



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

STIRLINGŮV MOTOR

STIRLING ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dan Mader

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Dan Mader
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Stirlingův motor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stirlingův motor byl vynalezen již na počátku 19. století, kdy měl být účinnější alternativou k parnímu stroji. V důsledku komplikovanější konstrukce se však svého masového uplatnění nedočkal. V posledních dekádách lze pozorovat určitou renesanci Stirlingova motoru, která souvisí s jeho vysokou účinností a především možností pracovat s externím zdrojem tepla, což je zajímavé pro obnovitelné zdroje energie. V souvislosti s obnovitelnými zdroji energie se jeví zajímavé i využití reverzního Stirlingova cyklu, který funguje jako chladicí zařízení. Zařízení postavená na reverzním cyklu jsou schopna dosáhnout velice nízkých teplot a v minulosti byla využívána např. ke zkapaňování vzduchu. Nabízí se tak otázka, zdali by nebylo možné použít Stirlingův motor jako tepelné čerpadlo, které využívá odpadní teplo, nebo teplo z obnovitelných zdrojů energie.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést rešerši současných konstrukcí Stirlingova motoru a posoudit jejich vhodnost k využití jako chladicí zařízení (tepelné čerpadlo).

Seznam doporučené literatury:

JUDGE, Arthur William. Small gas turbines and free piston engines. Macmillan, 1960. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015002023474>

WEST, C. D. Principles and applications of Stirling engines. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. ISBN 0442-29273-2.

KARABULUT, Halit. Dynamic analysis of a free piston Stirling engine working with closed and open thermodynamic cycles. Renewable Energy [online]. Elsevier, 2011, 36(6), 1704-1709 [cit. 2018-10-26]. DOI: 10.1016/j.renene.2010.12.006. ISSN 0960-1481.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá konstrukčními variantami Stirlingova motoru užívanými pro chlazení. První kapitola obsahuje historii vzniku a princip činnosti motoru. V druhé kapitole je popsán Stirlingův cyklus pro různá zařízení. V dalších kapitolách jsou popsány jednotlivé konstrukční varianty, rozdělené do kategorií dle oblasti užívání na komerční jednotky, armádní systémy a jednotky pro vesmírné mise. V rámci diskuze jsou tyto konstrukce srovnány a je nastíněn jejich budoucí vývoj. Výsledkem práce je souhrnná teoretická analýza současných kryogenních jednotek fungujících na principu Stirlingova motoru.

Klíčová slova

Stirlingův motor, Stirlingův cyklus, regenerátor, kryogenika, motor s volným pístem, split-type, oxford-type, pulzní trubice

ABSTRACT

Presented bachelor thesis deals with study of constructional variations of Stirling engine that work in reverse as heat pump for cooling. First chapter contains history and functional principle of Stirling engine. Second chapter describes Stirling cycle for various devices. The following chapters consist of constructional variations which are divided into three application categories: commercial, military technical, space. In last chapter are these variations compared together and possible future of these devices is being predicted. Result of this thesis is theoretical analysis of Stirling cryocoolers that are based on Stirling engine.

Key words

Stirling engine, Stirling cycle, regenerator, cryogenics, free-piston engine, split-type, oxford-type, pulse-tube

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MADER, Dan. *Stirlingův motor* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. 37 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Hejčík. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117170>

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Stirlingův motor** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Dan Mader

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jiřímu Hejčíkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce, ačkoliv jeho slovy šlo pouze o: „Tři celkem bezvýznamné poznámky a pár připomínek formálního charakteru.“ Dále děkuji své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 Stirlingův motor.....	2
1.1 Historie vzniku.....	2
1.2 Princip činnosti	5
2 Stirlingův cyklus.....	6
2.1 Ideální model	6
2.2 Reverzní cyklus pro chladicí zařízení	7
2.3 Reverzní cyklus pro tepelné čerpadlo	8
2.4 Skutečný cyklus	10
3 Konstrukční typy	11
3.1 Modifikace α	11
3.2 Modifikace β	12
3.3 Modifikace γ	13
4 Speciální druhy motoru	14
4.1 Stirlingův motor s rombickým mechanismem.....	14
4.2 Stirlingův motor s volným pístem	16
5 Využití motoru jako chladicího zařízení	20
5.1 Komerční kryogenní jednotky	21
5.2 Kryogenní jednotky v armádních systémech.....	22
5.2.1 Split-type Stirlingova jednotka.....	23
5.2.2 Chladicí jednotka SQUID senzoru.....	24
5.3 Kryogenní jednotky pro vesmírné mise.....	25
5.3.1 Oxford-type kryogenní jednotka	26
5.3.2 Pulzní trubice.....	27
DISKUSE	31
ZÁVĚR.....	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	36
SEZNAM OBRÁZKŮ	37

ÚVOD

„Stirlingův motor je mechanické zařízení, které pracuje na principu uzavřeného termodynamického cyklu s regenerací, s cyklickým stlačováním a expanzí pracovní látky při rozdílných teplotách.“ [1]

V současné době zažívá tento stroj již druhou renesanci. Vzhledem k současným trendům ve využívání obnovitelných zdrojů energie a užití odpadního tepla se motor s vysokou účinností a možností pracovat s téměř libovolným externím zdrojem tepla jeví jako ideální řešení.

Uplynulo však více než 200 let od jeho vzniku a přesto je používán pouze ve specifických případech a masivní rozšíření spolu s komerčním úspěchem je stále v nedohlednu. Na první pohled jednoduché zařízení v sobě propojuje oblasti termodynamiky, přenosu tepla, proudění, struktury materiálů, dynamiky a mnoha dalších odvětví [2]. A možná právě proto přitahuje i po takové době pozornost vědců, studentů i komerčních společností z celého světa. Každý zde může najít své pole působnosti a využít svých odborných znalostí, zároveň však tato rozmanitost může být jedním z důvodů, proč je i přes teoreticky široké možnosti jeho použití stále ve stínu elektromotorů a motorů s vnitřním spalováním.

Cílem mé práce je přiblížit neméně důležité možnosti tohoto stroje, které souvisí s reverzním Stirlingovým cyklem. V oblasti chlazení je Stirlingův motor využíván v několika konstrukčních variantách, které ve své práci popisuji a srovnávám.



Obrázek 1: Detail motoru s volným pístem [3]

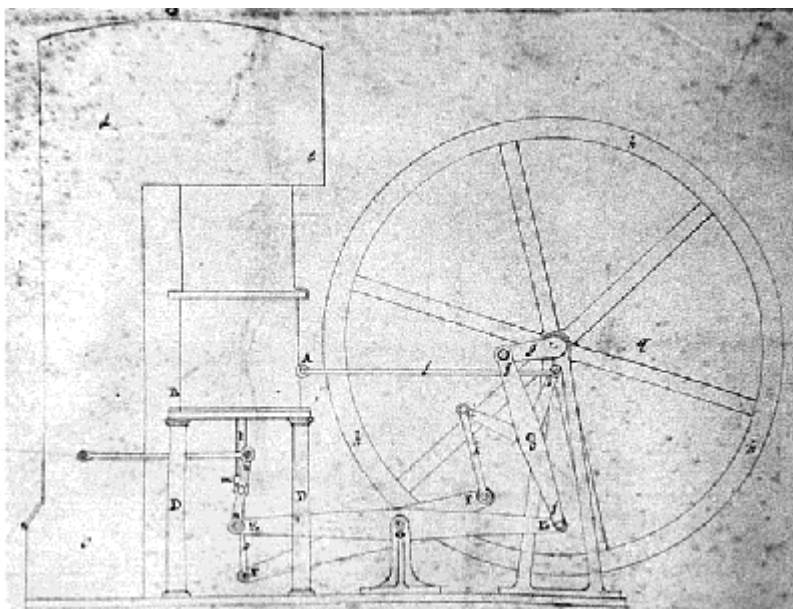
1 Stirlingův motor

1.1 Historie vzniku

Robert Stirling, skotský pastor, žil v letech 1790 až 1878. Bývá označován za vynálezce teplovzdušného motoru, který v současnosti nese jeho jméno [1].

Ve skutečnosti byl tento typ stroje známý již delší dobu, konkrétně v patentu z roku 1794 popisuje Thomas Mead: „*Určité metody... vhodné pro spuštění a chod jakéhokoliv zařízení, na které budou použity.*“ V tomto patentu Mead popisuje první mechanické zařízení na principu uzavřeného termodynamického cyklu [2].

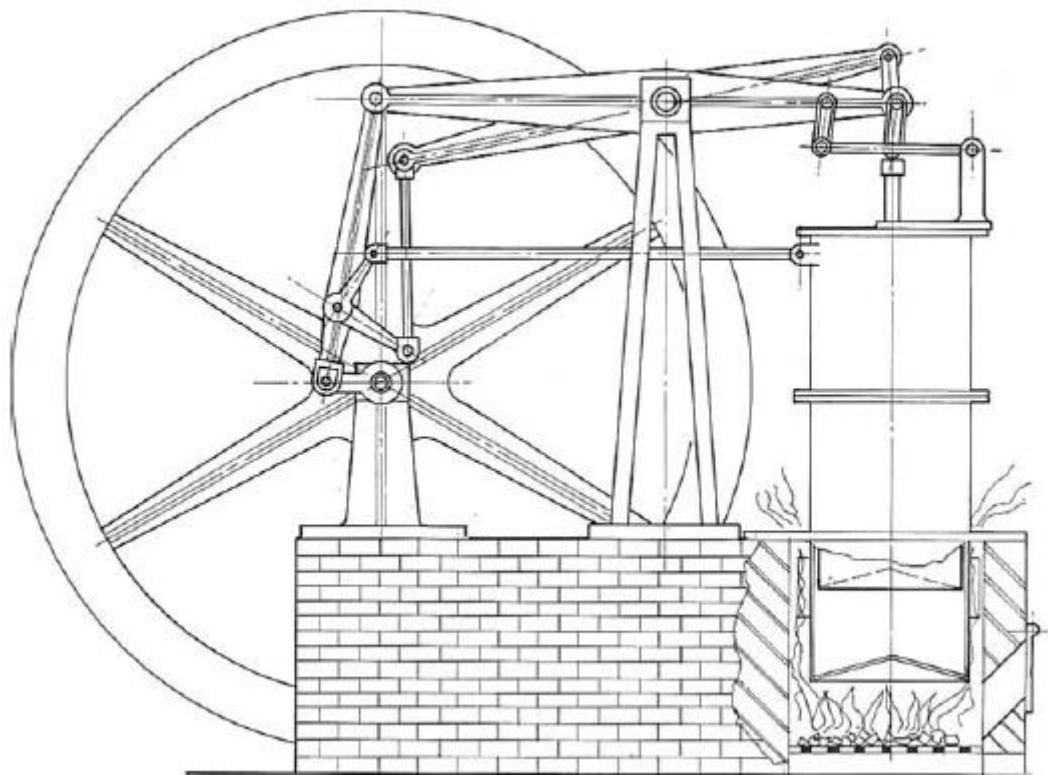
Robert Stirling se ovšem zasloužil o důležitou část stroje, zvyšující jeho účinnost. V roce 1816 si nechává patentovat součást zvanou „ekonomizér“, v dnešní době známou pod názvem regenerátor. Spolu s ní získává patent i na vlastní konstrukci motoru.



Obrázek 2: Náčrt Stirlingova motoru v patentu z roku 1816 [4]

Během dvou let byl postaven první motor s výkonem 1492 W (v té době 2 koňských sil) k pumpování vody z lomu v Ayrshire ve Skotsku. Tato informace o výkonu se objevuje v článku časopisu *The Engineer* z roku 1917 ku příležitosti stého výročí vynálezu. Počítačové simulace prokázaly, že stroj by skutečně mohl fungovat, nicméně s maximálním výkonem kolem 373 W (kolem 1/2 koňské síly). Na základě patentu (viz obrázek 2) byl postaven motor ve skutečné velikosti. Z testů vyplynulo, že každodenní provoz v lomu by byl v podstatě nemožný vzhledem k příliš nízké vstupní teplotě a náchylnosti chodu stroje na směr a sílu větru [4].

Na základě těchto poznatků ale i dalších důkazů, zejména popisu události, při níž se v důsledku přehřátí zničil válec, se předpokládá, že stroj v lomu z roku 1818 nebyl sestaven na základě patentu, ale pravděpodobně dle nákresu na obrázku 3. Na něm je válec obráceně vzhledem k původní konfiguraci a přímý kontakt s ohněm zajišťuje dosažení požadované vstupní teploty.



Obrázek 3: Nákres předpokládané konstrukce [4]

Přestože Robert Stirling a jeho bratr James zasvětili vývoji a zdokonalování vynálezu velkou část svých životů, nebyli komerčně úspěšní. Stroje na tomto principu se ovšem rozšířily i zásluhou švédského vynálezce Johna Ericssona, který zkonstruoval několik druhů zařízení na podobném principu. Jeho motory měly tok pracovní látky řízený ventily a nejčastěji se jednalo o variantu s malým výkonem k pohonu větráků a čerpadel na vodu.

S rozvojem motorů s vnitřním spalováním a elektromotorů byly teplovzdušné motory společně s parním strojem vytlačeny z trhu.

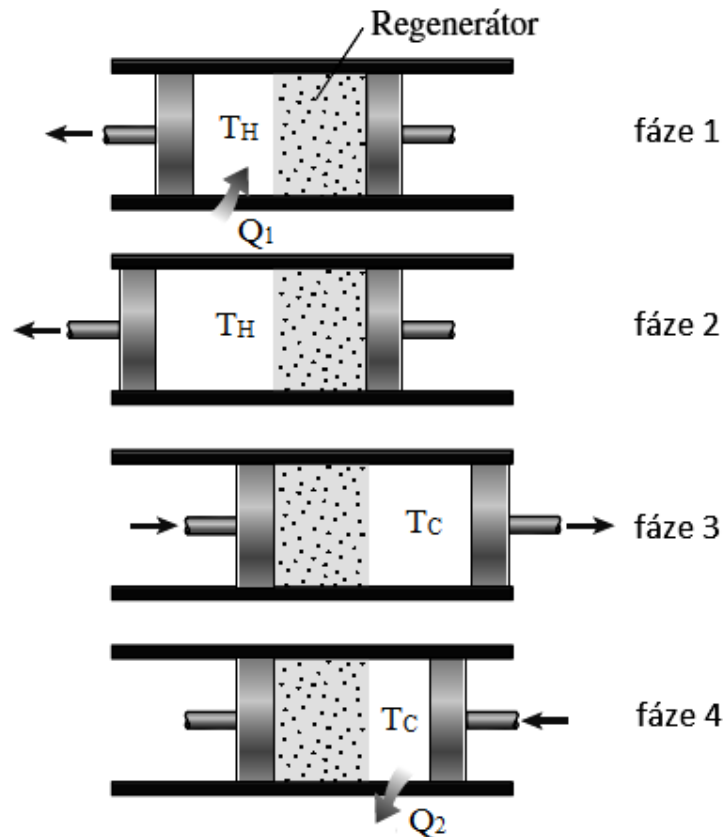
Využití motorů v reverzním chodu jako tepelného čerpadla navrhnul lord Kevin už v 19. století. Ale teprve ve 20. století došlo k rozšíření těchto strojů, především v oblasti chlazení. V roce 1834 britský astronom John Herschel aplikoval koncept reverzního Stirlingova cyklu a vytvořil první chladicí jednotku na tomto principu. Ačkoliv se tyto jednotky rozšířily i do Spojených států amerických, výrazného úspěchu se nedočkaly. Byly nahrazeny chladicími zařízeními s kompresory [5].

