, měrnou hmotnost vody ρ pro $(t_2 + t_l)/2$ a koeficient energetických ztrát systému pro přípravu teplé vody $z = 0,75$. Poslední proměnnou je objem potřebného množství vody na 1 den V_p . U staveb určených k bydlení se dle normy ČSN EN 12831-3 uvádí zhruba $0,04 \text{ m}^3/\text{osobu}/\text{den}$. Hodnota tedy byla stanovena na základě uvažovaného počtu 28 obyvatel bytového domu.

Pro výpočet roční potřeby tepla je ještě nutné znát teplotu studené vody v létě $t_{svl} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ a v zimě $t_{svz} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a počet dnů, po který bude soustava v roce pracovat.

7.3.1 Výpočet denní potřeby

$$Q_{OTV,d} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_p \cdot (t_2 - t_1)}{3600}$$
$$Q_{OTV,d} = (1 + 0,75) \cdot \frac{992,65 \cdot 4\,186 \cdot (28 \cdot 0,04) \cdot (55 - 10)}{3\,600} = 101\,803,21 \text{ Wh}$$

7.3.2 Výpočet roční potřeby

$$Q_{OTV,r} = Q_{OTV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{OTV,d} \cdot \frac{t_2 - t_{svl}}{t_2 - t_{svz}} \cdot (N - d)$$

$$Q_{OTV,r} = 101\,803,21 \cdot 247 + 0,8 \cdot 101\,803,21 \cdot \frac{55 - 15}{55 - 5} \cdot (365 - 247)$$

$$Q_{OTV,r} = 32\,833\,571,29 \text{ Wh/rok}$$

$$Q_{OTV,r} = \mathbf{32,83 \text{ MWh/rok} = 118,19 \text{ GJ/rok}}$$

7.4 Celková potřeba tepla

$$Q_P = Q_{VYT,r} + Q_{OTV,r} = 36,44 + 32,83 = \mathbf{69,27 \text{ MWh/rok}}$$

$$Q_P = Q_{VYT,r} + Q_{OTV,r} = 131,18 + 118,19 = \mathbf{249,37 \text{ GJ/rok}}$$

8 Spotřeba energií

Již známe tepelné ztráty a potřebu tepla na vytápění a ohřev teplé vody, ale pro další postup, resp. návrh zdrojů, je nutné si stanovit požadovaný tepelný a elektrický výkon.

8.1 Spotřeba tepla a potřebný tepelný výkon

Na začátku je nutné si sestavit univerzální diagram trvání teplot pro celé otopné období.

Diagram lze získat za pomoci hodnot τ a θ . Hodnota τ představuje poměr počtu dnů n a počtu dnů otopného období d . Proto se bude pohybovat v rozmezí od 0 do 1.

$$\tau = \frac{n}{d}$$

Hodnota θ je určena vztahem:

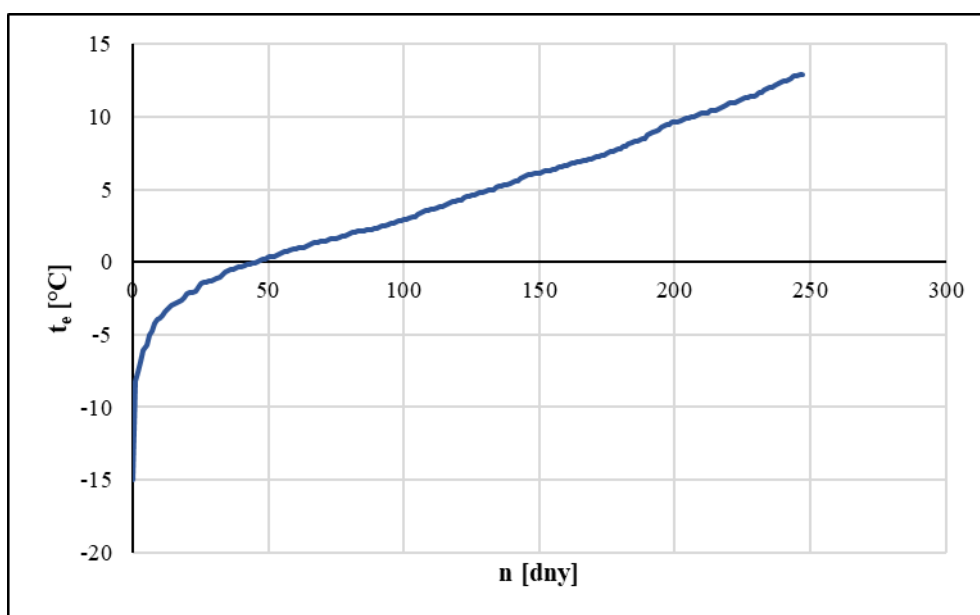
$$\theta = \frac{t_{em} - t_e}{t_{em} - t_{ev}}$$

Hodnoty θ je možné mít předpřipravené a z nich následně úpravou předešlého vzorce určit teploty t_e .

$$t_e = t_{em} - \theta \cdot (t_{em} - t_{ev})$$

nebo můžeme využít naměřené venkovní teploty, které jsou za určitý poplatek dostupné na stránkách ČHMÚ nebo jako v našem případě na stránkách společnosti OTE, a.s., operátora trhu s elektřinou a plynem, kde jsou volně ke stažení.

Data byla nashromážděna z let 2019 – 2022 pro oblast Západní Čechy, v níž se nachází popisovaný objekt. Získané denní teploty z jednotlivých let byly seřazeny od nejmenší po největší a následně zprůměrovány, což nám umožnilo stanovit délku otopného období na 247 dní a sestavit diagram trvání teplot (viz Graf 1).

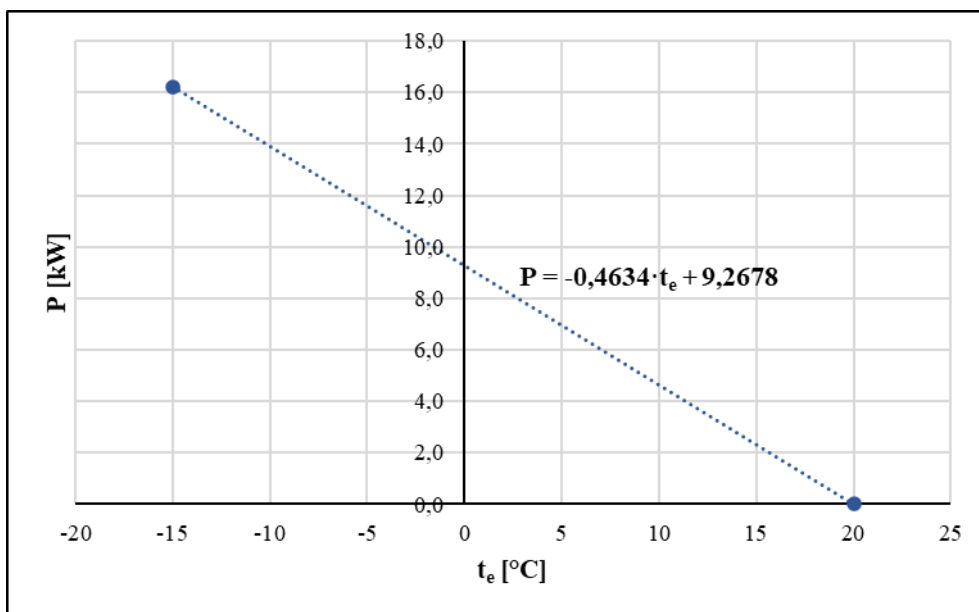


Graf 1 Univerzální diagram trvání teplot pro otopné období v ČR

Následně je zapotřebí sestavit graf znázorňující závislost tepelného výkonu P_{vyt} určeného pro vytápění na venkovní teplotě. Závislost bude lineární, proto nám stačí si určit maximální a minimální požadovaný výkon.

Minimální výkon bude nulový a sice pro teplotu $t_{is} = 20 \text{ °C}$ stanovenou jako průměrnou vnitřní výpočtovou teplotu. Platí, že hraniční teplota pro topnou sezónu je $t_{em} = 13 \text{ °C}$, ale při této teplotě již využíváme zdroj na určitý nenulový výkon. Proto budeme předpokládat, že bychom vytápěli do doby, než by venkovní teplota překročila hodnotu t_{is} .

Maximální výkon stanovíme takový, aby zcela vyrovnal vypočtené tepelné ztráty $Q_C = 16\,218,673 \text{ W}$.



Graf 2 Závislost tepelného výkonu pro vytápění na venkovní teplotě

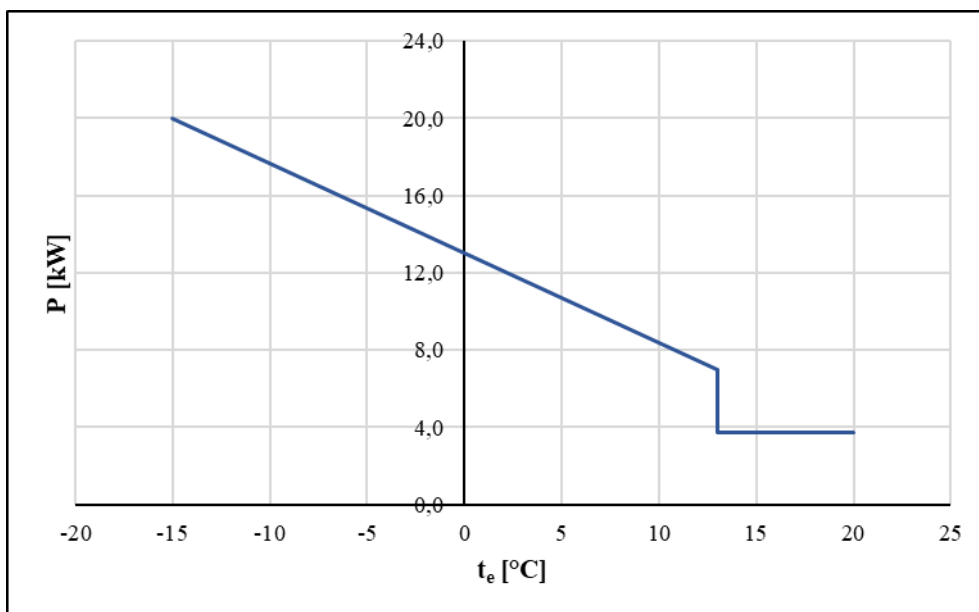
t_e [°C]	P [kW]
-15	16,21867
20	0

Tab. 13 Tabulka ke grafu závislosti tepelného výkonu pro vytápění na venkovní teplotě

Ze závislosti $P = -0,4634 \cdot t_e + 9,2678$ si dopočítáme tepelný výkon pro vytápění při 13 °C a z již známé roční potřeby tepla na ohřev teplé vody $Q_{OTV,r} = 32,83 \text{ MWh/rok}$ si stanovíme potřebný výkon.

$$P_{OTV} = \frac{Q_{OTV,r}}{8760} = \frac{32,83 \cdot 1000}{8760} = 3,748 \text{ kW}$$

Nově získanými hodnotami doplníme stávající graf (viz Graf 3).

