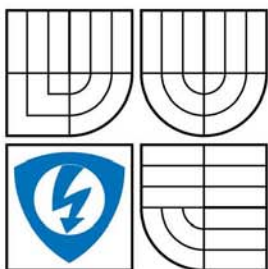


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TERMODYNAMICKÝ CYKLUS

THERMODYNAMIC CYCLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

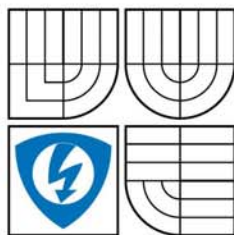
Ing. OTO ZATLOUKAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN MACHÁČEK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ing. Oto Zatloukal
Ročník: 3

ID: 18996
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Termodynamický cyklus

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Studium termodynamického cyklu, zejména sestávajícího se ze dvou izotermických a dvou izochorických dějů.
2. Matematický model pro výpočet a vykreslení p-V diagramu a T-S diagramu cyklu.
3. Kritické zhodnocení možnosti cyklus využít, zdůraznění předností, nedostatků.
4. Teoretickou studii stroje realizujícího uvedený cyklus a porovnání tohoto cyklu s jinými cykly, zejména Carnotovým.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 1.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jan Macháček

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ing. Oto Zatloukal

Bytem: 260, 69123, Ivaň

Narozen/a (datum a místo): 25.2.1978, Brno

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Termodynamický cyklus

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Jan Macháček

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Bibliografická citace práce:

ZATLOUKAL, O. Termodynamický cyklus. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 48 stran.

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

Děkuji Ing. Janu Macháčkovi za poskytnutí cenných rad a studijních materiálů, bez nichž by tato Bakalářská práce nemohla vzniknout.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Termodynamický cyklus

Ing. Oto Zatloukal

vedoucí: Ing. Jan Macháček

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis
Thermodynamic cycle

by
Ing. Oto Zatloukal

Supervisor: Ing. Jan Macháček
Brno University of Technology, 2009

Brno

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na studium termodynamických dějů a z nich sestávajících cyklů, zejména cyklu sestávajícího ze dvou izotermických a dvou izochorických dějů. Dále je proveden matematický model tohoto cyklu a jeho kritické zhodnocení.

Klíčová slova

termodynamický děj; termodynamický cyklus; isotermický děj; izochorický děj

Abstract

This work is focused on study of thermodynamic processes and cycles composed from this processes, chiefly the cycle composed from two isothermal and two isochoric processes. Additionally is done a mathematical model of the cycle and critical summary.

Key words

thermodynamic process; thermodynamic cycle; isothermal process; isochoric process

Obsah

Obsah.....	10
Seznam obrázků.....	11
Použité označení.....	12
1 Úvod.....	14
1.1 Termomechanika a rozvoj techniky.....	14
1.2 Tepelné stroje s vnějším přívodem tepla.....	14
1.3 Tepelné stroje s vnitřním přívodem tepla.....	14
1.4 Ostatní tepelné stroje.....	15
2. Termodynamické děje.....	16
2.1 Stav plynu a stavová rovnice.....	16
2.1.1 Ideální a reálný plyn.....	16
2.2 Vratné a nevratné děje.....	16
2.2.1 Izotermický děj.....	17
2.2.2 Izobarický děj.....	18
2.2.3 Izochorický děj.....	19
2.2.4 Adiabatický (izoentropický) děj.....	20
2.2.5 Polytropický děj.....	21
3 Termodynamické cykly.....	23
3.1 Základy termodynamických cyklů.....	23
3.2 Vratné a nevratné termodynamické cykly.....	23
3.3 Cykly konající nebo spotřebovávající práci.....	23
3.4 Termická účinnost oběhu.....	23
3.5 Carnotův cyklus.....	24
4 Matematický model pro výpočet a vykreslení zadaného cyklu.....	26
4.1 Výpočetní program „Matlab“.....	26
4.1.1 Stavba a funkce výpočetního programu.....	26
4.1.2 Vývojový diagram výpočtového programu.....	34
4.2 Výpočetní program formát „exe a html“.....	36
4.2.1 Výpočetní program ve formátu spustitelné aplikace „vypočet.exe“.....	36
4.2.2 Výpočetní program ve formátu webové aplikace „html“.....	38
5 Kritické zhodnocení a realizace zadaného cyklu.....	43
5.1 Realizace a využití zadaného cyklu.....	43
5.1.1 Realizace jednotlivých dějů zadaného cyklu.....	43
5.1.2 Praktická realizace.....	44
5.2 Kritické zhodnocení.....	44
5.3 Praktické využití Stirlingova motoru.....	45
6 Závěr.....	46
Seznam použité literatury.....	47
Seznam příloh.....	48

Seznam obrázků

Obrázek 1. Izotermický děj v p-v a T-s diagramu.....	18
Obrázek 2. Izobarický děj v p-v a T-s diagramu.....	19
Obrázek 3. Izochorický děj v p-v a T-s diagramu.....	20
Obrázek 4. Adiabatický (izoentropický) děj v p-v a T-s diagramu.....	21
Obrázek 5. Polytropický děj v p-v a T-s diagramu.....	22
Obrázek 6. Carnotův cyklus v p-v a T-s diagramu.....	24
Obrázek 7. Stirlingův cyklus v p-v a T-s diagramu.....	26
Obrázek 8. Spuštění výpočtu a zadání vstupních dat.....	27
Obrázek 9. Chybové hlášení – parametr mimo rozsah.....	28
Obrázek 10. Chybové hlášení – spodní teplota je vyšší než horní.....	29
Obrázek 11. Správně zadaná vstupní data.....	29
Obrázek 12. Výpis vstupních dat.....	31
Obrázek 13. Výpis vypočtených hodnot.....	32
Obrázek 14. Vykreslení průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S.....	33
Obrázek 15. Spuštění výpočtu, zadání vstupních dat a výzva k opravě.....	37
Obrázek 16. Výpis dat výpočtu a vykreslení průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S.....	38
Obrázek 17. Seznam programů - zde pouze jeden.....	39
Obrázek 18. Zadání vstupních dat – příliš vysoká účinnost.....	40
Obrázek 19. Chybové hlášení.....	40
Obrázek 20. Zadání vstupních dat – správná data.....	41
Obrázek 21. Výpis dat výpočtu a vykreslení průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S.....	42
Obrázek 22. Stirlingův motor.....	44

Použité označení

Označení	Jednotka	Název
Q	J	Teplo
Q _o	J	Odvedené teplo
Q _p	J	Přivedené teplo
S	J·K ⁻¹	Entropie
S _p	J·K ⁻¹	Počáteční entropie
T	K	Teplota
T _C	K	Dolní pracovní teplota
T _{CS}	K	Střední teplota při odvodu tepla
T _H	K	Horní pracovní teplota
T _{HS}	K	Střední teplota při přívodu tepla
TT	K	Počáteční teplota pro výpočet termodynamického děje
V	m ³	Objem
V _C	m ³	Celkový objem válců
V _k	m ³	Objem kompresního prostoru
VV	m ³	Počáteční objem pro výpočet termodynamického děje
a ₀	J·kg ⁻¹	Měrná práce konaná během jednoho cyklu
c _p	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku
c _v	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná tepelná kapacita za stálého objemu
m	kg	Hmotnost
n	-	Polytropický exponent
n _r	-	Účinnost regenerace
n _t	-	Termická účinnost
n _{tC}	-	Termická účinnost Carnotova cyklu
p	Pa	Tlak
pp	Pa	Plnicí tlak
q	J·kg ⁻¹	Měrné teplo
q _C	J·kg ⁻¹	Měrné odvedené teplo
q _H	J·kg ⁻¹	Měrné přivedené teplo
r	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná plynová konstanta
s	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná entropie
s _p	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Měrná počáteční entropie
ss	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Počáteční měrná entropie pro výpočet termodynamického děje
v	m ³ ·kg ⁻¹	Měrný objem

η_t	-	Termická účinnost
η_{tC}	-	Termická účinnost Carnotova cyklu
κ	-	Adiabatický exponent

1 Úvod

1.1 Termomechanika a rozvoj techniky

Vědeckotechnický obor termomechaniky se zabývá studiem chování plynů, par a jejich směsí. Za posledních 200 let umožnily znalosti tohoto oboru obrovský rozvoj techniky a průmyslu, především zkonstruování tepelných strojů které umožňují přeměnit tepelnou energii na mechanickou práci.

1.2 Tepelné stroje s vnějším přívodem tepla

Mezi prvními byl vynález parního stroje jakožto tepelného stroje s vnějším přívodem tepla, tj. přívodu tepla z vnějšího zdroje, kde médium dostává tepelnou energii zvenku, nikoliv tedy vlastní reakcí média. Zpravidla nemění v průběhu pracovního cyklu své chemické složení. Parní stroj má velmi nízkou účinnost a poměrně velkou hmotnost a zástavbu vzhledem k dosaženému výkonu. Avšak ukázal směr, kterým se až do dnešní doby ubírá moderní energetika. Většina tepelných elektráren i elektrárny jaderné využívají princip ohřevu vody a její přeměnu na páru pomocí vnějšího zdroje tepla, tj. kotle na spalování paliv nebo jaderného reaktoru. Parní stroj byl postupně nahrazen parní turbínou, která při provozu v optimálním režimu dosahuje podstatně vyšších účinností a především výkony jedné jednotky dosahují řádově stovek megawattů.

1.3 Tepelné stroje s vnitřním přívodem tepla

Narozdíl od výše uvedených tepelných strojů s vnějším přívodem tepla u těchto strojů dochází v průběhu pracovního cyklu k získání tepelné energie z vnitřních změn média zpravidla spalováním směsi paliva se vzduchem, dochází tedy k většinou nevratným změnám chemického složení média. Aby byla zajištěna dlouhodobá dodávka energie, musí docházet k výměně náplně v tepelném stroji, tedy nasávání čerstvé směsi a odvodu spalin. Na tomto principu pracuje většina dnes používaných spalovacích motorů a spalovací turbíny. Spalovací motory mohou být různých konstrukcí (pístový spalovací motor s klikovým mechanismem nebo Wankelův spalovací motor s rotačními písty atd.), tak různých principů (zážehové, vznětové atd.), které mění tlakovou energii média na mechanickou energii. Pístový spalovací motor je dnes nejrozšířenějším tepelným strojem. Zatímco spalovací turbína přeměňuje kinetickou energii proudících spalin na energii mechanickou. Spalovací turbína dosahuje při provozu v optimálních podmínkách téměř stejné účinnosti jako spalovací motor, má však mnohem lepší parametr hmotnosti při přepočtu na jednotku výkonu, proto se hodí především do aplikací, které vyžadují vyšší výkony a pracují v ustálených režimech jako například elektrárny, pohonné jednotky námořních lodí, letadel atd.

1.4 Ostatní tepelné stroje

Mezi tyto stroje lze zařadit například pneumatické systémy, které mění mechanickou energii na tlakovou energii plynu a tuto zase na jiném místě mění zpět na energii mechanickou. I přesto, že si tyto stroje nemusí vůbec vyměňovat tepelnou energii s okolím (v praxi to však není možné díky ztrátám), lze je zahrnout mezi tepelné stroje, neboť k přeměně energie využívají termodynamických jevů spojených se změnou parametrů média tzv. stavů média.

2. Termodynamické děje

2.1 Stav plynu a stavová rovnice

V přírodě se látky vyskytují v různých skupenstvích (plynném, kapalném, pevném a plasma). V rámci jednotlivých skupenství můžeme dále rozlišovat různé stavy. Tyto stavy jsou popsány souhrnem určitých fyzikálních veličin. Mezi základní stavové veličiny řadíme tlak, teplotu a objem, další velmi užitečné stavové veličiny jsou např. entropie či entalpie. Vztah mezi jednotlivými fyzikálními veličinami je popsán stavovou rovnicí. Stavové veličiny vyjadřujeme obvykle malými písmeny, pokud se jedná o měrné veličiny vztažené např. na 1 kg látky nebo velkými písmeny vztažené již pro konkrétní množství m kg látky.

Stavová rovnice ideálního plynu pro vratné děje

$$p \cdot v = r \cdot T \quad (1)$$

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad (2)$$

2.1.1 Ideální a reálný plyn

Pro zjednodušení termodynamických dějů a výpočtů zavádíme pojem ideální plyn, tj. plyn, jehož částice na sebe navzájem nepůsobí, tedy při pohybu nevzniká tření mezi částicemi plynu ani mezi plynem a okolím např. pístem. Dále také plyn nemění svoje fyzikální vlastnosti, při nízkých teplotách nekapalní a netuhne. Takovéto předpoklady značně usnadňují výpočty termodynamických dějů. V praxi za běžných podmínek se obvykle užívané technické plyny jako vzduch, oxid uhličitý atd. chovají téměř jako ideální plyn, takže se při výpočtech nedopouštíme nijak závažných chyb.

Oproti tomu reálný plyn má celou řadu vlastností, které pokud bychom je chtěli zahrnout do výpočtů tyto značně komplikují. V praxi se v případech, kde je to opodstatněné, některé tyto vlastnosti přenášejí na ideální plyn. Nejčastěji se jedná o teplotní závislost tepelných kapacit. Takovýto plyn pak označujeme jako idealizovaný.

2.2 Vratné a nevratné děje

Termodynamické děje jsou pochody, při nichž látka (dále budeme předpokládat ideální nebo reálný plyn) mění stav. Základní dělení termodynamických jevů je na děje vratné a nevratné. Pro grafické znázornění jednotlivých dějů nebo i celých cyklů s výhodou využíváme grafů, na jejichž osy se vynášejí stavové veličiny. Nejčastěji používané jsou dva diagramy:

- pracovní (indikátorový) diagram – vyjadřuje závislost tlaku na objemu plynu, často se označuje jako p-V nebo p-v diagram.
- tepelný (entropický) diagram – vyjadřuje závislost teploty plynu na jeho entropii, často se označuje jako T-S nebo T-s diagram.

