

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

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



Rekuperace kinetické energie u automobilů

Vehicle kinetic energy recuperation

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Stanislav Nikolaievskiy
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.
Rok: 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nikolaievskyi** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **491824**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rekuperace kinetické energie u automobilů

Název bakalářské práce anglicky:

Vehicle kinetic energy recuperation

Pokyny pro vypracování:

Popis možností rekuperace pohybové energie u automobilů (osobních, nákladních)
Varianty rekuperace využitelné v osobních automobilech a u nákladních vozidel či autobusů
Porovnání variant z nákladového hlediska

Seznam doporučené literatury:

Kožoušek J.: Teorie spalovacích motorů. Vysokoškolská učebnice. SNTL, Praha 1971.
Dominique Petitjean et al. Advanced gasoline engine turbocharging technology for fuel economy improvements. Tech. zpr. SAE Technical Paper, 2004.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Vítek, CSc. 13116

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

Datum zadání bakalářské práce: **01.06.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Ing. Miroslav Vítek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Stanislav Nikolaievskyi

Poděkování

Děkuji Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc. za cenné rady a odborné vedení, které mi pomohly při vypracování této práce.

Stanislav Nikolaievskiy

Název práce:
Rekuperace kinetické energie u automobilů

Autor: Stanislav Nikolaievskiy

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt: Tato bakalářská práce zkoumá možnosti rekuperace včetně použití spalovacího motoru. V práci je uveden přehled různých možností rekuperace pohybové energie u automobilů. Zvláštní pozornost je věnována použití pístového motoru jako kompresoru pro stlačování vzduchu při brzdění do tlakové nádoby pro pozdější využití k přeplňování motoru při sání. Následuje výpočet bilance a ekonomické vyhodnocení investice do takové přestavby. Byly použity ekonomické ukazatele, citlivostní analýza a SWOT pro vyhodnocení této investice.

Klíčová slova: Rekuperace, spalovací motor, přeplňování, vzduchový kompresor

Title:
Vehicle kinetic energy recuperation

Author: Stanislav Nikolaievskiy

Abstract:: This bachelor's thesis examines possibilities of recuperation, including using an internal combustion engine. The thesis presents an overview of various possibilities for recuperation of kinetic energy in cars. Special attention is paid to the use of a piston engine as a compressor to compress air during braking into a pressure vessel for later use to supercharge the engine during intake. Then follows a calculation of an energy balance and an economic evaluation of an investment in such a conversion. Economic indicators, sensitivity analysis and SWOT were used to evaluate this investment.

Key words: Recuperation, internal combustion engine, turbocharging, air compressor

Obsah

Úvod	10
1 Spalovací motor a jeho efektivita	11
1.1 Spalovací motor	11
1.2 Zvýšení efektivnosti a ekonomičnosti provozu spalovacích motorů	12
1.2.1 Snížení mechanických ztrát	12
1.2.2 Zvýšení tlaku vzduchu na vstupu do motoru	13
1.2.3 Snížení doby chodu naprázdno	15
1.2.4 Rekuperace brzděné energie	15
1.2.5 Metody rekuperace brzděné energie	15
2 Přestavba spalovacího motoru na kompresor	17
2.1 Kompresce vzduchu do tlakové nádoby	17
2.1.1 Doplnkový mechanicky poháněný kompresor	17
2.1.2 Použití spalovacího motoru jako pístového kompresoru	18
2.2 Umístění tlakové nádoby ve vozidle	18
2.3 Úprava motoru na kompresor	19
2.4 Použití stlačeného vzduchu	20
2.4.1 Přepřívání	20
2.4.2 Startování	21
3 Výpočet celkové bilance upraveného pohonu vozidla	22
3.1 Výpočet práce přepřívání	22
3.1.1 Výpočet práce motoru	24
3.1.2 Výpočet práce dmyhadla	24
3.1.3 Celková práce na přepřívání	25
3.1.4 Závislost tlaku plnění na tlaku před turbínou	26
3.2 Volba motoru	27
3.2.1 Motor 1.0 TSI	27
3.3 Dosazení do výpočtu	28
3.3.1 Výpočet objemu V_2 a V_5	29
3.3.2 Výpočet práce dmyhadla	29
3.3.3 Výpočet práce motoru	29
3.3.4 Celková práce pohonu na přepřívání	29
3.4 Výpočet práce přestavěného na kompresor motoru	29
3.4.1 Adiabatické stlačování vzduchu	30
3.4.2 Rekuperovaná kinetická energie	30

3.4.3	Výpočet kompresorového chodu motoru	31
3.5	Volba nádoby	32
3.6	Úspora paliva při přeplňování z nádoby	32
3.6.1	Definice městského provozu	33
3.6.2	Potenciální úspora při rozjezdech	33
3.6.3	Výpočet úspor	34
3.7	Celková úspora paliva	36
3.8	Postup fungování rekuperačního systému	37
3.9	Vliv stylu jízdy na spotřebu	39
3.10	Další úspory	39
3.10.1	Brzdný systém	39
3.10.2	Životnost turbodmychadla	40
3.11	Použití tohoto způsobu v nákladních vozidlech a autobusech	40
3.11.1	Volba většího vozu	41
3.11.2	Přibližný výpočet úspor Ford F-150	42
4	Ekonomické vyhodnocení	43
4.1	Úvod	43
4.2	Ekonomické ukazatele	43
4.2.1	NPV	44
4.2.2	RCF	44
4.2.3	Stanovení diskontu	44
4.3	Výpočet vstupních investic	45
4.3.1	Škoda Octavia 1.0 TSI	45
4.3.2	Ford F-150 2.7 Ecoboost	46
4.4	Provozní náklady	46
4.4.1	Volba nájezdů a životnosti vozidla	46
4.4.2	Doba životnosti vozidla	47
4.4.3	Odhad údržby a oprav	48
4.4.4	Úspora pohonných hmot a zohlednění opotřebení vozidla	49
4.5	Ekonomické ukazatele úspor	50
4.5.1	Škoda Octavia	50
4.5.2	Ford F-150	50
4.6	Citlovostní analýza	51
4.6.1	Škoda Octavia	51
4.6.2	Ford F-150	54
4.7	SWOT analýza	56
Závěr		58
Bibliografie		60
Seznam obrázků		63
Seznam tabulek		65
Seznam použitých zkratk a symbolů		66

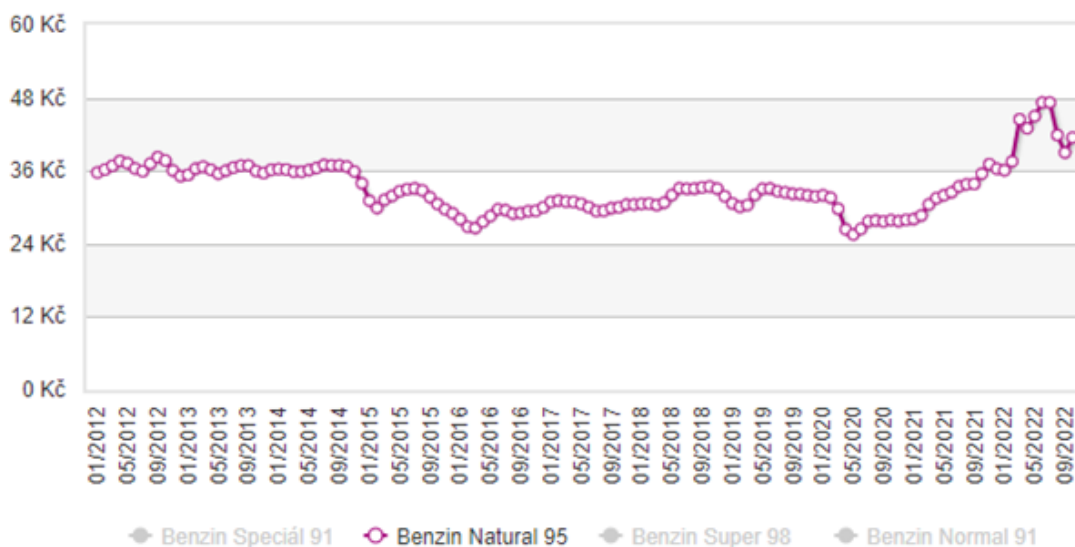
Úvod

V dnešní době počet osobních aut stále roste. Podle statistiky v roce 2021 je ve světě 1,446 miliard automobilů [1]. Toto souvisí s ekonomickým růstem států, které se stále rozvíjí a mají velkou populaci, například Čína.

Z toho plyne závislost dopravního sektoru na fosilních palivech. Pro automobilovou dopravu je rozhodující ropa. Navíc EU je třetí největší spotřebitel ropy po USA a Číně [2].

Proto se výroba automobilů musí přizpůsobit k tomu, že se zavádí přísné ekologické normy. Z jiné strany na ně tlačí spotřebitelé, kteří chtějí menší spotřebu svých vozidel.

V Evropské unii zatím zůstávají nejpoužívanějšími palivy benzín a nafta [3].