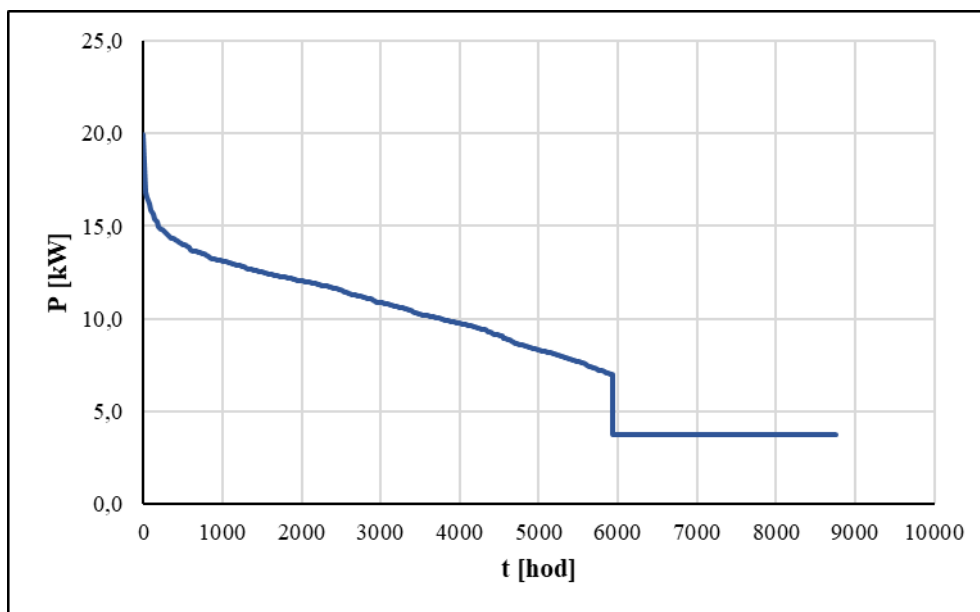


Graf 3 Závislost celkového tepelného výkonu na venkovní teplotě

t_e [°C]	P_t [kW]
-15	19,967
13	6,992
13	3,748
20	3,748

Tab. 14 Tabulka ke grafu závislosti celkového tepelného výkonu na venkovní teplotě

S využitím dosud vytvořených grafů (viz Graf 1, 3) lze nyní sestavit diagram trvání instalovaného výkonu. Z Grafu 1 odečteme venkovní teplotu t_e pro určitý počet dnů topné sezóny n , následně z Grafu 3 odečteme velikost celkového tepelného výkonu P_t pro zmíněnou venkovní teplotu. Takto postupujeme dál až získáme křivku závislosti celkového tepelného výkonu na počtu dnů otopného období. Závislost ještě doplníme o hodnoty výkonu pro dny mimo topnou sezónu a výsledkem bude diagram trvání instalovaného výkonu (viz Graf 4).



Graf 4 Diagram trvání instalovaného výkonu v průběhu roku

Z Grafu 4 vyplývá maximální potřebný výkon zdrojů, přičemž v nejchladnější dny je požadován výkon 19,967 kWt. Výpočet uvedený výše nekalkuluje s proměnnou teplotou v průběhu dne, ale jen s průměrnou denní teplotou. Zároveň nezohledňuje možnost teplot nižších než uvažovaná vnější výpočtová teplota. Z těchto důvodů, pro zajištění dodávky tepla k pokrytí denních špiček a během dnů s teplotou nižší než t_{ev} , je nezbytné stanovit rezervu výkonu alespoň 10 %. Maximální požadovaný výkon zdrojů bych tedy zvolil na úrovni 23 kWt, což splňuje danou podmínku.

8.2 Spotřeba elektrické energie a potřebný elektrický výkon

Skutečná spotřeba elektrické energie je přibližně $E = 18,136$ MWh/rok. Hodnota byla odvozena od roční spotřeby elektrické energie 1 domácnosti a přepočítána pro bytový dům tvořený 8 bytovými jednotkami. Roční spotřeba $E_b = 2\,267$ kWh/rok byla stanovena na základě přibližných spotřeb jednotlivých spotřebičů (viz Tab. 15). Pro porovnání byla z vyúčtování spotřeby elektřiny jednoho bytu byla zjištěna spotřeba $E_{bv} = 2\,338$ kWh/rok.

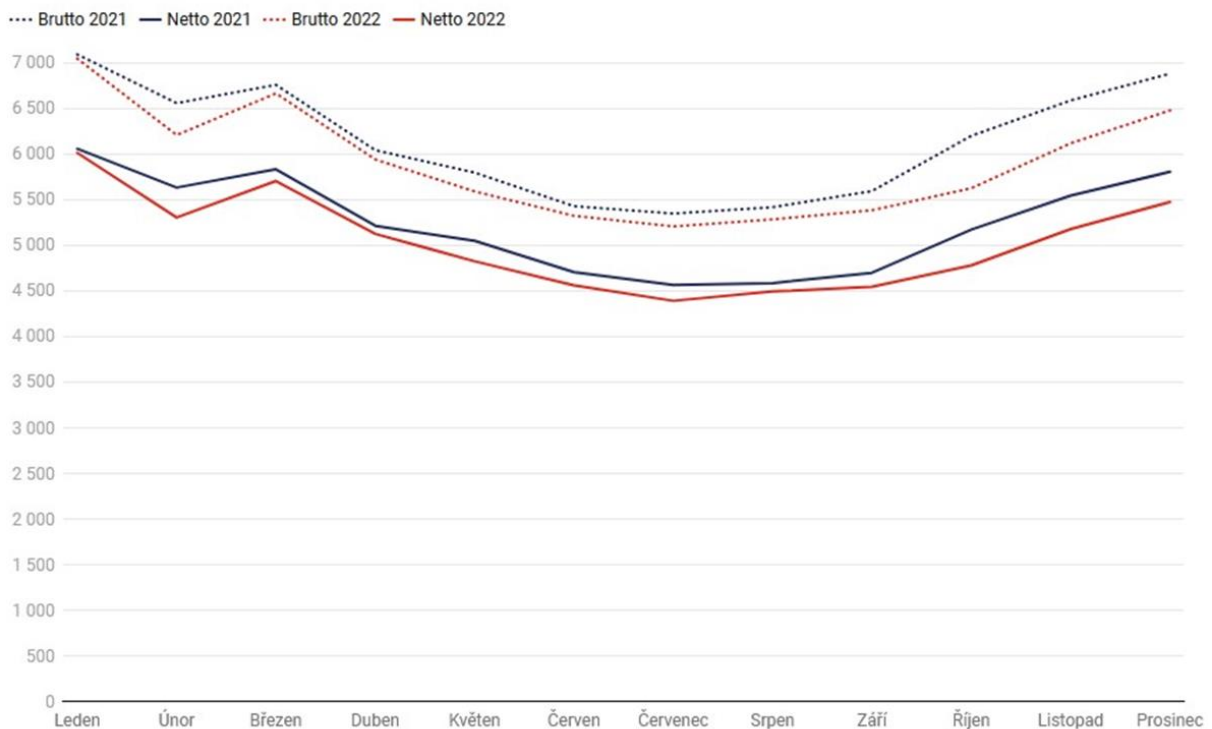
spotřebič	roční spotřeba [kWh]
lednička s mrazákem	140
myčka	260
rychlovarná konvice	147
mikrovlnná trouba	36
pračka	179
sušička	360

fén	20
notebook	150
počítač + monitor	400
televize	150
vysavač	25
žehlička	150
světla	200
ostatní	50
CELKEM	2 267

Tab. 15 Roční spotřeba jednotlivých spotřebičů v 1 domácnosti [37, 38, 39, 40, 41, 42]

Pro následné určení spotřeby elektřiny bytového domu byla využita data z webových stránek ERÚ. Z grafu měsíční spotřeby elektřiny v ČR (viz Graf 5) byla stanovena průměrná měsíční spotřeba a poměrem skutečné a průměrné hodnoty vypočítány požadované koeficienty potřebné k určení skutečné spotřeby bytové jednotky a poté celého bytového domu (viz Graf 6).