Za vratný děj považujeme děj, při kterém plyn přechází ze stavu „1“, který je popsán konkrétními hodnotami stavových veličin do stavu „2“, který je popsán konkrétními hodnotami stavových veličin odlišnými od stavu „1“, například zvýšení tlaku v uzavřené nádobě naplněné plynem po přivedení tepla. Pokud toto teplo zase odvedeme, plyn se vrátí zpět do stavu „1“ a bude mít stejné hodnoty stavových veličin jako na počátku celého děje. Základními vratnými ději jsou:

- izotermický děj (probíhá za konstantní teploty)
- izobarický děj (probíhá za konstantního tlaku)
- izochorický děj (probíhá za konstantního objemu)
- adiabatický (izentropický) děj (probíhá bez výměny tepla s okolím, entropie je konstantní)
- polytropický děj (koeficient polytropy je konstantní)

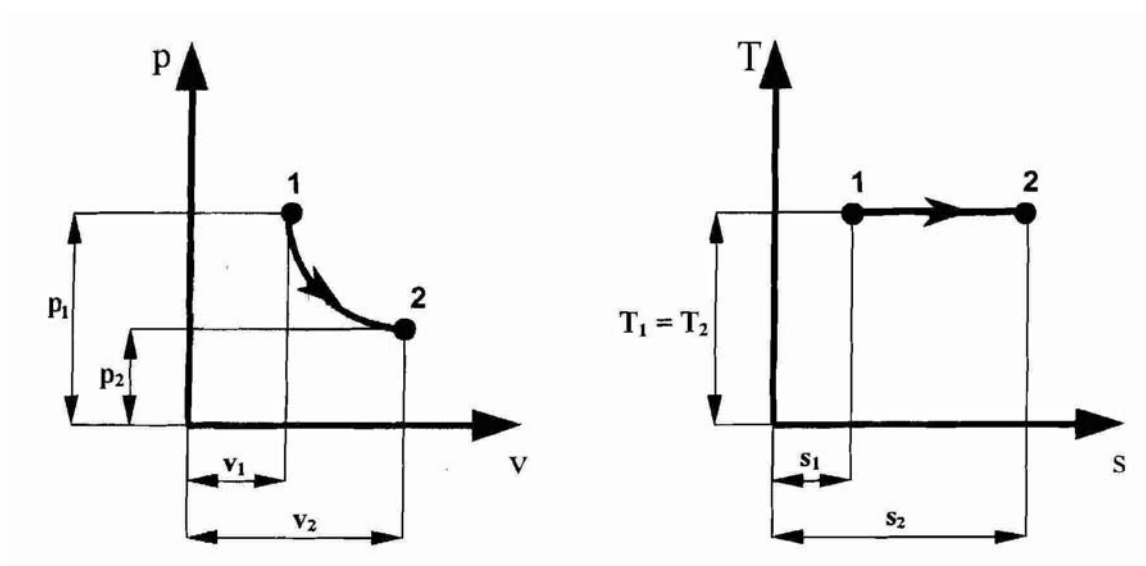
Jednotlivé děje jsou popsány v následujících kapitolách.

Nevratný děj je takový děj, kdy při přechodu z jednoho stavu do druhého stavu dojde k nevratným změnám stavových veličin vlivem vlastností reálného nebo idealizovaného plynu, například adiabatická expanze a komprese v tepelně izolované termodynamické soustavě. V tepelně izolované termodynamické soustavě nedochází v průběhu adiabatických změn k žádné výměně tepla s okolím, tedy v případě vratného děje by se tento projev snižením teploty plynu při expanzi a opětovným zvýšením teploty při kompresi. Změna entropie by byla nulová. Avšak vlastnosti reálného plynu, zejména ztráty třením při expanzi a kompresi způsobí, že děj se stane nevratným. Ztráty třením se přemění na teplo, takže při každém ději dojde ke zvýšení entropie. Teplo vzniklé třením nelze při adiabatickém ději žádným způsobem z této soustavy odejmout a děj je tedy nevratný. Mezi základní nevratné děje patří:

- vznik tepla třením
- difúze plynů
- škrcení plynů

2.2.1 Izotermický děj

Izotermický děj je děj, při kterém přechází plyn ze stavu „1“ popsaného stavovými veličinami s indexem 1 do stavu „2“ popsaného stavovými veličinami s indexem 2, přičemž teplota plynu se nemění.



Obrázek 1. Izotermický děj v p-v a T-s diagramu [2]

Probíhá-li děj zleva doprava tak, jak je znázorněno na obrázku 1, jedná se o izotermickou expanzi. Do soustavy je přiváděno teplo a soustava koná práci. Probíhá-li děj obráceně, tj. zprava doleva, jedná se o izotermickou kompresi. Ze soustavy je odváděno teplo a soustava spotřebovává práci.

Dosažením podmínky $T = \text{konst.}$ do stavové rovnice dostaneme rovnici izotermy která má následující tvar.

$$p \cdot v = \text{kont.} \quad (3)$$

Změna měrné entropie je vyjádřena vztahem.

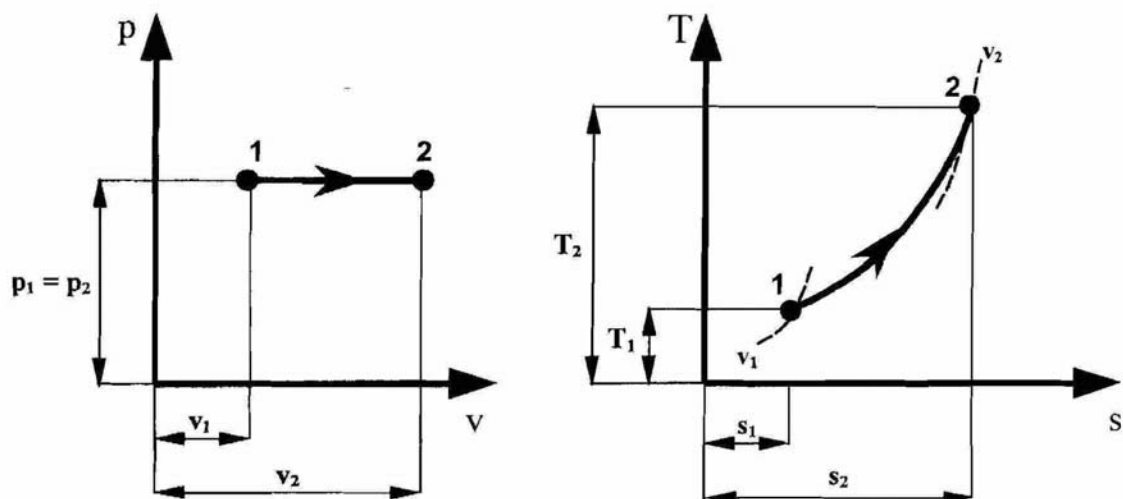
$$s_2 - s_1 = r \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = r \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4)$$

Měrné sdělené teplo je dáno vztahem.

$$q_{12} = T \cdot (s_2 - s_1) \quad (5)$$

2.2.2 Izobarický děj

Izobarický děj je děj, při kterém přechází plyn ze stavu „1“ popsaného stavovými veličinami s indexem 1 do stavu „2“ popsaného stavovými veličinami s indexem 2, přičemž tlak plynu se nemění.



Obrázek 2. Izobarický děj v p-v a T-s diagramu [2]

Probíhá-li děj zleva doprava tak, jak je znázorněno na obrázku 2, jedná se o izobarickou expanzi. Do soustavy je přiváděno teplo a soustava koná práci. Probíhá-li děj obráceně, tj. zprava doleva, jedná se o izotermickou kompresi. Ze soustavy je odváděno teplo a soustava spotřebovává práci.

Dosažením podmínky $p = \text{konst.}$ do stavové rovnice dostaneme rovnici izobary, která má následující tvar.

$$\frac{v}{T} = \text{kont.} \quad (6)$$

Změna měrné entropie je vyjádřena vztahem.

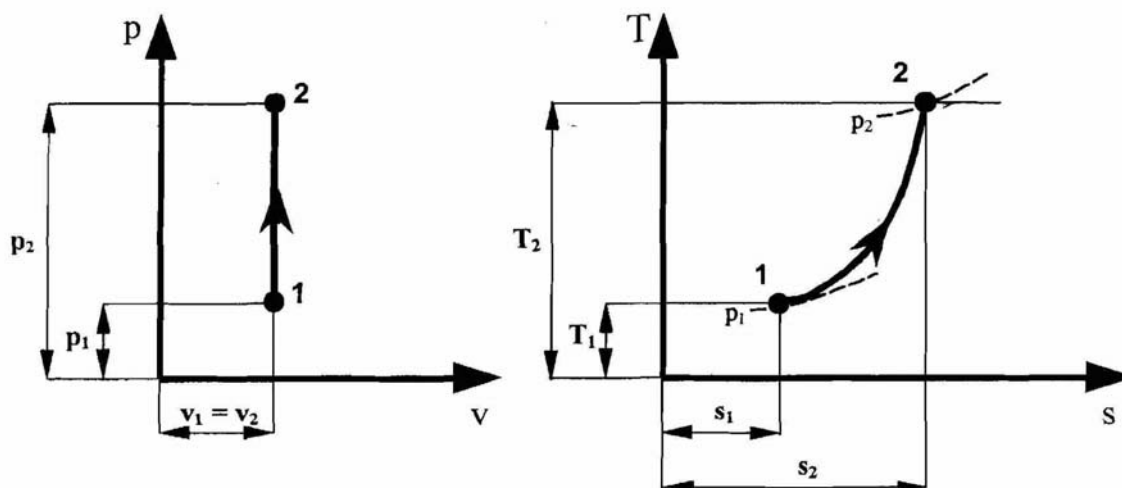
$$s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (7)$$

Měrné sdělené teplo je dáno vztahem.

$$q_{12} = c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (8)$$

2.2.3 Izochorický děj

Izochorický děj je děj, při kterém přechází plyn ze stavu „1“ popsaného stavovými veličinami s indexem 1 do stavu „2“ popsaného stavovými veličinami s indexem 2, přičemž objem plynu se nemění.



Obrázek 3. Izochorický děj v p-v a T-s diagramu [2]

Probíhá-li děj zleva doprava tak, jak je znázorněno na obrázku 3, jedná se o izochorickou kompresi. Do soustavy je přiváděno teplo, ale soustava nekoná práci, všechno přivedené teplo se spotřebuje na zvýšení vnitřní energie plynu. Probíhá-li děj obráceně, tj. zprava doleva, jedná se o izochorickou expanzi. Ze soustavy je odváděno teplo, soustava však nespotřebovává práci, pouze se snižuje vnitřní energie plynu.

Dosažením podmínky $v = \text{konst.}$ do stavové rovnice dostaneme rovnici izochory, která má následující tvar.

$$\frac{p}{T} = \text{kont.} \quad (9)$$

Změna měrné entropie je vyjádřena vztahem.

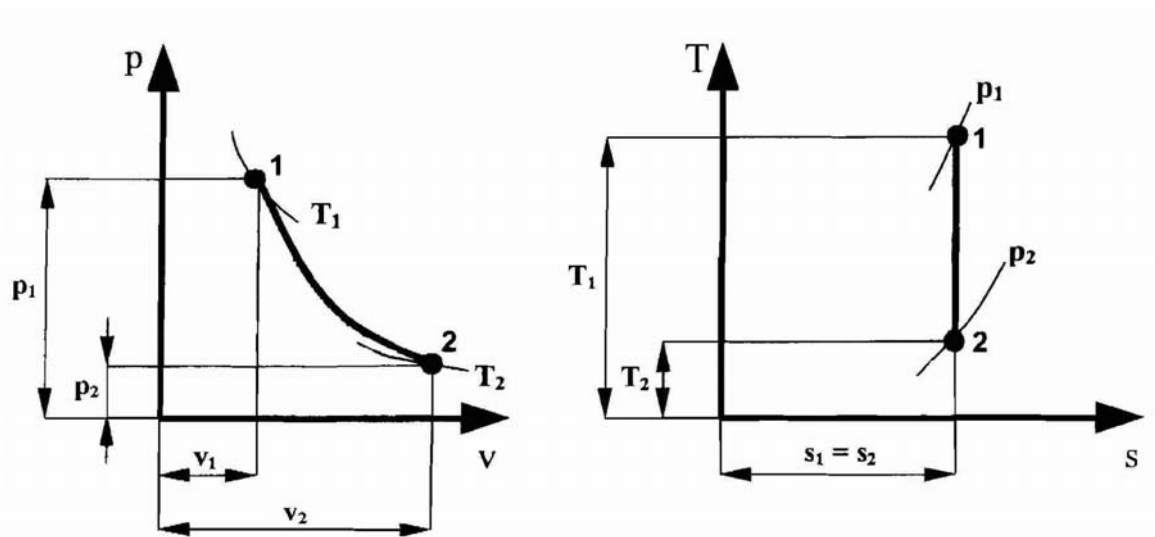
$$s_2 - s_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (10)$$

Měrné sdělené teplo je dáno vztahem.

$$q_{12} = c_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (11)$$

2.2.4 Adiabatický (izoentropický) děj

Adiabatický děj je děj, při kterém přechází plyn ze stavu „1“ popsaného stavovými veličinami s indexem 1 do stavu „2“ popsaného stavovými veličinami s indexem 2, přičemž nedochází k výměně tepla s okolím, entropie plynu se nemění.



Obrázek 4. Adiabatický (izoentropický) děj v p-v a T-s diagramu

Probíhá-li děj zleva doprava tak, jak je znázorněno na obrázku 4, jedná se o adiabatickou expanzi. Do soustavy není přiváděno ani odváděno teplo, soustava však koná práci, která je krytá snížením vnitřní energie plynu. Probíhá-li děj obráceně, tj. zprava doleva, jedná se o adiabatickou kompresi. Ze soustavy není odváděno ani přiváděno teplo, soustava však spotřebovává práci pro zvýšení vnitřní energie plynu.

Úpravou stavové rovnice pro podmínky $q = \text{konst.}$, $s = \text{konst.}$ dostaneme rovnici adiabaty, která má následující tvar.