Za první renesanci můžeme označit období v první polovině 20. století, kdy holandská firma Phillips hledá vhodný zdroj energie pro své přenosné radiopřijímače. Znalosti termodynamiky a rozvoj technologie materiálu otevřely nové možnosti. Dr. Rolf Meier poprvé užívá označení „Stirlingův motor“ poté, co je pod jeho vedením v rámci vývoje nahrazen vzduch jako pracovní látka héliem nebo vodíkem. Po vynálezu tranzistoru a vylepšení baterií se inženýři z firmy Phillips přeorientovali z vývoje malého generátoru na motory s vysokými výkony. Zároveň byl vyčleněn výzkumný tým pod vedením Dr. Köhlera, který se zaměřil na vývoj kryogenních jednotek. Vývoj byl úspěšný a v roce 1954 se začala prodávat první zařízení, schopná zkapalnit 8 litrů kyslíku za hodinu. Toto zařízení a jeho následné varianty byly prodávány po celém světě a lze je označit za první významný komerční úspěch moderního Stirlingova motoru [1].

V roce 1968 vznikl společný projekt několika švédských společností pod názvem United Stirling, s cílem prozkoumat nové možnosti užití motoru. Za použití licence firmy Phillips vznikl motor o výkonu 150 kW pro pohon autobusů, terénních vozidel anebo ponorek. I přes řadu funkčních prototypů nebyla nikdy zahájena sériová výroba kvůli vysokým výrobním nákladům. Tyto náklady by byly v porovnání se stejně výkonným vznětovým motorem několikanásobně vyšší [6].

1.2 Princip činnosti

Stirlingův motor patří mezi čtyřdobé pístové motory se systémem vnějšího spalování. Jeho charakteristickým znakem je část zvaná regenerátor. Ten je ve své podstatě malý tepelný výměník, který uchovává část tepla během jedné části cyklu a navrácí ji zpět pracovní látce během další části cyklu. Tím se podstatně zvyšuje účinnost, protože není třeba systému dodávat a odebírat tolik tepla. Z důvodů existence více konstrukčních modifikací je základní princip činnosti popsán na teoretickém modelu (viz obrázek 4). Tento model se skládá z válce se dvěma písty a regenerátoru mezi nimi.



Obrázek 4: Průběh jednoho cyklu (upraveno [7])

V první fázi se veškerá pracovní látka (plyn) nachází v levé (horké) komoře, za vysoké teploty T_H a vysokého tlaku. Během ohřevu ve fázi 1–2 se dodává teplo plynu o teplotě T_H z vnějšího zdroje. Když se plyn začne za konstantní teploty rozpínat, levý píst se pohybuje směrem ven a koná práci. Zároveň klesá tlak plynu.

Během fáze 2–3 se oba písty pohybují vpravo při stejné rychlosti, dokud není veškerý plyn v pravé komoře. Když plyn prochází skrze regenerátor, zahřívá jej. Dochází zde k přenosu tepla na regenerátor a teplota plynu klesne z T_H na T_C .

Ve fázi 3–4 se pravý píst pohybuje dovnitř a stlačuje plyn. Teplo je odváděno chladičem a za konstantní teploty T_C se zvyšuje tlak.

Během fáze 4–1 se oba písty pohybují doleva při stejné rychlosti, čímž je plyn vytlačován do levé komory. Teplota plynu vzrůstá z T_C na T_H při průchodu regenerátorem. Tím je cyklus uzavřen.

2 Stirlingův cyklus

2.1 Ideální model

Jedná se o termodynamický cyklus, který se skládá z *izoterem* a *izochor*. Z diagramů na obrázku 5 vyplývá, že se jedná o přímý vratný cyklus. Ideální cyklus pracuje s ideálním plynem, pro který platí stavová rovnice, je ideálně stlačitelný a bez vnitřního tření.

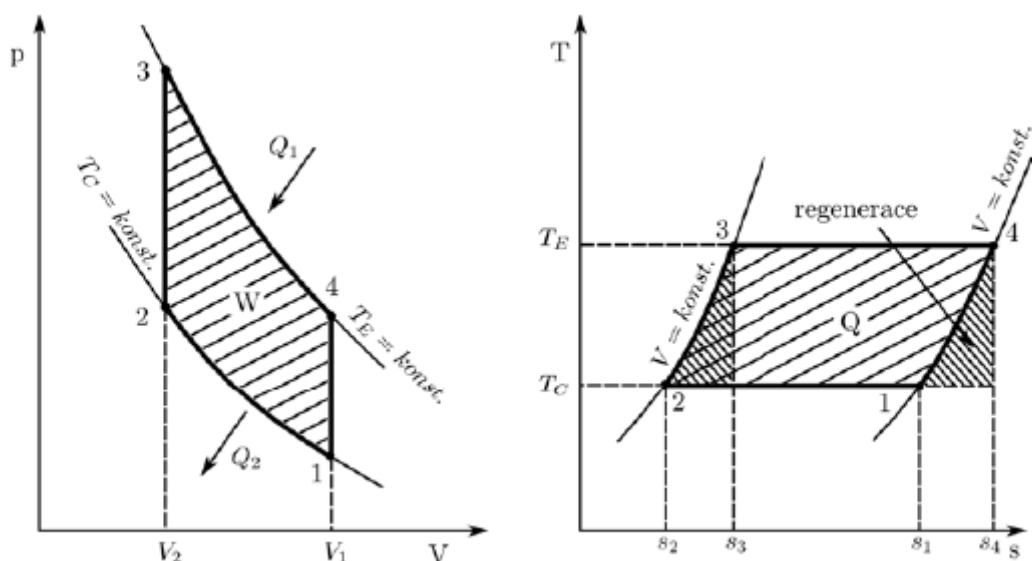
První fáze cyklu se nazývá *izotermická komprese*. Plyn je stlačován při konstantní teplotě T_C . Odvedené teplo je rovno práci vynaložené pro stlačení. Entropie pracovní látky klesá.

Druhá fáze cyklu se nazývá *izochorický ohřev*. Objem zůstává konstantní a teplota vzroste z T_C na teplotu T_E . Hodnota tlaku vzroste z p_2 na p_3 . Vyrůstá vnitřní energie a entropie pracovní látky. Práce se nekoná.

Během třetí fáze, nazývané *izotermická expanze*, proudí plyn regenerátorem a odevzdává mu část tepla a expanduje. Expanzí plynu je vyvolán tlak na pracovní píst, který působí na klikovou hřídel. Koná se práce. Průběžným přívodem tepla Q_1 z vnějšího zdroje se udržuje teplota T_E . Entropie roste, vnitřní energie pracovní látky se nemění.

Čtvrtá a poslední fáze cyklu se nazývá *izochorické chlazení*. Plyn je přemístěn do chladné části za konstantního objemu. Teplota T_E klesá na teplotu T_C . Tlak klesá z hodnoty P_4 na P_1 . Vnitřní energie a entropie pracovní látky se zmenšují. Práce se nekoná.

Regenerátor přijímá teplo od pracovní látky v ději 4–1 a navrácí jej zpět pracovní látce v ději 2–3. V případě, že je množství předávaného tepla regenerátorem stejné, potom se výměna tepla mezi okolím a pracovní látkou odehrává pouze při teplotách T_E a T_C . Účinnost Stirlingova termodynamického cyklu (rovnice 2.3) je pak shodná s termickou účinností cyklu Carnotova.

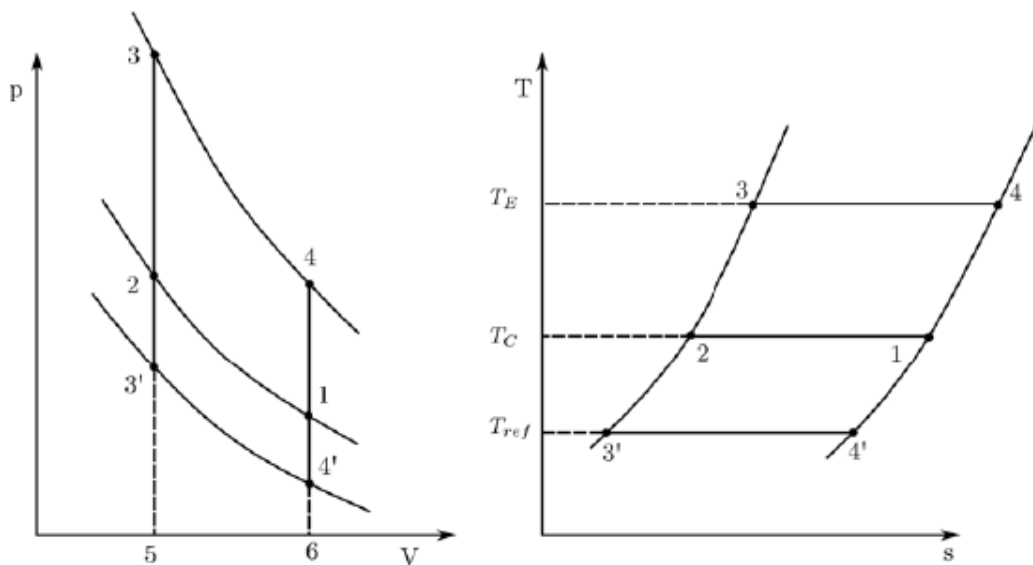


Obrázek 5: p-V a T-s diagram ideálního cyklu [8]

2.2 Reverzní cyklus pro chladicí zařízení

Stejný ideální oběh, kterým lze popsat Stirlingův cyklus pracující jako motor, lze užít k popisu reverzního cyklu. Cyklus ovšem probíhá v opačném směru a nazývá se proto nepřímý. Je třeba dodávat mechanickou práci ve formě otáčení hřídele a stroj produkuje práci tepelnou ve formě ochlazování zásobníku. Použitá pracovní látka (plyn) nemění během cyklu své skupenství. Diagramy na obrázku 6 nabízí srovnání přímého a nepřímého cyklu. Práce nutná ke stlačení plynu je stejná pro oba cykly (oblast vymezená body 1–2–5–6). Expanzní práce (oblast 4'–3'–5–6) je v případě nepřímého cyklu menší než práce kompresní a práce dodaná (oblast 1–2–3–4), v této fázi cyklu je proto nutné systém pohánět. Přestup tepla probíhá mezi kompresí a expanzí. Ve fázi 2–3 je pracovnímu plynu odebráno teplo a ve fázi 4–1 je teplo plynu dodáno. Teplota komprese T_C je pro oba cykly stejná. Teplota expanze je různá, pro přímý cyklus T_E a pro nepřímý T_{ref} [8]. Hospodárnost chladicího zařízení se posuzuje dle chladicího faktoru ε_C , označovaného také jako koeficient znásobení neboli COP (*coefficient of performance*), kde

$$\varepsilon_C = \frac{\text{odvedené teplo}}{\text{dodaná práce}} = \frac{T_{ref}}{T_C - T_{ref}}. \quad (2.1)$$



Obrázek 6: Stirlingův cyklus jako pohon a jako chladicí systém [8]

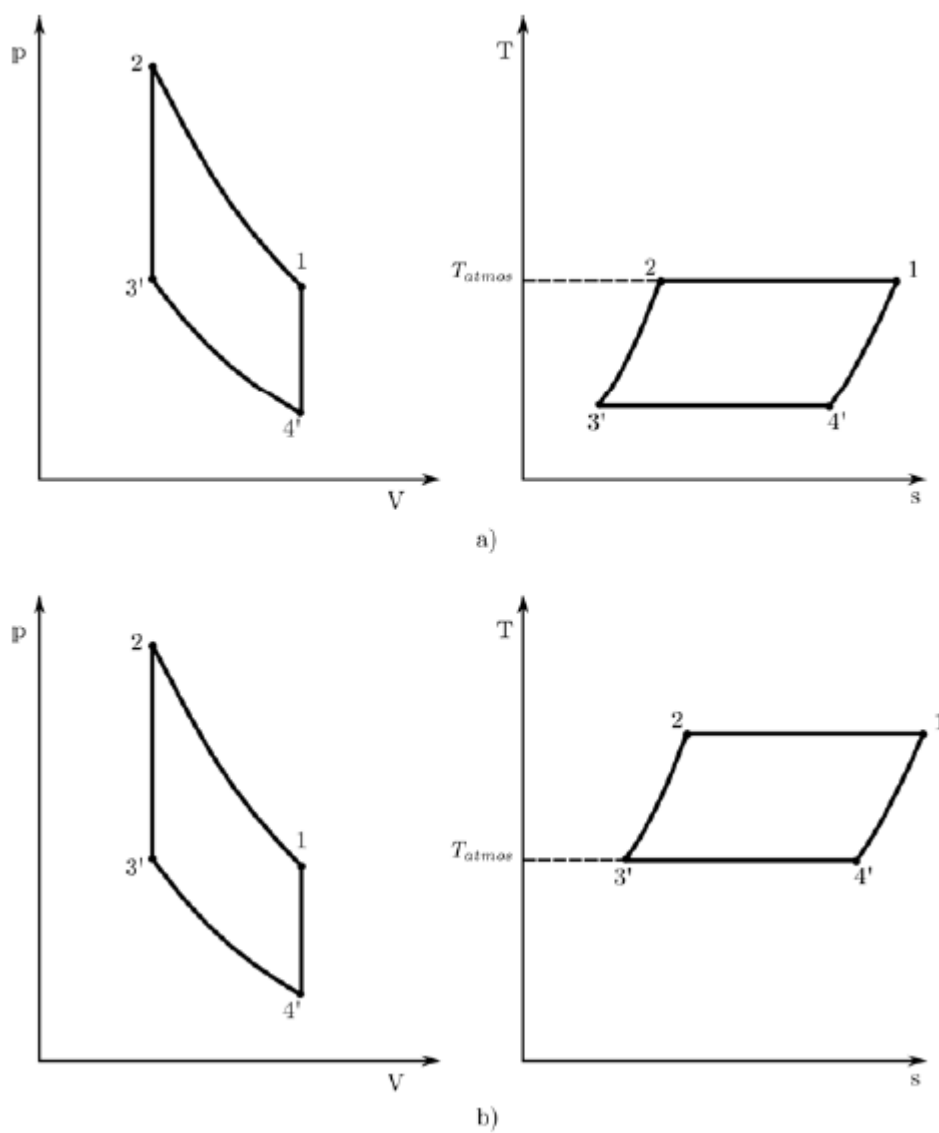
2.3 Reverzní cyklus pro tepelné čerpadlo