Obrázek 1: Vývoj ceny benzínu Natural 95 [4]

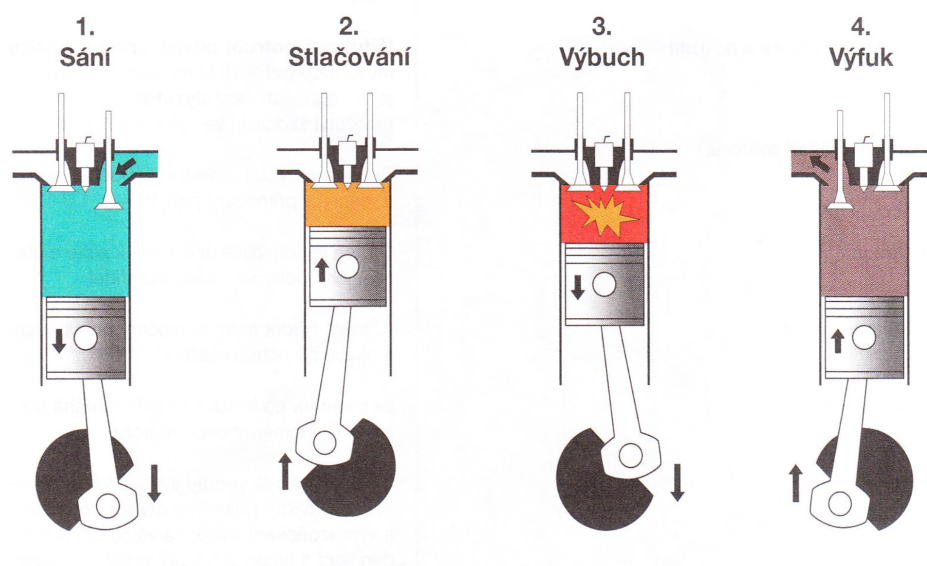
Díky této skutečnosti se vyvíjí různé metody zefektivnění provozu automobilů. Buď jde o hybridizaci nebo zmenšení ztrát klasických pohonných jednotek (například odlehčení, přeplňování, nebo snížení mechanických ztrát) [5]. Další možností je rekuperace brzděné energie, což je v hustém provozu výhodná metoda [6].

Kapitola 1

Spalovací motor a jeho efektivita

1.1 Spalovací motor

Stále nejpoužívanějším typem motoru je čtyřtaktní pístový motor. Podle typu paliva jsou vznětové a zážehové. Jde o tepelný stroj, který přeměňuje chemickou energii na teplo a mechanickou energii působením na píst. Účinnost těchto motorů se pohybuje kolem 35 % [7]. Horní hranice se dá odvodit z Carnotova oběhu, z něhož jsou patrné nevýhody tohoto typu pohonu, například oproti elektromotoru. Stále se ale vyvíjejí způsoby jak zvýšit účinnost spalovacích motorů [7], [8].



Obrázek 1.1: Princip fungování zážehového spalovacího motoru [7]

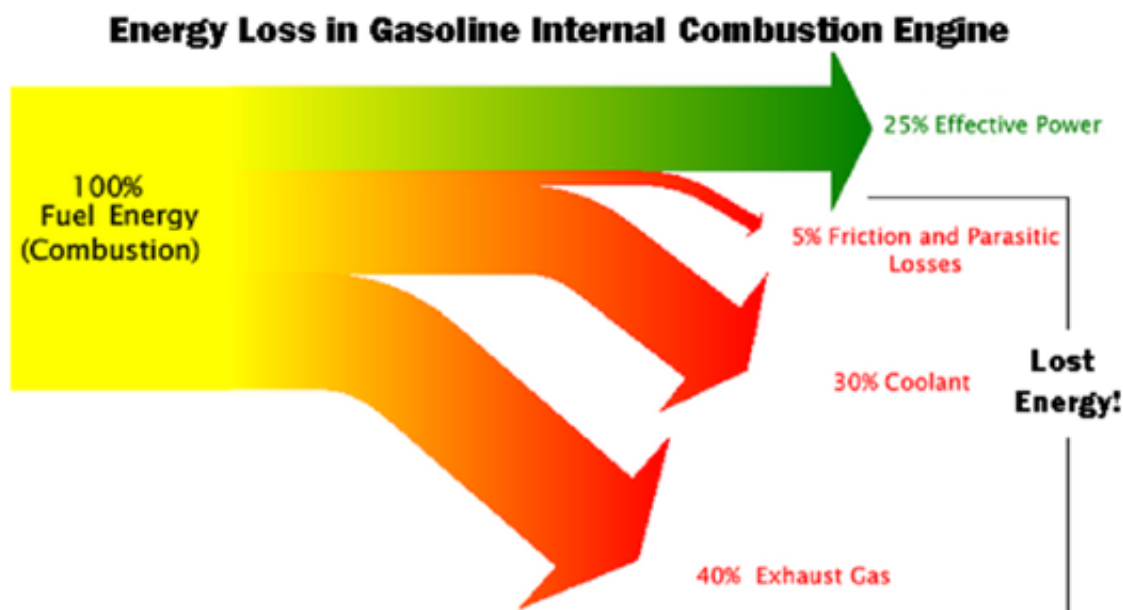
1.2 Zvýšení efektivity a ekonomičnosti provozu spalovacích motorů

Spalovací motor, jako každý jiný, slouží k přeměně formy energie a tato přeměna je ztrátová [8]. Nejdůležitějšími druhy ztrát jsou:

- tepelné (výfuk, chlazení)
- mechanické (tření v převodovce, v ložiskách)
- vlastní spotřeba (alternátor, kompresor klimatizace, oběhové čerpadlo chlazení apod.)

Větší výkon motoru je žádaná věc, navíc při co nejmenších rozměrech a hmotnosti [9]. Existuje více cest k efektivnější práci motoru a lepšímu využití paliva:

- snížení mechanických ztrát
- zvýšení plnicího tlaku (přepřívání)
- snížení doby běhu naprázdno („start and stop“)
- rekuperace brzděné energie



Obrázek 1.2: Energetická bilance spalovacího motoru [10]

1.2.1 Snížení mechanických ztrát

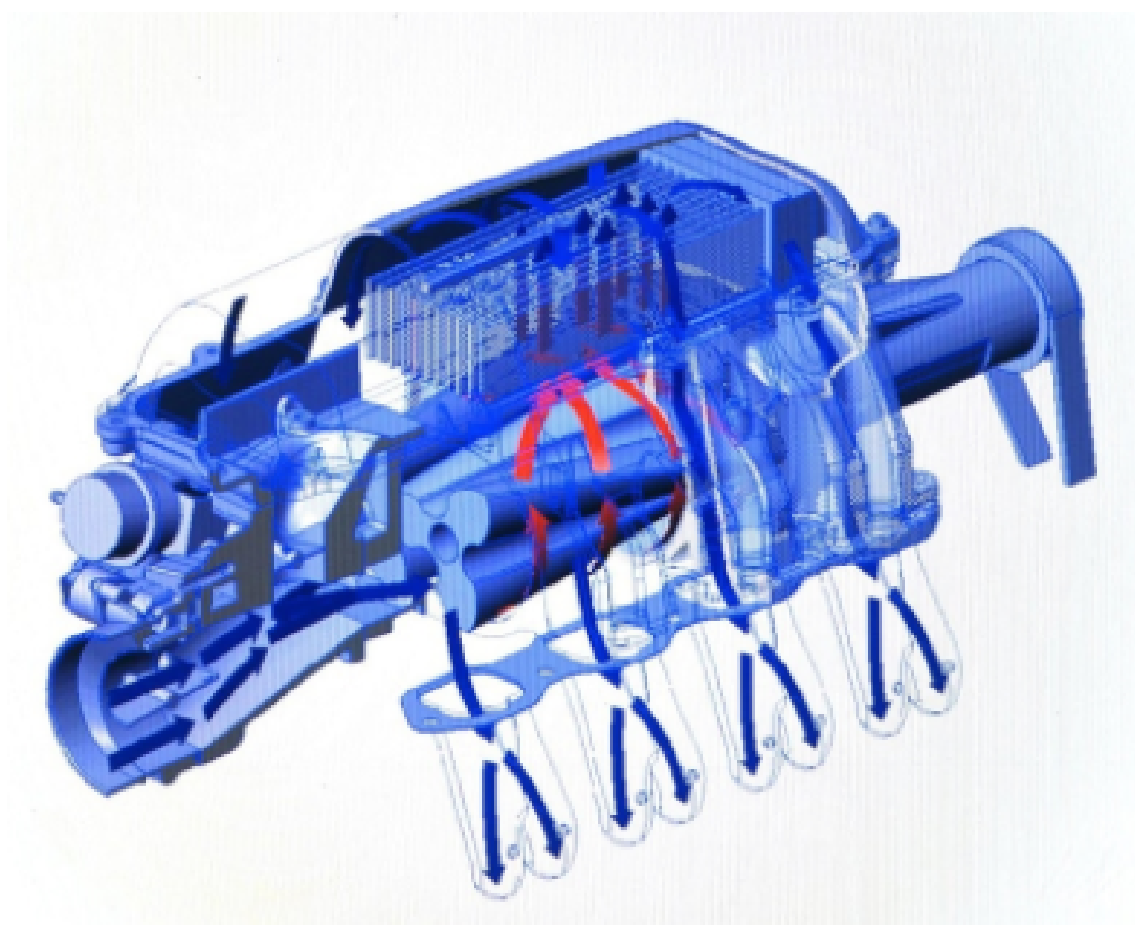
Mechanické ztráty způsobené třením se dají snížit mazáním. Zpravidla se používají oleje (minerální, syntetické). Také se snižuje opotřebení dílů, které se o sebe třou, a zlepšuje se odvod tepla.

1.2.2 Zvýšení tlaku vzduchu na vstupu do motoru

Jedná se o velice jednoduchý a účinný způsob zvyšování výkonu motoru. Používá se jak u zážehových, tak i u vznětových pohonných jednotek. Snahou je dopravit do válce více vzduchu pro dosažení lepšího spalování a tak můžeme dostat z menšího zdvihového objemu více výkonu. Navíc nejsou třeba žádné zvláštní přestavby a úpravy motoru [9].

Kompresor s mechanickým pohonem

Je přímo připojen k motoru, odebírá z něj výkon na přeplňování při jízdě, při volnoběhu se odpojuje. Vyznačuje se tím, že má rychlý nárůst tlaku v nízkých otáčkách (absence turbodíry) [11].