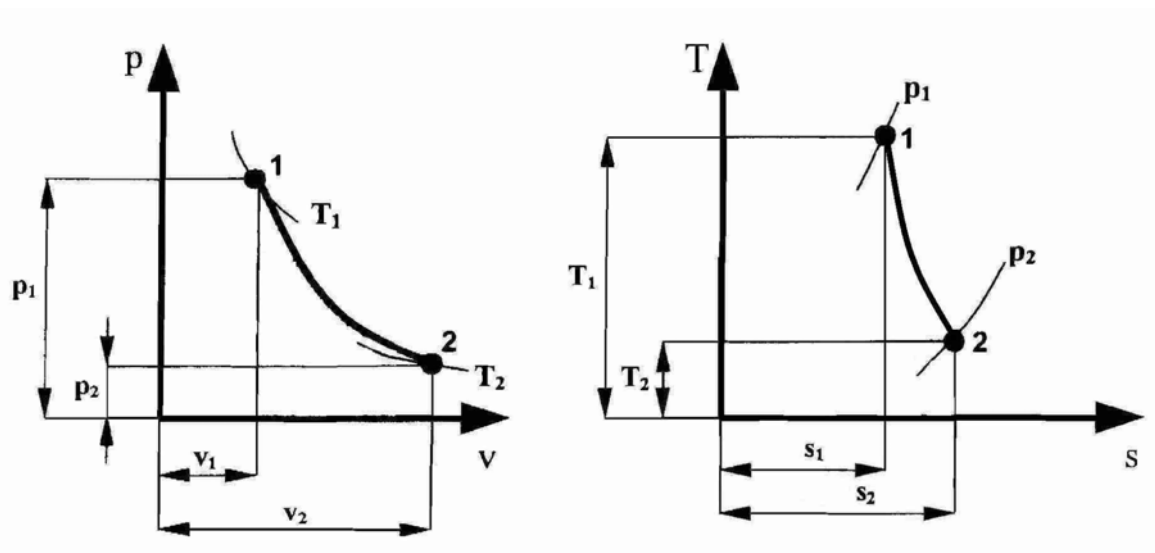
$$p \cdot v^{\kappa} = \text{kont.} \quad (12)$$

Poissonova konstanta κ je adiabatický exponent a je dána vztahem.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (13)$$

2.2.5 Polytropický děj

Polytropický děj je děj, při kterém přechází plyn ze stavu „1“ popsaného stavovými veličinami s indexem 1 do stavu „2“ popsaného stavovými veličinami s indexem 2, při němž se mění všechny stavové veličiny tak, že exponent polytropy je konstantní. Adiabatický a izotermický děj jsou mezními ději při kompresi nebo expanzi, které v praxi nelze dosáhnout.



Obrázek 5. Polytropický děj v p-v a T-s diagramu [2]

Probíhá-li děj zleva doprava tak, jak je znázorněno na obrázku 5, jedná se o polytropickou expanzi. Do soustavy je přiváděno teplo a soustava koná práci. Probíhá-li děj obráceně, tj. zprava doleva, jedná se o polytropickou kompresi. Ze soustavy je odváděno teplo a soustava spotřebovává práci.

Polytropický děj je popsán rovnicí polytropy, která má následující tvar.

$$p \cdot v^n = \text{kont.} \quad (14)$$

Exponent polytropy n lze vyjádřit takto.

$$n = \frac{\log \frac{p_1}{p_2}}{\log \frac{v_2}{v_1}} \quad (15)$$

3 Termodynamické cykly

3.1 Základy termodynamických cyklů

Termodynamický cyklus, někdy se nazývá také oběh, je sled několika na sebe navazujících termodynamických dějů, po jejichž vykonání se soustava dostane zpět do původního stavu. Na principu opakování těchto cyklů je pak možno postavit tepelný stroj, který právě podle termodynamického cyklu, který v něm probíhá, koná nebo spotřebovává práci, odevzdává či spotřebovává teplo. Právě na základě těchto vlastností lze určit základní kritéria pro dělení termodynamických cyklů.

3.2 Vratné a nevratné termodynamické cykly

Vratný cyklus je složen pouze z vratných dějů. Vratné děje nelze v praxi realizovat, jsou to děje výhradně teoretické, tudíž i vratné cykly jsou v praxi nerealizovatelné a jsou tedy cykly teoretickými. Přesto však pro zjednodušení velmi často uvažujeme při popisu cyklu reálného stroje jako by byl složen z vratných dějů. Tato úvaha značně zjednoduší termodynamické výpočty a chyby, kterých se dopustíme lze buď přímo zanedbat nebo což se provádí častěji do výpočtů zahrnout pomocí různých koeficientů určených měření na podobném tepelném stroji.

Nevratný cyklus obsahuje alespoň jeden nevratný děj.

3.3 Cykly konající nebo spotřebovávající práci

Termodynamické cykly konající práci se nazývají přímé cykly nebo také cykly tepelných motorů. Tyto cykly mění tepelnou energii na mechanickou práci, realizují se například ve spalovacích motorech nebo turbínách.

Termodynamické cykly spotřebovávající práci se nazývají cykly nepřímé, obrácené nebo také cykly tepelných pracovních strojů. Tyto cykly spotřebovávají mechanickou práci, realizují se například v kompresorech a tepelných čerpadlech.

3.4 Termická účinnost oběhu

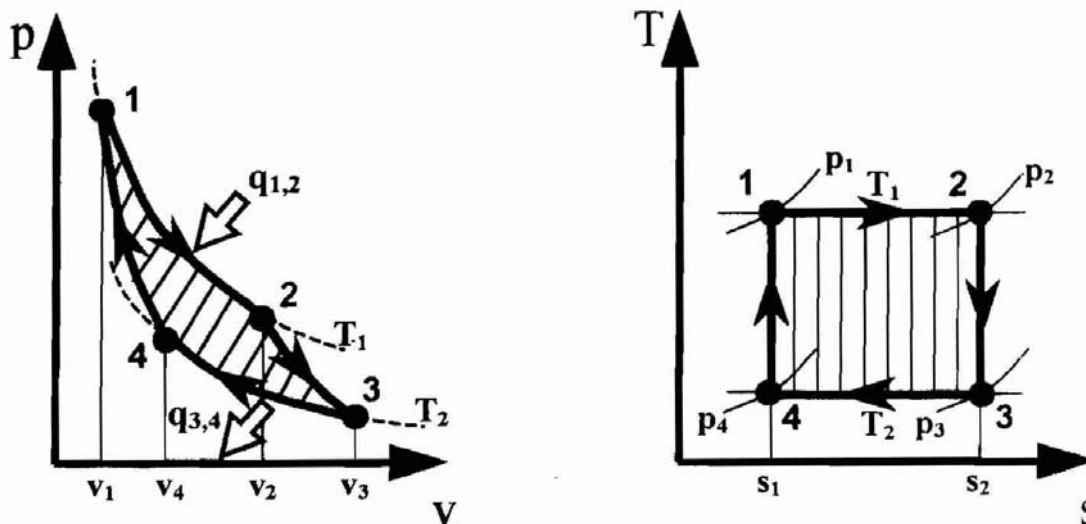
Termická účinnost oběhu je základní parametr oběhu a vyjadřuje míru dokonalosti cyklu realizujícího se v daném tepelném stroji, charakterizuje nám míru využití energie, kterou musíme do stroje dodat, abychom dosáhli požadovaného výstupu ze stroje.

U cyklů tepelných motorů lze termickou účinnost vyjádřit jako poměr práce vykonané cyklem vůči dodanému teplu, lze ji také vyjádřit pomocí tepla přivedeného a odvedeného.

$$\eta_t = \frac{a_o}{q_H} = \frac{q_H - |q_C|}{q_H} = 1 - \frac{|q_C|}{q_H} \quad (16)$$

3.5 Carnotův cyklus

Carnotův cyklus je teoretický vratný termodynamický cyklus pracující s ideálním plynem. Skládá se ze čtyř dějů: dvou izotermických a dvou adiabatických.



Obrázek 6. Carnotův cyklus v p-v a T-s diagramu [2]

Carnotův cyklus si lze představit tak, že je realizován pístovým strojem, který pracuje se dvěma tepelnými zásobníky, které v pravidelných intervalech odvádí a přivádí teplo do pracovní látky stroje a to pouze v průběhu izotermické expanze a komprese. Právě proto, že se jedná o děje izotermické, výměna tepla probíhá tak, že teplota v zásobnících i teplota pracovního média zůstává během děje neměnná. V průběhu adiabatických dějů (komprese a expanze) si pracovní látka nevyměňuje s okolím žádné teplo. Celý cyklus tedy pracuje mezi dvěma teplotami tepelných zásobníků, kde z jednoho teplo přijímá, nazýváme jej horký zásobník, označujeme indexem „H“. A druhého zásobníku, jemuž teplo předává, nazýváme jej studený zásobník a označujeme indexem „C“. Pro stanovení termické účinnosti vyjdeme tedy ze vztahu (16) kde:

$$\eta_{tc} = 1 - \frac{m \cdot r \cdot T_C \cdot \ln \frac{v_3}{v_4}}{m \cdot r \cdot T_H \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}} \quad (17)$$

Pracovní látka a její množství v oběhu zůstává stále stejná a porovnání rovnic pro adiabatický děj mezi stavy 2-3 a 4-1 lze dokázat že i poměry objemů v_3 ku v_4 a v_2 ku v_1 jsou si rovny. Po úpravě tedy dostaneme výsledný vztah pro termickou účinnost Carnotova cyklu.

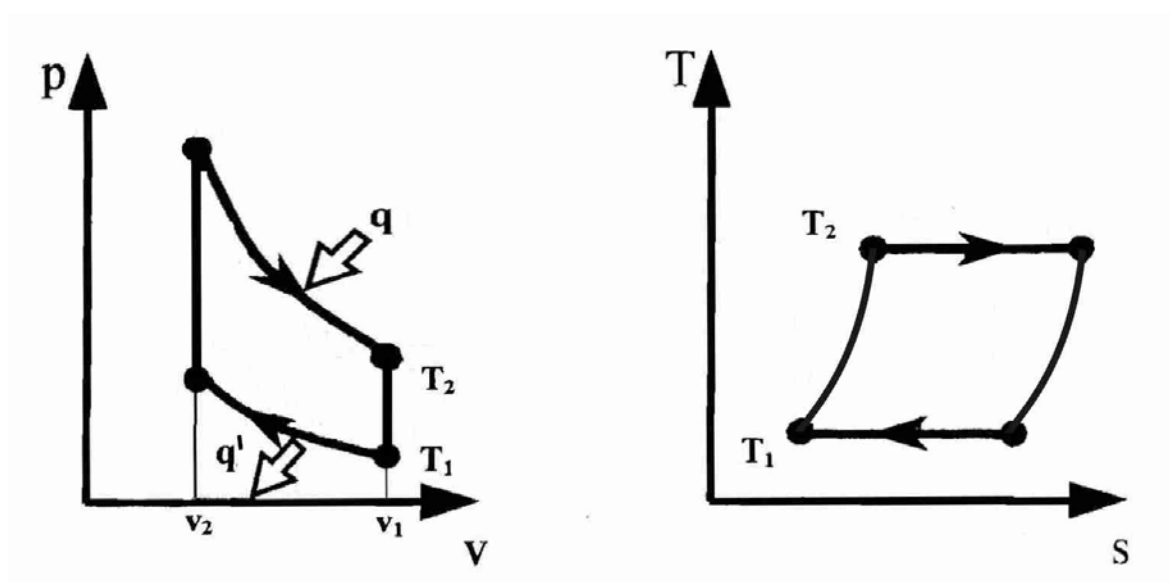
$$\eta_{tc} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (18)$$

Termická účinnost Carnotova cyklu je závislá pouze na teplotách, mezi kterými cyklus pracuje. Je také dokázáno, že neexistuje žádný jiný cyklus, který by pracoval mezi stejnými teplotami a měl při tom vyšší termickou účinnost než Carnotův cyklus. Jinými slovy Carnotův cyklus je cyklus s nejvyšší možnou termickou účinností. Této vlastnosti Carnotova cyklu s velkou výhodou využíváme k posouzení účinnosti tepelných strojů pracujících s jinými termodynamickými cykly. Snahou všech konstruktérů je dosáhnout maximální účinnosti stroje, tedy přiblížit se co nejvíce právě Carnotovu cyklu, tyto postupy nazýváme carnotizací.

4 Matematický model pro výpočet a vykreslení zadaného cyklu

Matematický model je zpracován v prostředí výpočetního programu Matlab. Skládá se z hlavního programu (funkce vypocet.m), která se odvolává na jednotlivé funkce pro načtení dat a výpočet jednotlivých termodynamických dějů. V hlavním programu jsou poté provedeny výpočty účinností zadaného cyklu a porovnávacího Carnotova cyklu, dále je provedeno vykreslení zadaného cyklu v p-V a T-S diagramu.

Zdrojové kódy a elektronická podoba výpočtového modelu termodynamického cyklu zpracované v prostředí MATLAB jsou přiloženy v přílohách.