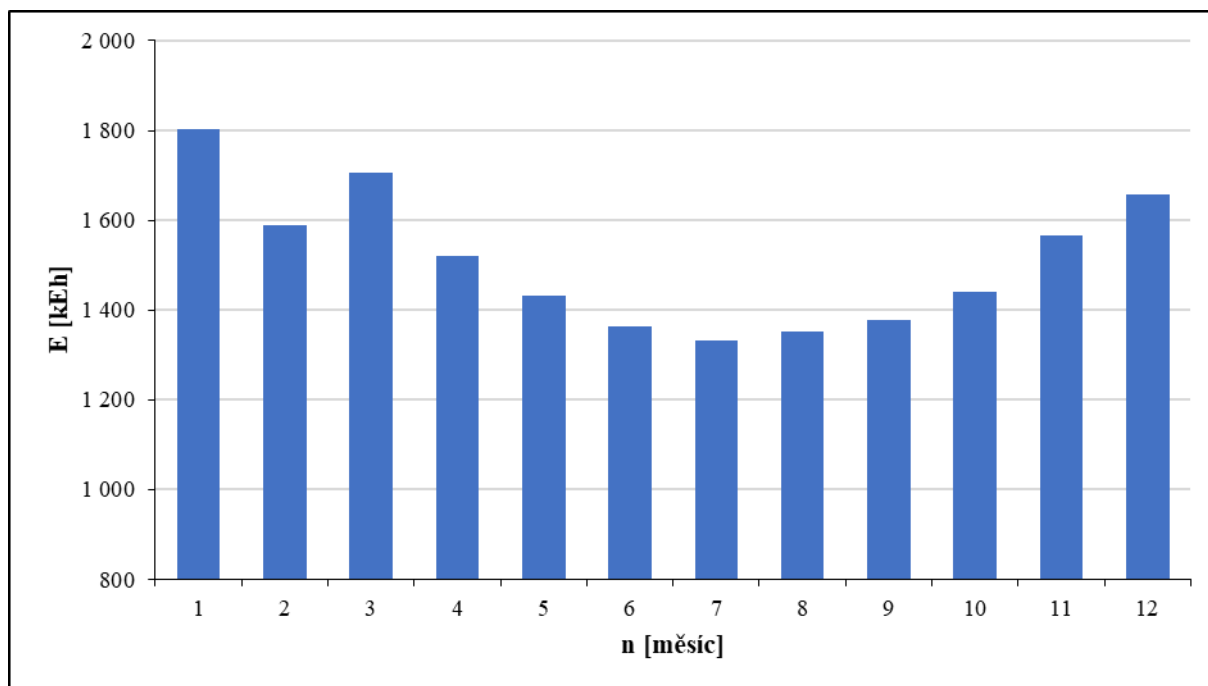
Spotřeba elektřiny [GWh]



Předběžné údaje

Zdroj: ERÚ · [Stáhnout data](#) · [Vložit](#) · [Stáhnout obrázek](#) · Vytvořeno nástrojem [Datawrapper](#)

Graf 5 Měsíční spotřeba elektřiny v ČR pro roky 2021 a 2022 [43]



Graf 6 Spotřeba elektřiny v jednotlivých měsících

Měsíc	Průměrná měsíční spotřeba bytu [kWh]	Koeficienty	Spotřeba elektřiny 1 bytu [kWh]	Celková spotřeba bytového domu [kWh]
Leden	188,917	1,193	225,359	1802,872
Únor	188,917	1,051	198,571	1588,564
Březen	188,917	1,128	213,181	1705,448
Duben	188,917	1,006	190,025	1520,201
Květen	188,917	0,947	178,833	1430,663
Červen	188,917	0,901	170,284	1362,274
Červenec	188,917	0,882	166,565	1332,522
Srpen	188,917	0,895	169,052	1352,416
Září	188,917	0,912	172,240	1377,918
Říjen	188,917	0,953	179,979	1439,829
Listopad	188,917	1,036	195,696	1565,572
Prosinec	188,917	1,097	207,215	1657,721

Tab. 16 Tabulka ke grafu spotřeby elektřiny v jednotlivých měsících

9 0. varianta

Porovnávací energetická koncepce je tvořena elektrickou sítí dodávající elektrickou energii (tarif D02d) a stacionárním plynovým kondenzačním kotlem THERM 24 KDNS o výkonu až 26 kW a účinnosti 90 %.



Obr. 25 Kotel THERM 24 KDNS

Investiční náklady zahrnují mikrokogenerační jednotku, kotel, společnou akumulární nádrž, příslušenství (vybavení pro zapojení kotle do stávajícího rozvodného systému) a náklady na instalaci a uvedení do provozu. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 17).

Položka	Cena
Kotel THERM 24 KDNS	48 900,00 Kč
Akumulační nádrž PS2F 3000 N25	94 700,00 Kč
Příslušenství	18 100,00 Kč
Instalace a uvedení do provozu	3 000,00 Kč
Celkem investice	164 700,00 Kč

Tab. 17 Investiční náklady výchozí koncepce

Provozní náklady zahrnují celkovou cenu za palivo, cenu nakoupené elektřiny, servis a revize obou zdrojů. K celkové ceně za palivo bylo nutné znát spotřebu paliva stanovenou z příkonu kotle a z výhřevnosti paliva (viz Tab. 18). Elektrická energie je nakupována od společnosti ČEZ v tarifu D02d. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 18). [44]

Položka	Hodnota	Jednotka
Příkon v palivu (Kotel)	302,00	GJ/rok
Výhřevnost paliva (zemní plyn)	35,00	MJ/m ³

Spotřeba paliva	8 628,48	m ³ /rok
Cena paliva (zemní plyn)	31,00	Kč/m ³
Cena paliva celkem	267 482,81 Kč	Kč/rok
Nákup elektřiny	115 925,12	Kč
Servis a revize kotle	-	Kč
Servis a revize kotle	800,00	Kč
Celkem provozní náklady	384 207,93	Kč

Tab. 18 Provozní náklady výchozí koncepce

10 Navrhované varianty

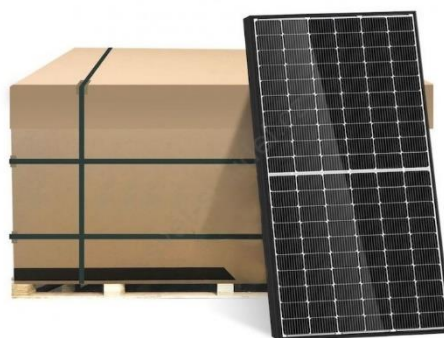
10.1 I. varianta

10.1.1 Popis

První navrhovaná varianta zahrnuje fotovoltaickou elektrárnu složenou z 49 fotovoltaických článků, každý o výkonu 460 Wp, určených primárně k výrobě elektrické energie a sekundárně pro převod části vyrobené energie na teplo pro ohřev TV. Fotovoltaická elektrárna vyrábí dostatek energie na jaře, na podzim a v létě, v zimním období je přesto nezbytné využívat elektrickou síť. Tepelnou energii pro vytápění a ohřev TV primárně zajišťuje stacionární plynový kondenzační kotel THERM 24 KDNS o výkonu až 26 kW a účinnosti 90 %.



Obr. 26 Kotel THERM 24 KDNS



Obr. 27 Fotovoltaické panely Jinko 460 Wp

Kotel bude sloužit jak k ohřevu TV, tak i k vytápění. Vysoký výkon fotovoltaických panelů umožňuje výrobu elektrické energie, jejíž hodnota po značnou část roku překračuje požadavek. Část této nadbytečné energie, zejména z letních měsíců, kdy je množství získané

energie nejvyšší, bude využita k elektrickému ohřevu TV. Další část může být uložena do bateriového úložiště a zbytek lze prodat.

Při výběru kotle bylo samozřejmě nezbytné dodržet podmínku rezervy tepelného výkonu, která činila min. 20 %. Rezerva dosahuje 30,2 %, podmínka je splněna:

$$k = \frac{P_K}{P_{Pmax}} = \frac{26}{19,97} = 1,302 \rightarrow 30,2 \%$$

Na základě požadovaného výkonu a časového intervalu (730 hodin odpovídajících délce jednoho měsíce) je možné stanovit potřebu tepelné energie. Kotel je určený pro ohřev TV a pro vytápění (viz Tab. 19 a Tab. 20). Po celý rok budou pro ohřev TV použity i přebytky elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, které byly vzhledem ke kapacitě baterie upraveny koeficientem 0,5 (viz Tab. 20).

Kromě dodatečných nákupů elektrické energie zajišťuje dodávku elektřiny i fotovoltaická elektrárna instalovaná na střeše. Ve směru JZ až ZJZ, přesněji s azimutem k jihu 59,5° a sklonem 34,2°, je nasměrováno 28 fotovoltaických panelů s celkovým výkonem 12,88 kWp o celkové ploše 60,424 m². Ve směru JJV až JV, přesněji s azimutem k jihu -30,5° a sklonem 25,7°, je nasměrováno 21 fotovoltaických panelů s celkovým výkonem 9,66 kWp a o celkové ploše 45,318 m². Celá fotovoltaická elektrárna vyrábí dostatek elektrické energie, proto je jen část této energie využita pro přímou spotřebu a zbytek je využit k ohřevu TV (viz Tab. 21)

období (počet hodin)	kotel	potřeba
0 - 730	28,712	28,712
730 - 1460	24,338	24,338
1460 - 2190	22,268	22,268
2190 - 2920	20,251	20,251
2920 - 3650	17,865	17,865
3650 - 4380	15,745	15,745
4380 - 5110	12,981	12,981
5110 - 5840	10,387	10,387
5840 - 6570	1,048	1,048
6570 - 7300	0	0
7300 - 8030	0	0
8030 - 8760	0	0
CELKEM [GJ]	153,60	153,60
CELKEM [MWh]	42,67	42,67

Tab. 19 Bilance tepelné energie (vytápění) pro I. variantu

měsíc	elektrina z FVE	kotel - výroba	potřeba
leden	1,176	8,862	10,038
únor	1,866	7,200	9,066
březen	3,070	6,968	10,038
duben	2,736	6,978	9,714
květen	2,575	7,463	10,038
červen	2,452	7,262	9,714
červenec	2,399	7,639	10,038
srpen	2,434	7,604	10,038
září	2,480	7,234	9,714
říjen	2,592	7,446	10,038
listopad	1,447	8,267	9,714
prosinec	1,110	8,928	10,038
CELKEM [GJ]	26,34	91,85	118,19
CELKEM [MWh]	7,32	25,51	32,83

Tab. 20 Bilance tepelné energie (ohřev TV) pro I. variantu

měsíc	FVE - výroba	potřeba	elektrina z FVE na pokrytí potřeb	nákup elektřiny	přebytek elektřiny z FVE pro ohřev TV
leden	2,351	6,490	1,176	5,315	1,176
únor	3,733	5,719	1,866	3,852	1,866
březen	6,472	6,140	3,070	3,070	3,402
duben	9,282	5,473	2,736	2,736	6,545
květen	9,964	5,150	2,575	2,575	7,389
červen	10,607	4,904	2,452	2,452	8,155
červenec	11,218	4,797	2,399	2,399	8,820
srpen	10,060	4,869	2,434	2,434	7,626
září	7,668	4,961	2,480	2,480	5,188
říjen	5,336	5,183	2,592	2,592	2,745
listopad	2,894	5,636	1,447	4,189	1,447
prosinec	2,219	5,968	1,110	4,858	1,110
CELKEM [GJ]	81,80	65,29	26,34	38,95	55,47
CELKEM [MWh]	22,72	18,14	7,32	10,82	15,41

Tab. 21 Bilance FVE

10.1.2 Náklady

Investiční náklady zahrnují fotovoltaickou elektrárnu, kotel, společnou akumulaci nádrží, příslušenství ke kotli (regulátor a vybavení pro zapojení obou zdrojů do stávajícího rozvodného systému), náklady na instalaci kotle a jeho uvedení do provozu, náklady na kabeláž, nosné

držáky a montáž FV panelů, AC/DC měnič, solární baterii Dyness Tower T14 o kapacitě 14,2 kWh a nabíječku. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 22).