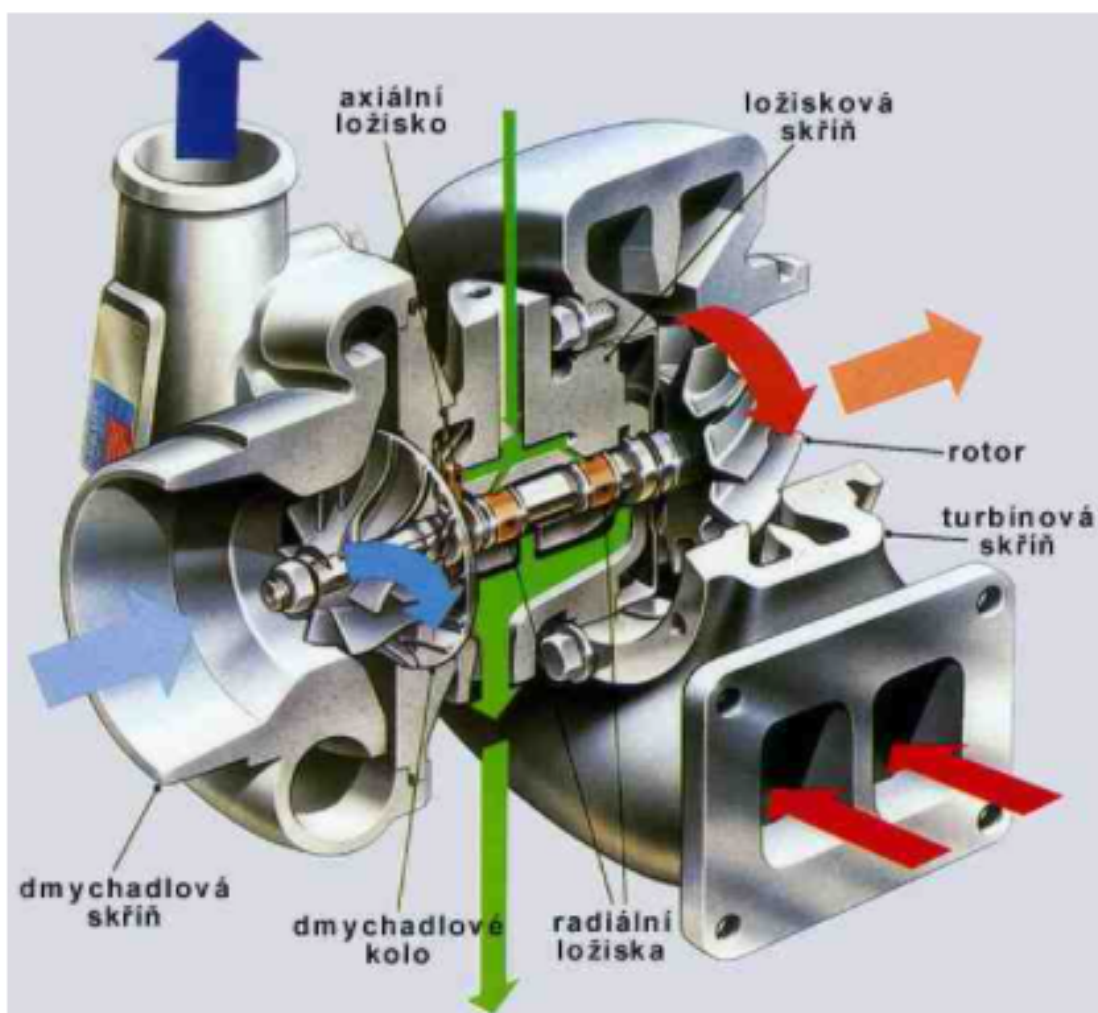


Obrázek 1.3: Mechanicky pohaněný kompresor [12]

Turbodmychadlo

Jedná se o dmychadlo poháněné výfukovými plyny. Skládá se ze dvou hlavních částí - turbínové a dmychadlové. Zvýšení výkonu je dosaženo stlačením vzduchu do motoru a tak zvyšuje účinnost oproti klasickému motoru. Turbína se točí rychlostí 50 000 až 400 000 ot/min. Je to složitější systém, než mechanicky poháněný kompresor, ale neodebírá výkon z hřídele motoru, využívá jenom energii výfukových plynů [11], [12].

Značnou výhodou je nárůst výkonu bez velkých úprav, turbodmychadlo má i některé nevýhody. Vzduch v dmychadle se během stlačení ohřívá s následnou nutností chlazení, což snižuje účinnost. Také existuje prodleva mezi sešlápnutím plynového pedálu a nárůstu tlaku. Další nevýhodou je nutnost řízení přeplňování. Například při velkém zatížení a vysokých otáčkách je nutno vypustit přebytečné výfukové plyny, aby nedošlo k poškození turbodmychadla a samotného motoru.



Obrázek 1.4: Turbodmychadlo poháněné výfukovými plyny [12]

1.2.3 Snížení doby chodu naprázdno

„Start and stop“ systém, je technologie, která po zastavení vozidla vypne motor, pak ho opět nastartuje před rozjezdem. V důsledku toho snižuje spotřebu paliva a emise, zejména v hustém provozu. Za určitých podmínek se dá ušetřit přes 8 procent paliva. Nevýhodou ale je nutnost údržby systému, vzniká totiž větší zátěž na baterii a startér [13].

1.2.4 Rekuperace brzděné energie

Při brzdění se vozidla kinetická energie přemění na teplo v brzdách. Princip rekuperace spočívá v tom, abychom tuto brzděnou energii nemařili v brzdách (tou přeměnou na teplo), ale nějak využili. Zpravidla se tato energie akumuluje a pak se používá pro pohon za jízdy [14].

V případě napájení ze sítě se tato energie vrací přímo do napájecí sítě, kde je použita pro zrychlování jiných napájených lokomotiv či napájení jiných připojených spotřebičů. Typickým příkladem je pražské metro [14]. Při napájení z baterie se energie používá pro nabíjení baterie.

V automobilech se také používá rekuperace, a to více způsoby.

1.2.5 Metody rekuperace brzděné energie

Elektrická rekuperace

Pokud se jedná o elektromobil, tak jednoduše elektromotor při brzdění pracuje v generátorovém režimu a nabíjí baterii. U spalovacích motorů je hřídel spojena s elektrogenerátorem a ten vyrábí elektrickou energii, která se použije na nabíjení baterií, nebo se použije pro pohon pomocných systémů [15].

Také existuje možnost nabíjení superkondenzátoru. Výhodou této metody je, že při úschově elektrické energie, nedochází k její transformaci do jiné formy. Jelikož každá přeměna je ztrátová a může mít další nežádoucí účinky, tak ze ztrátového hlediska je tato metoda výhodnější než akumulace do baterií. Avšak z hlediska měrné energie, je superkondenzátor v nevýhodě v porovnání s akumulátory a setrvačníky [16].

Rekuperace stlačováním plynu

Princip spočívá ve stlačování tekutiny v nádobě. Jako pracovní plyn se často používá dusík. Po stlačování do nádoby je tato metoda dobrá na dlouhodobé uschování energie. Na druhou stranu, není tento způsob tak účinný jako elektrická rekuperace a stlačování plynů je proces, který vyžaduje čas [17]. Je nutno zmínit, že nabíjení baterie také trvá nějaký čas.

Mechanická rekuperace

Principiálně se jedná o rotující setrvačnick, který je schopný přijmout energii během brzdění. Potom se setrvačnick při jízdě připojí k hnací hřídeli a přes převodovku předá moment na kola. Tento způsob rekuperace je určen ke krátkodobému uschovávání kinetické energie, kdy je setrvačnick schopen akumulovat větší množství energie, dle hmotnosti a pevnosti materiálu setrvačnicku [17].

Kapitola 2

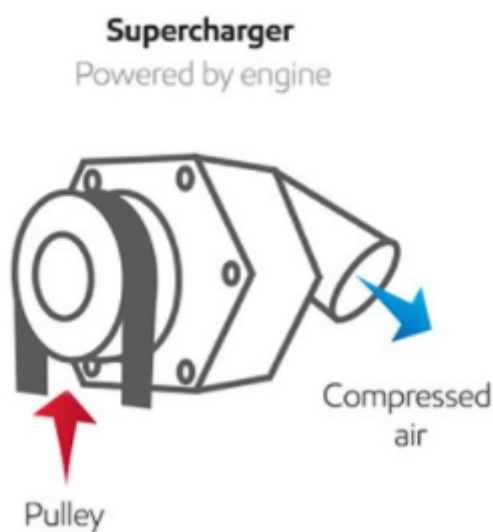
Přestavba spalovacího motoru na kompresor

2.1 Komprese vzduchu do tlakové nádoby

Hlavním způsobem rekuperace, který se bude v této práci řešit, je použití spalovacího motoru jako kompresoru pro stlačování vzduchu. Jedná se o stlačování vzduchu během brzdění do tlakové nádoby a jeho následného použití. Otázkou potom je umístění nádoby, nutné úpravy a přestavby a způsoby použití.

2.1.1 Doplnkový mechanicky poháněný kompresor

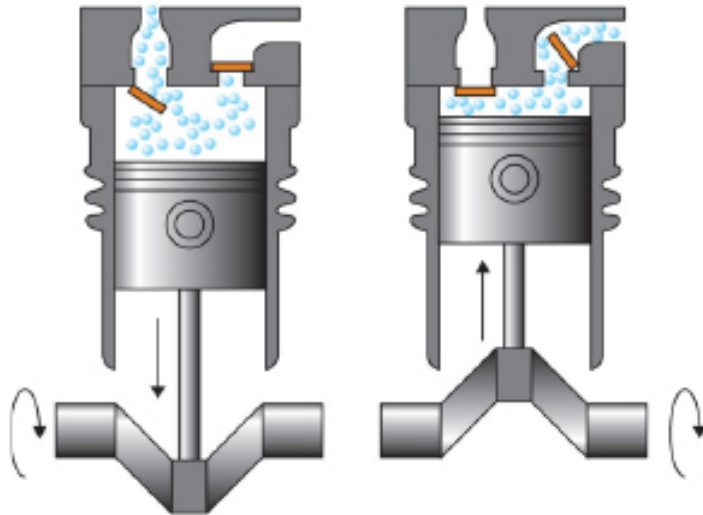
První variantou je během brzdění pomocí elektronicky ovládaného mechanismu připojovat k motoru kompresor. Jenže tento způsob vyžaduje použití dalších zařízení, což přinese další ztráty a bude potřeba vyřešit umístění a řízení kompresoru.