Stirlingův reverzní cyklus pro tepelné čerpadlo pracuje naprosto stejně jako cyklus pro chladicí zařízení. Jediný rozdíl je v teplotách, neboť u tepelného čerpadla jsou teploty T_C a T_{ref} nižší (viz obrázek 7). Teplota T_C je v případě chladicího systému nebo motoru teplotou chladicí vody při atmosférickém tlaku. U tepelného čerpadla je T_C teplota získané vysokopotenciální energie užívané k vytápění. Pracovní látka o teplotě T_C má proto vyšší tlak než atmosférický a pracovní látka o teplotě T_{ref} vstupující do systému (z půdy, povrchových vod, odpadního tepla nebo okolního vzduchu) má tlak atmosférický. Do systému je třeba dodávat práci a užitečným produktem je vysokopotenciální energie o teplotě T_C [8]. Hospodárnost tepelného čerpadla vyjadřuje topný faktor ε_H dle vztahu

$$\varepsilon_H = \frac{\text{dodané teplo}}{\text{vykonaná práce}} = \frac{T_C}{T_C - T_{ref}}. \quad (2.2)$$

Tento vztah je inverzní k termické účinnosti pro motory dle vztahu

$$\eta_t = \frac{\text{vykonaná práce}}{\text{dodané teplo}} = \frac{T_C - T_{ref}}{T_C}. \quad (2.3)$$



Obrázek 7: Stirlingův cyklus pro a) tepelné čerpadlo, b) chladicí zařízení [8]

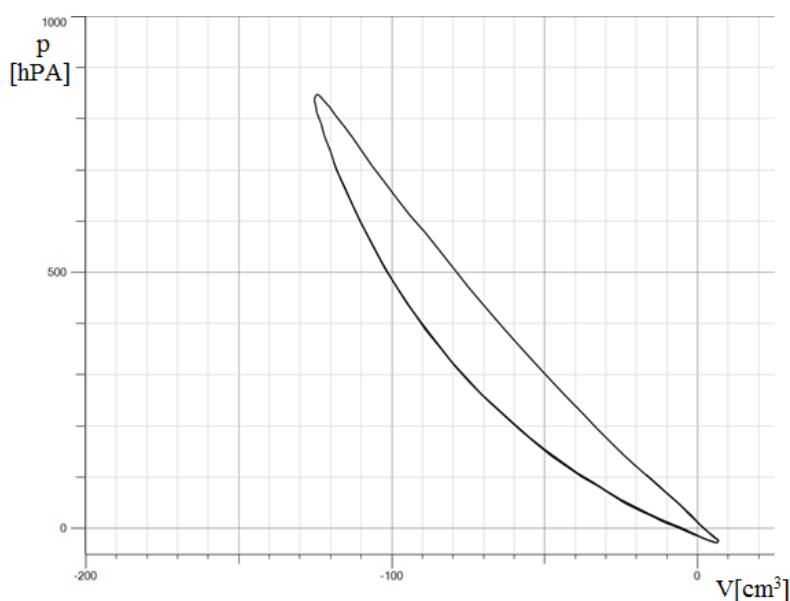
2.4 Skutečný cyklus

V rámci idealizace zanedbává Stirlingův cyklus, stejně jako ostatní modelové cykly (Otto, Diesel, Brayton), značné množství faktorů. Ty potom svým působením u reálného stroje výrazně mění technické parametry. Jedním ze zásadních parametrů je účinnost. Protože ideální Stirlingův cyklus má stejnou účinnost jako Carnotův cyklus, bývá Stirlingův motor často označován jako zázračný stroj. Účinnost reálného stroje sice může být vyšší než u motorů s vnitřním spalováním, rozhodně se však ani zdaleka neblíží Carnotově účinnosti.

Pro ilustraci reálného oběhu byl použit školní model Stirlingova motoru a výsledky měření byly zpracovány pomocí software *CassyLab 2*. Reálný oběh se od ideálního na první pohled liší tím, že p - V diagram tvoří hladká křivka (viz obrázek 8). Protože se jedná o rotační stroj, konají písty spojitý pohyb a hrany čtyř ideálních dějů splývají. Idealizace předpokládá izotermickou kompresi a expanzi s dokonalým přestupem tepla. Ve skutečnosti se jedná spíše o adiabatický děj, protože při vyšších otáčkách probíhá přestup tepla pouze v krátkém časovém úseku, a tedy nedokonale. Ideální regenerátor má neomezenou tepelnou kapacitu a systému odebírá a následně navrácí stejné množství tepla. U skutečného regenerátoru je nutné zahrnout aerodynamický odpor, nedokonalý přestup tepla, turbulentní proudění plynu, netěsnost mezi válcem a regenerátorem a řadu dalších faktorů, které snižují účinnost regenerace [8]. Pro výpočet účinnosti školního modelu bylo nutné získat hodnoty vykonané práce a dodaného tepla. Práce A_0 byla pomocí softwaru odečtena z grafu, jedná se o velikost plochy uvnitř křivky. Množství tepla Q_1 bylo získáno stejným způsobem, v tomto případě se však jedná o plochu ohraničenou horní částí křivky a horizontální osou.

$$\eta_t = \frac{\text{vykonaná práce}}{\text{dodané teplo}} \quad (2.4)$$

$$\eta_t = \frac{A_0}{Q_1} = \frac{16770}{49870} = 0,336 = 33,6 \% \quad (2.5)$$



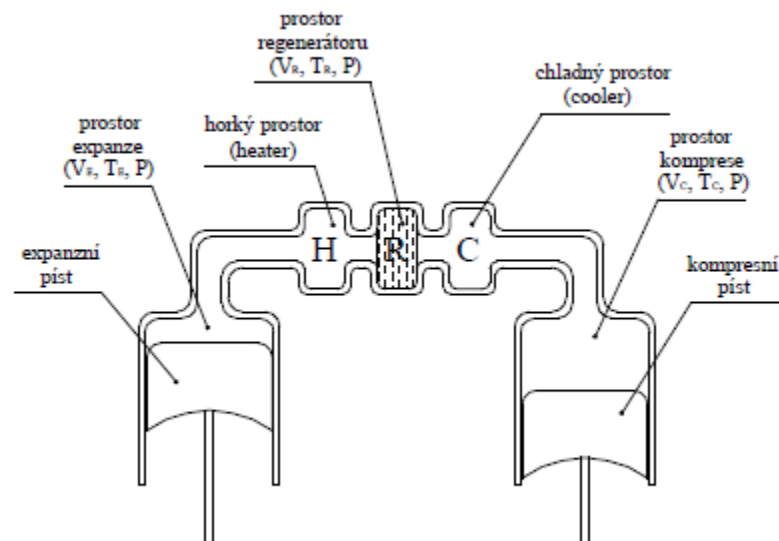
Obrázek 8: p - V diagram skutečného cyklu

3 Konstrukční typy

Stirlingův motor prošel při svém vývoji mnoha konstrukčními variantami. Lze je dělit na jednočinné, dvojčinné, hybridní či motory s volným pístem. Z hlediska umístění pístů rozlišujeme tři základní modifikace: α , β , a γ .

3.1 Modifikace α

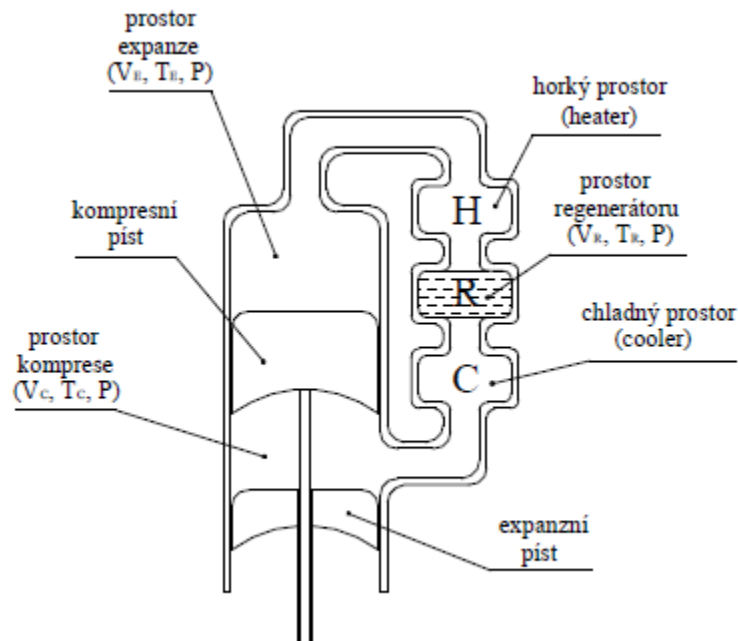
Tento typ modifikace zahrnuje varianty, jejichž pracovní prostor je rozdělen mezi dva válce, kompresní a expanzní. Jeden obsahuje pouze horký plyn a druhý pouze chladný plyn. Chladič, regenerátor a ohřivač se nachází mezi nimi (viz obrázek 9) [8].



Obrázek 9: Schéma modifikace α [8]

3.2 Modifikace β

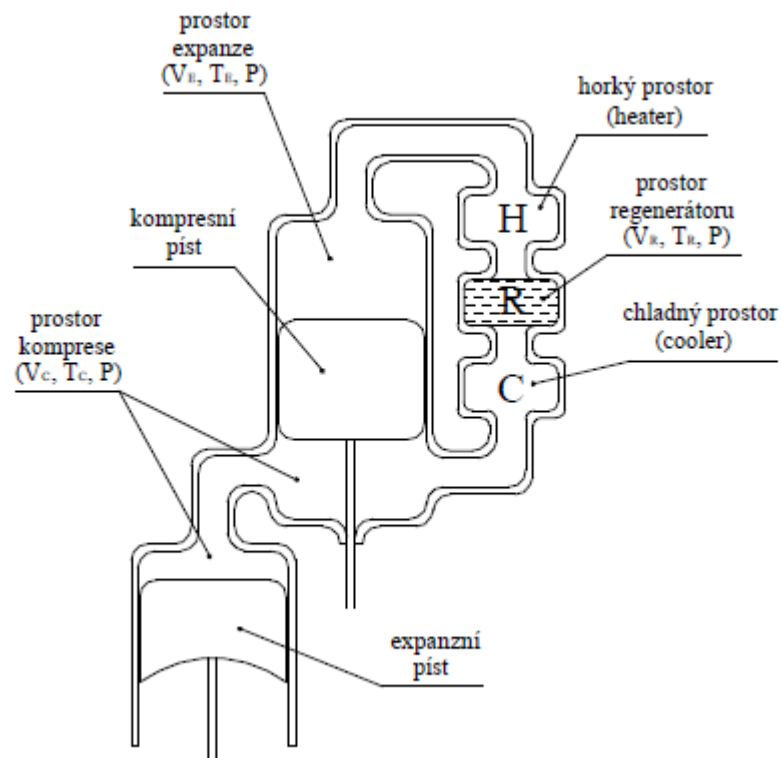
Tuto variantu představil Robert Stirling ve svém patentu z roku 1816. Tvoří ji pouze jeden válec a v něm se pohybují oba písty. Kompresní píst, nazývaný také přemísťovací, slouží ke změně objemu horkého prostoru. Expanzní píst, označovaný v této modifikaci jako pracovní, koná práci. Na změně objemu chladné části se podílí pracovní i přemísťovací píst. Jejich chod se tak v určité části cyklu překrývá (viz obrázek 10) [8].



Obrázek 10: Schéma modifikace β [8]

3.3 Modifikace γ

Tento typ je kombinací modifikace α a β . Obsahuje pracovní i přemísťovací píst, ale každý se pohybuje ve vlastním válci. Chladný prostor je rozdělen mezi oba válce, a proto má minimální objem vždy nenulový (viz obrázek 11) [8].

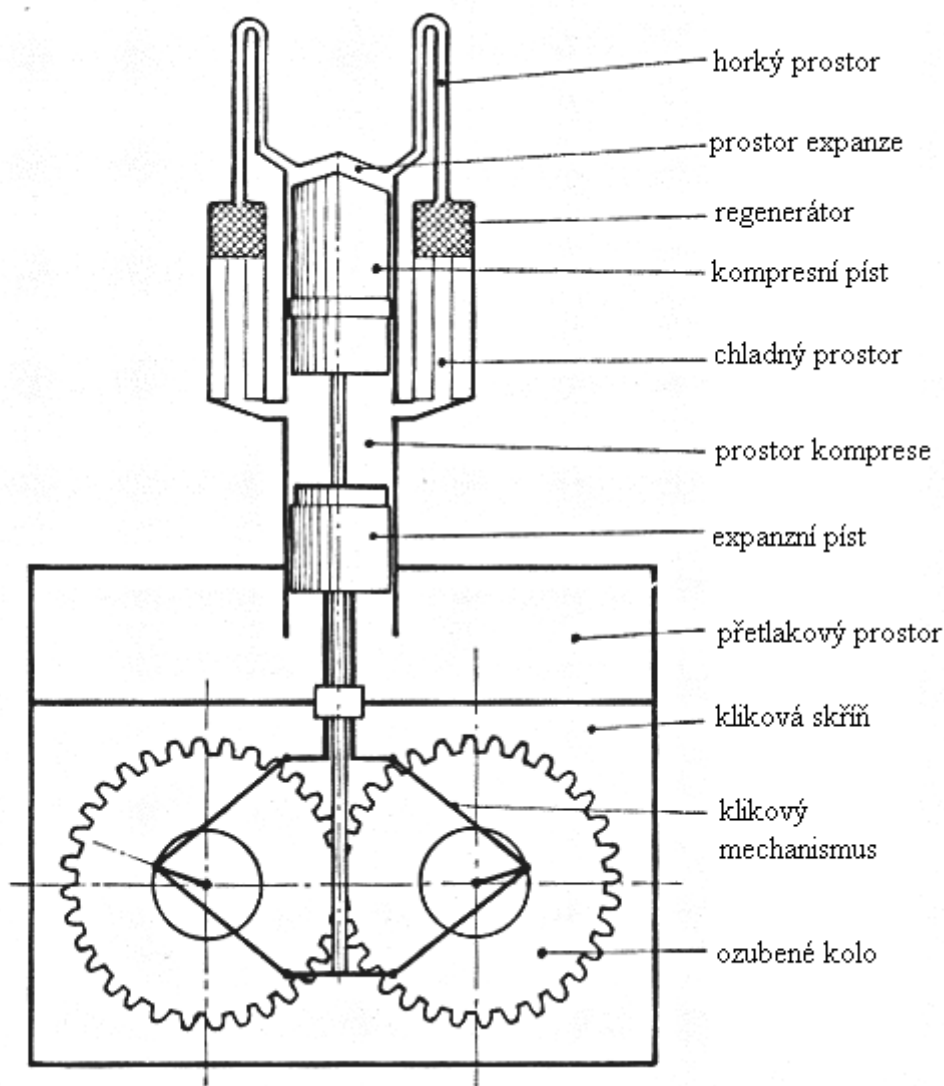


Obrázek 11: Schéma Modifikace γ [8]