Položka	Cena
Kotel THERM 24 KDNS	48 900,00 Kč
Akumulační nádrž PS2F 3000 N25	94 700,00 Kč
Příslušenství	18 100,00 Kč
Instalace a uvedení do provozu	3 000,00 Kč
FVE JINKO 460Wp černý rám IP68 Half Cut	178 617,36 Kč
Montáž (3 000 až 5 000 Kč/m²)	349 600,00 Kč
Kabeláž (30 Kč/m)	8 000,00 Kč
Nosné držáky (1 500 Kč/panel)	73 500,00 Kč
AC/DC měnič	35 000,00 Kč
Solární baterie Dyness Tower T14	165 288,43 Kč
Nabíječka	7 336,00 Kč
Celkem investice	982 041,79 Kč

Tab. 22 Investiční náklady I. varianty

Provozní náklady zahrnují celkovou cenu za palivo, cenu nakoupené elektřiny, servis a revize obou zdrojů. K celkové ceně za palivo bylo nutné znát spotřebu paliva stanovenou z příkonu zdroje a z výhřevnosti paliva (viz Tab. 23). Elektrická energie je nakupována od společnosti ČEZ v tarifu D02d. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 23). [44]

Položka	Hodnota	Jednotka
Příkon v palivu (Kotel)	272,72	GJ/rok
Výhřevnost paliva (zemní plyn)	35,00	MJ/m ³
Spotřeba paliva	7 791,96	m ³ /rok
Cena paliva (zemní plyn)	31,00	Kč/m ³
Cena paliva celkem	241 550,68	Kč/rok
Nákup elektřiny	70 253,74	Kč
Servis a revize kotle	800,00	Kč
Servis a revize FVE	7 000,00	Kč
Celkem provozní náklady	319 604,42	Kč

Tab. 23 Provozní náklady I. varianty

10.1.3 Ekonomické vyhodnocení

Investice 0. varianty	IN _p	164 700,00	Kč
Provozní náklady 0. varianty	PR _p	384 207,93	Kč
Investice 1. varianty	IN	982 041,79	Kč
Provozní náklady 1. varianty	PR	319 604,42	Kč
Cash Flow (úspora v provozních nákladech)	CF	64 603,52	Kč
Úroková míra	r	8,9	%
Prostá doba návratnosti	T _s	12,652	let
Čistá současná hodnota (nominál) po 15 letech	NPV _n	151 710,96	Kč
Čistá současná hodnota (diskont) po 15 letech	NPV _d	-293 504,51	Kč

Tab. 24 Ekonomické vyhodnocení I. varianty

Pro posouzení výnosnosti varianty se používá metoda stanovující čistou současnou hodnotu po uplynutí zamýšlené doby životnosti, která je zde 15 let. V případě kladné čisté současné hodnoty je vysoká pravděpodobnost úspěšného projektu. Do vyhodnocení se dále uvádí, za jak dlouhou dobu se investice vrátí. Tuto hodnotu stanovuje doba návratnosti.

10.1.3.1 Provozní Cash Flow v 0. roce

$$CF_0 = IN_p - IN$$

$$CF_0 = 164\,700 - 982\,041,79 = -817\,341,79 \text{ Kč}$$

10.1.3.2 Provozní Cash Flow v t. roce (nominální)

$$CF_t = PR_p - PR$$

$$CF_t = 384\,207,93 - 319\,604,42 = 64\,603,52 \text{ Kč}$$

10.1.3.3 Úroková míra

$$r = 8,9 \%$$

10.1.3.4 Provozní Cash Flow v t. roce (diskontované)

$$DCF_t = \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$DCF_1 = \frac{64\,603,52}{(1+0,089)^1} = 59\,323,71 \text{ Kč}$$

$$DCF_2 = \frac{64\,603,52}{(1+0,089)^2} = 54\,475,40 \text{ Kč}$$

10.1.3.5 Čistá současná hodnota po 15 letech (diskontovaná)

$$NPV = \sum_{t=0}^{15} \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$NPV = \sum_{t=0}^{15} \frac{64\,603,52}{(1+0,089)^t} = -293\,504,51 \text{ Kč}$$

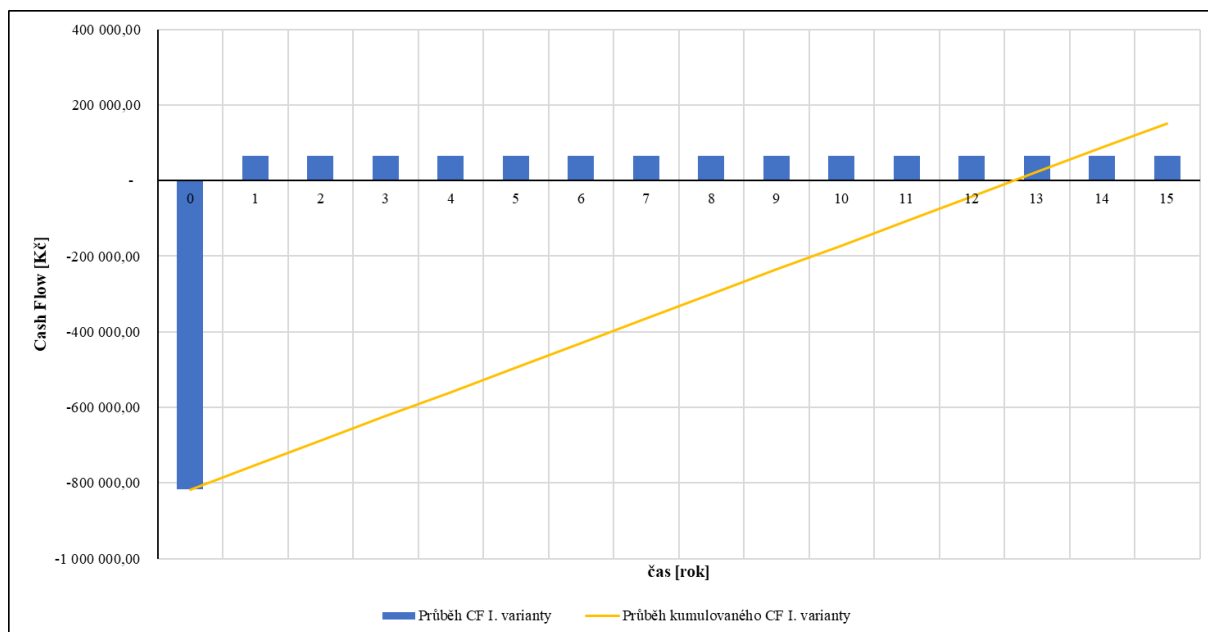
10.1.3.6 Prostá doba návratnosti

$$T_s = \frac{IN - INp}{CF_t}$$

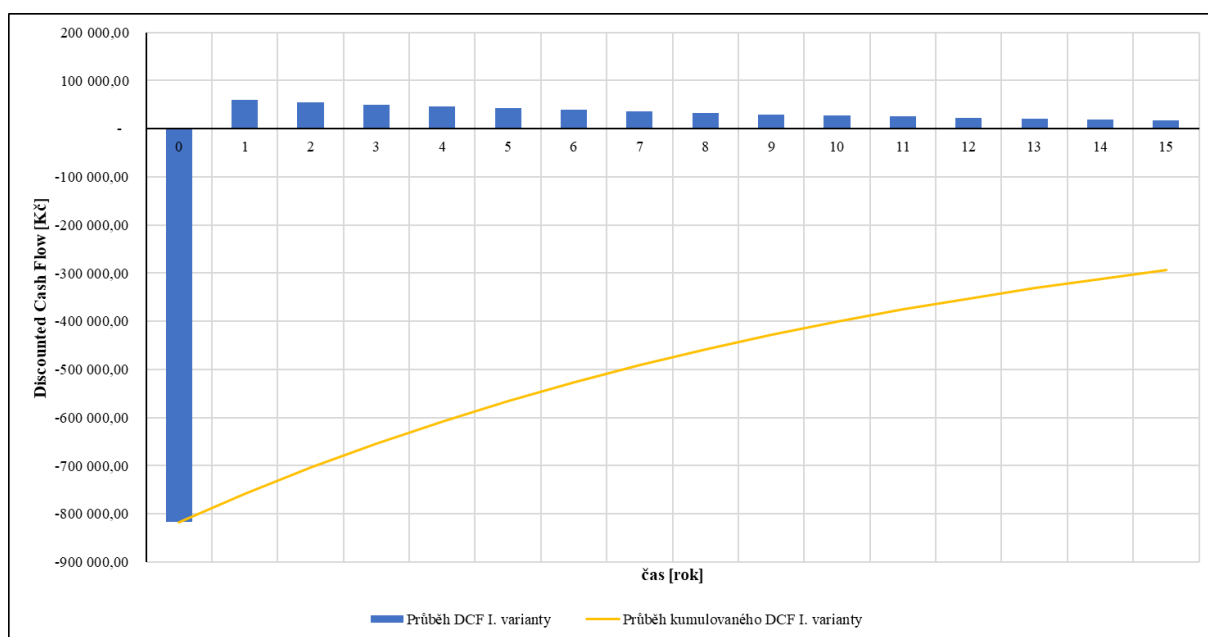
$$T_s = \frac{982\,041,79 - 164\,700}{64\,603,52} = 12,652 \text{ let}$$