Obrázek 2.1: Kompresor poháněný motorem [18]

2.1.2 Použití spalovacího motoru jako pístového kompresoru

Další variantou je použít spalovací motor přímo jako pístový kompresor. Během brzdění přestane vstřikovač přidávat do válce palivo, ale dál bude do motoru nasáván vzduch. Následným stlačením pístu se otevře ventil a vzduch se začne stlačovat do kompresorové nádoby. Dá se využít přímo výfukový ventil, přičemž ve výfukovém potrubí musí být přesměrování vzduchu do tlakové nádoby, místo do výfuku.



Obrázek 2.2: Princip pístového kompresoru [19]

2.2 Umístění tlakové nádoby ve vozidle

Problém umístění tlakové nádoby ve vozidle je důležitý. Často tento problém řeší majitelé vozidel s pohonem na plyn. První možností je použít část zavazadlového prostoru. Toto řešení ale není moc praktické pro ty, kteří vůz používají k pravidelnému převážení rozměrných nákladů. Pokud objem kufru není důležitým faktorem, nádoba může být umístěna tam. Další možností je umístit nádobu místo rezervy. To nezabere místo v kufru, navíc v dnešní době mnozí řidiči rezervu nepoužívají nebo ji dokonce vůbec nemají [20]. Pokud nádoba bude na místě rezervy, je populárním řešením toroidální tvar.

2.3 Úprava motoru na kompresor

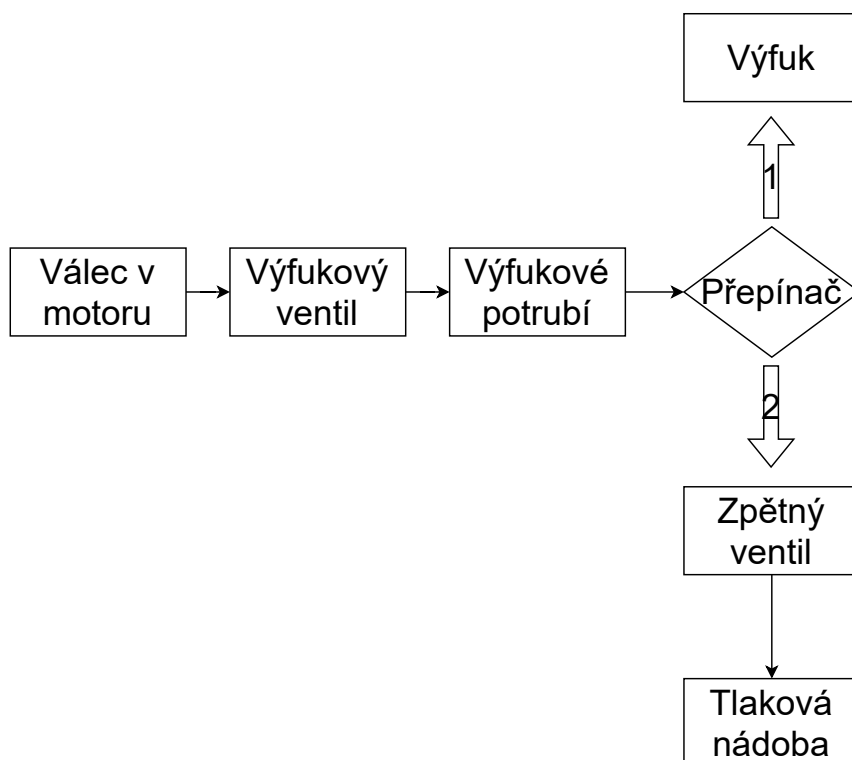
Jde o úpravu pístového motoru na kompresor. První možností je přidat doplňkový ventil, který bude vést k nádrži. Během tohoto procesu sací ventil funguje normálně, ale výfukový je zavřený. Tato možnost má nevýhodu v tom, že musíme zasahovat do motoru.

Další možnost je udělat speciální přepínač ve výfukovém systému. Je dobré umístit přepínač na konci výfukového potrubí před vstupem do katalyzátoru a tlumiče výfuků, abychom rovnou dostávali vzduch ze všech válců.

Během brzdění vozidla přepínač změní polohu a zároveň se přestane vstříkovat palivo. Sací ventil zůstane v chodu, což nám zajistí, že se nasávaný vzduch dostane do tlakové nádoby. Přepínač bude ovládán elektronicky, což vyžaduje mírné úpravy softwaru.

Před tlakovou nádobou bude umístěn zpětný ventil, který zajistí, že během další fáze brzdění dostaneme další dávku vzduchu do nádoby bez ztráty již stlačeného vzduchu.

Kyslík ve vzduchu umožňuje spalování. Použijeme-li tento vzduch během rozjíždění, dosáhneme lepšího spalování a většího výkonu. Při plnění velkým tlakem (maximálně možným pro konkrétní motor), dosáhneme většího množství kyslíku a vzduchu ve válci. Tím se zvýší objemová účinnost a dostaneme větší výkon. Přibližné schéma je na obrázku:



Obrázek 2.3: Schéma okruhu s tlakovou nádobou verze 1, vlastní tvorba

2.4 Použití stlačeného vzduchu

Máme nádobu se stlačeným vzduchem s určitým tlakem (v nádobě bude zřízen manometr). Nejefektivnější variantou jeho použití je přepřňování.

2.4.1 Přepřňování

Jak bylo zmíněno výše, přepřňovaný motor má větší výkon než atmosférický se stejným zdvihovým objemem. Přepřňování je většinou realizováno pomocí turbodmychadla, které také potřebuje nějaký výkon k provozu. Myšlenka je taková, abychom v momentě, kdy je v nádobě dostatečný tlak, použili vzduch k přepřňování. Turbodmychadlo se v tento moment od motoru odpojí a bude použit stlačený vzduch. To má několik výhod:

- Zvyšujeme životnost turbodmychadla
- Předpokládáme větší výkon při tomto způsobu přepřňování
- Likvidujeme problém „turbodíry“ (prodleva před plným záběrem turbodmychadla)

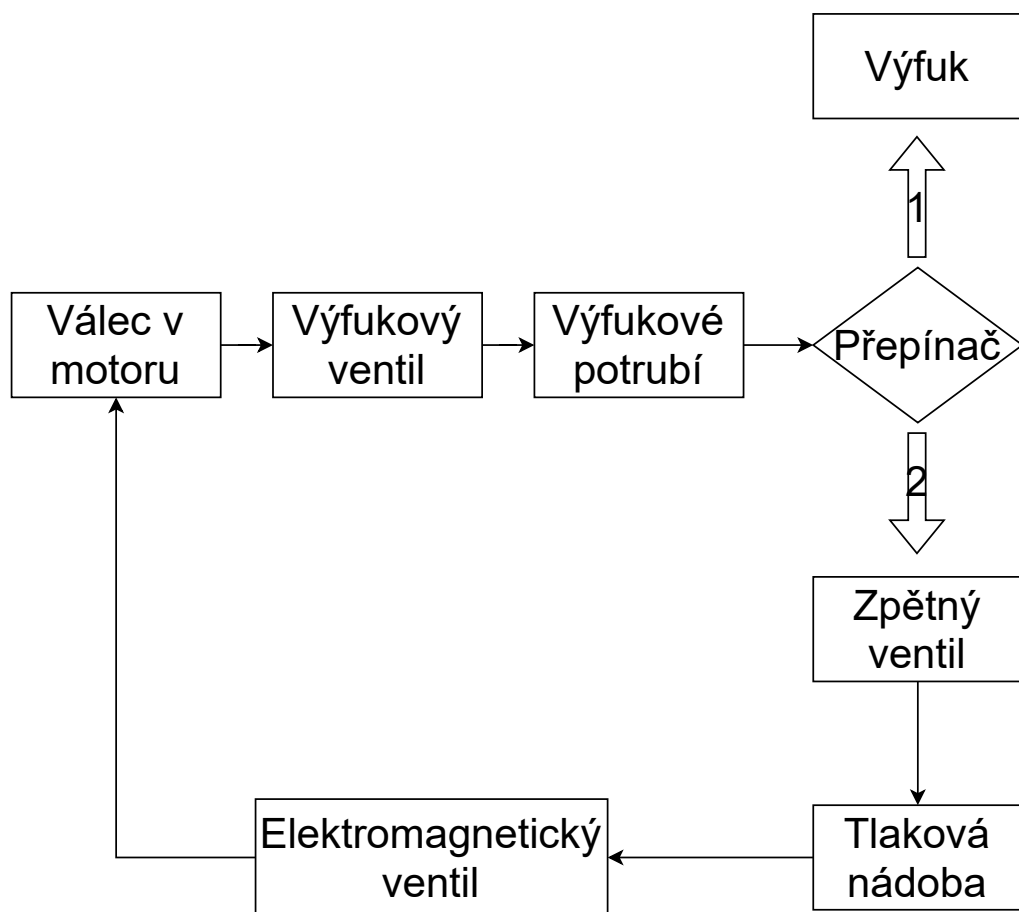
Také existuje možnost použití turbodmychadla zároveň se vzduchem z nádoby. To ale bude chtít jemné nastavení tohoto režimu, aby nevznikl pneumatický ráz, kvůli rozdílu tlaku. Také tím nám přibudou ztráty v turbodmychadlu, čili přijdeme o řadu výhod tohoto systému.

Přepřňování bude realizováno pomocí speciálního elektromagnetického ventilu. K otevření bude potřeba několik podmínek:

- Minimální tlak v nádobě
- Odpojení turbodmychadla
- Otevření sacího ventilu příslušného válce
- Motor neběží na volnoběh

Ventil se zavře až tlak v nádobě klesne natolik, že nebude docházet k účinnému přepřňování.