4 Speciální druhy motoru

4.1 Stirlingův motor s rombickým mechanismem

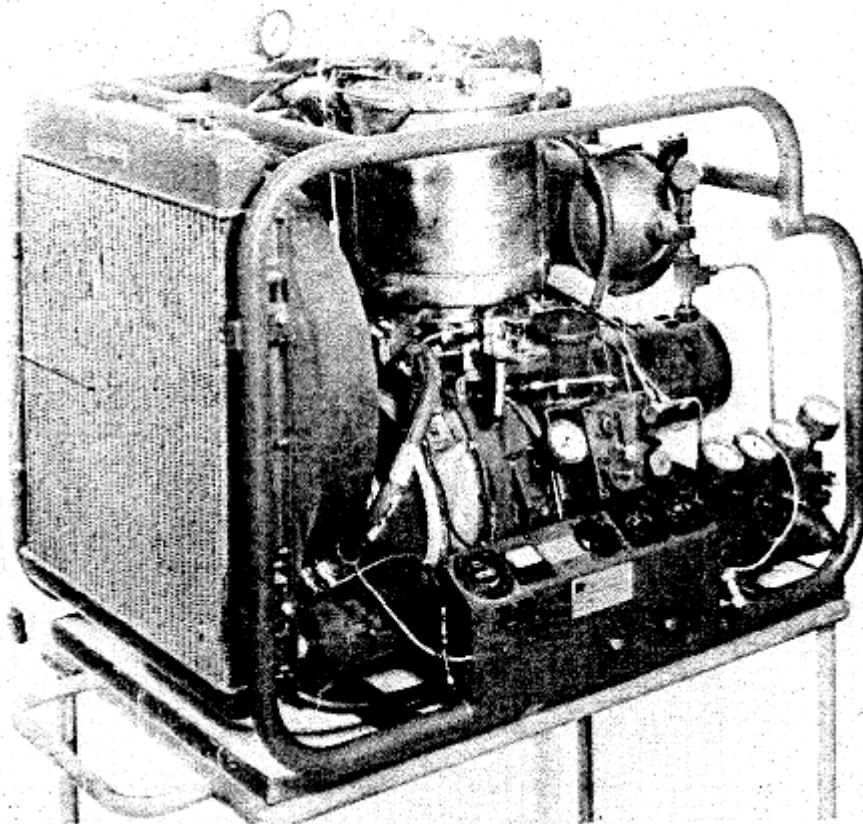
Rombický mechanismus vynalezl Dr. Meier v roce 1959 při výzkumu Stirlingova motoru ve firmě Phillips. Tento systém se skládá z již popsané modifikace β , dále dvou klikových mechanismů, které jsou opačně orientované, a dvou stejných ozubených kol. Pracovní a přemísťovací píst jsou ojnicemi spojeny se třmeny. K hornímu třmenu je připojena dutá pístnice pracovního pístu a k dolnímu je připojena pístnice přemísťovacího pístu. Ozubená kola zajišťují synchronizaci pohybu klikových mechanismů [9].



Obrázek 12: Schéma motoru s rombickým mechanismem (upraveno [9])

Díky uzavřenosti systému může motor pracovat s vysokým tlakem, aniž by byla nutná přetlaková kliková skříň. Pečlivým vyvážením mechanismu lze eliminovat působení bočních sil na písty. Motor je po konstrukční stránce zcela symetrický (viz obrázek 12). Statická i dynamická vyváženost v případě jednoválcového systému umožňuje dosažení vysokých otáček takřka bez vibrací. Hlavní nevýhodou rombického mechanismu je jeho relativní složitost.

Tento vynález podnítl opětovný zájem o Stirlingův motor. Vzniklo množství jednoválcových, dvouválcových i čtyřválcových prototypů. Na základě licencí od společnosti Phillips vytvořila a otestovala firma General Motors přenosný generátor pro americkou armádu (viz obrázek 13). Motor měl maximální výkon 7,5 kW, používal jako pracovní látku vodík při tlaku 6,9 MPa. Později byl tento generátor testován v NASA v rámci studie pro ministerstvo energetiky Spojených států Amerických. Za použití helia, při tlaku 4,13 MPa, bylo dosaženo výkonu 3958 W. Termodynamická účinnost dosáhla 35 % s teplotou chladného prostoru 288 K a horkého prostoru 977 K. Simulace pomocí ideálního izotermického modelu, který se blíží Stirlingově ideálnímu cyklu, vedla na výsledný výkon 7442 W a termodynamickou účinnost 75 %. Tyto výsledky a zejména dvojnásobný rozdíl mezi skutečnou a teoretickou účinností prokazují značné rozdíly mezi ideálním a skutečným Stirlingovým cyklem [9].

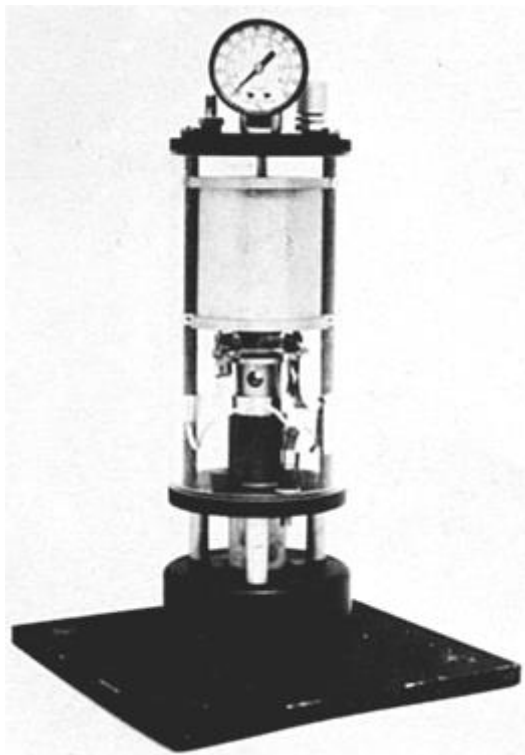


Obrázek 13: Generátor GPU-3 firmy General Motors [9]

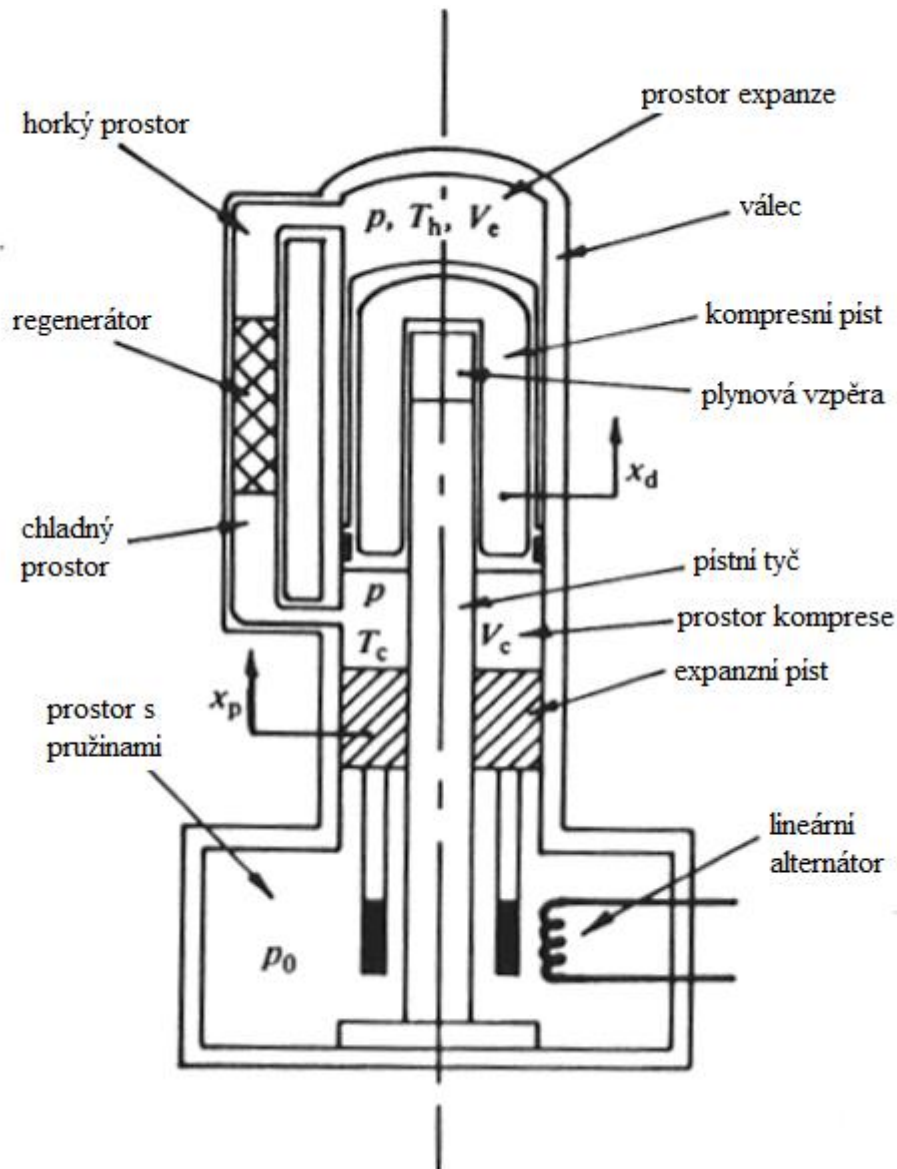
Po patnácti letech vývoje a výzkumu byly Stirlingovy motory s rombickým mechanismem svými technickými parametry připraveny konkurovat motorům vznětovým. Dosahovaly vysokého krouticího momentu, byly srovnatelné velikosti a váhy a produkovaly méně hluku a emisí. Oproti vznětovému motoru byla cena až trojnásobná, a protože nebylo reálné náklady dále snížit, byl tento koncept opuštěn. Přesto se jedná o důležitý milník ve vývoji Stirlingova motoru, neboť vedl k vynálezu motoru s volným pístem [1].

4.2 Stirlingův motor s volným pístem

V roce 1964 přišel profesor William Beale, z univerzity v Ohiu, s revoluční myšlenkou, která vedla ke vzniku zcela nové koncepce, motoru s volným pístem (*free-piston Stirling engine*). Na tento nápad údajně přišel, když přednášel o motoru s rombickým mechanismem a přitom si uvědomil, že motor bude fungovat i při odebrání tohoto komplexního mechanismu (viz obrázek 14). V dalších deseti letech udělal z konceptu funkční stroj, a protože od univerzity nezískal dostatečné prostředky pro komerční vývoj, založil firmu Sunpower. Následujících 42 let věnoval zdokonalování svého vynálezu a vedení společnosti. Vzniklo množství variant s výkonem od 35 W až do 7,5 kW a s různými zdroji tepla, od solární energie přes běžná fosilní paliva až po energii získanou z biomasy a odpadního tepla. Profesor Beale stanovil za cíl společnosti vytvořit solární systém na principu motoru s volným pístem, s parametry pro využití v běžné domácnosti. Ačkoliv se tento cíl nepodařilo naplnit, společnost významně zdokonalila technologii volného pístu. Vývoj zahrnoval především: aerodynamická ložiska, lineární alternátory, design a vlastní výrobu regenerátoru, design pružin a počítačové simulace procesů. Koncem 90. let se společnost zaměřila i na využití motoru pro kryogeniku a *mCHP* (*Micro combined heat and power system*, kombinovaný zdroj tepla a elektrické energie). První kryogenní jednotka byla uvedena na trh v roce 2001. Během dalších 10 let výrazně vzrostla poptávka a vzniklo tak portfolio produktů s využitím pro chlazení biologických vzorků, laseru, polovodičů a citlivých optických senzorů, zejména pro chromatografii a hmotnostní spektrometrii. V současné době pracuje společnost především na vylepšení konstrukce motoru pro zvýšení efektivity a snížení ceny. Tento vývoj má za cíl vytvořit komerčně úspěšné *mCHP* pro běžné domácnosti. Zároveň pokračují práce na zařízeních pro vesmírné aplikace v rámci zakázky od NASA [3].



Obrázek 14: Motor s volným pístem profesora Bealea [10]



Obrázek 15: Schéma motoru s volným pístem (upraveno [11])

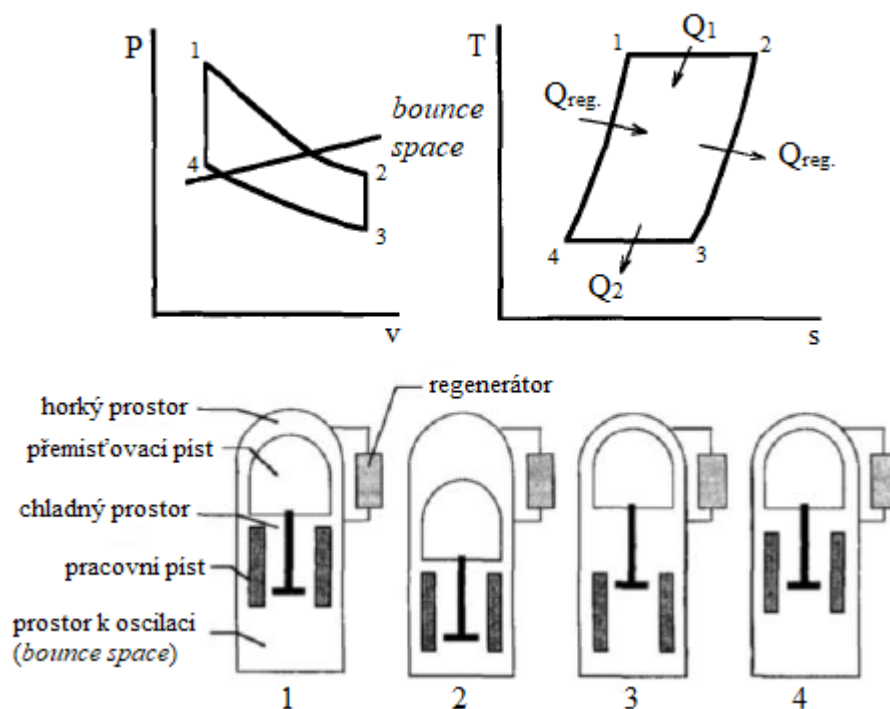
U tohoto typu motoru je pohyb pístů řízen pouze účinkem tlakových sil ve válci. Tím se odlišuje od dříve zmiňovaných konstrukčních variant, které se také označují jako kinematické motory, protože pohyb pístů je řízen mechanicky. Písty nejsou spojeny kloubovým mechanismem s motorem, ale volně oscilují mezi prostory, ve kterých se mění tlak, případně jsou uchyceny pomocí pružin (viz obrázek 15). Relativně velkou část motoru tvoří prostor pro oscilaci (*bounce space*), kde je udržován konstantní tlak. Pístnice přemístovacího pístu prochází skrz pracovní píst, aby mohly oba písty reagovat na změny tlaku v tomto prostoru. Relativní pohyb obou pístů je stanoven jejich hmotností a velikostí plochy vystavené tlaku. Soustavu pístů nejčastěji podpírají dvě hydrostatická ložiska. Samotný pracovní píst se chová jako ložisko pro pístnici přemístovacího pístu. Druhé ložisko se nachází na vnitřním průměru skříňě alternátoru. Obě ložiska jsou umístěna na chladné straně stroje a nejsou tak zatěžována teplem z vnějšího zdroje. Není nutné užití pístních kroužků, ale jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost při výrobě, aby vůle mezi písty, válcem a pístnicí přemístovacího pístu byly co nejmenší a minimalizovaly se ztráty toku plynu [12].