rok	CF		kumulované CF	
	nominální	diskontní	nominální	diskontní
0	-817 341,79	-817 341,79	-817 341,79	-817 341,79
1	64 603,52	59 323,71	-752 738,27	-758 018,08
2	64 603,52	54 475,40	-688 134,75	-703 542,68
3	64 603,52	50 023,32	-623 531,24	-653 519,36
4	64 603,52	45 935,10	-558 927,72	-607 584,27
5	64 603,52	42 180,99	-494 324,20	-565 403,28
6	64 603,52	38 733,69	-429 720,69	-526 669,59
7	64 603,52	35 568,13	-365 117,17	-491 101,46
8	64 603,52	32 661,27	-300 513,66	-458 440,18
9	64 603,52	29 991,99	-235 910,14	-428 448,20
10	64 603,52	27 540,85	-171 306,62	-400 907,35
11	64 603,52	25 290,04	-106 703,11	-375 617,31
12	64 603,52	23 223,18	-42 099,59	-352 394,13
13	64 603,52	21 325,23	22 503,93	-331 068,90
14	64 603,52	19 582,40	87 107,44	-311 486,51
15	64 603,52	17 982,00	151 710,96	-293 504,51
NPV	151 710,96	-293 504,51		

Tab. 25 Hodnocení I. varianty



Graf 7 Ekonomické vyhodnocení I. varianty podle CF



Graf 8 Ekonomické vyhodnocení I. varianty podle DCF

Tento postup se aplikuje i na další dvě varianty.

10.2 II. varianta

10.2.1 Popis

Druhá navrhovaná varianta zahrnuje mikrokogenerační jednotku na pelety ÖkoFEN Pellematic Condens_e s celkovou účinností 93 % poskytující jednak teplo pro ohřev TV a

částečně i pro vytápění s výkonem až 9 kWt a jednak do určité míry pokrývá spotřebu elektrické energie s výkonem až 1 kWe. Požadavky na elektrickou energii doplňuje opět elektrická síť a k zajištění dodávek tepelné energie určené pro vytápění slouží dále stacionární kotel na pelety Eko-Max Slim 16 s výkonem až 16 kW a účinností 90 %.

Mikrokogenerační jednotka bude sloužit jak k ohřevu TV, tak částečně i k vytápění. Kvůli nedostačujícímu tepelnému výkonu MKGJ, je nutné přidat špičkový kotel, který bude sloužit pouze k vytápění.



Obr. 28 ÖkoFEN Pellematic Condens_e



Obr. 29 Eko-Max Slim 16

Při výběru zdrojů bylo nezbytné dodržet podmínku rezervy tepelného výkonu, která činila min. 20 %. Rezerva dosahuje 25,2 %, podmínka je splněna:

$$k = \frac{P_K + P_{MKGJ}}{P_{Pmax}} = \frac{16 + 9}{19,97} = 1,252 \rightarrow 25,2 \%$$

Na základě požadovaného výkonu a časového intervalu (730 hodin odpovídajících délce jednoho měsíce) je možné stanovit potřebu tepelné energie. Mikrokogenerační jednotka je určená pro ohřev TV a částečně i pro vytápění, proto v letním období (6570 – 8760 hodin) bude pracovat se sníženým tepelným, resp. elektrickým, výkonem a v následujících měsících bude pracovat již většinou s vyšším nebo maximálním výkonem. Poté bude po vyčerpání výkonu mikrokogenerační jednotky spuštěn kotel pro zajištění potřebné dodávky tepla pro vytápění (viz Tab. 26).

Kromě dodatečných nákupů elektrické energie zajišťuje dodávku elektřiny i mikrokogenerační jednotka s výkonem, který je úměrně upravován podle tepelného výkonu. Pro výrobu v letních měsících byl proto elektrický výkon upraven koeficientem 41,6 % maximálního výkonu a po zbytek roku koeficientem 92 % maximálního výkonu (viz Tab. 27).

období (počet hodin)	MKGJ - výroba	Kotel - výroba	potřeba
0 - 730	23,652	14,910	38,562
730 - 1460	23,652	10,537	34,189
1460 - 2190	23,652	8,467	32,119
2190 - 2920	23,652	6,449	30,101
2920 - 3650	23,652	4,063	27,715
3650 - 4380	23,652	1,943	25,595
4380 - 5110	22,738	0,093	22,831
5110 - 5840	20,237		20,237
5840 - 6570	10,898		10,898
6570 - 7300	9,850		9,850
7300 - 8030	9,850		9,850
8030 - 8760	9,850		9,850
CELKEM [GJ]	225,34	46,46	271,80
CELKEM [MWh]	62,59	12,91	75,50

Tab. 26 Bilance tepelné energie pro II. variantu

měsíc	MKGJ	potřeba	nákup elektřiny
leden	2,463	6,490	4,027
únor	2,225	5,719	3,494
březen	2,463	6,140	3,676
duben	2,384	5,473	3,089
květen	2,463	5,150	2,687
červen	1,079	4,904	3,825
červenec	1,115	4,797	3,682
srpen	1,115	4,869	3,753
září	2,384	4,961	2,577
říjen	2,463	5,183	2,720
listopad	2,384	5,636	3,252
prosinec	2,463	5,968	3,504
CELKEM [GJ]	25,00	65,29	40,28
CELKEM [MWh]	6,95	18,14	11,19

Tab. 27 Bilance elektrické energie pro II. variantu

10.2.2 Náklady

Investiční náklady zahrnují mikrokogenerační jednotku, kotel, společnou akumulární nádrž, příslušenství (regulátor a vybavení pro zapojení obou zdrojů do stávajícího rozvodného systému) a náklady na instalaci a uvedení do provozu. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 28).

Položka	Cena
MKGJ ÖkoFEN Pellematic Condens_e	592 436,97 Kč
Akumulační nádrž PS2F 3000 N25	94 700,00 Kč
Příslušenství	60 000,00 Kč
Instalace a uvedení do provozu	3 500,00 Kč
Kotel Eko-Max Slim 16	95 000,00 Kč
Příslušenství	49 086,78 Kč
Instalace a uvedení do provozu	3 000,00 Kč
Celkem investice	897 723,75 Kč

Tab. 28 Investiční náklady II. varianty

Provozní náklady zahrnují celkovou cenu za palivo, cenu nakoupené elektřiny, servis a revize obou zdrojů. K celkové ceně za palivo bylo nutné znát spotřebu paliva stanovenou z příkonu obou zdrojů a z výhřevnosti paliva (viz Tab. 29). Elektrická energie je nakupována od společnosti ČEZ v tarifu D02d. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 29). [44]

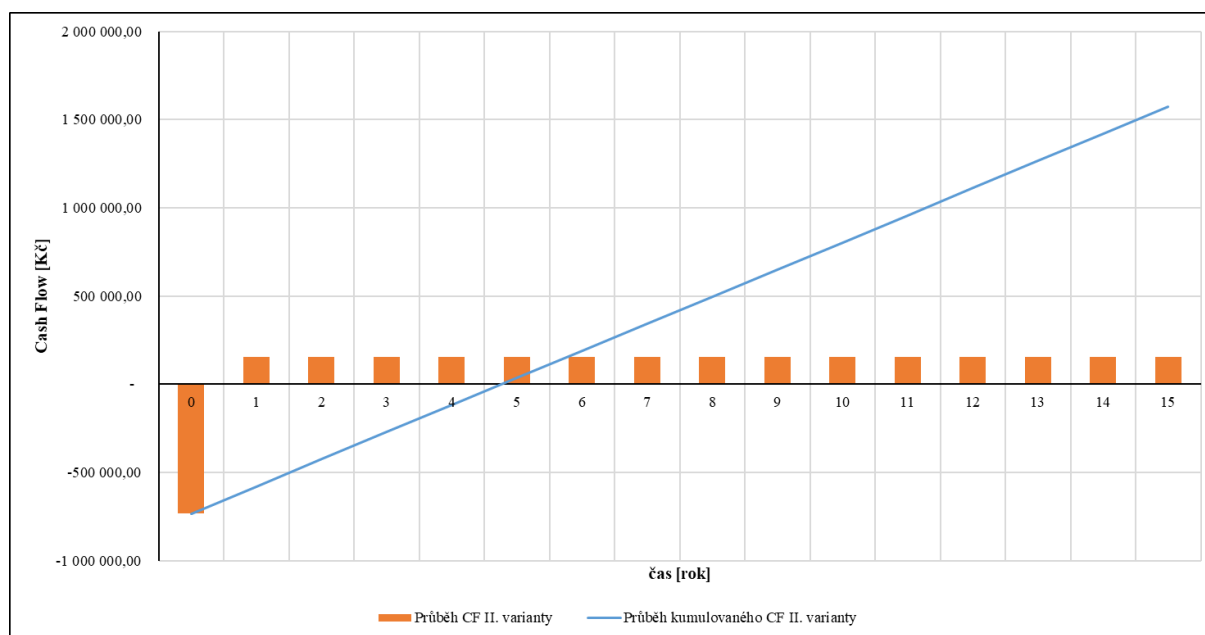
Položka	Hodnota	Jednotka
Příkon v palivu (MKGJ)	269,22	GJ/rok
Příkon v palivu (Kotel)	51,62	GJ/rok
Výhřevnost paliva (dřevní pelety)	17,00	MJ/kg
Spotřeba paliva	18 873,09	kg/rok
Cena paliva (dřevní pelety)	8,26	Kč/kg
Cena paliva celkem	155 975,97	Kč/rok
Nákup elektřiny	72 563,94	Kč
Prodej elektřiny	-	Kč
Servis a revize kotle	800,00	Kč
Servis a revize MKGJ	1 200,00	Kč
Celkem provozní náklady	230 539,91	Kč