Takže schéma provozu bude vypadat následujícím způsobem:



Obrázek 2.4: Schéma okruhu s tlakovou nádobou verze 2, vlastní tvorba

2.4.2 Startování

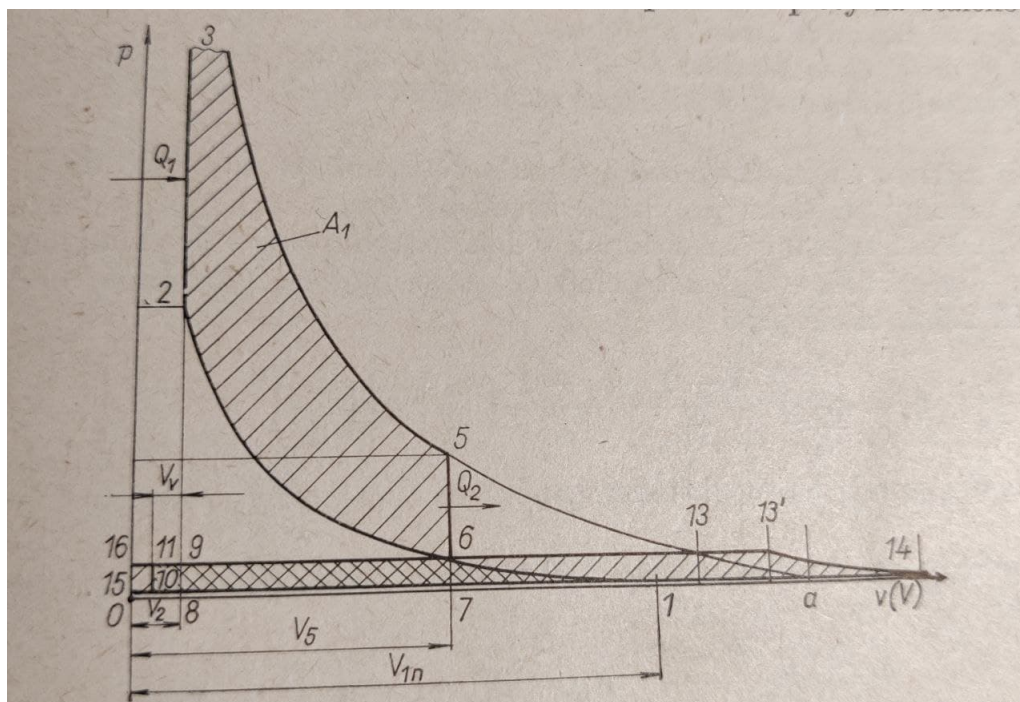
Může nastat situace, že baterie vozidla je nedostatečně nabitá a proto normální nastartování není možné. Teoreticky bychom mohli použít stlačený vzduch na „pomoc“ startéru. To se používalo u velkých naftových motorů, často u armádních vozidel. V takovém případě byl vzduch umístěn ve speciálních lahvích a sloužil jenom pro tento účel [21]. Mělo by to smysl pro moderní downsizové motory, které mají menší mechanické ztráty, a tak by dostatečné množství vzduchu mohlo pomoci.

Kapitola 3

Výpočet celkové bilance upraveného pohonu vozidla

3.1 Výpočet práce přeplňování

Jde o výpočet práce turbíny a dmyhadla. To se vypočte pomocí „p - V“ diagramu. V nejjednodušším případě je plnicí tlak je stejně velký jako tlak před turbínou. Diagram můžeme vidět na obrázku 3.1.

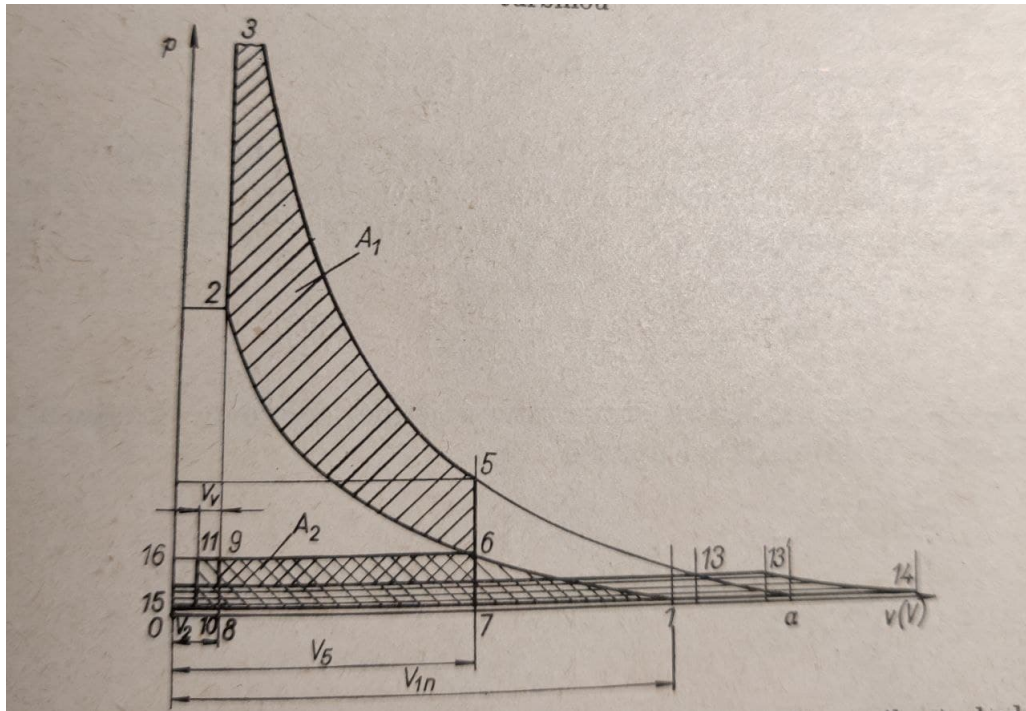


Obrázek 3.1: Teoretický tlakový diagram čtyřdobého motoru, přeplňovaného dmyhadlem, které je poháněno turbínou na výfukové plyny a je-li plnicí tlak stejně velký jako tlak plynů před turbínou [22]

Legenda:

- 1 – 2 – 3 – 5 : klasické fáze práce motoru (po řadě: sání, komprese, expanze a výfuk)
- 5 – a – 7 – 6 – 5 : expanzní práce motoru
- 13 : bod protitlaku před turbínou, do něhož jsou výfukové plyny vytlačovány
- 5 – 6 – 13 – 5 : expanzní práce, která bude přeměněna na kinetickou energii víření v turbíně
- 13' – 14 : expanze v turbíně
- 16 – 13' – 14 – 15 – 16 : práce turbíny
- 10 – 1 – 6 – 11 – 10 : práce dmyhadla
- 9 – 6 – 7 – 8 – 9 : kladná práce plnění motoru

Reálně ale plnicí tlak je vyšší, než tlak před turbínou. Pak diagram bude vypadat následujícím způsobem:



Obrázek 3.2: Teoretický tlakový diagram čtyřdobého motoru přeplňovaného turbodmyhadlem, je-li plnicí tlak vyšší než tlak plynů před turbínou [22]

Legenda je výše u obrázku 3.1, zde ale jsou práce plnění a plnicí tlak vyšší.

Křivka 13'-14 označuje expanzi v turbíně, takže pracovní diagram turbíny je vyjádřen plochou 16-13'-14-15-16. Práce dmyhadla je daná plochou 10-1-6-11-10. Poměr obou ploch udává účinnost celého soustrojí (turbodmyhadla).

Kladná práce plnění motoru 9-6-7-8-9 je potom totožná se zápornou prací potřebnou k vytlačení zplodin hoření.

3.1.1 Výpočet práce motoru

Píst motoru během přepřívování koná práci, která je rovna podle [22]

$$A_P = (p_6 - p_{13'}) (V_5 - V_2) [J], \quad (3.1)$$

kde

- A_P : Práce, kterou vykonává motor v době přepřívování válce [J],
- p_6 : Tlak plnění [bar],
- $p_{13'}$: Tlak před lopatkami turbíny [bar],
- V_5 : Objem zplodin hoření před expanzí a únikem do turbíny [m³],
- V_2 : Objem směsí po stlačení [m³].

Takže vzorec 3.1 můžeme přepsat do tvaru¹

$$A_{Pm3} = \frac{(p_6 - p_{13'}) (V_5 - V_2)}{V_1} [J/m^3], \quad (3.2)$$

kde

- A_{Pm3} : Práce, kterou vykonává motor v době přepřívování válce na metr kubický plnicího vzduchu [J],
- p_6 : Tlak plnění [bar],
- $p_{13'}$: Tlak před lopatkami turbíny [bar],
- V_5 : Objem zplodin hoření před expanzí a únikem do turbíny [m³],
- V_2 : Objem směsí po stlačení [m³],
- V_1 : Objem motoru [m³].

Ve vzorci 3.1 je zanedbaná práce turbíny a dmychadla. Musíme si ale uvědomit, že se jedná o totožnou práci, rozdíl je ve znaménku. Také výsledek se bude lišit kvůli netěsnostem a ztrátě plnicího vzduchu při vyplachování spalovacího prostoru [22].

3.1.2 Výpočet práce dmychadla

Práce dmychadla pro hmotnost 1 kg vzduchu při adiabatické účinnosti je dána rovnicí podle² [22]

$$A_{Dkg} = -\frac{1}{\eta_{ad}} \cdot \frac{n-1}{n} \cdot R \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_6}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] [J/kg], \quad (3.3)$$

¹Při rozměrové analýze vzorce 3.1 je patrné, že dostaneme práci v Joulech. Toto je práce na jeden cyklus práce motoru. Tuto práci je potřeba vydělit zdvihovým objemem motoru, a tak dostaneme práci na jeden metr kubický plnicího vzduchu.

Jednotku bar jsem se rozhodl použít pro jasnější výpočet, počítáme s převodem 1 bar = 100 kPa.