V první fázi 1–2 dochází k *izotermické expanzi*, kdy je teplo dodáváno z vnějšího zdroje. Oba písty jsou vytlačovány směrem dolů rozpínajícím se plynem a pracovní píst přitom koná práci. Zvýšení objemu plynu v expanzním prostoru a zároveň snižování objemu v oscilačním prostoru pohybem pístu vede ke vzniku rozdílných tlaků ve stroji. Tlak v oscilačním prostoru dosáhne vyšších hodnot než tlak v expanzním prostoru. V bodě 2 se tak lehký přemísťovací píst začíná pohybovat vzhůru. Těžký pracovní píst se vlivem setrvačných účinků stále pomalu pohybuje dolů (viz obrázek 16).

Fáze 2–3 probíhá za konstantního objemu – *izochorické chlazení*. Pracovní píst se již téměř nepohybuje a přemísťovací píst vytlačuje plyn z horkého prostoru skrze regenerátor do chladného prostoru. Ochlazení plynu vede ke snížení tlaku. V bodě 3 je pracovní píst zcela zastaven a rozdíl tlaků působí změnu směru pohybu.

Ve fázi 3–4 dochází ke kompresi plynu v chladném prostoru vlivem pohybu pracovního pístu a to za konstantní teploty. V bodě 4 je plyn zcela stlačen.

Ve fázi 4–1 se přemísťovací píst pohybuje dolů a při zachování konstantního objemu tlačí plyn skrze regenerátor zpět do horké komory. Tok plynu v kompresním prostoru je řízen v kanály ve stěnách válce, které jsou odkrývány nebo zakrývány podle pohybu pístů. Proto nejsou nutné ventily.



Obrázek 16: Průběh jednoho cyklu (upraveno [12])

Stejně jako u jiných konstrukcí nelze dosáhnout Carnotovy účinnosti kvůli ztrátám. Mezi nejvýznamnější patří:

- Ztráty při vedení tepla válcem, regenerátorem, přemísťovacím pístem a těsněním.
- Ztráty způsobené silami nutnými pro pohyb přemísťovacího pístu.
- Ztráty při toku plynu v regenerátoru.
- Tlakové ztráty způsobené nedokonalým utěsněním kolem přemísťovacího pístu a jeho pístnice a u pracovního pístu.
- Ztráty způsobené třením v ložisku.
- Tepelné, magnetické a elektrické ztráty v lineárním alternátoru

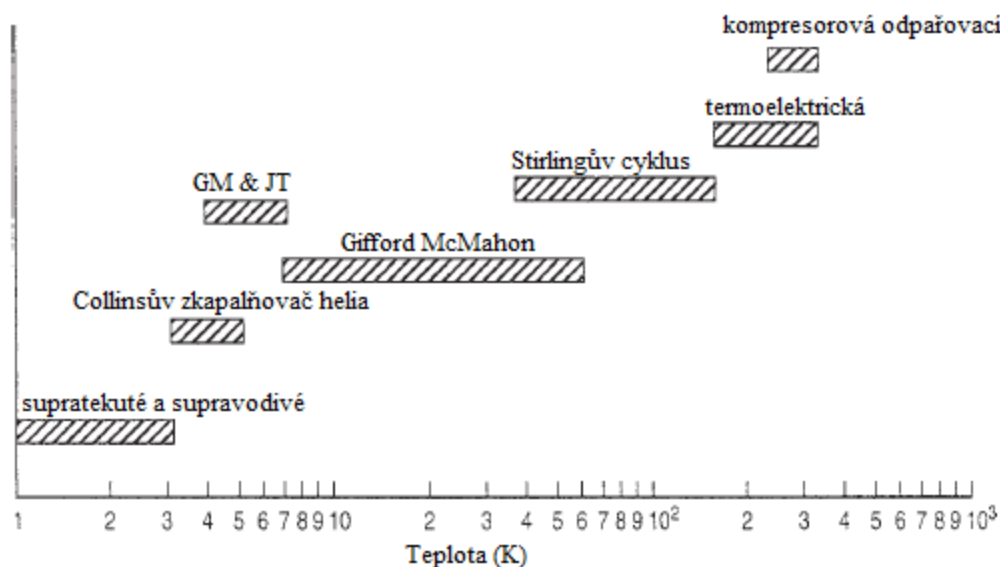
Pohybující se písty také způsobují vibrace válce. Nejčastější řešení je spojení dvou stejných motorů proti sobě. Fázové vibrace se navzájem vyruší. Možných konfigurací je velké množství, mezi nejčastěji používané patří protilehlé, stejnosměrné a do „V“ [12].

Motor s volným pístem má oproti dříve používaným konfiguracím řadu výhod. Není nutné jej spouštět cizím zdrojem, protože pracuje při téměř konstantní frekvenci. Po zahřátí horkého prostoru stačí pouze nepatrná výchylka či vibrace, aby se systém sám rozběhl a ustálil. Schopnost samočinného spouštění je velmi důležitá a odlišuje tento typ konstrukce od kinematických motorů, které ji nemají. Díky absenci klikového mechanismu nepůsobí mezi pístem a válcem žádné boční síly. Tím je vyřešen problém s mazáním a opotřebáváním tohoto prostoru. Samotná pracovní látka slouží k mazání a nedochází tak k ucpávání regenerátoru mazadlem jako u dřívějších konstrukcí. Hermetické uzavření pracovní látky v motoru zvyšuje jeho životnost a spolehlivost. Velké množství strojů však vyžaduje pro svůj chod rotační pohyb hřídele a jeho absence u motoru s volným pístem tak může být vnímána jako nevýhoda [10].

V současnosti slouží Stirlingovy motory s volným pístem nejen chlazení popsanému v dalších kapitolách, ale také k výrobě elektrické energie. Při přeměně tepelné energie ze Slunce dosahuje nejvyšší účinnosti v porovnání s fotovoltaickými panely i dalšími solárními systémy. Mezi další aplikace patří výroba elektrické energie spalováním plynů s nízkou výhřevností nebo plynů těžko spalitelných v motorech s vnitřním spalováním [8].

5 Využití motoru jako chladicího zařízení

Podobně jako Stirlingův motor, který nedokázal konkurovat motorům s vnitřním spalováním, chladicí jednotky na principu Stirlingova cyklu nedokázaly konkurovat běžným kompresorovým jednotkám. Našly však své uplatnění v kryogenním chlazení. Kryogenika, nebo také technika hlubokých teplot, se zabývá jevy při teplotách zhruba od 125 K do absolutní nuly. Hranice mezi běžným a kryogenním chlazením není přesně stanovena, ale nejčastěji se používá právě teplota pod 125 K, neboť většina průmyslově používaných plynů (např. helium, vodík, neon, dusík, argon, kyslík, vzduch) má bod varu pod touto teplotou. Naopak látky používané při běžném chlazení (např. čpavek, oxid uhličitý, oxid siřičitý, metylchlorid) mají bod varu nad touto teplotou. Kryogenní chlazení bylo využíváno především v kosmonautice a armádních systémech. Nyní se postupně rozšiřuje i do dalších průmyslových odvětví. Ve strojírenství se kryogenním tepelným zpracováním upravuje struktura oceli. V rámci chemického průmyslu bývá toto chlazení užíváno ke zkapalnění či separaci plynu. Velké množství tekutého dusíku je spotřebováno v potravinářství na mražení potravin při jejich transportu. Ve zdravotnictví se kryogenika používá pro uchování krve a kostní dřeně a také ke chlazení supravodivých magnetů, které jsou součástí přístroje na nukleární magnetickou rezonanci [13].



Obrázek 17: Rozsah teplot pro různá komerční chladicí zařízení (upraveno [14])

5.1 Komerční kryogenní jednotky

V současné době existuje velké množství společností, zabývajících se kryogenikou. Zařízení se rozdělují zejména dle hodnoty teploty, které jsou schopna dosáhnout (viz obrázek 18). V případě Stirlingových jednotek převažují na trhu 2 varianty. Kryogenní jednotky malých rozměrů pro chlazení elektronických senzorů a kryogenní skříňové boxy pro chlazení laboratorních vzorků. V obou případech je využívána konstrukce motor s volným pístem. Pro znázornění prvního typu byla zvolena jednotka společnosti Sunpower s označením CryoTel® GT. Zařízení o délce 276 mm a průměru 83 mm s příkonem 240 W dosáhne teploty 40 K [3].



Obrázek 18: CryoTel® GT [3]

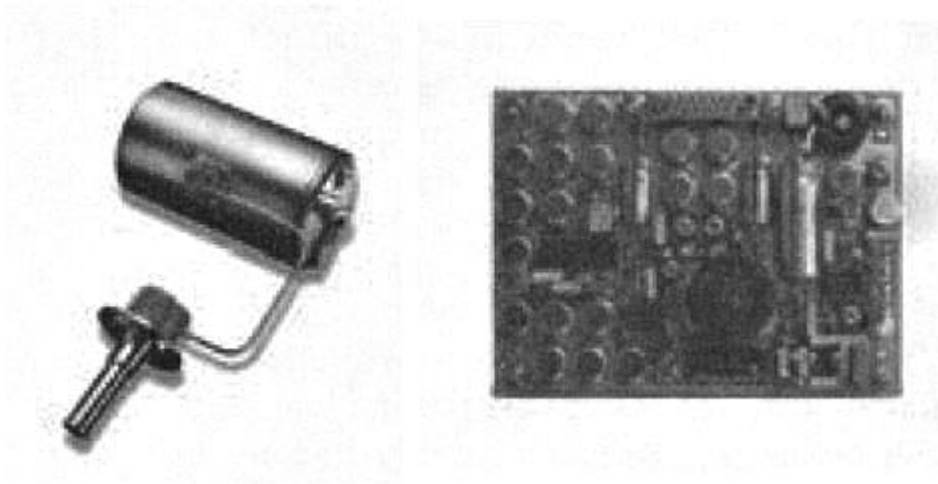
Druhý typ zařízení znázorňuje chladicí box SU780XLE společnosti Stirling Ultracold (viz obrázek 19). Jednotka s objemem 780 l umožňuje chlazení v rozmezí 187 až 250 K, s příkonem 1200 W. Dle výrobce spotřebuje tato jednotka až o 2/3 méně energie v porovnání s kompresorovými jednotkami o stejných parametrech. Tyto dva typy patří mezi nejrozšířenější, na trhu ovšem existují i komerční *split-type* varianty a začínají se objevovat první pulzní trubice, popisované v dalších kapitolách [15].



Obrázek 19: Stirling Ultracold SU780XLE [15]

5.2 Kryogenní jednotky v armádních systémech

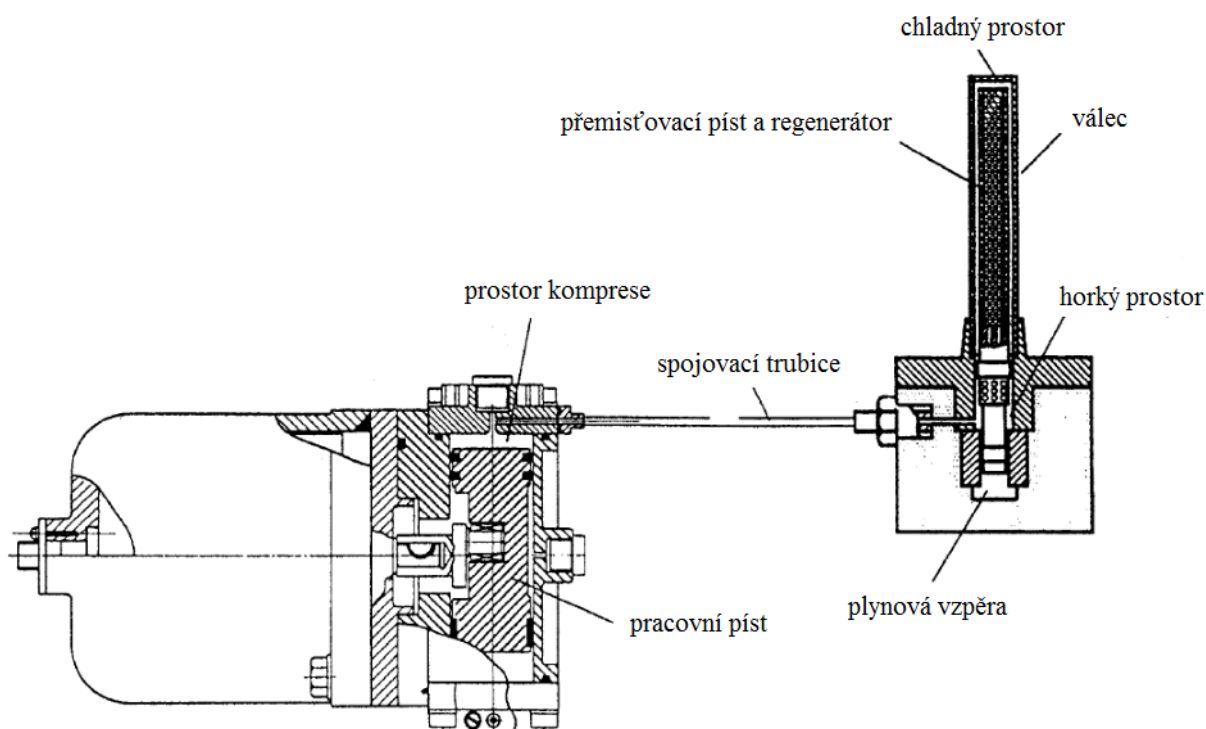
Kryogenní jednotky nasazené v rámci armádních systémů nesou označení taktické (*tactical Stirling coolers*). Nejčastěji se jedná o zařízení velmi malých rozměrů (do 150 mm bez zahrnutí kompresoru), s hmotností kolem 3 kg a s vysokou odolností vůči nepříznivým vlivům pracovního prostředí. Pro okamžité nasazení je důležitá schopnost rychlého chlazení, kdy pracovní látka ve formě kapalného helia dosáhne teploty 77 K za méně než 180 sekund. Operační životnost dosahovala řádů pouze stovek hodin. Nejnovější výzkum a vývoj v oblasti ložisek, těsnění a také dostupnost vysoce kvalitních maziv umožňuje optimalizaci chladičů jednotky na takovou úroveň, že je schopna pracovat několik let bez údržby. Takové jednotky ale nachází uplatnění především ve vesmírných projektech. V rámci armádních systémů je preferována nižší cena na úkor životnosti, zejména pro chlazení naváděcích senzorů raket, neboť se jedná o zařízení na jedno použití [16].



Obrázek 20: Taktická jednotka a chlazená elektronická deska [16]

5.2.1 Split-type Stirlingova jednotka

Tato chladicí jednotka bývá označována jako hlavní alternativa k chladicím systémům s kapalným heliem a nejčastěji se užívá v armádních zařízeních. Pracovní náplň tvoří helium v plynném stavu. Označení *split-type* vychází z konstrukce. Část s pracovním pístem, zde označovaná jako kompresor, je oddělena od části s přemísťovacím pístem spojovací trubici (viz obrázek 21). Toto uspořádání významně snižuje vibrace v chladném prostoru a umožňuje chladit citlivé elektro-optické senzory bez jejich ovlivňování [14].