Tab. 29 Provozní náklady II. varianty

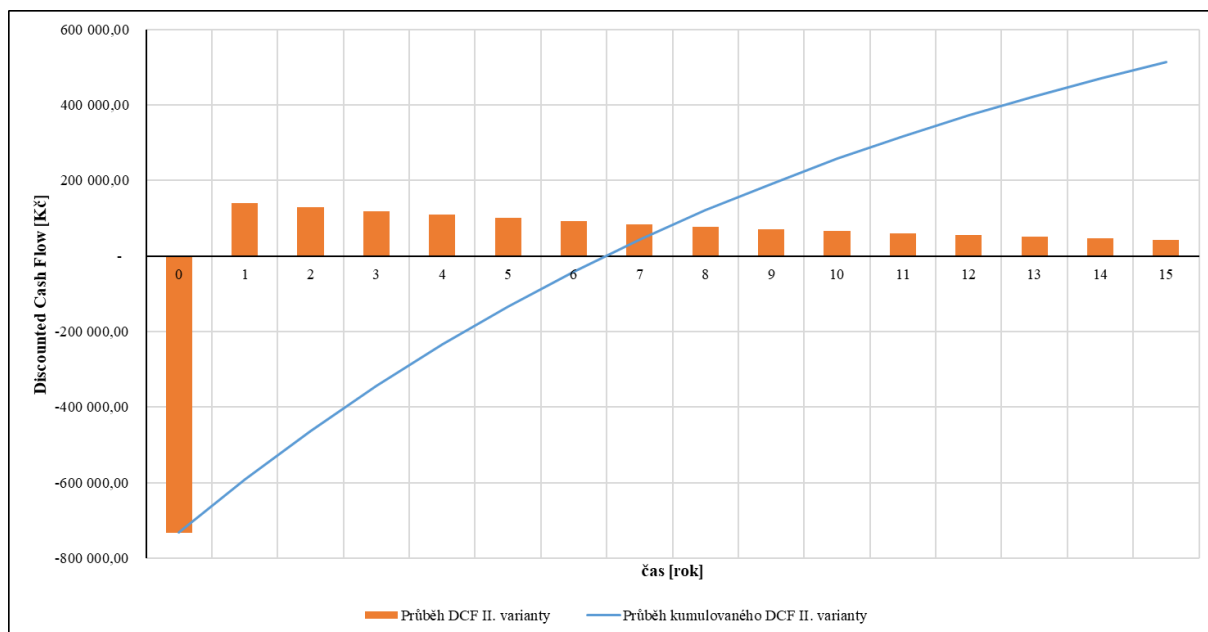
10.2.3 Ekonomické vyhodnocení

Investice 0. varianty	IN _p	164 700,00	Kč
Provozní náklady 0. varianty	PR _p	384 207,93	Kč
Investice 2. varianty	IN	897 723,75	Kč
Provozní náklady 2. varianty	PR	230 539,91	Kč
Provozní C-F (úspora proti výchozí variantě)	CF	153 668,02	Kč
Úroková míra	r	8,9	%
Prostá doba návratnosti	T _s	4,770	let
Čistá současná hodnota (nominál) po 15 letech	NPV _n	1 571 996,59	Kč
Čistá současná hodnota (diskont) po 15 letech	NPV _d	512 992,62	Kč

Tab. 30 Ekonomické vyhodnocení II. varianty



Graf 9 Ekonomické vyhodnocení II. varianty podle CF



Graf 10 Ekonomické vyhodnocení II. varianty podle DCF

10.3 III. varianta

10.3.1 Popis

Třetí navrhovaná varianta zahrnuje závěsnou plynovou mikrokogenerační jednotku Vitotwin 300-W s celkovou účinností 96 %, jejíž Stirlingův motor o výkonech 6 kWt a 1 kWe částečně zajišťuje dodávky elektrické energie a zároveň získanou tepelnou energii je možné využít alespoň k ohřevu TV. K vytápění během topné sezóny je určen zabudovaný plynový kondenzační kotel Vitodens 200-W poskytující výkon až 20 kW s účinností 98 %. Pro

uspokojení požadavků na elektrickou energii je i v této koncepci nezbytné počítat s odběrem elektřiny s elektrické sítě.

Mikrokogenerační jednotka bude sloužit jak k ohřevu TV, tak i k vytápění. Přesněji pro ohřev TV bude sloužit Stirlingův motor a pro vytápění jej bude doplňovat integrovaný kotel.



Obr. 30 Vitotwin 300-W

Při výběru zdroje bylo samozřejmě nezbytné dodržet podmínku rezervy tepelného výkonu, která činila min. 20 %. Rezerva dosahuje 30,2 %, podmínka je splněna:

$$k = \frac{P_S + P_K}{P_{Pmax}} = \frac{6 + 20}{19,97} = 1,302 \rightarrow 30,2 \%$$

Na základě požadovaného výkonu a časového intervalu (730 hodin odpovídajících délce jednoho měsíce) je možné stanovit potřebu tepelné energie. Mikrokogenerační jednotka je určena pro ohřev TV a částečně i pro vytápění, proto v letním období (6570 – 8760 hodin) bude pracovat se sníženým tepelným, resp. elektrickým, výkonem a v následujících měsících bude pracovat již většinou s vyšším nebo maximálním výkonem. Poté bude po vyčerpání výkonu mikrokogenerační jednotky spuštěn kotel pro zajištění potřebné dodávky tepla pro vytápění (viz Tab. 31).

Kromě dodatečných nákupů elektrické energie zajišťuje dodávku elektřiny i mikrokogenerační jednotka s výkonem, který je úměrně upravován podle tepelného výkonu. Pro výrobu v letních měsících byl proto elektrický výkon upraven koeficientem 62,5 %

maximálního výkonu a po zbytek roku koeficientem 96,6 % maximálního výkonu (viz Tab. 32).

období (počet hodin)	MKGJ - výroba	Kotel - výroba	potřeba
0 - 730	15,768	22,794	38,562
730 - 1460	15,768	18,421	34,189
1460 - 2190	15,768	16,351	32,119
2190 - 2920	15,768	14,333	30,101
2920 - 3650	15,768	11,947	27,715
3650 - 4380	15,768	9,827	25,595
4380 - 5110	15,768	7,063	22,831
5110 - 5840	15,768	4,469	20,237
5840 - 6570	10,564	0,335	10,898
6570 - 7300	9,850		9,850
7300 - 8030	9,850		9,850
8030 - 8760	9,850		9,850
CELKEM [GJ]	166,26	105,54	271,80
CELKEM [MWh]	46,18	29,32	75,50

Tab. 31 Bilance tepelné energie pro III. variantu

měsíc	MKGJ	potřeba	nákup elektřiny
leden	2,588	6,490	3,903
únor	2,337	5,719	3,381
březen	2,588	6,140	3,552
duben	2,504	5,473	2,968
květen	2,588	5,150	2,563
červen	1,619	4,904	3,285
červenec	1,673	4,797	3,124
srpen	1,673	4,869	3,196
září	2,504	4,961	2,456
říjen	2,588	5,183	2,596
listopad	2,504	5,636	3,132
prosinec	2,588	5,968	3,380
CELKEM [GJ]	27,76	65,29	37,53
CELKEM [MWh]	7,71	18,14	10,43

Tab. 32 Bilance elektrické energie pro III. variantu

10.3.2 Náklady

Investiční náklady zahrnují mikrokogenerační jednotku včetně kotle, akumulární nádrž, příslušenství (regulátor a vybavení pro zapojení mikrokogenerační jednotky do stávajícího rozvodného systému) a náklady na instalaci a uvedení do provozu. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 33).

Položka	Cena
MKGJ Vitotwin 300 W	350 000,00 Kč
Akumulační nádrž PS2F 3000 N25	94 700,00 Kč
Příslušenství	40 000,00 Kč
Instalace a uvedení do provozu	3 500,00 Kč
Celkem investice	488 200,00 Kč

Tab. 33 Investiční náklady III. varianty

Provozní náklady zahrnují celkovou cenu za palivo, cenu nakoupené elektřiny, servis a revize zdroje. K celkové ceně za palivo bylo nutné znát spotřebu paliva stanovenou z příkonu obou zdrojů a z výhřevnosti paliva (viz Tab. 34). Elektrická energie je nakupována od společnosti ČEZ v tarifu D02d. Ceny všech položek jsou uvedeny bez DPH (viz Tab. 34). [44]

Položka	Hodnota	Jednotka
Příkon v palivu (MKGJ)	202,05	GJ/rok
Příkon v palivu (Kotel - vestavěný)	97,92	GJ/rok
Výhřevnost paliva (zemní plyn)	35,00	MJ/m ³
Spotřeba paliva	8 570,64	m ³ /rok
Cena paliva (zemní plyn)	31,00	Kč/m ³
Cena paliva celkem	265 689,95	Kč/rok
Nákup elektřiny	67 794,62	Kč
Prodej elektřiny	-	Kč
Servis a revize MKGJ	1 200,00	Kč
Celkem provozní náklady	334 684,57	Kč