Obrázek 7. Stirlingův cyklus v p-v a T-s diagramu

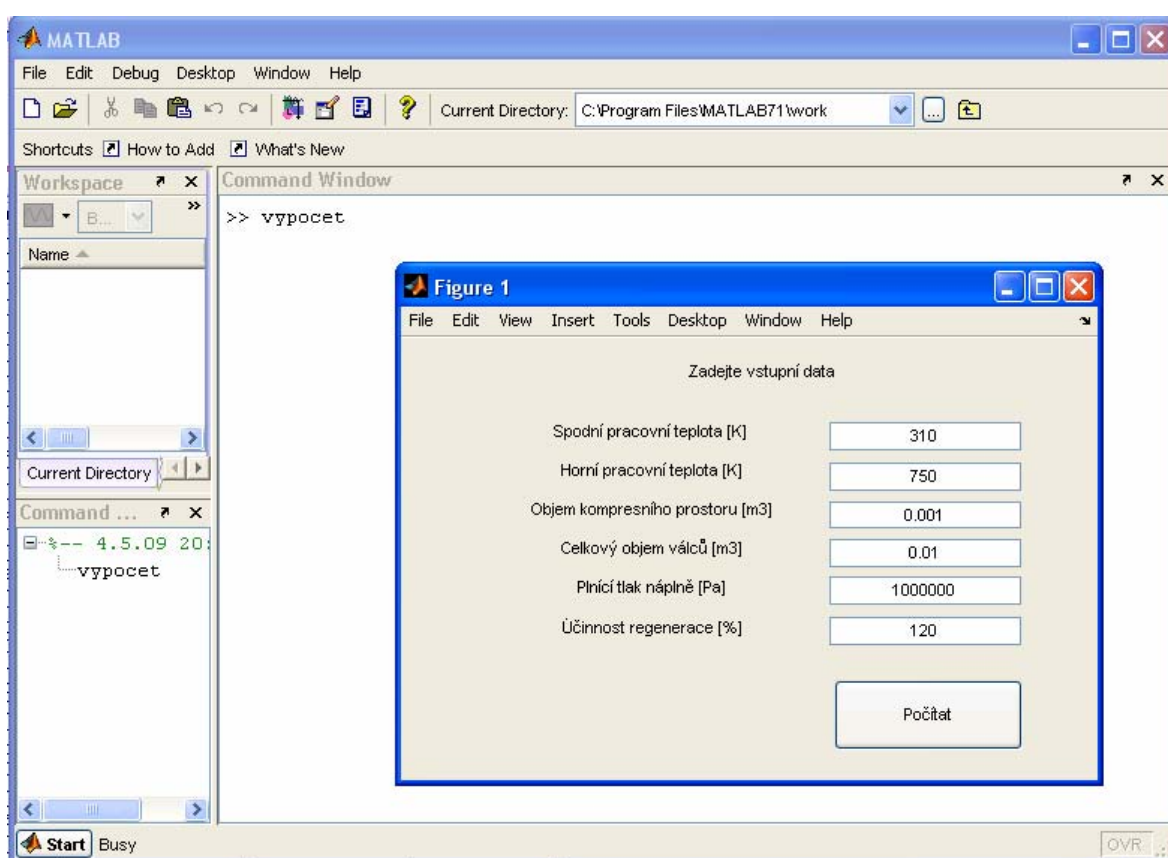
4.1 Výpočetní program „Matlab“

4.1.1 Stavba a funkce výpočetního programu

Vlastní výpočetní program se spouští v prostředí Matlabu voláním hlavní funkce „Vypocet“. Tato funkce nemá žádné vstupní proměnné a také nevrací žádné výstupní hodnoty. Slouží jako hlavní část programu pro volání dalších funkcí, které zajišťují celý proces výpočtu od načtení dat až po výpis výsledných hodnot na obrazovku a vykreslení průběhů do grafů. Funkce programu je znázorněna pomocí vývojového diagramu v následující kapitole.

Po spuštění hlavní funkce je volána funkce „Dataread“, která zajišťuje načtení vstupních dat od uživatele prostřednictvím dialogového okna, kde je možné do jednotlivých polí zapsat vstupní data pro výpočet. Vstupními daty jsou: Spodní pracovní teplota cyklu, Horní pracovní teplota cyklu, Objem kompresního prostoru, Celkový

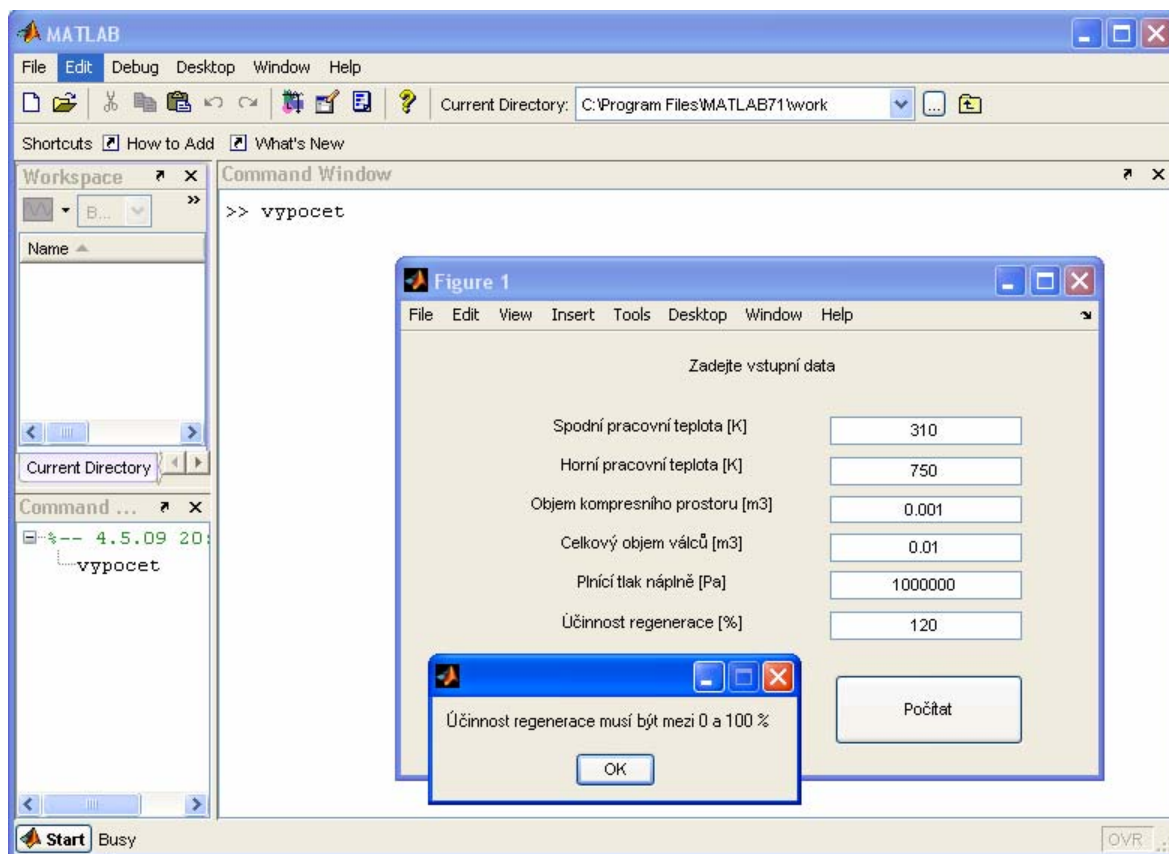
zdvihový objem, Počáteční plnicí tlak náplně a Účinnost regenerace v regenerátoru, je-li do oběhu zařazen. Pokud je oběh bez regenerace, zadáme účinnost rovnu nule. Výpočet je za předpokladu dodržení určitých pravidel možno provést s téměř neomezeným rozsahem vstupních hodnot, avšak z praktického hlediska by měly vstupní data splňovat určité meze. Lze si jen těžko představit prakticky použitelný stroj, který bude pracovat mezi teplotou dolního zásobníku kolem absolutní nuly a teplotou horního zásobníku v řádech milionů stupňů nebo při tlacích tisíců megapascalů. Z tohoto důvodu je rozsah vstupních dat omezen na hodnoty, které i tak zasahují do teoretické roviny práce stroje. Je možné například nastavit účinnost regenerace až 100 %. Pro usnadnění práce jsou již základní vstupní data předdefinována, výpočet lze spustit potvrzením tlačítkem „Počítat“.



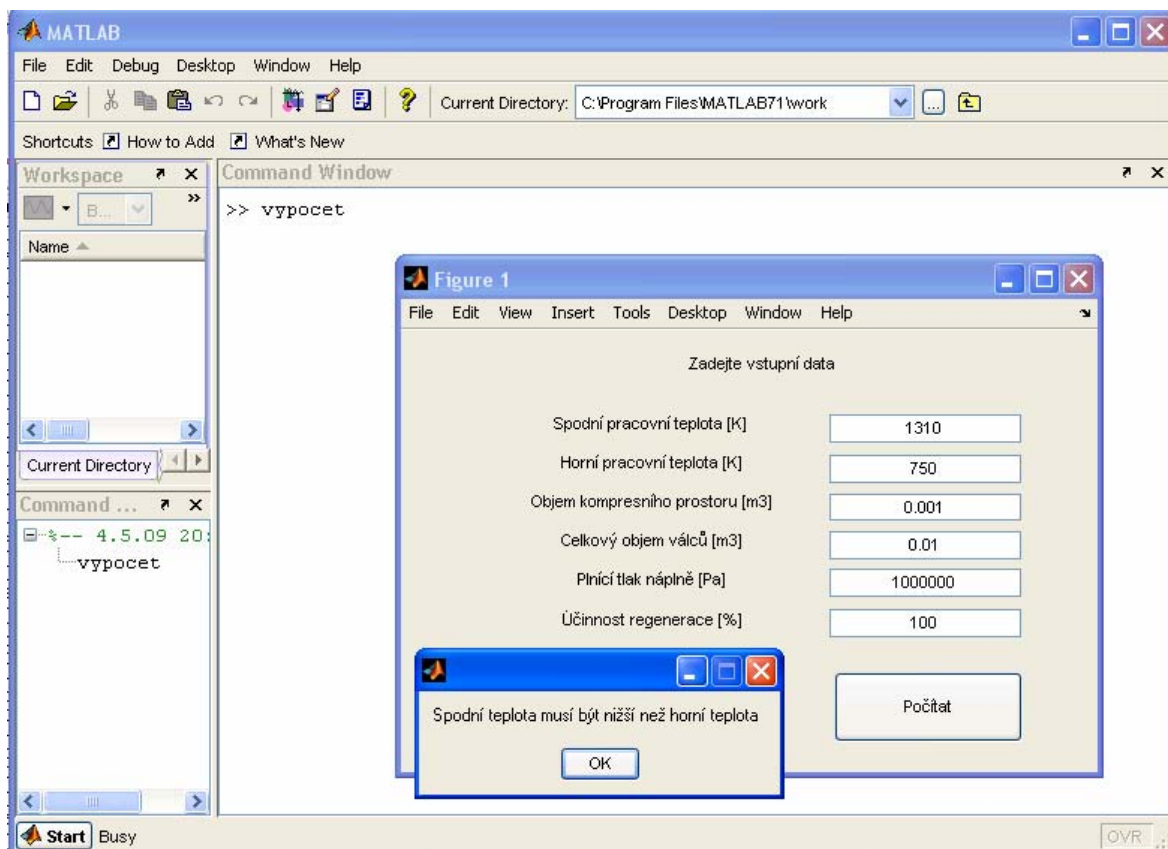
Obrázek 8. Spuštění výpočtu a zadání vstupních dat

Jakmile potvrdíme zadání vstupních dat, jsou tyto načteny do jednotlivých proměnných funkce „Dataread“, která ještě před svým ukončením volá funkci pro kontrolu vstupních dat „Checkdata“. Tato funkce provede kontrolu, zda jsou zadaná data v povoleném rozsahu a jestli splňují další podmínky pro správný běh programu, to jsou horní pracovní teplota musí být vyšší než spodní pracovní teplota a objem kompresního prostoru musí být menší než celkový objem. Pokud není některá z podmínek splněna funkce „Checkdata“ vypíše na obrazovku hlášení, který parametr nesplňuje podmínky pro řádný běh výpočtu. Je-li tento dialog potvrzen, program se vrátí zpět do fáze zadávání vstupních dat, kde je možno

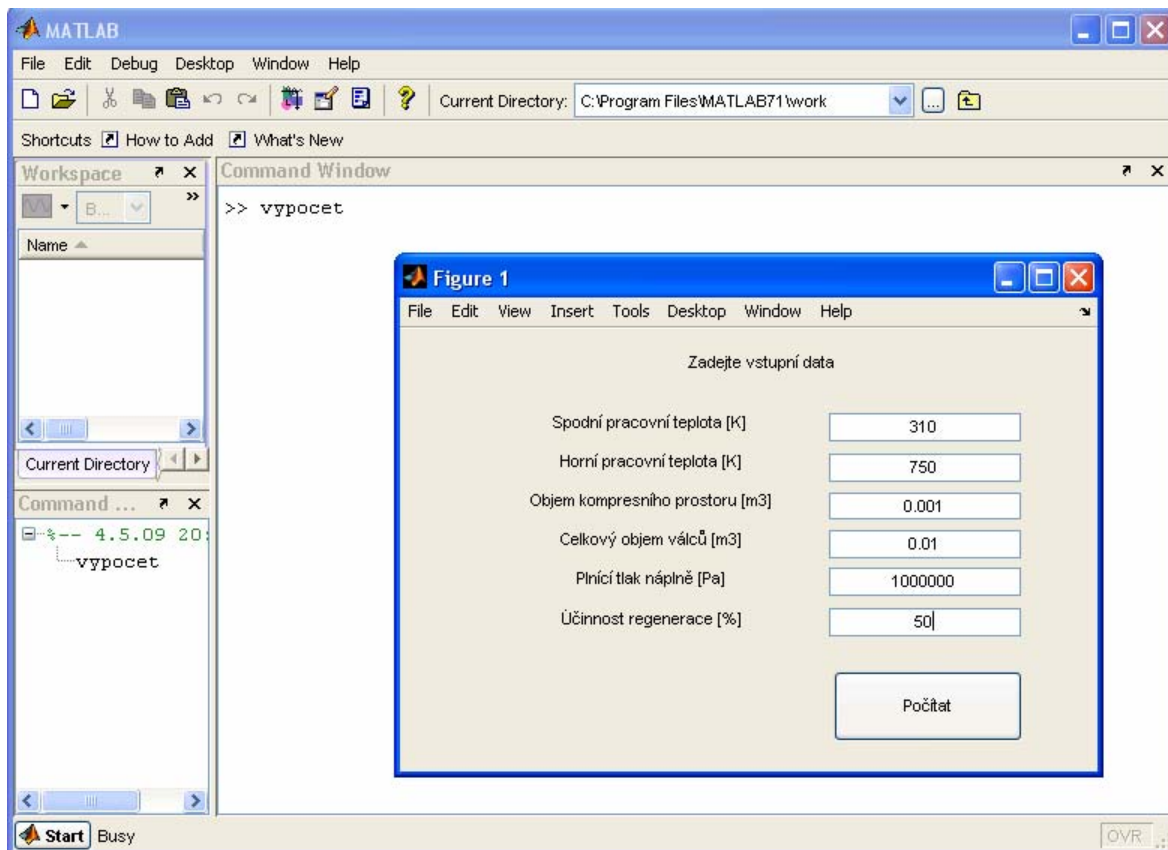
provést opravu chybně zadaného údaje. Všechny doposud zadané hodnoty zůstávají ve stavu tak, jak jsme je zadali. Není tedy třeba zadávat všechny údaje znovu, stačí pouze opravit nesprávně zadanou hodnotu a zadání opět potvrdit tlačítkem „Počítat“. Kontrola zadávaných dat je prováděna po každém stisknutí tlačítka počítat tak dlouho, dokud všechny vstupní hodnoty nejsou zadány správně. Editací funkce „Checkdata“ je možno měnit kritéria pro posuzování vstupních hodnot. Jsou-li všechny vstupní hodnoty zadány správně, navrátí funkce „Dataread“ tento soubor dat do hlavní funkce „Vypocet“.