²Znaménko minus ve vzorci 3.3 znázorňuje to, že práce turbíny a stejné a liší se jen o znaménko. Pro náš výpočet budeme uvažovat práci dmychadla jako kladnou, protože motor pohání soustrojí turbína-dmychadlo a k tomu musí vykonat určitou práci.

kde

- η_{ad} : Adiabatická účinnost [-],
- R : Plynová konstanta vzduchu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
- T_1 : Teplota nasátého vzduchu [$^{\circ}\text{K}$],
- p_1 : Tlak před dmychadlem [bar],
- p_6 : Plnicí tlak [bar],
- n : Exponent polytropy [-].

3.1.3 Celková práce na přeplňování

Přepočteme práci motoru na kilogram vzduchu

$$A_{Pkg} = \frac{A_{Pm3}}{\rho_v} = \frac{(p_6 - p_{13'}) (V_5 - V_2)}{V_1 \cdot \rho_v} \quad [\text{J}/\text{kg}], \quad (3.4)$$

kde

- A_{Pkg} : Práce motoru na kilogram vzduchu [J/kg],
- A_{Pm3} : Práce, kterou vykonává motor v době přeplňování válce na metr kubický plnicího vzduchu [J],
- ρ_v : Hustota vzduchu [kg/m^3],
- p_6 : Plnicí tlak [bar],
- $p_{13'}$: Tlak před lopatkami turbíny [bar],
- V_5 : Objem zplodin hoření před expanzí a únikem do turbíny [m^3],
- V_2 : Objem směsi po stlačení [m^3],
- V_1 : Objem motoru [m^3].

Potom výslednou práci motoru na kilogram vzduchu během přeplňování včetně práci dmychadla vypočteme:

$$\begin{aligned} A_M &= A_{Dkg} + A_{Pkg} = \\ &= \frac{(p_6 - p_{13'}) (V_5 - V_2)}{V_1 \cdot \rho_v} + \frac{1}{\eta_{ad}} \cdot \frac{n-1}{n} \cdot R \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_6}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad [\text{J}/\text{kg}], \end{aligned} \quad (3.5)$$

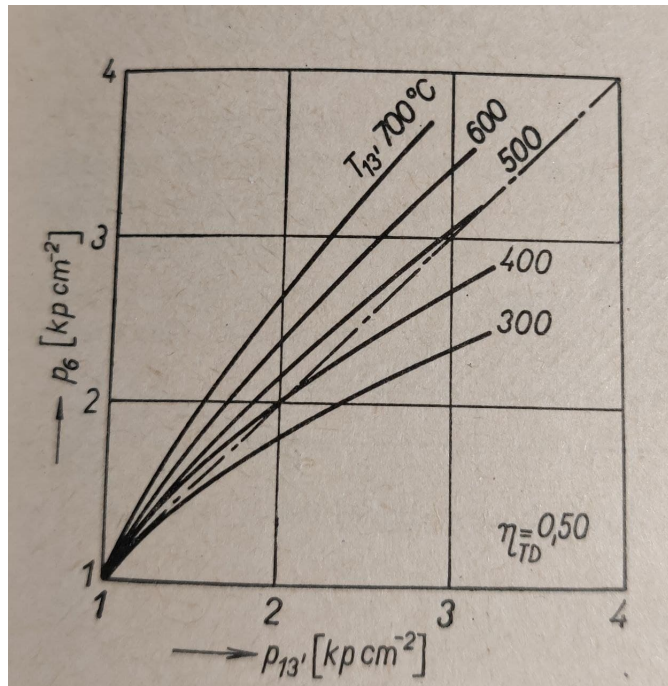
kde

- A_M : Celková práce na přeplňování [J/kg],
- A_{Pkg} : Práce motoru na kilogram vzduchu, kterou vykonává motor v době přeplňování válce (viz 3.1),
- A_{Dkg} : Práce, kterou vykoná dmychadlo na kilogram vzduchu,
- ρ_v : Hustota vzduchu,
- další veličiny : viz 3.3, 3.4.

3.1.4 Závislost tlaku plnění na tlaku před turbínou

Je důležité zmínit, že tlak plnění p_6 je závislý na tlaku před turbínou $p_{13'}$ a taky na teplotě vzduchu před lopatkami turbíny $T_{13'}$. Teplota $T_{13'}$ bývá různá, u naftových motoru je nižší 500 - 700 °C. U benzínových až 800 °C. Proto je nutné turbodmychadlo uměle chladit, aby nedošlo k poškození lopatek či jiných částí soustrojí [22].

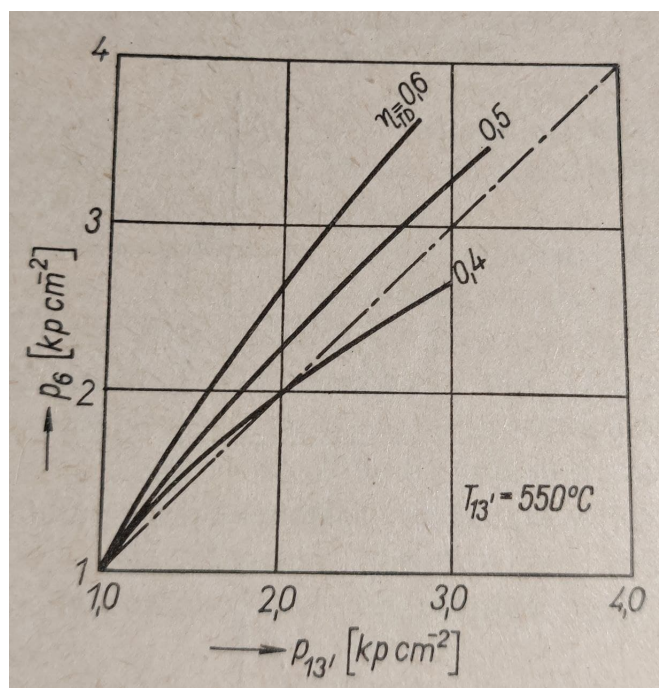
Pokud celková účinnost turbodmychadla je 50 % a teplota nasátého vzduchu T_1 je 288 °K, pak závislost tlaku plnění p_6 na tlaku před turbínou $p_{13'}$ je uveden na obrázku 3.3 pro různé hodnoty teploty $T_{13'}$.



Obrázek 3.3: Závislost tlaku plnění p_6 na tlaku $p_{13'}$ před turbínou pro různou teplotu $T_{13'}$ před lopatkami turbíny a pro neproměnnou účinnost turbodmychadla $\eta_{TD} = 50\%$ [22]

Pokud si zvolíme neproměnnou teplotu $T_{13'}$, tak zmíněná výše závislost může být použita pro různé účinnosti turbodmychadla³. To je znázorněno na obrázku 3.4.

³Je nutno zmínit, že veškeré množství výfukových plynů prochází turbínou.



Obrázek 3.4: Závislost tlaku plnění p_6 na tlaku $p_{13'}$ před turbínou a účinnosti turbodmychadla při neproměnné teplotě $T_{13'}$ pro proměnnou účinnost turbodmychadla [22].

3.2 Volba motoru

Automobilky vyvinuly a stále vyvíjejí velkou řadu motorů. Pro výpočet budeme potřebovat nějaký konkrétní případ. Rozhodl jsem se výpočet provést pro motor 1.0 TSI (Turbocharged Stratified Injection). K tomu vedlo několik důvodů:

- Motor čerpá velkou část výkonu z přeplňování, nikoliv ze zdvihového objemu
- Je to moderní přeplňovaný benzínový motor koncernu Volkswagen
- Přeplňování benzínových motorů je výhodnější, kvůli teplejším zplodinám hoření

3.2.1 Motor 1.0 TSI

Jedná se o tříválcový přeplňovaný benzínový motor. Motor je čtyřdobý, vyrábí se v různých variantách, existuje také možnost automatické převodovky. V této práci uvažuji variantu s výkonem 81 kW. Motor se instaluje do mnoha vozů automobilky Volkswagen, včetně českých vozů Škoda. [23].

Uvádí se přeplňovací přetlak až 1,6 barů [24], což je docela vysoká hodnota. Podle mého názoru se jedná skutečně o maximální hodnotu v maximálních možných pro provoz přeplňování otáčkách. Tlak přeplňování při běžné jízdě je samozřejmě menší.

Také uvažujeme variantu s menším výkonem, takže plnicí tlak a teplota výfukových plynů bude menší. Jelikož málo benzinových přeplňovaných motorů má v dnešní době variabilní geometrii lopatek (lopatky se natočí správným způsobem pro zajištění vysokého plnicího tlaku při různých otáčkách motoru), tak bych zvolil očekávaný plnicí tlak 1,1 barů. Jedna se o přetlak přeplňování, není zde zahrnut atmosférický tlak.

3.3 Dosazení do výpočtu

Pro výpočet budeme potřebovat tyto údaje⁴:

- $k = 1,35$: Exponent adiabaty [-],
- $R = 287$: Plynová konstanta [$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$],
- $n = 1,31$: Exponent polytropy [-],
- $T_{13'} = 550$: Zvolená teplota výfukových plynů [$^\circ C$],
- $\eta_{ad} = 0,9$: Adiabatická účinnost [-],
- $p_6 = 2,1$: Absolutní tlak [bar],
- $p_{13'} = 1,77$: Tlak před lopatkami turbíny (odečteno z 3.4) [bar],
- $p_1 = 0,95$: Tlak před dmychadlem [bar],
- $\rho_v = 1,205$: Hustota vzduchu podle [25] [kg/m^3].

K výpočtu potřebujeme objemy V_5 a V_2 podle 3.4. Podle [22] platí následující tvrzení:

$$\frac{V_5}{V_2} = \varepsilon_e \quad [-], \quad (3.6)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \varepsilon_k \quad [-], \quad (3.7)$$

kde

- ε_e : Expanzní poměr [-],
- ε_k : Kompresní poměr [-],
- V_5 : Objem zplodin hoření před expanzí a únikem do turbíny [m^3],
- V_2 : Objem směsi po stlačení [m^3],
- V_1 : Objem motoru [m^3].