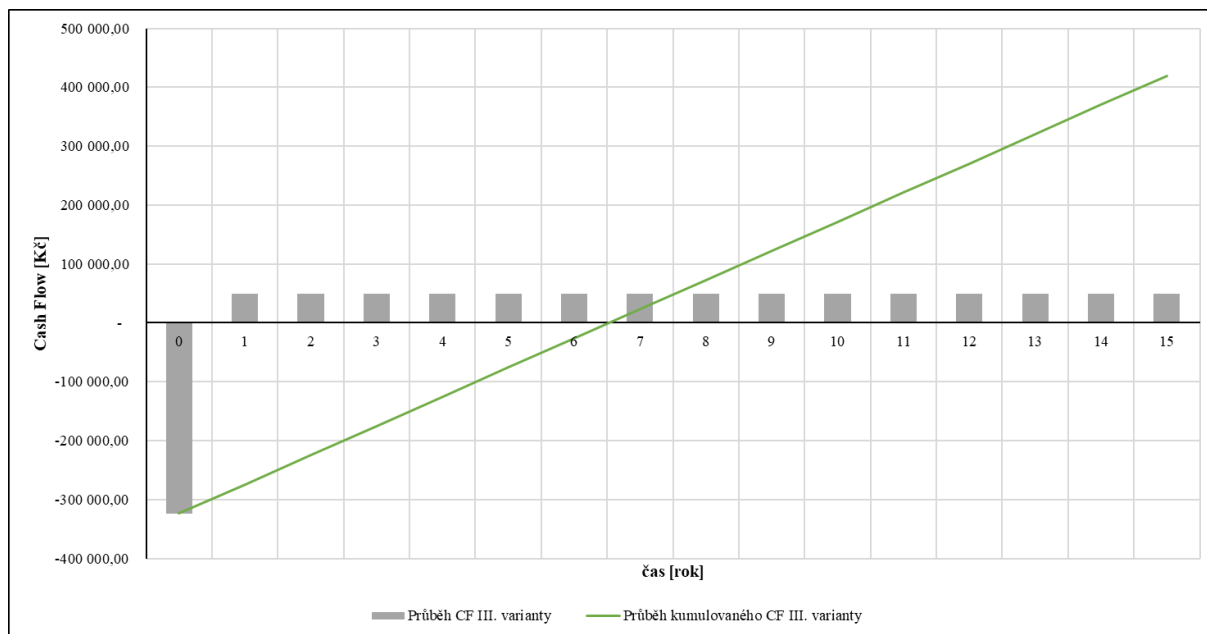
Tab. 34 Provozní náklady III. varianty

10.3.3 Ekonomické vyhodnocení

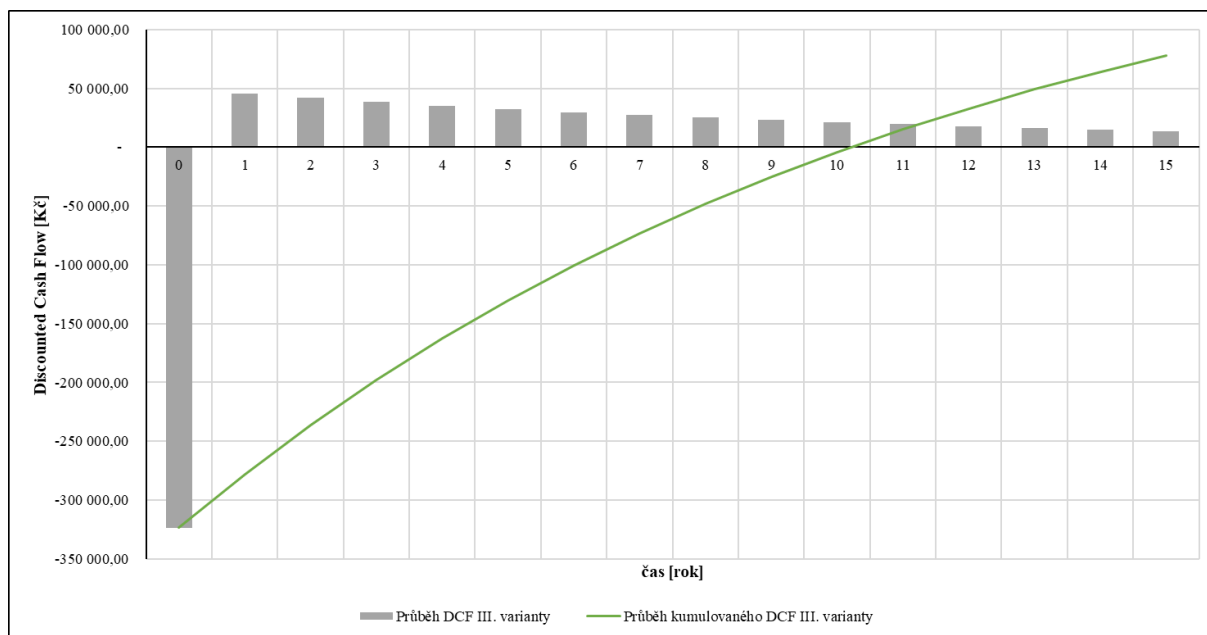
Investice 0. varianty	INp	164 700,00	Kč
Provozní náklady 0. varianty	INp	384 207,93	Kč
Investice 3. varianty	IN	488 200,00	Kč
Provozní náklady 3. varianty	PR	334 684,57	Kč
Cash Flow (úspora v provozních nákladech)	CF	49 523,36	Kč
Úroková míra	r	8,9	%

Prostá doba návratnosti	T_s	6,532	let
Čistá současná hodnota (nominál) po 15 letech	NPVn	419 350,39	Kč
Čistá současná hodnota (diskont) po 15 letech	NPVd	78 059,90	Kč

Tab. 35 Ekonomické vyhodnocení III. varianty



Graf 11 Ekonomické vyhodnocení III. varianty podle CF



Graf 12 Ekonomické vyhodnocení III. varianty podle DCF

11 Závěr

11.1 Shrnutí a vyhodnocení práce

Tato bakalářská práce pojednávala o vhodnosti použití mikro/kogenerační jednotky, jejíž součástí je Stirlingův motor. V první části jsem se zabýval analýzou oběhu Stirlingova motoru včetně jeho principů, konstrukčních vlastností, využití v praxi a dále jeho výhod a nevýhod.

V další části jsem cílil na seznámení veřejnosti s problematikou mikrokogenerace, jejími výhodami, ale i úskalími spojenými s realizací.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo navrhnout 3 varianty energetických koncepcí pro vybraný objekt. Minimálně 2 z těchto variant měly zahrnovat mikrokogenerační jednotku využívající Stirlingův motor. Pro navržení a následné porovnání zmíněných variant s 0. porovnávací variantou bylo nejprve nutné stanovit tepelné ztráty vybraného objektu a požadavky na tepelnou a elektrickou energii.

Celková tepelná ztráta objektu byla stanovena obálkovou metodou. Touto metodou byla stanovena tepelná ztráta 16 218,673 W. Tato hodnota je pro objekt obdobných rozměrů nízká, ale s přihlédnutím ke zvolenému složení konstrukce byla uznána jako přijatelná. Na základě údajů a výpočtu převzatých ze stránek TZB-info byla stanovena potřeba tepla na vytápění 32,44 MWh/rok a potřeba na ohřev teplé vody 32,83 MWh/rok. Celková tepelná potřeba činila 69,27 MWh/rok.

Pro určení maximálního tepelného výkonu nutného pro zajištění potřeb tepla na vytápění a ohřev teplé vody byl z denních hodnot teplot pro danou oblast získaných od OTE sestaven diagram trvání instalovaného výkonu. Z něj byl určen maximální požadovaný tepelný výkon 19,967 kWt.

Následně byla ze spotřeb jednotlivých spotřebičů stanovena spotřeba elektrické energie pro celý objekt 18,136 MWh/rok, která byla po porovnání spotřeby elektrické energie z faktury 1 domácnosti, uznána jako odpovídající.

Dalším cílem byla studie mikrokogenerace vybraného objektu z pohledu bilancování spotřeby energie, technických charakteristik, systémových vlivů a nákladovosti.

První varianta zahrnující plynový kondenzační kotel a fotovoltaickou elektrárnu splnila požadavky na dodávku tepla a elektřiny, ale vysoké investiční náklady a nízká úspora na provozních nákladech v porovnání s 0. variantou měli za následek vysokou prostou dobu

návratnosti 12,652 roku a při započítání úrokové míry je tato koncepce z finančního hlediska nezisková.

Druhá varianta zahrnující kotel na pelety a mikrokogenerační jednotku na pelety využívající Stirlingův motor byla investičně podobně nákladná jako první varianta, ale nižší cena dřevních pelet oproti zemnímu plynu snížila provozní náklady, a proto byla prostá doba návratnosti 4,77 roku. Tato varianta má i negativa v podobě vyšších emisí znečišťujících látek a nutnosti pravidelně doplňovat zásobník na palivo.

Třetí varianta zahrnující plynovou mikrokogenerační jednotku na pelety využívající Stirlingův motor by byla podle investičních nákladů velmi výhodná v porovnání s předchozími dvěma variantami, ale používání zemního plynu ovlivnilo provozní náklady a to mělo za následek jejich nízkou úsporu v porovnání s 0. variantou. Prostá doba návratnosti dosáhla 6,532 roku.

Z navržených energetických koncepcí bych vybral 2. variantu, která má příznivé finanční nároky a nízkou dobu návratnosti. S přihlédnutím k současné geopolitické situaci je používání dřevních pelet výhodné oproti zemnímu plynu kvůli jejich stabilnějším cenám a dodávkám. Tato varianta má také nejvyšší zastoupení obnovitelných zdrojů využívaných pro splnění dodávek energií.

11.2 Náhled do budoucna

Trendem moderní doby je ustupovat od vytápěcích systémů využívající tuhá fosilní paliva a nahrazovat je alternativními ekologičtějšími zdroji – solární energie, zemní plyn a biomasa. Pro každý objekt jsou vhodné jiné způsoby vytápění a je na uživateli, aby si zvolil své priority a podle nich vybral způsob vytápění. Mikrokogenerační jednotky jsou jedno z možných současných hlavních řešení výroby elektrické a tepelné energie, proto si jejich rozvoj zaslouží ještě více pozornosti i do budoucna.

Důraz na KVVET kladou i příslušné orgány EU, důsledkem jsou směrnice a další materiály vyjadřující i legislativně kogeneraci jednoznačnou podporu a stanovující postupné cíle jejího rozvoje. Česká republika tento trend plně akceptuje a podporuje. Výrazem této podpory jsou nové podmínky pro provoz kogeneračních zdrojů se stanovenými minimálními cenami výkupu elektřiny a s příspěvky na vyrobenou elektřinu.

Velké pole působnosti je například v budování velkého počtu malých kogeneračních zařízení v objektech a budovách občanské vybavenosti včetně rodinných domů nebo menších komplexů obytných budov.