Obrázek 9. Chybové hlášení – parametr mimo rozsah



Obrázek 10. Chybové hlášení – spodní teplota je vyšší než horní

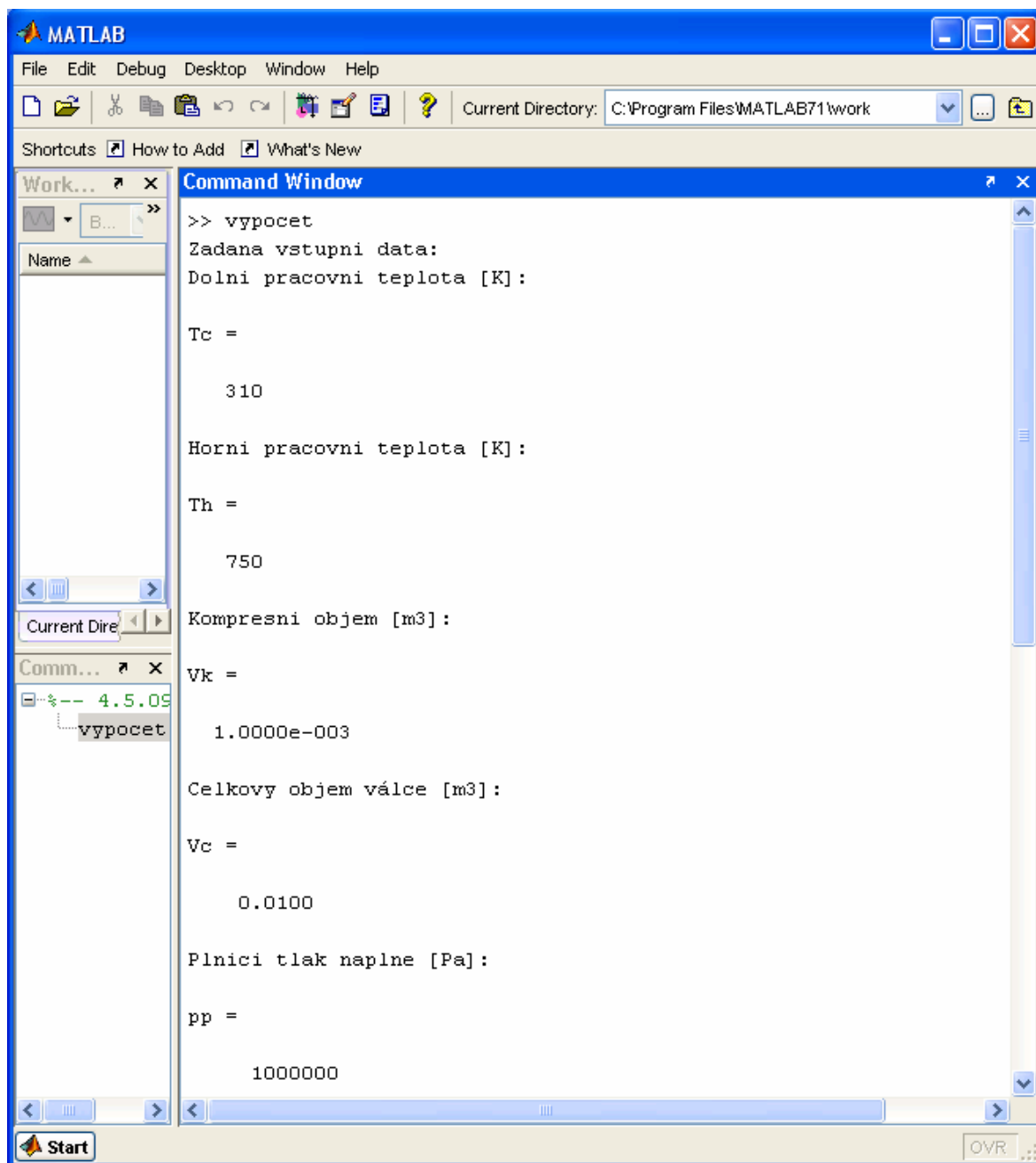


Obrázek 11. Správně zadaná vstupní data

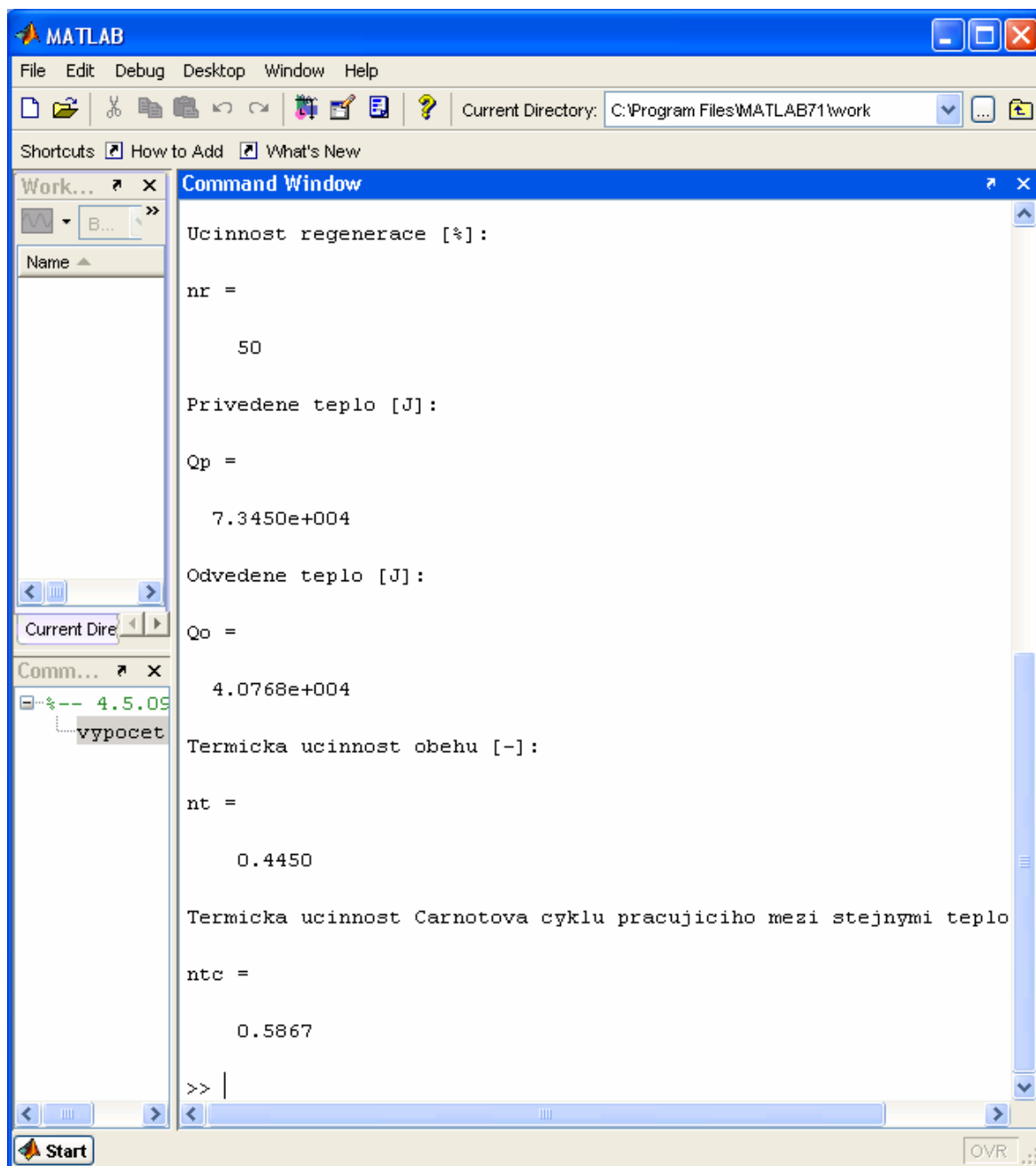
Po předání vstupních dat do hlavní funkce jsou postupně volány jednotlivé funkce pro výpočet stavových veličin pro jednotlivé termodynamické děje cyklu. Tyto funkce si postupně předávají vypočtené hodnoty tak, že koncový stav jednoho děje je počátečním stavem děje následujícího. Jako první je tedy volána funkce „Kizoterma“, která provede výpočet stavových veličin pro izotermickou kompresi, na ni naváže funkce „Kizochora“, která provede výpočet stavových veličin pro izochorickou kompresi, dále pak funkce „Eizoterma“, která provede výpočet stavových veličin pro izotermickou expanzi a další funkce „Eizochora“, která provede výpočet stavových veličin pro izochorickou expanzi. Každá jednotlivá funkce pro výpočet jednotlivých dějů vypočte soubor stavových bodů s jednotlivými stavovými parametry a tyto vrátí do hlavní funkce „Vypocet“. Všechny tyto body jsou poté hlavní funkcí sloučeny v jeden soubor čtyř set bodů popisujících celý cyklus.

Poté jsou z parametrů cyklu vypočteny velikosti přivedeného a odvedeného tepla v průběhu jednoho cyklu, termodynamické účinnosti a termodynamické účinnosti porovnávacího Carnotova cyklu.

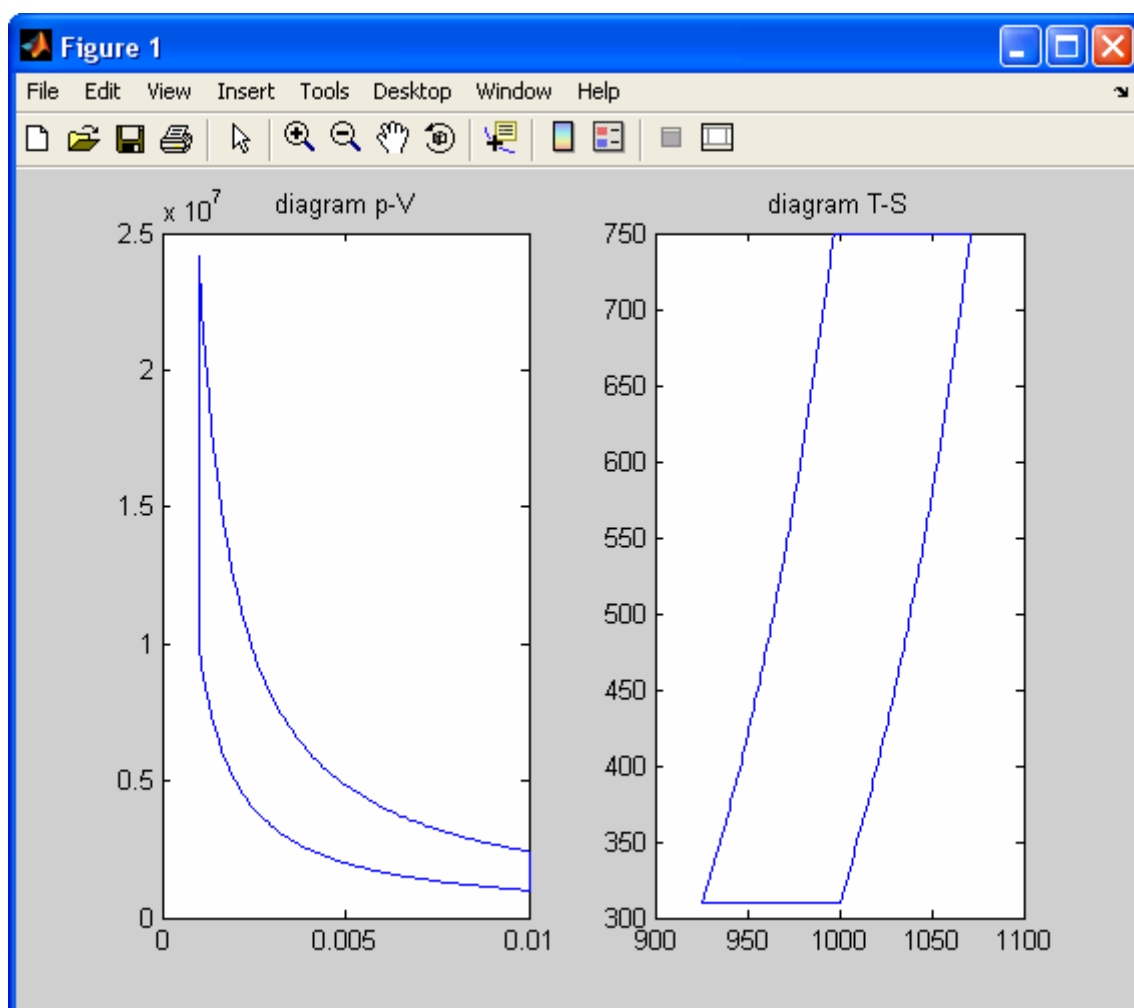
Nakonec je proveden výpis vstupních a vypočtených hodnot na obrazovku a je provedeno vykreslení grafů průběhu cyklu v diagramech p - V a T - S .