Podle [26], [23] také $\varepsilon_e = 12,5$ a $\varepsilon_k = 10,5$. Potom dopočteme hledané objemy za podmínky, že V_1 je objem motoru před kompresí, což je v našem případě $11 = 0,001 m^3$.

⁴Tlaky p_6 a $p_{13'}$ se určily z grafu 3.4 pro účinnost $\eta_{TD} = 0,6$. Odečtení respektuje poměr mezi jednotkou barů a $kp \cdot cm^{-2}$.

Adiabatická účinnost byla zvolena v běžných rozmezích.

3.3.1 Výpočet objemu V_2 a V_5

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon_k} = \frac{0,001}{10,5} = 9,52 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3, \quad (3.8)$$

$$V_5 = V_2 \cdot \varepsilon_e = 9,52 \cdot 10^{-5} \cdot 12,5 = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (3.9)$$

3.3.2 Výpočet práce dmyhadla

Podle 3.3 platí

$$\begin{aligned} A_{Dkg} &= \frac{1}{\eta_{ad}} \cdot \frac{n-1}{n} \cdot R \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_6}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \\ &= \frac{1}{1,31} \cdot \frac{1,31-1}{1,31} \cdot 287 \cdot 293 \cdot \left[\left(\frac{2,1}{0,95} \right)^{\frac{1,31-1}{1,31}} - 1 \right] = 4550 \text{ J/kg}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.3.3 Výpočet práce motoru

Podle 3.4 platí

$$\begin{aligned} A_{Pkg} &= \frac{(p_6 - p_{13'}) \cdot (V_5 - V_2)}{V_1 \cdot \rho_v} = \\ &= \frac{(2,1 - 1,77)}{0,001} \cdot 100000 \cdot \frac{(1,19 \cdot 10^{-3} - 9,52 \cdot 10^{-5})}{1,205} = 29982 \text{ J/kg}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.3.4 Celková práce pohonu na přeplňování

Potom z 3.5 platí

$$A_M = A_{Dkg} + A_{Pkg} = 29982 + 4550 = 34532 \text{ J/kg}. \quad (3.12)$$

Toto je celková práce, kterou koná motor a dmyhadlo na přeplňování.

3.4 Výpočet práce přestavěného na kompresor motoru

Pro stlačování vzduchu se bude používat motor, který bude pracovat jako pístový kompresor. Moderní přeplňované benzínové motory mají tlak ve válci přibližně 1 MPa, to poznáme z kompresního poměru [23]. To znamená, že pak můžeme dosáhnout zmíněného tlaku v nádobě.

3.4.1 Adiabatické stlačování vzduchu

Stlačování vzduchu budeme považovat za adiabatický proces. Práci adiabatického stlačení vzduchu vypočítáme podle vztahu uvedeného v [27], [28], který má tvar

$$\begin{aligned} A_{ad} &= \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot t \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] = \\ &= \frac{1,35}{0,35} \cdot 287 \cdot 293 \cdot \left[\left(\frac{10}{0,95} \right)^{(0,35)/1,35} - 1 \right] = 272752 \text{ J/kg}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

kde

- A_{ad} : Práce na stlačování vzduchu [J/kg],
- k : Exponent adiabaty [-],
- R : Plynová konstanta vzduchu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
- t : Teplota vzduchu [$^\circ\text{K}$]
- η_{ad} : Adiabatická účinnost [-],
- P_2 : Požadovaný tlak [bar],
- P_1 : Tlak před stlačením [bar].

3.4.2 Rekuperovaná kinetická energie

Kinetická energie vozidla s hmotností 1500 kg při rychlosti 50 km/h se vypočítá jako

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{1500 \cdot 13,8^2}{2} = 142830 \text{ J}, \quad (3.14)$$

kde

- E_{kin} : Kinetická energie [J],
- m : Hmotnost vozidla [kg],
- v : Rychlost vozidla [m/s].

Je jasné, že celou tuto energii neumíme rekuperovat. Respektujeme ztráty, tření kol o silnici, pohon pomocných zařízení motoru, odpor vzduchu a případné přibrzdování. Zvolíme si, že na jedno brzdění umíme rekuperovat $E_{rek} = 100 \text{ kJ}$ a pak použít tuto energii na stlačování. Takže na jedno brzdění umíme teoreticky stlačit maximálně ⁵

$$m_{stl1} = \frac{E_{rek}}{A_{ad}} = \frac{100000}{264865} = 0,37 \text{ kg}, \quad (3.15)$$

- E_{rek} : Rekuperovaná kinetická energie [J],
- m_{stl1} : Teoretická hmotnost stlačeného vzduchu na jedno brzdění [kg],
- A_{ad} : Práce na stlačování vzduchu [J/kg].

⁵Toto je pomocný výpočet, který pak použijeme pro ověření hmotnosti vzduchu, která byla stlačená motorem.

3.4.3 Výpočet kompresorového chodu motoru

Teď vypočítáme kolik vzduchu zvládne stlačit motor za minutu.

Motor má parametry [23]:

$d = 74,5$: Průměr pístu [mm],

$h = 76,4$: Zdvih pístu [mm],

$\eta_o = 0,9$: Objemová účinnost motoru při atmosferickém provozu (zvoleno) [-].

Uvažujeme také otáčky, na celý cyklus spalovacího motoru udělá klikový hřídel 2 otáčky⁶. To znamená, že na jednu fázi komprese udělá hřídel dvě otáčky. Zvolíme si průměrné otáčky při brzdění 1500 ot/min. To znamená, že do vzorce pro kompresor dosadíme dvakrát menší hodnotu $n_0 = 750$ ot/min. Pak bude platit podle [27], že průřez pístu je

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0745^2}{4} = 4,359 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2. \quad (3.16)$$

Vypočítáme objemový průtok pro jeden válec

$$Q_v = S \cdot h \cdot \eta_o \cdot n_o = 0,225 \text{ m}^3/\text{min}. \quad (3.17)$$

Jedná se o tříválcový motor, proto výsledný objemový průtok je

$$Q_{cel} = 3 \cdot Q_v = 0,675 \text{ m}^3/\text{min}. \quad (3.18)$$

Po vynásobení Q_{cel} hustotou vzduchu ρ_v získáme hmotnostní tok

$$G = Q_{cel} \cdot \rho_v = 0,675 \cdot 1,205 = 0,813 \text{ kg}/\text{min}. \quad (3.19)$$

Kde

S : Průřez pístu [m^2],

Q_v : Objemový průtok na jeden válec [m^3/min],

η_o : Objemová účinnost motoru [-],

d : Průměr pístu [mm],

h : Zdvih pístu [mm],

Q_{cel} : Objemový průtok celkový [m^3/min],

G : Hmotnostní tok [kg/min].

Pokud doba brzdění k semaforu bude zvolena $t_{br} = 5$ sekund. Takže na jedno brzdění umíme stlačit

$$m_{stl2} = G \cdot t_{br} = 0,813 \cdot \frac{5}{60} = 0,068 \text{ kg}, \quad (3.20)$$

kde

⁶Podle mě není žádoucí upravovat mechanismus, který otvírá a zavírá sací a výfukový ventil. Pokud se to provede, pak se normální provoz motoru změní

t_{br} : Čas brzdění [min],
 m_{stl2} : Předpokládaná hmotnost stlačeného vzduchu na jedno brzdění [kg],
 G : hmotnostní tok [kg/min].

Toto je dobrá zpráva, protože $m_{stl2} > m_{stl1}$. Kompresor je zařízení, které nemá velkou účinnost, to znamená, že hodnota skutečně stlačeného vzduchu bude určitě menší, než ta teoretická.

3.5 Volba nádoby

Jelikož je možné stlačit 675 litrů vzduchu za minutu (stačí to na dvanáct brzdění v našem případě) a umíme dosáhnout tlaku kolem 10 barů, tak si zvolíme nádobu s maximálním přetlakem 10 barů. Maximální tlak je dán kompresním tlakem, který je motor schopen vyvinout.

Potřebujeme ještě znát dobu brzdění. Ve městě bych zvolil 5 sekund. Po dálnici rekuperovat moc nejde a proto počítáme s městským provozem. Pro bezpečnost a různé situace, jako jízda s kopce, bych navrhoval nádobu pro dobu trvalého brzdění 30 sekund. Pak nám vyjde, že množství, které dostaneme do nádoby za uvažovanou dobu brzdění, je

$$V_s = \frac{Q_{cel} \cdot 30}{60} = \frac{675 \cdot 30}{60} = 337,5 \text{ l.} \quad (3.21)$$

Při přetlaku v nádobě 10 barů objem vzduchu je

$$V_v = \frac{337,5}{10} = 33,8 \text{ l,} \quad (3.22)$$

kde

V_s : Objem stlačeného vzduchu za uvažovanou dobu [l],
 V_v : Zvoleny objem nádoby pro daný přetlak [l],
 Q_{cel} : Objemový průtok celkový [l/min].

Kvůli menšímu namáhání stěn nádoby a pro různé nečekané situace, které mohou nastat, bych zvolil velikost nádoby 35 litrů.

3.6 Úspora paliva při přepřňování z nádoby

Pokud manometr v nádobě indikuje správný dostatečný tlak, bude motor plněn vzduchem z nádoby. Také se v tento okamžik odpojí turbodmychadlo, čímž ušetříme další energii.

3.6.1 Definice městského provozu

Podle studie [29], jízda křižovatkami má značný vliv na spotřebu paliva. Představme si, že vozidlo každých 500 metrů projíždí křižovatkou, což je v centru města běžné. Ve zmíněné studii vozidlo projelo celkem deseti křižovatkami za cca 4 kilometry.