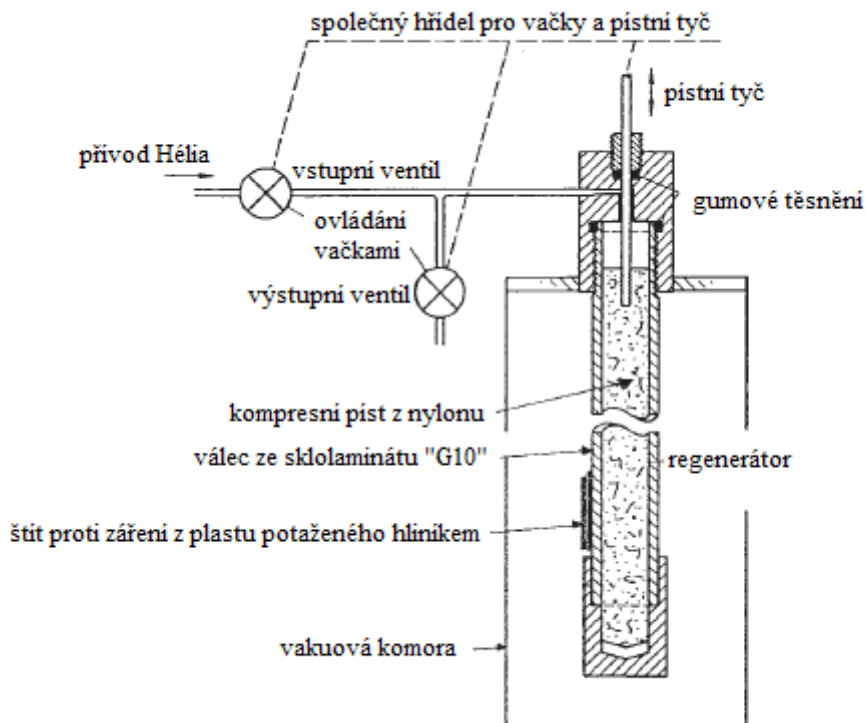


Obrázek 21: Schéma split-type jednotky (upraveno [14])

Na obrázku 20 je typická taktická jednotka. Kompresor má v průměru 76 mm a je dlouhý 138 mm. Část s chladným prostorem má v průměru 55 mm a délku 88 mm. Váží 3,4 kg a s příkonem 1,75 W dosáhne v prostředí s teplotou 28 °C pracovní látka teploty 67 K [16].

5.2.2 Chladicí jednotka SQUID senzoru

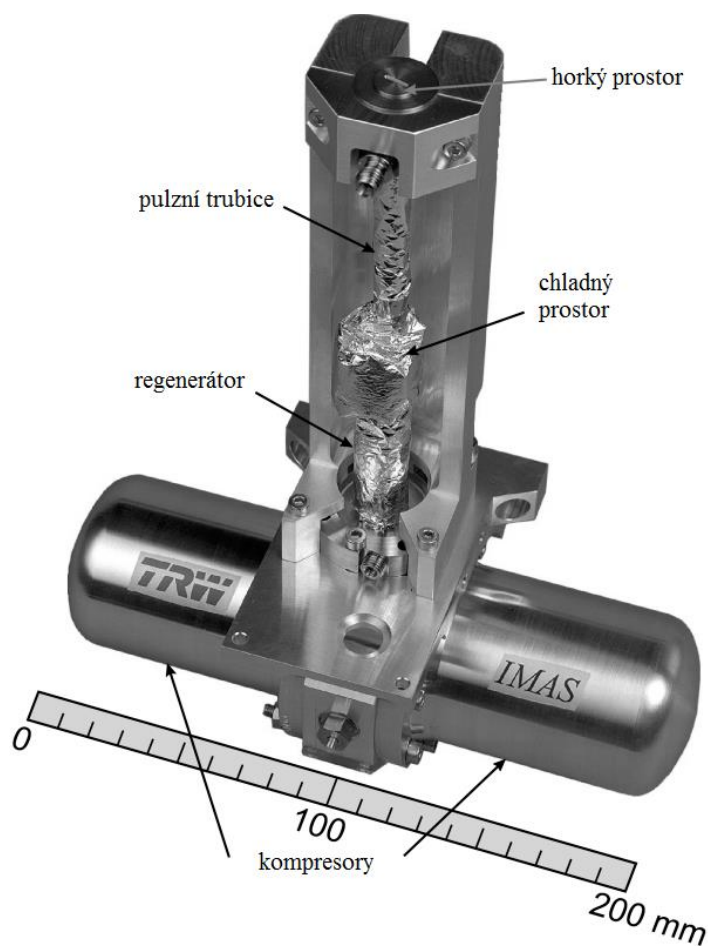
SQUID senzor neboli supravodivé kvantové interferenční zařízení (*superconducting quantum interference device*) slouží k měření magnetických polí až na hranici 10^{-15} T. V armádních systémech se používá k detekci magnetických anomálií, které umožňují nalezení ponorek z námořních hlídkových letadel. V civilním sektoru slouží především ve zdravotnictví pro záznam mozkových signálů a v geologii při průzkumu ložisek. Na *split-type* jednotku ke chlazení tohoto senzoru jsou kladeny specifické požadavky. Těch je dosaženo pomocí moderních materiálů. Výměník tepla musí kromě běžné funkce zajistit ochranu před elektromagnetickým rušením a elektronickým šumem. Všechny části musejí být zhotoveny z nemagnetických materiálů, aby se zabránilo ovlivňování senzoru. Konkrétní materiály jsou popsány na obrázku 22. Tato jednotka pracuje na frekvenci 1 Hz a dosáhne teploty 50 K v méně než 4 hodinách [14].



Obrázek 22: Schéma jednotky chlazení SQUID senzoru (upraveno [14])

5.3 Kryogenní jednotky pro vesmírné mise

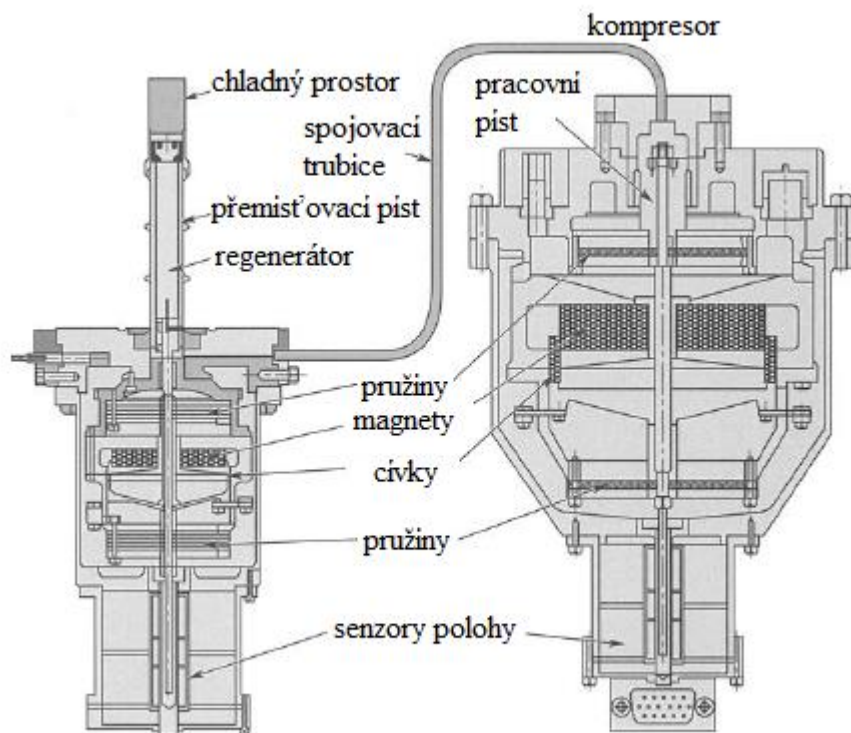
První zařízení pracující na Stirlingově cyklu bylo vyneseno do vesmíru v roce 1970. Jednalo se o komerční kryogenní jednotku upravenou pro krátkodobé experimenty. Následný vývoj zařízení pro vesmírné aplikace vycházel vždy z nejnovějších poznatků o Stirlingově motoru. V roce 1979 byly testovány 4 jednotky s rombickým pohonem vytvořené firmou Philips pro Univerzitu Johna Hopkinse. Střídavě pracovaly po dobu 5 let, než byl satelit zničen. První *split-type* varianty byly nasazeny v roce 1989 a jednalo se o upravené taktické jednotky. Následovalo několik let testování a optimalizace. Na zařízení pracující ve vesmíru jsou kladeny extrémně vysoké požadavky, především na spolehlivost. Ta vyžaduje pravděpodobnost bezporuchového provozu po navrženou životnost a pro vesmírné aplikace přesahuje 99 %. Životnost souvisí zejména s opotřebením materiálu při pohybu mechanismu. Motor s volným pístem obsahuje pouze 2 pohyblivé součástky, pracovní a přemísťovací píst, přesto jeho životnost nepřesahovala 7 000 hodin provozu při zachování požadované spolehlivosti. Tento nedostatek u taktických jednotek vedl k dalšímu vývoji a k inovaci konstrukce se zaměřením na zvýšení životnosti [16].



Obrázek 23: Pulzní trubice pro chlazení infračervených senzorů satelitu (upraveno [17])

5.3.1 Oxford-type kryogenní jednotka

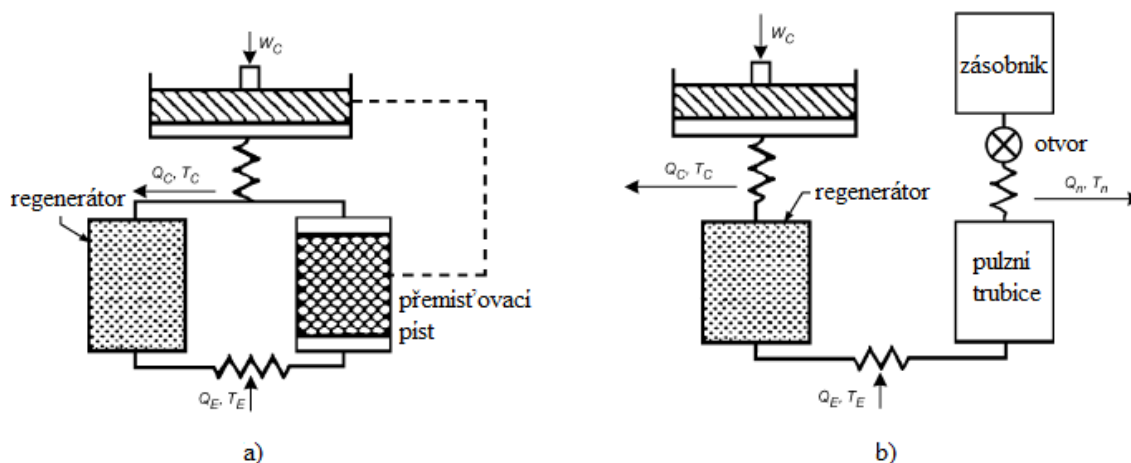
Na univerzitě v Oxfordu byla koncem 70 let, za spolupráce ústavu inženýrské mechaniky pod vedením Dr. Daveyho a ústavu fyziky atmosféry pod vedením Dr. Warreta, navržena, sestrojena a otestována kryogenní jednotka s dlouhou životností. Vychází ze *split-type* konstrukce a z provedených úprav vychází i současná zařízení (viz obrázek 24). Mezi hlavní inovace patřily membránové pružiny (*flexure springs*). Mají velkou radiální ale malou axiální tuhost a při vychýlení na ně působí pouze nízké mechanické napětí. Pružiny jsou navrženy a vyrobeny z takového materiálu, že dosahují v podstatě neomezené životnosti. Druhou inovací je velikost vůle mezi válcem a písty (*noncontacting gas-gap clearance seal*), která se mění v závislosti na poloze membránových pružin a na kompresním poměru. Tímto způsobem byl vyřešen problém s částicemi uvolňovanými při kontaktu pístů s válcem, které následně ovlivňovaly pracovní náplň a poškozovaly těsnění. Další vylepšení zahrnuje upravený lineární motor (kompresor) a hermetické uzavření pracovní látky, helia, při tlaku od 1 do 3,5 MPa. Tato vylepšení zvýšila životnost až na 15 000 hodin, tedy dvojnásobek životnosti původních *split-type* jednotek [16].



Obrázek 24: Schéma oxford-type jednotky (upraveno [16])

5.3.2 Pulzní trubice

Přemisťovací píst používaný ve Stirlingově motoru má několik nedostatků. Je zdrojem vibrací, často se opotřebovává a způsobuje ztráty při vedení tepla a při toku pracovní látky. V kryogenní jednotce označované jako pulzní trubice s otvorem (*orifice pulse tube*) byly tyto nedostatky vyřešeny odstraněním přemisťovacího pístu (viz obrázek 25). Pohybu plynu v souladu se změnami tlaku je dosaženo pomocí otvoru (*orifice*) a zásobníku (*reservoir*), ve kterém se uchovává plyn v polovině cyklu. Tento zásobník je dostatečně velký pro zanedbání oscilace tlaku, která v něm nastává během oscilačního toku pracovní látky.



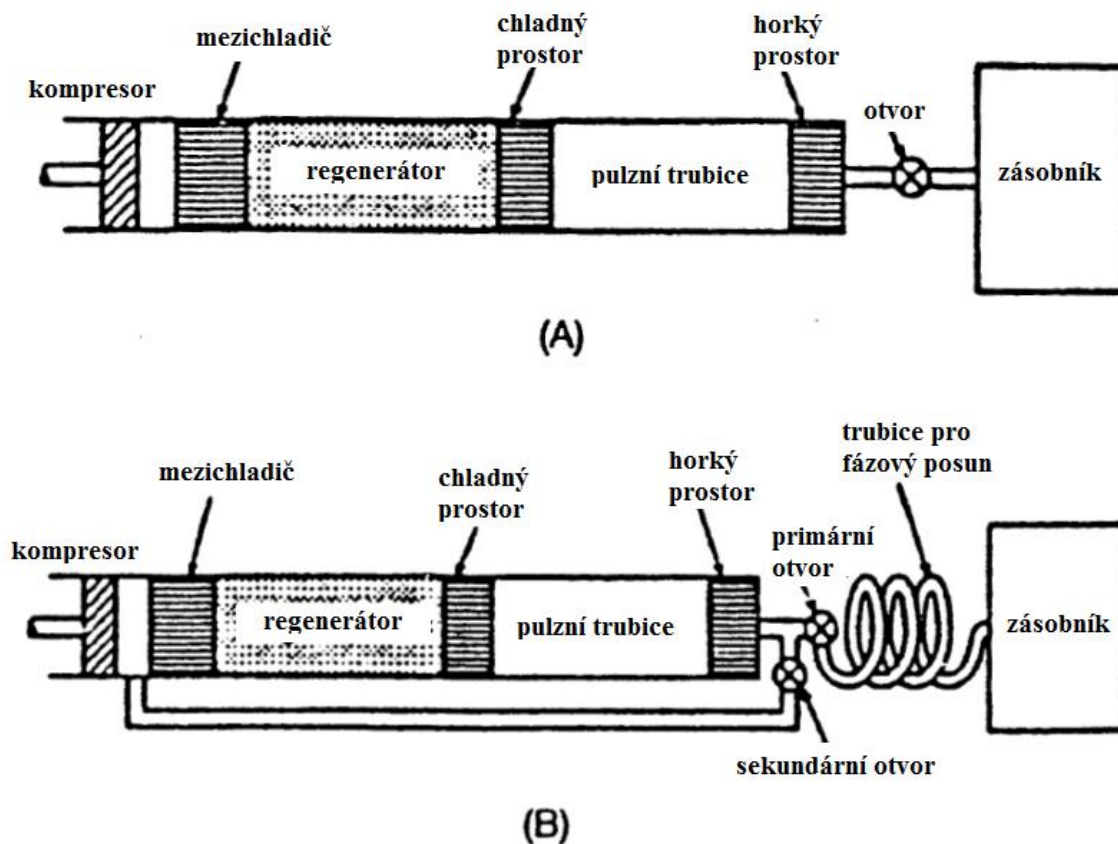
Obrázek 25: Schéma a) Stirlingovy jednotky, b) pulzní trubice s otvorem (upraveno [13])

Jako u mnoha dalších vynálezů v dějinách lidstva byl chladicí efekt pulzní trubice objeven náhodou. Na počátku 60. let pracovali vědci Gifford a Longworth ze Syrakuské univerzity v USA na vývoji chladicí jednotky, v současnosti označované jako Gifford-McMahon. Všimli si, že při oscilaci tlaku v trubici se uzavřený konec silně ohřál a otevřený konec se ochladil. Po dalším výzkumu a optimalizaci geometrie byli schopni dosáhnout teploty 124 K při chlazení horkého konce vodou. Tento prototyp se skládal pouze z trubice o průměru 25 mm, operoval při frekvenci 1 Hz a neobsahoval otvor ani zásobník. Bývá proto označován jako základní pulzní trubice (*basic pulse tube*). Protože účinnost tohoto zařízení byla velmi nízká, další vývoj byl ukončen [17].