Obrázek 12. Výpis vstupních dat

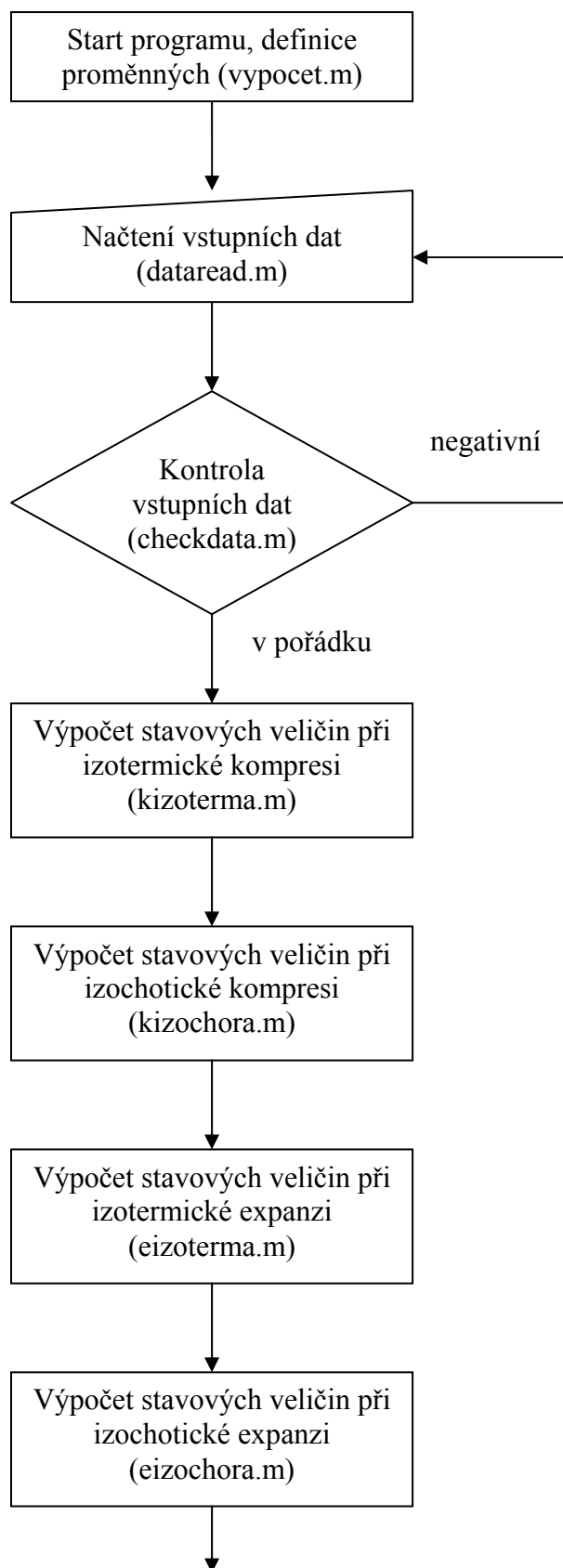


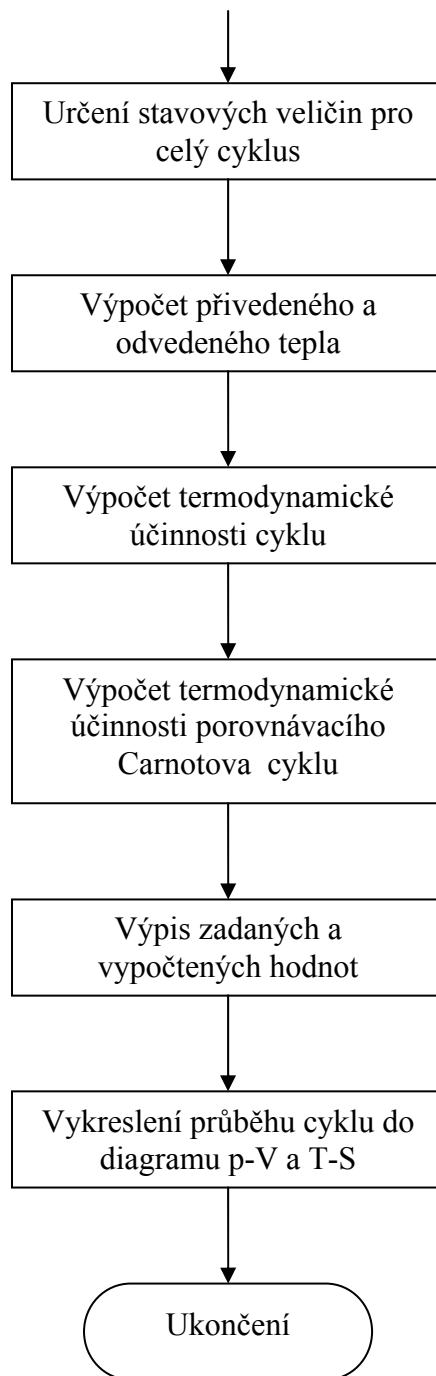
Obrázek 13. Výpis vypočtených hodnot



Obrázek 14. Vykreslení průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S

4.1.2 Vývojový diagram výpočtového programu





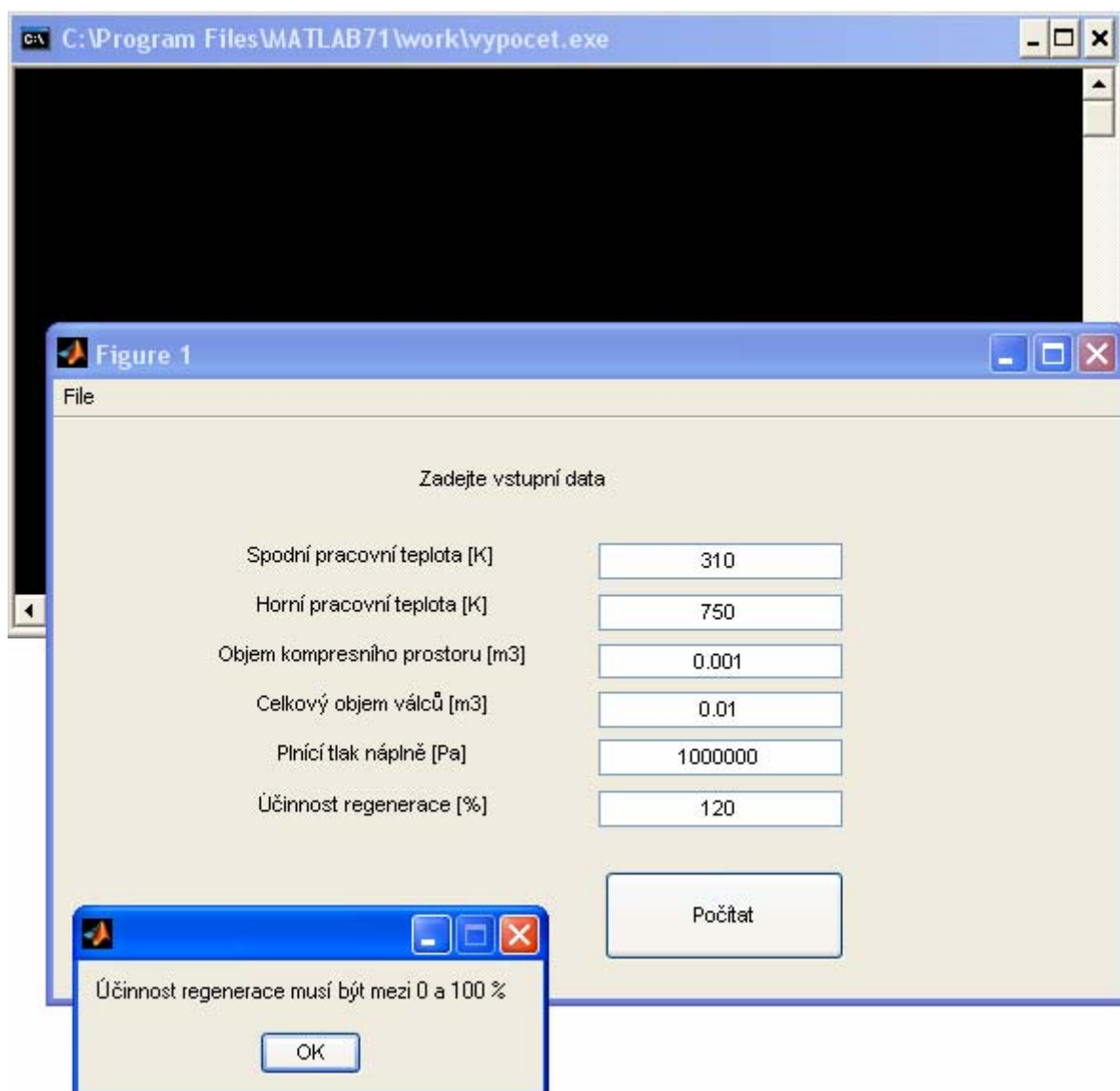
4.2 Výpočetní program formát „exe a html“

Navíc nad rámec zadaného zpracování byl výpočtový program exportován a upraven tak, aby mohl být spuštěn mimo prostředí Matlabu a to ve formátu spustitelné aplikace „vypočet.exe“ a ve formátu umožňujícím přístup přes webové rozhraní „formát html“.

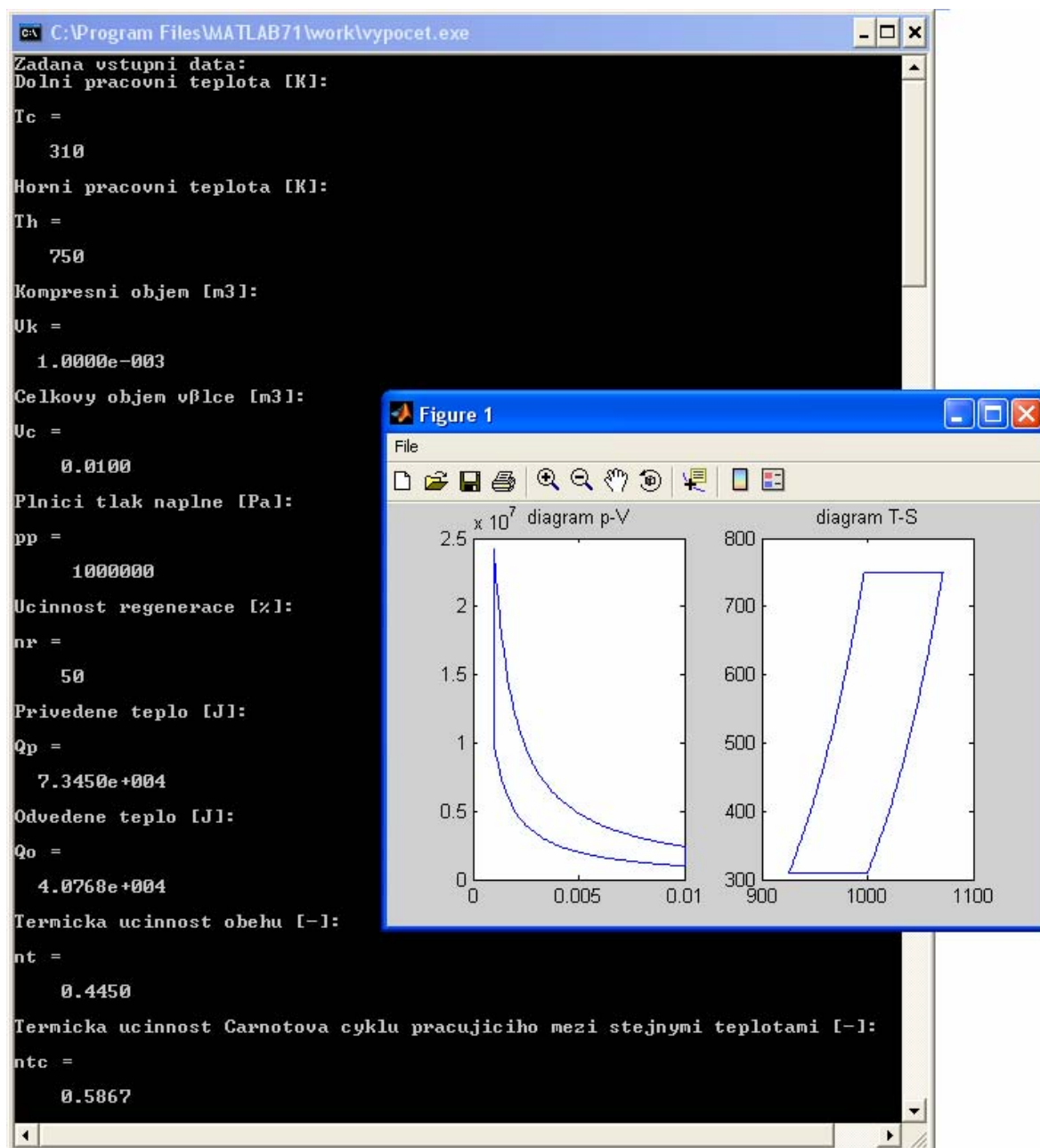
4.2.1 Výpočetní program ve formátu spustitelné aplikace „vypočet.exe“

Spustitelnou aplikaci je možno z Matlabu vyexportovat pomocí toolboxu „MCC Invoke MATLAB to C/C++ Compiler“. Voláním příkazu „MCC“ vygenerujeme celkem 5 souborů, z nichž jeden je samorozbalující soubor typu „exe“, ostatní jsou datové, konfigurační a záznamové soubory. Tyto soubory s sebou nesou zdrojové kódy Matlabu, které se po spuštění samorozbalujícího souboru nainstalují do podadresáře „vypocet_mcr“. Do tohoto adresáře se také nainstalují další podpůrná data pro běh výpočtu mimo prostředí Matlabu a výpočet se spustí. Přesto, že výpočet běží mimo prostředí Matlabu, tak je nutné, aby na počítači, na kterém je program provozován, byl Matlab nainstalován a to ve verzi, ve které byl proveden export, neboť v průběhu výpočtu jsou volány knihovny Matlabu. Nejlépe je vyexportovat spustitelnou aplikaci přímo na počítači, na kterém má být provozována, zajistí nám to nejen kompatibilitu z hlediska verze Matlabu, ale také dostupnost všech potřebných knihoven z hlediska přístupových cest. Přiložený export je proveden ve verzi 7.1.0.246.

Vlastní program lze kdykoliv spustit pomocí souboru „vypocet.exe“ z konzolového okna nebo je možno na něj vytvořit zástupce, pomocí kterého budeme program startovat. Po startu programu se na obrazovce objeví konzolové okno, do něhož budou vypisovány vypočtené hodnoty, dále je zobrazen dialog pro zadávání vstupních dat. Výpočet probíhá obdobně jako v prostředí Matlabu. Po zadání vstupních dat je provedena kontrola s výzvou na případné opravy, je-li vše v pořádku, proběhne výpočet a do konzolového okna jsou vypsány zadané a vypočtené hodnoty oběhu, dále je v novém okně vykreslen průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S.