Současný rozvoj KVET a jeho podpory vyvolává také potřebu informovanosti odborné veřejnosti i běžných spotřebitelů o výhodách a stávajících technických možnostech tohoto oboru.

12 Zdroje

- [1] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor. *Transformační technologie* [online]. Brno: Jiří Škorpík, 2009, 2009-06, 2013-03 [cit. 2023-01-03]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor_332013.html#menu
- [2] *Stirlingův spalovací motor. Spalovací motor - historie vzniku* [online]. [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://carhappy.ru/cs/dvigatel-vneshnego-sgoraniya-stirlinga-dvigatel-vnutrennego/>
- [3] ZELENÉ ZPRÁVY.CZ. Stirlingův motor – historie, princip a jeho využití při kogeneraci. *Zelenezpravy.cz* [online]. 16. 10. 2012 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <http://www.zelenezpravy.cz/stirlinguv-motor-%E2%80%93-historie-princip-a-jeho-vyuziti-pri-kogeneraci/>
- [4] Diesel engine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 30 September 2001, last edited on 16 January 2023 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine
- [5] Otto engine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 4 May 2005, last edited on 13 September 2022 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_engine
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. *Stirlingův motor: Využívání Stirlingova motoru* [online]. Brno: Jiří Škorpík, 2009-06, 2013-03 [cit. 2023-01-18]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor_332013.html
- [7] ORGAN, Allan J. *The Regenerator and the Stirling Engine*. Mechanical Engineering Publications Limited London and Bury St Edmunds, UK, 1997. ISBN 1 86058 010 6.
- [8] HAZDA, Jakub. *Analýza Stirlingova oběhu* [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103417.
Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [9] MACHÁČEK, Jan. *Stirlingův termodynamický cyklus* [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20337.
Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

- [10] MENDRYGAL, Jan. *Návrh zajištění energií pro rodinný domek s využitím Stirlingova motoru* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94760073.pdf>. Bakalářská práce. VŠB-TUO.
- [11] Stirlingův motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2014, aktualizováno 9. 11. 2022 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor
- [12] URIELI, Israel. Stirling Cycle Machine Analysis. *Ohio University* [online]. Ohio, 2010, latest update 12/12/2020 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/>
- [13] *The Essex Hot Air Engine* [online]. [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://myfordboy.blogspot.com/p/the-essex-hot-air-engine.html>
- [14] VONDRUŠ, Jan. *Stirlingův motor* [online]. Brno, 2016, str. 19 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/37211902-Vysoke-uceni-technicke-v-brne.html>. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [15] What is Stirling Cycle? *ExtruDesign.com* [online]. 2017, December 12, 2018 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://extrudesign.com/stirling-cycle/>
- [16] BULIŃSKI, Zbigniew, Ireneusz SZCZYGIEŁ, Tomasz KRYSIŃSKI, Wojciech STANEK, Lucyna CZARNOWSKA, Paweł GŁADYSZ a Adam KABAJ. *Finite time thermodynamic analysis of small alpha-type Stirling engine in non-ideal polytropic conditions for recovery of LNG cryogenic exergy* [online]. 15 December 2017 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421731695X>
- [17] LEBEDA, Vít. Stirlingův motor. *Stirlingmotor.cz* [online]. 2011 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/>
- [18] *Sterling Solar 2 Interconnection Project: DRAFT ENVIRONMENTAL ASSESSMENT* [online]. October 2020, pages 1,6 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-08/draft-ea-2141-sterling-solar2-2020-10.pdf>

- [19] Froid Stirling: Réfrigérateur Stirling à piston libre. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012 [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: https://fr.wikipedia.org/wiki/Froid_Stirling
- [20] KURIKKAL, Mohammed Shibil. Air Independent Propulsion; Silent Submarines with Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research & Technology* [online]. September 2016, 2 [cit. 2023-01-04]. ISSN 2278-0181. Dostupné z: <https://www.ijert.org/research/air-independent-propulsion-silent-submarines-with-stirling-engines-IJERTV5IS090242.pdf>
- [21] Třída Näcken. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011, aktualizováno 9. 8. 2021 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99%C3%ADda_N%C3%A4cken
- [22] Radioizotopový termoelektrický generátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007, aktualizováno 17. 10. 2021 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Radioizotopov%C3%BD_termoelektrick%C3%BD_gener%C3%A1tor
- [23] Advanced Stirling radioisotope generator. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016, last modified 11 November 2022 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Stirling_radioisotope_generator
- [24] *Aldebaran* [online]. AGA, 2015 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015_43_sti.php
- [25] ŠKORPÍK, Jiří. Principy výroby elektřiny a tepla v domácnostech. *Transformační technologie* [online]. Brno, 2010-06, 2010-06, last updated 2020-11-10 [cit. 2023-02-11]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/10.html>
- [26] MAREK, David. David Marek: Čeká nás složitý rok. Není jisté, že budeme mít dost plynu. *Newstream.cz* [online]. 26. 12. 2022 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.newstream.cz/nazory/david-marek-ceka-nas-slozity-rok-neni-jiste-ze-budeme-mit-dost-plynu>

- [27] JELÍNEK, Tomáš. Vědci chtějí omezit spalování dřeva a štěpky. Vzniká při něm více emisí než u spalování fosilních paliv. *EnergoŽrouti.cz* [online]. 14. 12. 2022 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://energozrouti.cz/clanek/vedci-chteji-omezit-spalovani-dreva-a-stepky-vznika-pri-nem-vice-emisi-nez-u-spalovani-fosilnich-paliv>
- [28] BUDÍN, Jan. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (kogenerace) v České republice. *Oenergetice.cz* [online]. 2017, 26. srpen 2017 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/kogenerace-v-ceske-republice>
- [29] NAZELENO.CZ, Redakce. *Kogenerace pro rodinné domy: Vyrábějte teplo a elektřinu najednou* [online]. NAZELENO.CZ. 2018 -, 22. 2. 2010 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/energetika/kogenerace-pro-rodinne-domy-vyrabejte-teplo-a-elektřinu-najednou.aspx>
- [30] POVÝŠIL, Roman a kol. ENERGO-ENVI. *Mikrokogenerace – efektivní nástroj stability a bezpečnosti dodávek energie* [online]. MPO. Praha, 2011, 99 s. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/mikrokogenerace.pdf>. Publikace Programu EFEKT 2011.
- [31] HIRŠ, Jiří a Milan KUBÍN. Kogenerační technologie v rodinných domech a v malých bytových komplexech. *Topenářství instalace* [online]. 2013, 25. 1. 2013, **2013**(1), 42 - 47 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/kogeneracni-technologie-v-rodinnych-domech-a-v-malych-bytovych-komplexech-detail-8567>
- [32] *Viessmann testuje mikrokogeneraci pro rodinné domy* [online]. 2018 -, 9. 2. 2010 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/viessmann-testuje-mikrokogeneraci-pro-rodinne-domy/>
- [33] ČESKÁ REPUBLIKA. *Cenové rozhodnutí ERÚ č. 11/2022 ze dne 30. září 2022, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie*. In: . Jihlava: ERÚ, 2022, 11/2022. Dostupné také z: <https://www.eru.cz/energeticky-regulacni-vestnik-132022>
- [34] FRAUSCHER THERMAL MOTORS. Stirling engine: Prototypes. *Frauscher thermal motors* [online]. Sankt Marienkirchen bei Schärding [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://www.frauscher-motors.com/stirling-engines/prototypes/>
- [35] ÖKOFEN. Pellematic Condens_e. *ÖkoFEN.com* [online]. [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: https://www.oekofen.com/en-gb/pellematic-condens_e/
- [36] ÖKOFEN. Pellematic Condens. *ÖkoFEN.com* [online]. [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://www.oekofen.com/en-gb/pellematic-condens/>

- [37] BŘEZINOVÁ, Jana. Jakou spotřebu mají nejpoužívanější spotřebiče v domácnosti?. *Srovnejto.cz* [online]. 27. 5. 2022 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.srovnejto.cz/blog/jakou-spotrebu-maji-nejpouzivanejsi-spotrebice-v-domacnosti/>
- [38] JIRÁSEK, Jakub. Kolik stojí provoz spotřebičů: srovnání před zdražením elektřiny a po něm. *SeznamZpravy.cz* [online]. 14. 9. 2022 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/domaci-zivot-v-cesku-kolik-stoji-provoz-spotrebicu-srovnani-pred-zdrazenim-elektřiny-a-po-nem-211633>
- [39] REDAKCE ELEKTRINA.CZ. Kolik wattů i korun spotřebuje vaše lednice, televize či PC? Podívejte se na 7 situací. *Elektrina.cz* [online]. 23. 2. 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/spotreba-a-prikon-domacich-spotrebicu-lednice-televize-pc-pracka>
- [40] SOLAR-ESHOP.CZ. Kolik wattů spotřebují Vaše spotřebiče?. *Solar-Eshop.cz* [online]. 24. 1. 2023 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/clanky/kolik-wattu-spotrebuji-vase-spotrebice/>
- [41] SROVNATOR.CZ. Kolik stojí provoz běžných spotřebičů v domácnosti?. *Srovnator.cz* [online]. 26.02.2018 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.srovnator.cz/clanky/kolik-stoji-provoz-beznych-spotrebicu-v-domacnosti/>
- [42] MALÁ, Petra. Kolik „žerou“ elektrické spotřebiče a na co si dát pozor, když chcete ušetřit. *BydlímeKvalitně.cz* [online]. 8. 7. 2022 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.bydlimekvalitne.cz/kolik-zerou-elektricke-spotrebice-na-co-si-dat-pozor-kdyz-chtete-usetrit>
- [43] ODDĚLENÍ STATISTIKY A SLEDOVÁNÍ KVALITY ERÚ. Měsíční spotřeba elektřiny 2022. In: ERÚ.cz [online]. 2023, 03.02.2023, 08.02.2023 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/mesicni-spotreba-elektřiny-2022>
- [44] SKUPINA ČEZ. Ceník elektřiny pro domácnosti. In: ČEZ.cz [online]. 2023, 4. 5. 2023 [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina-2023/moo/moo ee na 1 rok v akci 15.5.2023 cez.pdf>