Na počátku 80. let byl pod vedením J.C. Wheatleyho v Národní laboratoři Los Alamos v USA zkoumán přenos tepla při mnohem vyšších frekvencích než u původního prototypu. Při frekvencích mezi 500 a 1000 Hz dochází v krátké trubici k rezonanci a vzniku stojatého vlnění. Při takto vysokých frekvencích je přestup tepla v heliu v řádech desetin milimetru. Proto jsou v trubici umístěny blízko sebe destičky. Tato rezonující pulzní trubice se také nazývá termoakustická chladicí jednotka [17].

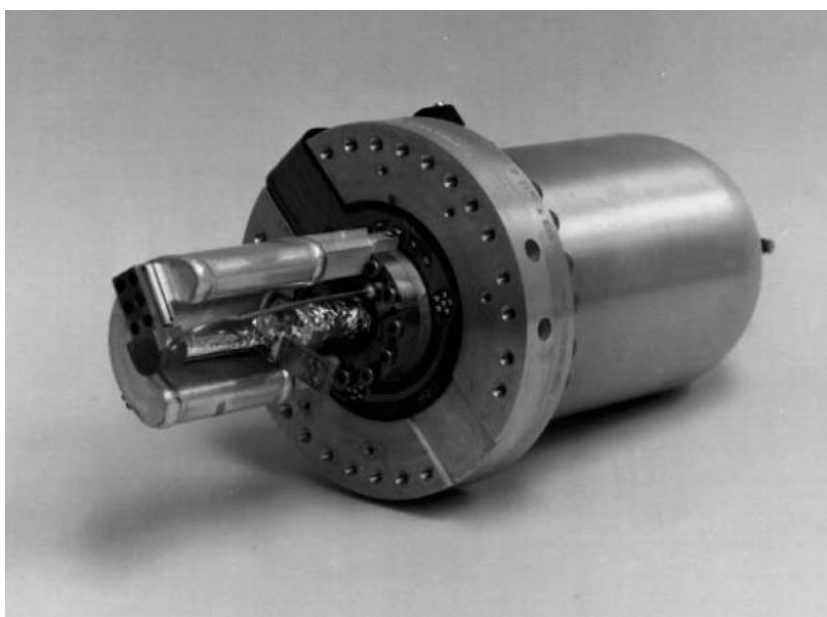
V roce 1984 představil E. I. Mikulin z Moskevské státní univerzity pulzní trubici s otvorem umístěným blízko horkého prostoru. Z tohoto konceptu vycházejí i současná zařízení. O rok později představil Dr. Radebaugh z Národního institutu standardů a technologie (dále jen NIST) v USA jednotku s otvorem umístěným mimo trubici. Horký prostor poté usměrňoval tok pracovní látky. Otvor tvořil jehlový ventil pro snazší regulaci toku plynu. Tato konfigurace dosáhla teploty 60 K [17].

Dalších několik let byly prováděny studie v NIST pro lepší porozumění principů činnosti zařízení. Termodynamika, běžně používaná k popisu systému jako například kompresorová odpařovací zařízení, v tomto případě nestačila. Bylo nutné ji rozšířit o termoakustiku pro vysvětlení oscilačního pohybu v trubici. Pochopení principu vedlo mimo jiné i ke zjištění, že jednotka nevyžaduje přenos tepla skrze stěnu trubice. Naopak má vyšší účinnost, pokud k němu nedochází. V roce 1990 dosáhlo zařízení vyvinuté v NIST teploty pod 40 K. S lepším porozuměním procesů a další optimalizací regenerátoru, trubice a výměníků tepla bylo v tomto roce rovněž dosaženo účinnosti shodné s kryogenními jednotkami na principu Stirlingova cyklu při srovnávací teplotě 80 K. Do této doby měly pulzní trubice účinnost 3-5× nižší a nemohly tak běžně používaným jednotkám konkurovat. V tomto roce také představili S. Zhu, P. Wu a Z. Chen z univerzity Xian Jiaotong v Číně koncept s druhým otvorem. Pojmenovali jej pulzní trubice s dvojitým vtokem (*double-inlet pulse tube*). Druhý otvor umožňuje malé části plynu (zhruba 10 %) obejít regenerátor a pohybovat se přímo mezi kompresorem a horkým prostorem (viz obrázek 26). Obchvat snižuje množství plynu procházející regenerátorem, proto jsou v regenerátoru nižší ztráty než u pulzní trubice s jedním otvorem. Trubice pro fázový posun (*inertance tube*) bývá tvořena dlouhou trubicí s malým průměrem a reguluje fázový posun mezi tokem plynu a změnami tlaku. Použití druhého otvoru vede ke zvýšení účinnosti, zejména při vyšších frekvencích, kdy dochází ke značným ztrátám. Na základě tohoto konceptu bylo sestrojeno jedno z prvních zařízení pro vesmírné mise. Kryogenní jednotka o délce 300 mm dosahovala teploty 80 K při příkonu pouhých 17 W (viz obrázek 27) [17].

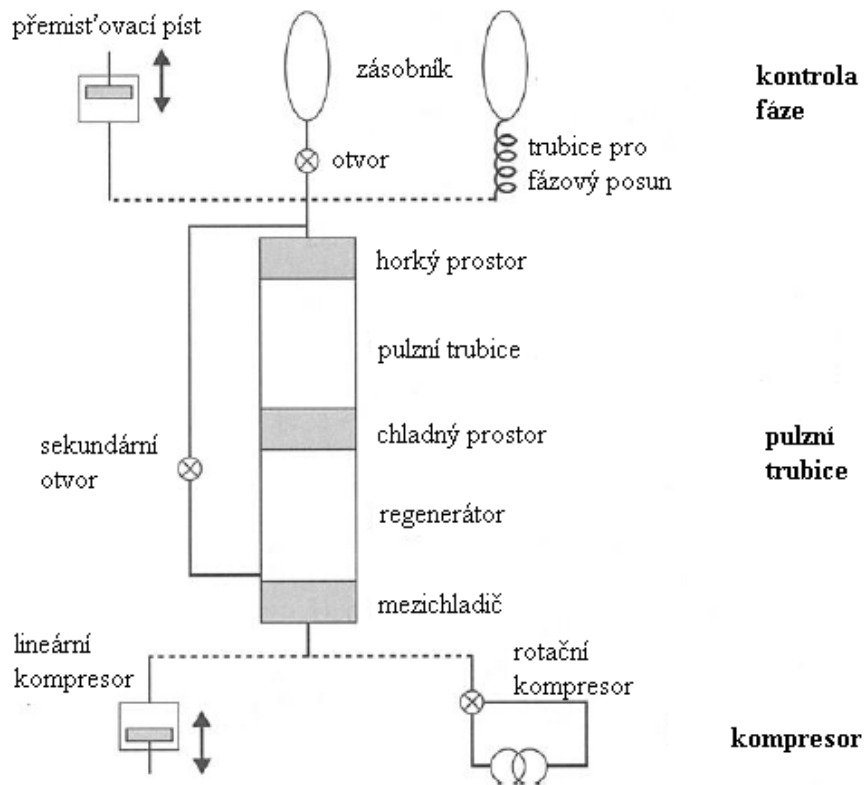


Obrázek 26: Schéma pulzní trubice a) s otvorem, b) s dvojitým vtokem (upraveno [5])

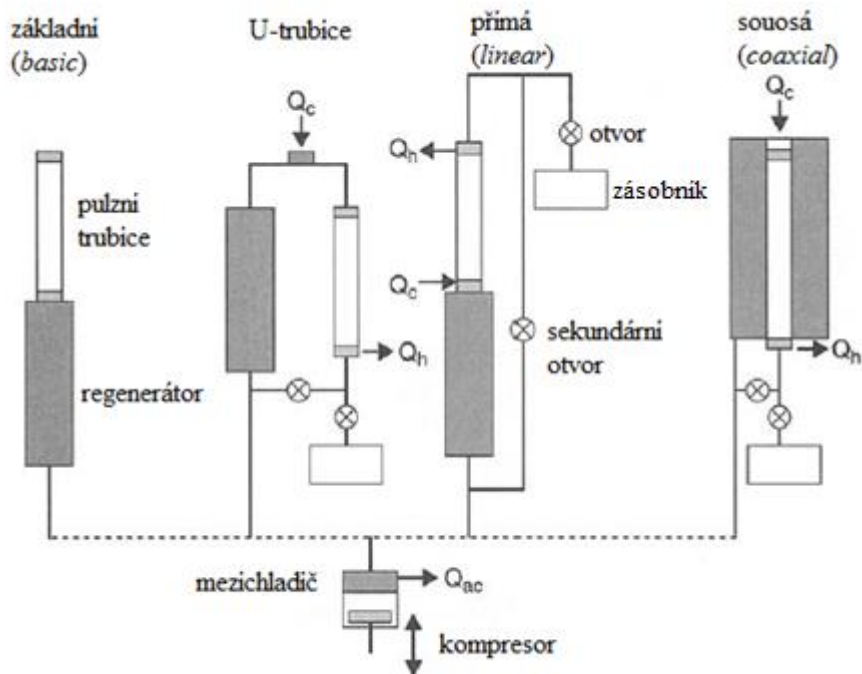
Ideální model pulzní trubice předpokládá adiabatickou kompresi a expanzi v trubici. V první fázi se píst pohybuje dolů a dochází ke kompresi pracovní látky v trubici. Ve druhé fázi dosáhne tlak v trubici vyšších hodnot než tlak v zásobníku, v důsledku zahřátého, stlačeného plynu. Tento rozdíl tlaků způsobí tok plynu skrze otvor do zásobníku. Dochází k výměně tepla s okolím v horkém prostoru na jednom konci trubice. Tok plynu ustane v momentě vyrovnání tlaků. Ve třetí fázi se píst pohybuje nahoru a plyn v trubici adiabaticky expanduje. Ve čtvrté fázi prochází plyn ze zásobníku skrze otvor a vytlačuje ochlazený plyn o nižším tlaku k chladnému prostoru na konci trubice. Při průchodu chladným prostorem absorbuje plyn teplo z vnějšího ochlazovaného předmětu. Tok plynu ustane v momentě vyrovnání tlaku. Pak se cyklus opakuje. Funkce regenerátoru je stejná jako u Stirlingova motoru. Samotná trubice slouží k oddělení procesů na obou koncích. Proto musí být dostatečně dlouhá, aby se plyn z horkého prostoru na jednom konci nedostal až na konec druhý, než se obrátí směr toku. Stejně tak se plyn z chladného prostoru nikdy nedostane do horkého prostoru. Plyn v prostřední části trubice zůstává vždy v trubici a způsobuje teplotní gradient, který konce odděluje. Zjednodušeně řečeno, plyn uvnitř trubice lze rozdělit na tři části. Prostřední část se chová jako přemísťovací píst, který je tvořen plynem namísto pevného materiálu. Aby tato část pracovala správně a izolovala od sebe konce, je nutné minimalizovat turbulence uvnitř trubice. Z hlediska mechanického pohybu už pulzní trubice nemůže být jednodušší. Jedná se jen o otevřenou trubici, ale z hlediska termodynamiky a hydrodynamiky obsahuje extrémně složité procesy, které stále nebyly zcela popsány. Funkcí trubice je přenášet hydrodynamickou nebo akustickou sílu v oscilujícím plynu z jednoho konce na druhý skrze teplotní gradient s minimální ztrátou energie [17]. Konfigurace pulzní trubice záleží na oblasti aplikace. Volí se řešení fázové kontroly chladného prostoru, typ kompresoru a případně užití obtoku s druhým otvorem (viz obrázek 28). Pro jednotky pracující ve vesmíru je volen pro svoji životnost a spolehlivost lineární kompresor používaný rovněž v *oxford-type* jednotce. U komerčních zařízení, která se pomalu začínají objevovat na trhu, bývá nejčastěji používán rotační kompresor. Podobně jako jsou u Stirlingova motoru rozlišovány tři základní modifikace α , β , γ , dělí se pulzní trubice na přímou (*linear*), souosou (*coaxial*) a U-trubicí (viz obrázek 29) [16].