Obrázek 15. Spuštění výpočtu, zadání vstupních dat a výzva k opravě



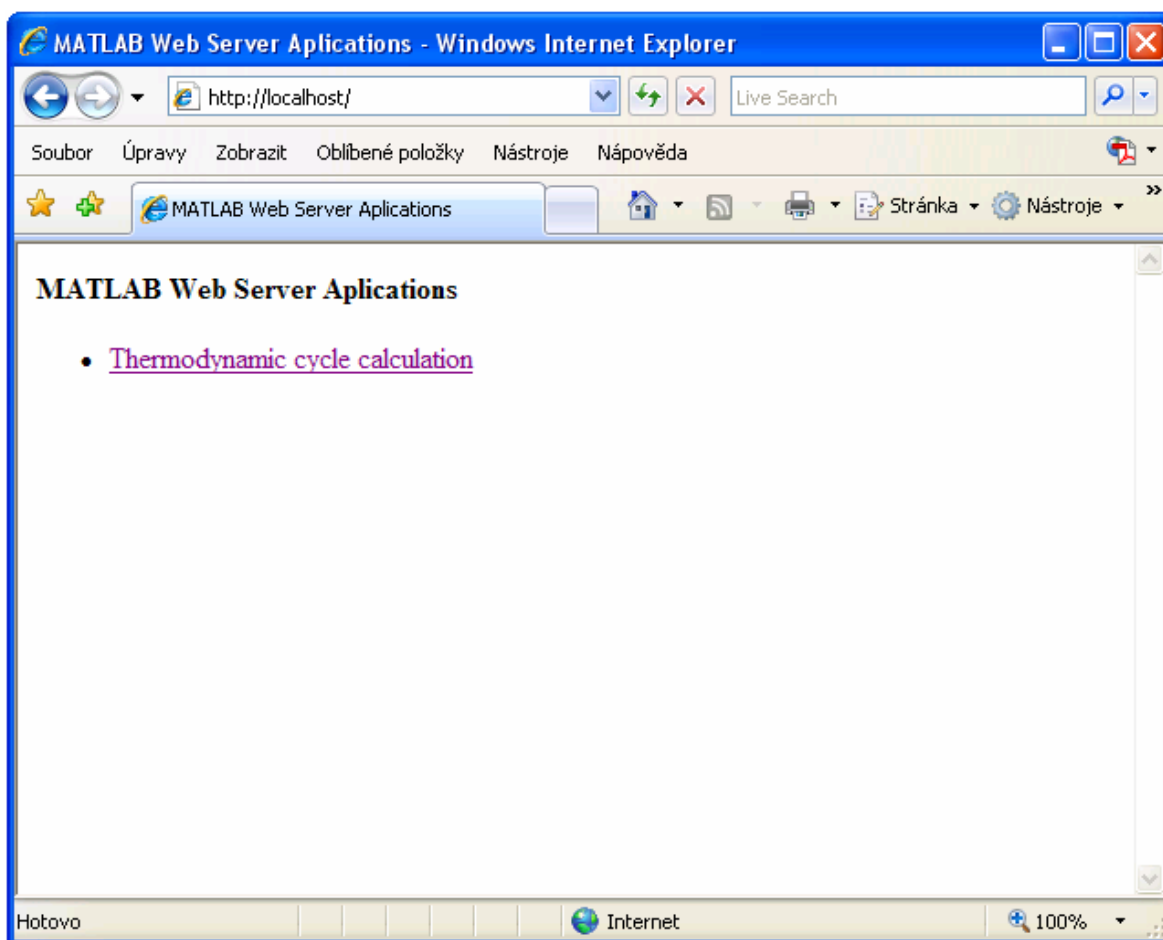
Obrázek 16. Výpis dat výpočtu a vykreslení průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S

4.2.2 Výpočetní program ve formátu webové aplikace „html“

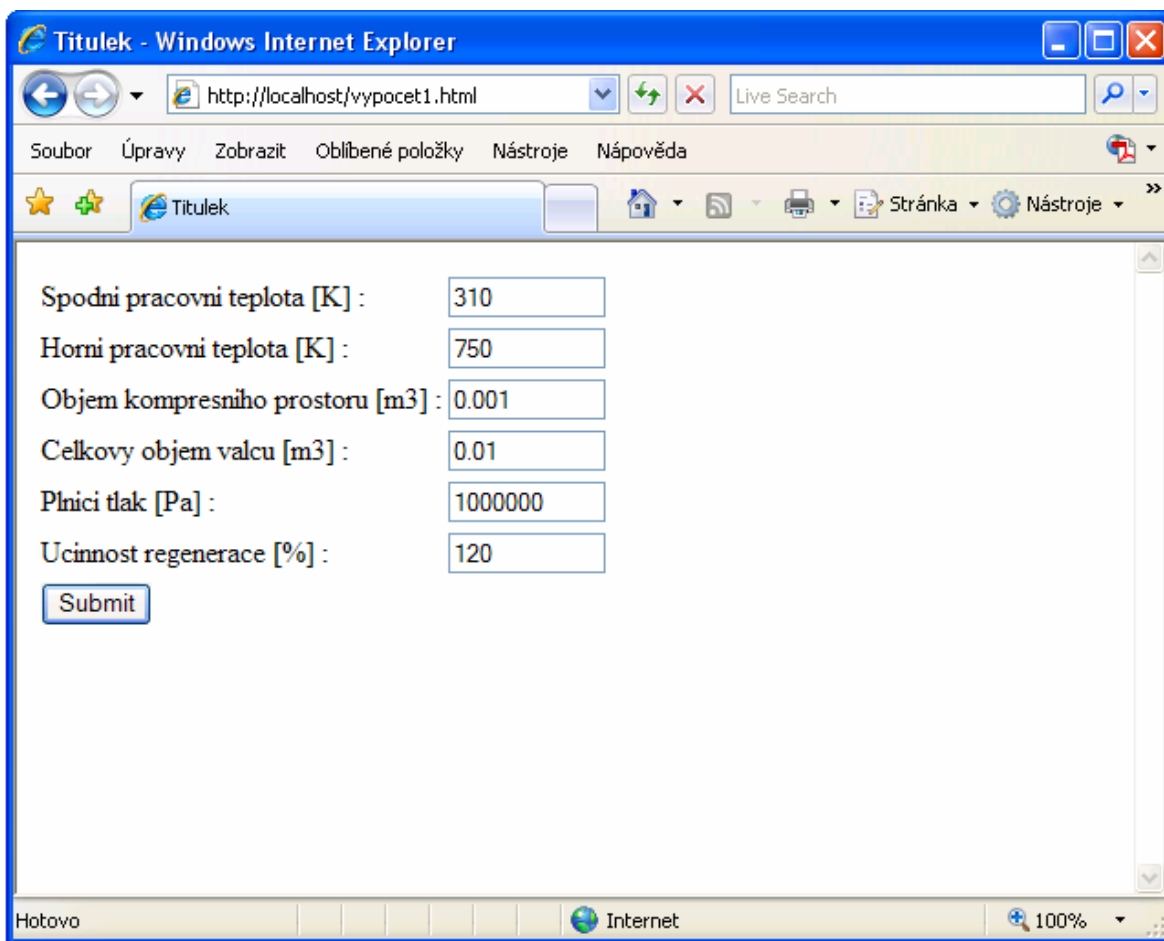
Webovou aplikaci je možno v Matlabu vytvořit několika způsoby v závislosti na verzi a nainstalovaných toolboxech. Ve verzi 7.1 zůstávají základem výpočtu zdrojové kódy Matlabu tzv. m-soubory. Tyto soubory je potřeba upravit tak, aby do nich mohly vstupovat a vystupovat data ze souborů „html“, které zprostředkovávají kontakt uživatele s jádrem programu. K tomuto přístupu slouží toolbox se jménem „Matlab Webserver“. Ve verzi 2007 je tvorba webové aplikace odlišná. Nejprve je nutno výpočtový program vyexportovat do Java aplikace (soubor s příponou JAR) obdobným způsobem jako export do spustitelné „exe“ aplikace pomocí toolboxu „MATLAB Builder JA“. S takto

vyexportovaným Java souborem je možno již pracovat jako s jakoukoliv jinou Java aplikací, kterou chceme umístit na internet.

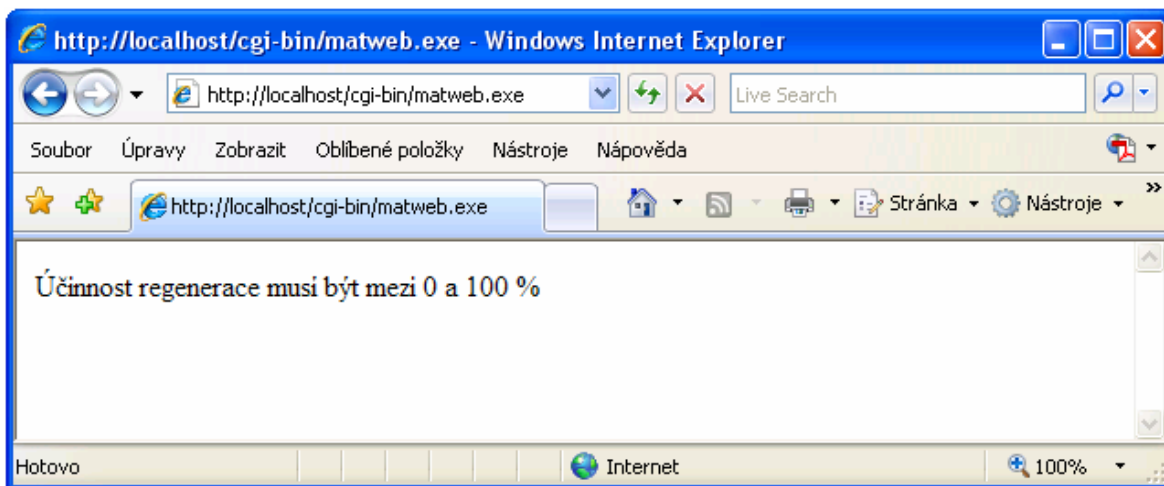
Jak již bylo výše zmíněno, výpočet byl proveden ve verzi 7.1, tudíž i webová aplikace je provedena v této verzi za pomoci Matlab Webserveru. Stejně jako u spustitelné „exe“ aplikace i zde jsou v průběhu výpočtu volány knihovny Matlabu, je tedy nutné aby Matlab byl nainstalován na serveru, z nějž budou výpočty spouštěny a byl spuštěn modul „Matlabserver“. Matlab musí být pouze na serveru, nikoliv však na pracovní stanici, ze které na server přistupujeme. Na serveru musí být také uloženy všechny výpočtové programy, ke kterým chceme přistupovat. Přes internetový prohlížeč je totiž možné přistupovat k celému souboru výpočetních programů, které si vybíráme z hlavní stránky. Seznam programů je definován na hlavní stránce v souboru „Index.html“. Kromě Indexu jsou vytvořeny další tři html soubory, které slouží pro komunikaci výpočtového programu s uživatelem. Soubor „Vypocet1.html“ je primární html soubor, který zajišťuje načtení vstupních dat a spuštění jádra výpočtu v Matlabu. Soubor „Vypočet2.html“ zajišťuje výpis vypočtených hodnot na obrazovku a vykreslení průběhů cyklu. Třetí soubor „Výpočet3.html“ slouží pro kontrolu vstupních dat.



Obrázek 17. Seznam programů - zde pouze jeden



Obrázek 18. Zadání vstupních dat – příliš vysoká účinnost



Obrázek 19. Chybové hlášení

Titulek - Windows Internet Explorer

http://localhost/vypocet1.html

Soubor Úpravy Zobrazit Oblíbené položky Nástroje Nápověda

Titulek

Spodni pracovní teplota [K] : 310

Horní pracovní teplota [K] : 750

Objem kompresního prostoru [m3] : 0.001

Celkový objem valcu [m3] : 0.01

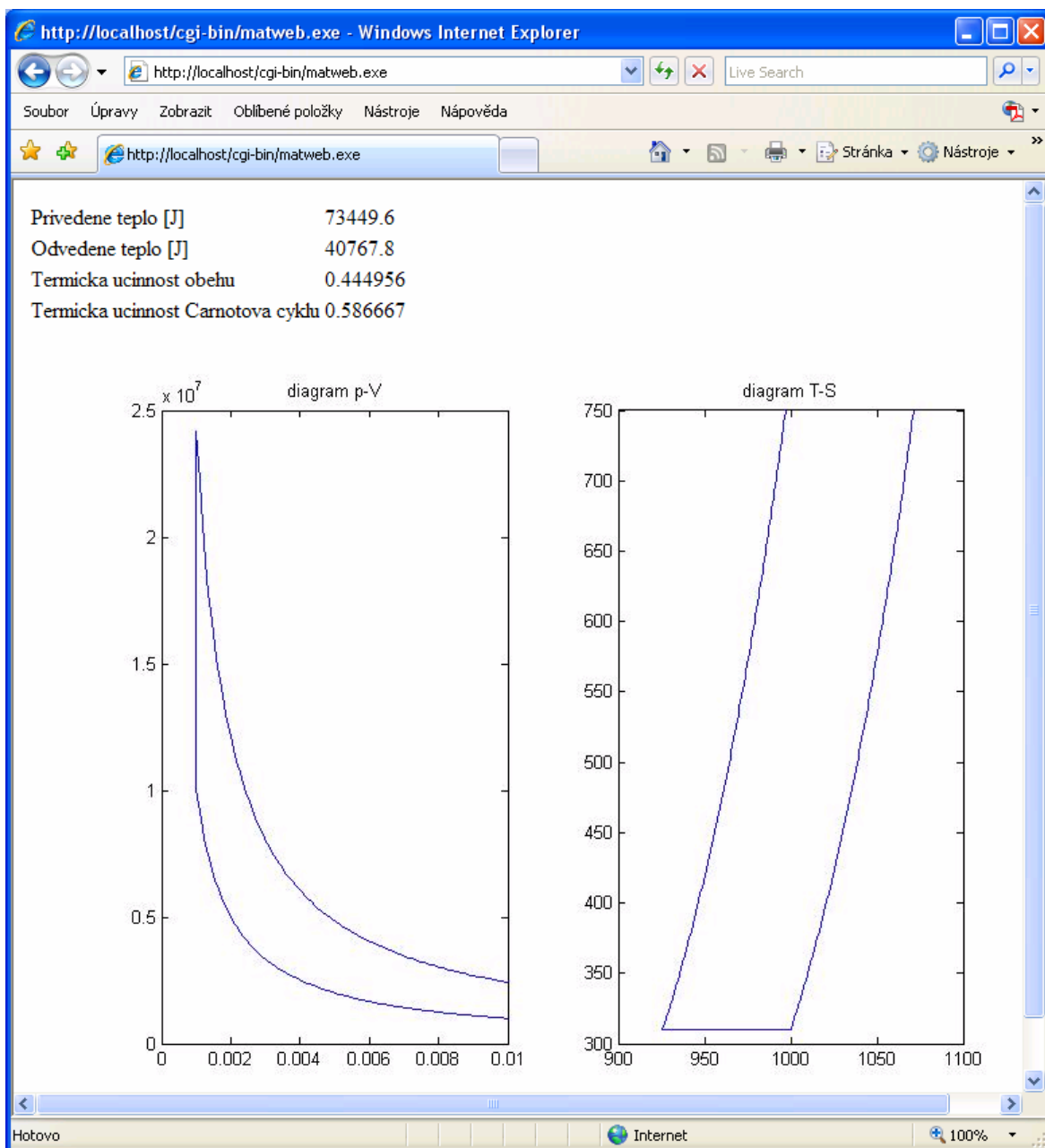
Plnicí tlak [Pa] : 1000000

Učinnost regenerace [%] : 50

Submit

Hotovo Internet 100%

Obrázek 20. Zadání vstupních dat – správná data



Obrázek 21. Výpis dat výpočtu a vykreslení průběhu cyklu do diagramu p-V a T-S

5 Kritické zhodnocení a realizace zadaného cyklu

5.1 Realizace a využití zadaného cyklu

Zadaný cyklus je složen ze čtyř vratných ideálních dějů:

- Izotermické komprese, během níž je ze soustavy odváděno teplo
- Izochorické komprese, kdy je do soustavy teplo přiváděno
- Izotermické expanze, kdy je do soustavy přiváděno teplo
- Izochorické expanze, kdy je ze soustavy teplo odváděno

Již to, že je cyklus složen z ideálních vratných dějů, brání jeho praktické realizaci. Lze však, za určitých výše uvedených zjednodušujících předpokladů, provést realizaci toho děje, v praxi například pomocí pístového stroje.

5.1.1 Realizace jednotlivých dějů zadaného cyklu

Během izotermické komprese se prostor ve válci zmenšuje a narůstá tlak, motor spotřebovává práci. Aby teplota zůstala konstantní, musí být zajištěn dostatečný odvod tepla. V praxi se tato podmínka velice těžko zajišťuje, stroj musí mít pomalý běh, aby byl dostatečný čas pro přestup tepla a vzhledem ke konstrukci stroje a jeho teplosměnných povrchů v praxi tato změna probíhá přibližně polytropicky.

Při izochorické kompresi se do válce musí přivést teplo za konstantního objemu, to by znamenalo, že se stroj musí zastavit, toto je však pro praxi zcela nevhodné, proto musí být stroj konstrukčně řešen tak, aby v této fázi neměnil objem plynu například pomocí dvou pístů, které mezi sebou udržují konstantní objem. I zde platí, že rychlost přívodu tepla hraje významnou roli především u strojů s vnějším přívodem tepla, kde teplo musí přestupovat přes stěnu válce. U strojů s vnitřním přívodem tepla, především u zážehových spalovacích motorů, kde je přívod tepla zajištěn zapálením směsi uvnitř válce, je rychlost hoření tak velká, že na indikátorových diagramech se tento děj velmi blíží izochorickému přívodu tepla.

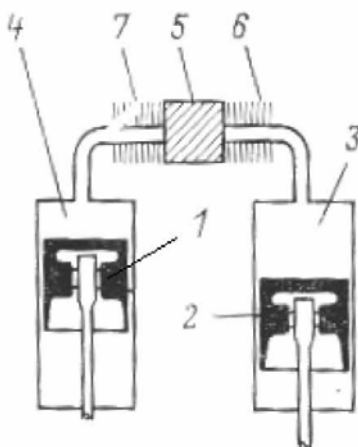
V průběhu izotermické expanze se prostor ve válci zvětšuje, tlak klesá a motor koná práci. Proto, aby se během tohoto děje neměnila teplota, musí být médiu přiváděno teplo, to je spojeno se stejnými problémy jako v případě izotermické komprese (nedostatek času a přestup tepla přes stěny válce. To v praxi vede k tomu, že děj probíhá přibližně polytropicky.

V případě izochorické expanze se z pracovní látky musí odvést teplo za konstantního objemu, což je spojeno se stejnými obtížemi jako izochorický přívod tepla (přerušovaný chod, nutnost konstrukčního řešení se dvěma písty atd.). U běžných spalovacích motorů, především dvoudobých, je toto zajištěno výměnou náplně, kdy se těsně před dolní úvratí otevřou ventily a kanály pro výměnu náplně a uzavřou se krátce po překonání dolní úvratí. U strojů, které pracují se stálou náplní, je nutno zajistit odvod tepla přes stěnu válce.

5.1.2 Praktická realizace

Zadaný cyklus sestávající ze dvou izochorických a dvou izotermických dějů je teoretickým popisem cyklu realizovaného Stirlingovým motorem, cyklus se též nazývá Stirlingovým cyklem. Tento motor nechal patentovat v roce 1816 Robert Stirling.

Stirlingův motor je pístový stroj pracující s uzavřeným cyklem s vnějším přívodem tepla. Konstrukčně je řešen jako stroj se dvěma písty pracujícími v jednom prostoru, respektive každý píst má svůj vlastní prostor a tyto jsou spolu propojeny přes regenerátor. Jeden píst se nazývá pracovní a druhý přemíst'ovací. Oblast pracovního pístu je chlazená a zajišťuje odvod tepla při izotermické kompresi. V dalším kroku se pracovní i přemíst'ovací píst pohybují tak, že objem pracovní látky se nemění, pouze se přemíst'uje z prostoru nad pracovním pístem do prostoru nad přemíst'ovacím pístem, při tom prochází přes regenerátor, kde se ohřívá. Oblast přemíst'ovacího pístu je ohřívána a zajišťuje přívod tepla ve fázi izotermické expanze, objem plynu narůstá, tlak působící na pracovní píst jej uvádí do pohybu a koná práci. V poslední fázi v průběhu izochorické expanze se oba písty pohybují opět tak, že je mezi nimi konstantní objem a médium přechází z prostoru přemíst'ovacího pístu do prostoru pracovního, píst přes regenerátor, kterému předává teplo. Stirlingovy motory mají několik variant uspořádání pracovního a přemíst'ovacího pístu a dle toho se také rozdělují na variantu α , β , γ , princip práce je však u všech variant stejný.



Obrázek 22. Stirlingův motor [5]

1-pracovní píst, 2-přemíst'ovací píst, 3-kompresní prostor,
4-expanzní prostor, 5-regenerátor, 6-ohříváč, 7-chladič

5.2 Kritické zhodnocení

Stroj, který teoreticky realizuje zadaný cyklus, je Stirlingův motor popsáný v předchozí kapitole. Právě podle svého objevitele se tento cyklus nazývá Stirlingovým cyklem. Stirlingův motor pracuje se dvěma tepelnými zásobníky s konstantní teplotou, stejně jako Carnotův cyklus, pracuje tedy mezi dvěma teplotami, rozdíl mezi Carnotovým a Stirlingovým cyklem je v přechodu mezi izotermickými ději. Zatímco v případě Carnotova

cyklu se jedná o děje adiabatické, při nichž se nesdílí s okolím žádné teplo, tak u Stirlingova cyklu jde o děje izochorické. Při izochorické expanzi je potřeba odvést z pracovní látky teplo, naopak při kompresi teplo přivést. Ve Stirlingově motoru je v případě izochrických změn teplo předáváno a zase odebíráno z regenerátoru. Lze dokázat, že v případě dokonalé regenerace je teplo odevzdané do regenerátoru při izochorické expanzi rovno teplu odebranému při izochorické kompresi, tedy v podstatě také nedochází k výměně tepla s okolím. Termická účinnost Stirlingova cyklu s dokonalou regenerací je tedy rovna termické účinnosti Carnotova cyklu pracujícího se stejnými teplotami. V praxi není možné realizovat dokonalou regeneraci ani ideální termodynamické děje, proto tedy termická účinnost skutečného stroje bude nižší. Na základě provedeného modelu můžeme porovnat termické účinnosti Carnotova cyklu a vypočteného Stirlingova cyklu, který pracuje bez regenerace.

5.3 Praktické využití Stirlingova motoru

Stirlingův motor se nabízí jako velice zajímavá alternativa ke spalovacím motorům s vnitřním spalováním (zážehovým a vznětovým motorům) zejména stacionárním. Právě v porovnání s těmito motory nabízí hned několik výhod. Spalování u Stirlingova motoru probíhá vně válců, lze tedy použít různá paliva, např. z obnovitelných zdrojů nebo využít sluneční energii. Jako zdroj tepla může sloužit také odpadní teplo z jiných procesů. V případě spalování paliv probíhá tento děj kontinuálně, je tedy možno spalování nastavit tak, aby produkovalo minimum škodlivých zplodin, čímž se motor stává výrazně šetrnější k životnímu prostředí než dnes běžně používané benzínové či naftové motory a má také klidnější chod. Oproti těmto motorům má však podstatně vyšší hmotnost a zástavbové rozměry na jednotku výkonu. Má několik konstrukčních problémů, zejména nutnost co nejlepšího utěsnění pracovní látky v motoru a jejího doplňování. A především díky tomu, že je velmi málo rozšířený, v podstatě se vyrábí pouze pro experimentální účely, je mnohonásobně dražší než srovnatelný konvenční spalovací motor.

Ze všech těchto důvodů se však pro budoucnost jeví jako dobrá alternativa pro kogenerační jednotky, tj. sdruženou výrobu tepla a elektrické energie.

6 Závěr

V této práci byla provedena studie Stirlingova termodynamického cyklu sestávajícího ze dvou izotermických a dvou izochorických dějů. V první kapitole je udělán stručný rozbor současného stavu uplatnění tepelných strojů. Ve druhé kapitole jsou podrobněji rozebrány jednotlivé termodynamické děje, jejich rozdělení a základní výpočtové vztahy. V kapitole číslo tři jsou popsány termodynamické cykly, jejich dělení a skladba z různých dějů. Dále je zde detailněji popsán Carnotův cyklus jakožto nejzákladnější cyklus termomechaniky. Ve čtvrté kapitole je rozebrán program pro výpočet stavových veličin v průběhu zadaného cyklu s jejich vykreslením do p - V a T - S diagramů. Program pro výpočet je vytvořen v prostředí Matlabu a má integrovanou jednoduchou kontrolu zadávaných dat tak, aby vstupní data byla v prakticky rozumných mezích. Program byl nad rámec zadání kompilován do samostatného spustitelného programu. Lze jej tedy spustit i mimo prostředí Matlabu. Dále byl také upraven tak, aby mohl být spuštěn z webového rozhraní. V kapitole číslo pět je uděláno zhodnocení Stirlingova cyklu a teoretický rozbor stroje realizujícího tento cyklus (Stirlingova motoru).

Stirlingův motor stojí v současné době na okraji zájmu o technické využití, je stavěn především pro vědecké účely a právě toto je ovšem známka toho, že skýtá velký potenciál pro budoucí nasazení. Má totiž oproti dnes používaným tepelným strojům několik podstatných výhod, především pracuje s vnějším přívodem tepla, což při spalování přináší menší problémy s emisemi oproti strojům s vnitřním přívodem tepla a může také využívat odpadní teplo z jiných procesů, další velkou výhodou je, že při dobré regeneraci dosahuje velmi vysoké termodynamické účinnosti.

Tato práce je zaměřena především na rozbor cyklu sestávajícího z teoretických izotermických a izochorických dějů. V budoucnu by bylo možné rozšířit práci a program o další prakticky hojně využívané průběhy a provést jejich porovnání. Dále by výpočtový program mohl být rozšířen o veličiny, které by výpočet přiblížily reálným dějům tak, aby program mohl být využit i k modelování reálného Stirlingova motoru.

Seznam použité literatury

- [1] PAVELEK, Milan, et al. *Termomechanika*. 3. přeprac. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2003. 286 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [2] ADAMOVSKEÝ, Radomír, NEUBERGER, Pavel. *Trmomechanika 1 : Termodynamika plynů, oběhy v plynech*. 1. vyd. Praha : Technická fakulta České zemědělské univerzity, 2000. 88 s. ISBN 80-213-0683-1.
- [3] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. *Fyzika : Mechanika - Termodynamika*. Překlad Jan Obdržálek, Petr Dub. Praha : VUTIUM a PROMETHEUS, 2001. 590 s. ISBN 80-214-1868-0.
- [4] DUŠEK, František. *Úvod do používání MATLAB*. Pardubice : FCHT KŘPVT, 1997. 56 s.
- [5] Stirlingův motor, conference Evropské forum 2002, Osnabrück. *Czech Innovation Relay Centre - výtahy z přednášek*. 2003, s. 6.
- [6] *Hot air motor website* [online]. [cit. 2009-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.stirlingmotor.com/>>.

Seznam příloh

Počet příloh: 10

Počet listů příloh: 40

- [A] Elektronické vydání této práce včetně výpočtového modelu termodynamického cyklu zpracovaná v prostředí MATLAB
- [B] Zdrojový kód hlavního programu „vypocet.m“
- [C] Zdrojový kód funkce pro načtení vstupních dat „dataread.m“
- [D] Zdrojový kód funkce pro výpočet izotermické komprese „kizoterma.m“
- [E] Zdrojový kód funkce pro výpočet izochorické komprese „kizochra.m“
- [F] Zdrojový kód funkce pro výpočet izotermické expanze „eizoterma.m“
- [G] Zdrojový kód funkce pro výpočet izochorické expanze „eizochora.m“
- [H] Zdrojový kód funkce pro kontrolu zadáných dat „checkdata.m“
- [I] Zdrojový kód souborů aplikace spouštěné přes web
- [J] Návod k použití výpočtového programu