Obrázek 27: Pulzní trubice pro vesmírné mise [17]



Obrázek 28: Schéma možných konfigurací pulzní trubice (upraveno [16])

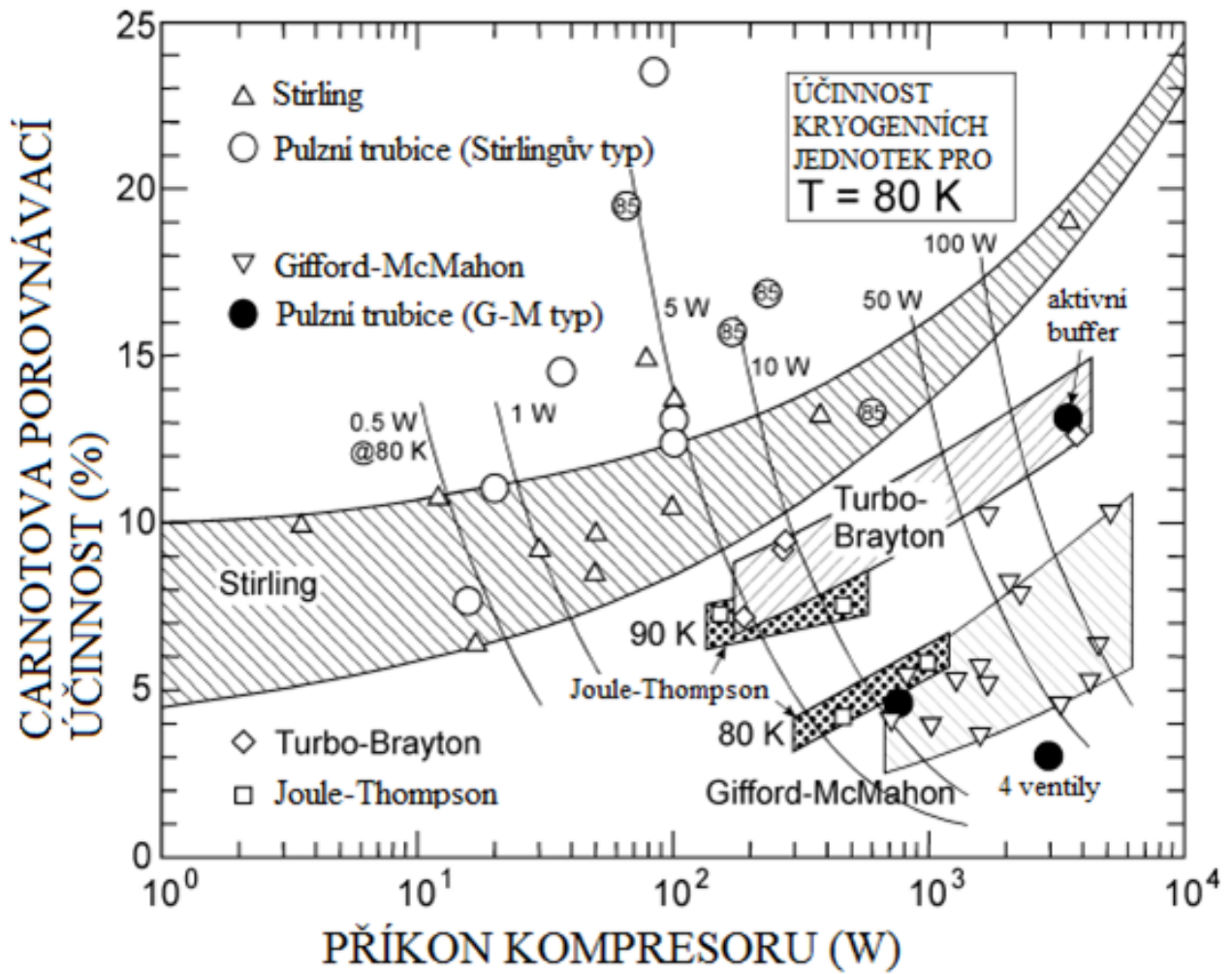


Obrázek 29: Schéma základních modifikací (upraveno [16])

DISKUSE

Srovnání Stirlingových kryogenních jednotek, pulzních trubíc a dalších typů chladicích zařízení nabízí graf na obrázku 30. Pro všechny typy platí stejná závislost. Jejich účinnost roste s velikostí zařízení, respektive s příkonem kompresoru. Rovněž je patrné, že pulzní trubice dosahují stejné nebo dokonce vyšší účinnosti jako Stirlingovy jednotky. Z toho vyplývá, že pulzní trubice dosahují v současnosti, vzhledem ke své velikosti a pro teploty v rozmezí od 60 do 120 K, nejvyšší účinnosti ze všech srovnatelných jednotek. Bez přemísťovacího pístu v chladném prostoru mají méně pohyblivých částí než ostatní typy. S výjimkou zařízení typu Joule-Thompson, které také nemá v chladném prostoru pohyblivé součásti, dosahuje ovšem nižších účinností pro teploty pod 100 K. Hlavní výhodou pulzních trubíc jsou nižší vibrace a v důsledku toho vyšší spolehlivost. Jejich využití v komerční sféře zatím zahrnuje pouze malé jednotky podobné těm pro vesmírné aplikace. Uvažuje se však o jejich průmyslovém využití pro zkapalňování plynu a chlazení supravodivých magnetů. V současnosti ale není známa horní hranice pro užitečnou velikost pulzních trubíc. Existují 3 hlavní nevýhody, kvůli kterým ještě zcela nenahradily Stirlingovy jednotky a ostatní zařízení. První je citlivost proudění na gravitaci u trubíc s průměrem větším jak 10 mm. Proto musí být chladný konec vždy směrem dolů, s výjimkou ve stavu beztláče. Tímto je omezeno využití, při kterém by zařízení měnilo své pozice. Druhou nevýhodou je prostor nutný pro samotnou trubici. U většiny armádních systémů je přesně vymezeno místo, do kterého se musí vejít chladný prostor zařízení. Tyto parametry byly vytvořeny před mnoha lety, kdy se používaly pouze jednotky typu Stirling nebo Joule-Thompson. Aby mohly být nahrazeny, je nutné vyrobit pulzní trubici se stejně velkým chladným prostorem a stejným výkonem, což je v současné době stále problém. Třetí nevýhodou je systém regenerace, který využívá oscilaci tlaku. Ta způsobuje pohyb schránky chladného prostoru jeho rozpínáním a smršťováním. Ačkoliv jsou tyto vibrace o řád nižší než ty vytvořené přemísťovacím pístem, pro některé aplikace jsou i tak příliš velké. Příkladem mohou být vesmírné dalekohledy, kde za konstantního tlaku a pouze s rotačním pohybem pracují jednotky typu Turbo-Brayton. Vývoj v oblasti pulzních trubíc již dospěl do fáze, kdy začínají nahrazovat ostatní typy. S dalšími pokroky a zejména se snížením ceny lze očekávat vytvoření nových možností využití, především v oblasti supravodičů [17].

V úvodu označuji současnou dobu za druhou renesanci pro Stirlingovy motory. Ze získaných poznatků jsem ovšem dospěl k názoru, že v oblasti chlazení se spíše jedná o počátek jejich konce. Tak jako byly původní modifikace α , β , γ nahrazeny motory s volným pístem, budou velmi pravděpodobně nahrazeny tyto motory pulzními trubícemi. Tento vývoj považuji za zřejmý a nevyhnutelný. Po více než 200 let si však Stirlingovy motory, respektive v oblasti chlazení Stirlingovy kryogenní jednotky (*Stirling cryo-coolers*), uchovaly v názvu jméno svého vynálezce. To se nyní s nasazením pulzních trubíc (*pulse-tube cryo-coolers*) mění. V oblasti chlazení tak možná zůstane znám pouze Stirlingův cyklus, na jehož principu pulzní trubice pracují. Jedná se ovšem o vzdálenou budoucnost a podle dosavadního vývoje odhaduji, že se Stirlingovými kryogenními jednotkami se budeme setkávat ještě pár desítek let. A i pokud by se má vize naplnila a tento typ kryogenní jednotky upadl v zapomnění, stále tu budou Stirlingovy motory a nebo přinejmenším v komerční oblasti označení produktů za „Stirlingový“ jakožto symbol tradice a historie společnosti.



Obrázek 30: Srovnání různých typů kryogenních jednotek (upraveno [17])

ZÁVĚR

Cílem mé práce bylo provést rešerši konstrukcí Stirlingova motoru užívaných ke chlazení. První kapitola obsahuje stručnou historii vzniku a vysvětlení principu činnosti stroje. Ve druhé kapitole se zabývám Stirlingovým cyklem pro různé druhy zařízení a srovnávám ideální cyklus se skutečným cyklem, vytvořeným na základě výsledků měření na školním modelu motoru. Od třetí kapitoly popisují samotné konstrukce. Jejich varianty jsem rozdělil dle oblasti užívání na komerční jednotky, armádní systémy a jednotky pro vesmírné mise. U jednotlivých konstrukcí popisují jejich vznik, schéma a následně uvádím konkrétní kryogenní jednotku včetně technických parametrů a obrázku. Popisem 4 hlavních konstrukcí a následně ještě možných variant, které z nich vycházejí, považuji cíl práce za splněný. V rámci diskuse porovnávám jednotlivé konstrukční varianty mezi sebou a také s ostatními běžně užívanými typy kryogenních jednotek. Srovnání pro teplotu 80 K znázorňuje graf závislosti Carnotovy porovnávací účinnosti na příkonu kompresoru. Na základě získaných poznatků a těchto srovnání potom nastiňuji možný budoucí vývoj v oblasti chlazení pomocí Stirlingových kryogenních jednotek. Na téma Stirlingova motoru existuje značné množství cizojazyčné literatury, zejména anglické. Zdroje v českém jazyce jsou velmi omezené a proto i kromě samotné rešerše považuji za přínos mé práce rozšíření těchto zdrojů o překlady z anglické literatury. V tomto ohledu je především koncept pulzních trubíc novinkou. V případném pokračování práce bych se zaměřil právě na tuto konstrukci, neboť se jedná o zajímavé téma, které je v českém prostředí prakticky neznámé a nezpracované, v anglické literatuře však existuje velké množství zdrojů a právě tato konstrukce má do budoucna velký potenciál.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WALKER, G. *The Stirling engine*. Scientific American [online], 1973. ISSN 00368733. Dostupné z: doi:10.1038/scientificamerican0873-80
- [2] ORGAN, Allan J. *Stirling Cycle Engines: Inner Workings and Design*. [online], 2013. ISBN 9781118818428. Dostupné z: doi:10.1002/9781118818428
- [3] *AmetekSunPower* [online]. Athens, OH 45701, ©2018. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sunpowerinc.com/>
- [4] ORGAN, Allan J. *The air engine: Stirling cycle power for a sustainable future*. Woodhead Publishing, 2007. ISBN 9781845692315.
- [5] DINÇER, İbrahim a Mehmet KANOĞLU. *Refrigeration Systems and Applications* [online], 2011. ISBN 9781119230762. Dostupné z: doi:10.1002/9780470661093
- [6] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [7] CENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. *Thermodynamics An Engineering Approach* [online], 2013. ISBN 9788578110796. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- [8] MACHÁČEK, J. *Stirlingův termodynamický cyklus*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] URIELI, Israel a David M. Berchowitz. *Stirling Cycle Machine Analysis* [online]. Bristol: A.Hilger, 1984. ISBN 9780852744352.
- [10] WALKER, Graham a J R SENFT. *Free-Piston Stirling Engines*. [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985, ISBN 978-3-642-82526-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-82526-2_2
- [11] W. REDLICH a D. M. BERCHOWITZ. Linear dynamics of free-piston stirling engines. *Archive: Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering 1983-1988* [online], 1985. Dostupné z: doi:10.1243/PIME_PROC_1985_199_025_02
- [12] HYDER A.K., Wiley R. L., Halpert G., Flood D.J. a Sabripour S. *Spacecraft Power Technologies* [online]. World Scientific, 2000. ISBN 978-1-86094-117-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt003W07Q3/spacecraft-power-technologies/stirling-cycle>
- [13] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, Inc. *2018 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition)* [online], 2018. ISBN 978-1-939200-97-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011QY2Y1/ashrae-handbook-refrigeration/mixed-refrigerant-cascade>

- [14] JHA, A R. *Cryogenic Technology and Applications* [online]. Elsevier, 2006. ISBN 978-07506-7887-2.
Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCTA00008/cryogenic-technology/cryogenic-technology>
- [15] *Stirling Ultracold* [online], ©2019. [cit. 2019-05-17].
Dostupné z: <https://www.stirlingultracold.com/>
- [16] DONABEDIAN, Martin. *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume 2 - Cryogenics* [online]. American Institute of Aeronautics and Astronautics/Aerospace Press, 2003. ISBN 978-1-884989-14-8.
Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0046IFYA/spacecraft-thermal-control/stirling-coolers>
- [17] RADEBAUGH, Ray. Pulse Tube Cryocoolers. In: S. KAKAÇ, H. F. SMIRNOV a M. R. AVELINO, *Low Temperature and Cryogenic Refrigeration* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. ISBN 978-94-010-0099-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-010-0099-4_24

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A_0	práce	J
B	magnetická indukce	T
ϵ_C	chladičí faktor	–
ϵ_H	topný faktor	–
η_t	termická účinnost	–
p	tlak	Pa
Q	teplo, množství tepla	J
Q_1, Q_E	teplo, množství tepla přivedené při expanzi	J
Q_2, Q_C	teplo, množství tepla přivedené při kompresi	J
$Q_{reg.}$	teplo, množství tepla přivedené regenerátorem	J
s	měrná entropie	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	termodynamická teplota	K
T_E, T_H	termodynamická teplota expanze	K
T_{ref}	termodynamická teplota expanze	K
T_C	termodynamická teplota komprese	K
V	objem	m^3
W	práce	J
W_E	práce expanzní	J
W_C	práce kompresní	J

Zkratka

Vysvětlivka

COP	koeficient znásobení
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NIST	Národní institut standardů a technologie
mCHP	kombinovaný zdroj tepla a elektrické energie
SQUID	supravodivé kvantové interferenční zařízení
USA	Spojené státy americké

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Detail motoru s volným pístem [3]	1
Obrázek 2: Nákres Stirlingova motoru v patentu z roku 1816 [4]	2
Obrázek 3: Nákres předpokládané konstrukce [4]	3
Obrázek 4: Průběh jednoho cyklu (upraveno [7])	5
Obrázek 5: p–V a T–s diagram ideálního cyklu [8]	6
Obrázek 6: Stirlingův cyklus jako pohon a jako chladicí systém [8]	7
Obrázek 7: Stirlingův cyklus pro a) tepelné čerpadlo, b) chladicí zařízení [8]	9
Obrázek 8: p–V diagram skutečného cyklu	10
Obrázek 9: Schéma modifikace α [8]	11
Obrázek 10: Schéma modifikace β [8]	12
Obrázek 11: Schéma Modifikace γ [8]	13
Obrázek 12: Schéma motoru s rombickým mechanismem (upraveno [9])	14
Obrázek 13: Generátor GPU-3 firmy General Motors [9]	15
Obrázek 14: Motor s volným pístem profesora Bealea [10]	16
Obrázek 15: Schéma motoru s volným pístem (upraveno [11])	17
Obrázek 16: Průběh jednoho cyklu (upraveno [12])	18
Obrázek 17: Rozsah teplot pro různá komerční chladicí zařízení (upraveno [14])	20
Obrázek 18: CryoTel® GT [3]	21
Obrázek 19: Stirling Ultracold SU780XLE [15]	21
Obrázek 20: Taktická jednotka a chlazená elektronická deska [16]	22
Obrázek 21: Schéma split-type jednotky (upraveno [14])	23
Obrázek 22: Schéma jednotky chlazení SQUID senzoru (upraveno [14])	24
Obrázek 23: Pulzní trubice pro chlazení infračervených senzorů satelitu (upraveno [17])	25
Obrázek 24: Schéma oxford-type jednotky (upraveno [16])	26
Obrázek 25: Schéma a) Stirlingovy jednotky, b) pulzní trubice s otvorem (upraveno [13])	27
Obrázek 26: Schéma pulzní trubice a) s otvorem, b) s dvojitým vtokem (upraveno [5])	28
Obrázek 27: Pulzní trubice pro vesmírné mise [17]	29
Obrázek 28: Schéma možných konfigurací pulzní trubice (upraveno [16])	30
Obrázek 29: Schéma základních modifikací (upraveno [16])	30
Obrázek 30: Srovnání různých typů kryogenních jednotek (upraveno [17])	32