3.6.2 Potenciální úspora při rozjezdech

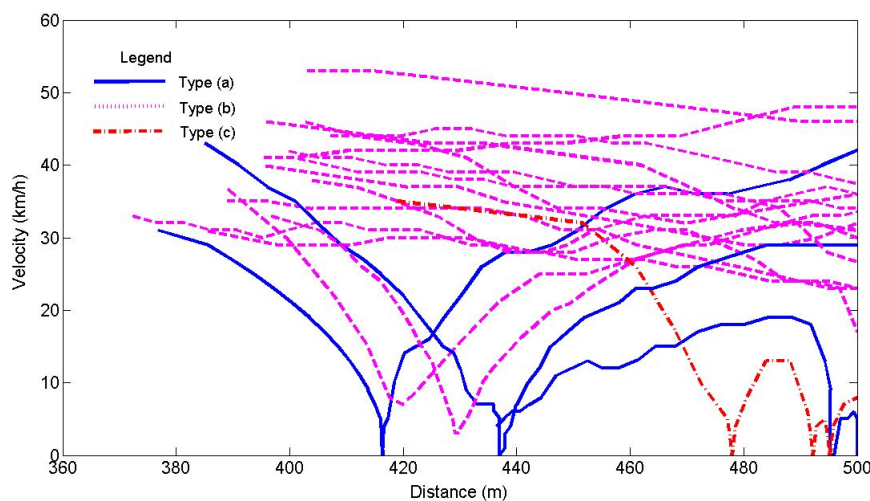
Pokud budeme plnit motor z nádoby místo turbodmychadla, navíc maximálním tlakem, můžeme dosáhnout menší spotřeby při rozjezdu. To se udělá tím, že motor zvládne rozjet vozidlo při provozu v nižších otáčkách.

Turbodmychadlo začíná citelně zabírat v otáčkách kolem 2000 pro benzínový motor. Použití předem připraveného vzduchu už nevyžaduje roztočení motoru a motor by měl být schopen poskytnout potřebný výkon a hlavně moment. Efekt by byl podobný, jako u vozidla s kompresorem, který je spojen s motorem. Dokáže to vyvinout sílu skoro na volnoběh.

To by mohlo zvýšit účinnost motoru na konstrukční maximum. Tím chci říct, že na začátku (v nízkých otáčkách) turbodmychadlo spíše vadí průchodu výfukových plynů, než přeplyne motor. Jelikož přeplyování budeme mít vyřešené, můžeme motor dostat do toho nejpříznivějšího režimu.

Spotřeba zvoleného motoru v Škodě Octavia 3 se udává 5,9 litrů benzínu na 100 km ve městě. Je známo, že výrobce většinou udává spotřebu za ideálních podmínek, proto budeme počítat s hodnotou 7 litrů na 100 km [30].

Vozidlo projede dvakrát za kilometr křižovatkou a plynule zrychluje 75 metrů. Tato hodnota je volena na základě měření ze zmíněné studie, které jsou vidět na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Diagram polohy a rychlosti vozidla v jedné z křižovatek [29]

Zde je názorný průběh „Type (a)“, který znázorňuje stav, že vozidlo bude muset zastavit a pak se rozjet.

3.6.3 Výpočet úspor

Úspory se skládají ze dvou složek:

- Úspory při odpojení turbodmychadla
- Úspory zvýšením účinnosti motoru

Turbodmychadlo je v našem případě je mechanické zařízení, které je poháněno tepelným strojem, což znamená, že si bere u přepřňovaných motorů část mechanické energie, ale celková bilance je pozitivní. Výkon motoru s turbem je vyšší než s atmosférickým motorem. Když ho odpojíme, ušetříme energii, protože motor musí překonat přetlak a roztočit samotnou turbínu.

Ze vzorce 3.14 víme, že potřebujeme přibližně 143 kJ na rozjezd. Tuto energii musí vydat motor. Takže pro spotřebu na rozjezd platí

$$S = \frac{E_{kin}}{\eta_{mot} \cdot H_b} \text{ kg}, \quad (3.23)$$

kde

- S : Spotřeba paliva na rozjezd [kg],
- H_b : Měrná výhřevnost benzínu [MJ/kg],
- η_{mot} : Účinnost motoru [-],
- E_{kin} : Kinetická energie při rychlosti 50 km/h [J].

Účinnost motoru zvolme $\eta_{mot1} = 25\%$, protože během rozjezdu turbodmychadlo zabírá hůře a má nižší plnicí tlak. Měrná výhřevnost benzínu je $H_b = 46,4 \text{ MJ/kg}$. Je potřeba zvýšit otáčky aby byl vyvinut potřebný tlak. Pro spotřebu na jeden rozjezd platí

$$S_{25} = \frac{E_{kin}}{\eta_{mot1} \cdot H_b} = \frac{142830}{0,25 \cdot 46,4 \cdot 10^6} = 0,0123 \text{ kg}, \quad (3.24)$$

kde

- S_{25} : Spotřeba na jeden rozjezd při dané účinnosti 25 % [kg],
- H_b : Měrná výhřevnost benzínu [J/kg],
- η_{mot1} : Účinnost motoru [-],
- E_{kin} : Kinetická energie při rychlosti 50 km/h [J].

Pokud budeme plnit vzduchem z nádoby, účinnost stoupne, protože hned máme k dispozici ten správný plnicí tlak. Počítáme s tím, že účinnost bude $\eta_{mot2} = 35\%$, což plyne ze studie účinnosti přepřňovaných motorů [31]. Dostaneme tedy spotřebu

$$S_{35} = \frac{E_{kin}}{\eta_{mot2} \cdot H_b} = \frac{142830}{0,35 \cdot 46,4 \cdot 10^6} = 0,0088 \text{ kg}, \quad (3.25)$$

kde

- S_{35} : Spotřeba na jeden rozjezd při dané účinnosti 35 % [kg],
- H_b : Měrná výhřevnost benzínu [J/kg],
- η_{mot2} : Účinnost motoru [-],
- E_{kin} : Kinetická energie při rychlosti 50 km/h [J].

Úspory při zvýšení účinnosti

Ze obrázku 3.5 je vidět, že pokud projedeme městským provozem 100 km, budeme z křižovatek zrychlovat 15 km (celkem 200 křižovatek).

Potom na 15 km výše definovaného provozu na rozjezdy při účinnosti 35 procent vozidlo spotřebuje

$$S_{roz1} = S_{25} \cdot 200 = 0,0123 \cdot 200 = 2,46 \text{ kg}, \quad (3.26)$$

- S_{roz1} : Spotřeba benzínu na rozjezdy z křižovatek [kg],
- S_{25} : Spotřeba na jeden rozjezd při dané účinnosti 25 % [kg].

Podobně pro 35 procent⁷

$$S_{roz2} = S_{35} \cdot 200 = 0,0088 \cdot 200 = 1,76 \text{ kg}, \quad (3.27)$$

- S_{roz2} : Spotřeba na rozjezdy z křižovatek [kg],
- S_{35} : Spotřeba na jeden rozjezd při dané účinnosti 35 % [kg].

Úspory při odpojení turbodmychadla

Víme z 3.12, že ušetříme 34532 J/kg vzduchu. Na správné spalování 1 kg benzínu potřebujeme přivést 14,7 kg vzduchu [32].

Pokud volíme účinnost motoru 35% během plnění z nádoby, tak z kilogramu spáleného benzínu o výhřevnosti 46,4 MJ/kg, dostaneme 16,24 MJ. Takže na kilogram spotřebovaného benzínu odpojením turbodmychadla ušetříme

$$m_u = \frac{14,7 \cdot A_M}{\eta_{mot2} \cdot H_b \cdot 10^6} = \frac{14,7 \cdot 34532}{16,24 \cdot 10^6} = 0,0313 \text{ [kg/kg]}, \quad (3.28)$$

⁷Je vidět, že rozjezd nebo zrychlení obecně spotřebuje opravdu hodně paliva. Palubní počítač by teoreticky ukazoval okamžitou spotřebu přibližně 15,7 litrů při účinnosti motoru 35 procent.

kde

- m_u : Úspora při odpojení turbodmychadla na kilogram spotřebovaného benzínu [kg/kg]⁸
 A_M : Celková práce na přeplňování [J/kg],
 S_{roz2} : Spotřeba na rozjezdy z křižovatek [kg],
 H_b : Měrná výhřevnost benzínu [J/kg].

3.7 Celková úspora paliva

Spočítáme tedy celkovou úsporu:

$$m_{celk} = S_{roz1} - S_{roz2} + S_{roz1} \cdot m_u = 2,46 - 1,76 + 1,76 \cdot 0,0313 = 0,756 \text{ kg}, \quad (3.29)$$

kde

- m_{celk} : Celková úspora [kg],
 S_{roz1} : Spotřeba na rozjezdy z křižovatek [kg],
 S_{roz2} : Spotřeba na rozjezdy z křižovatek [kg],
 m_u : Úspora na kilogram spotřebovaného benzínu [kg/kg].

Pokud počítáme s hustotou benzínu podle [33] $\rho_{ben} = 750 \text{ kg/m}^3$, tak celková úspora činí :

$$V_{ben} = \frac{m_{celk}}{\rho_{ben}} = \frac{0,756}{750} = 0,001008 \text{ m}^3 = 1,008 \text{ l}, \quad (3.30)$$

kde

- V_{ben} : Objem celkově uspořené paliva [l],
 ρ_{ben} : Hustota benzínu [kg/m³],
 m_{celk} : Spotřeba na rozjezdy z křižovatek [kg].

Je vidět, že vliv odpojení turbodmychadla je o hodně menší, než vliv zvýšení účinnosti. Což dává smysl, protože přeplňování si bere část energie, ale díky zvyšování účinnosti motoru a možnosti snížení jeho zdvihového objemu, je celková bilance kladná, jinak. Jinak by tento způsob nebyl tak rozšířený v moderních motorech.

⁸kg/kg je pro názornost toho, že udávaná hodnota je na jeden kilogram spotřebovaného benzínu. Fyzikálně je to jen poměrná bezrozměrná jednotka.

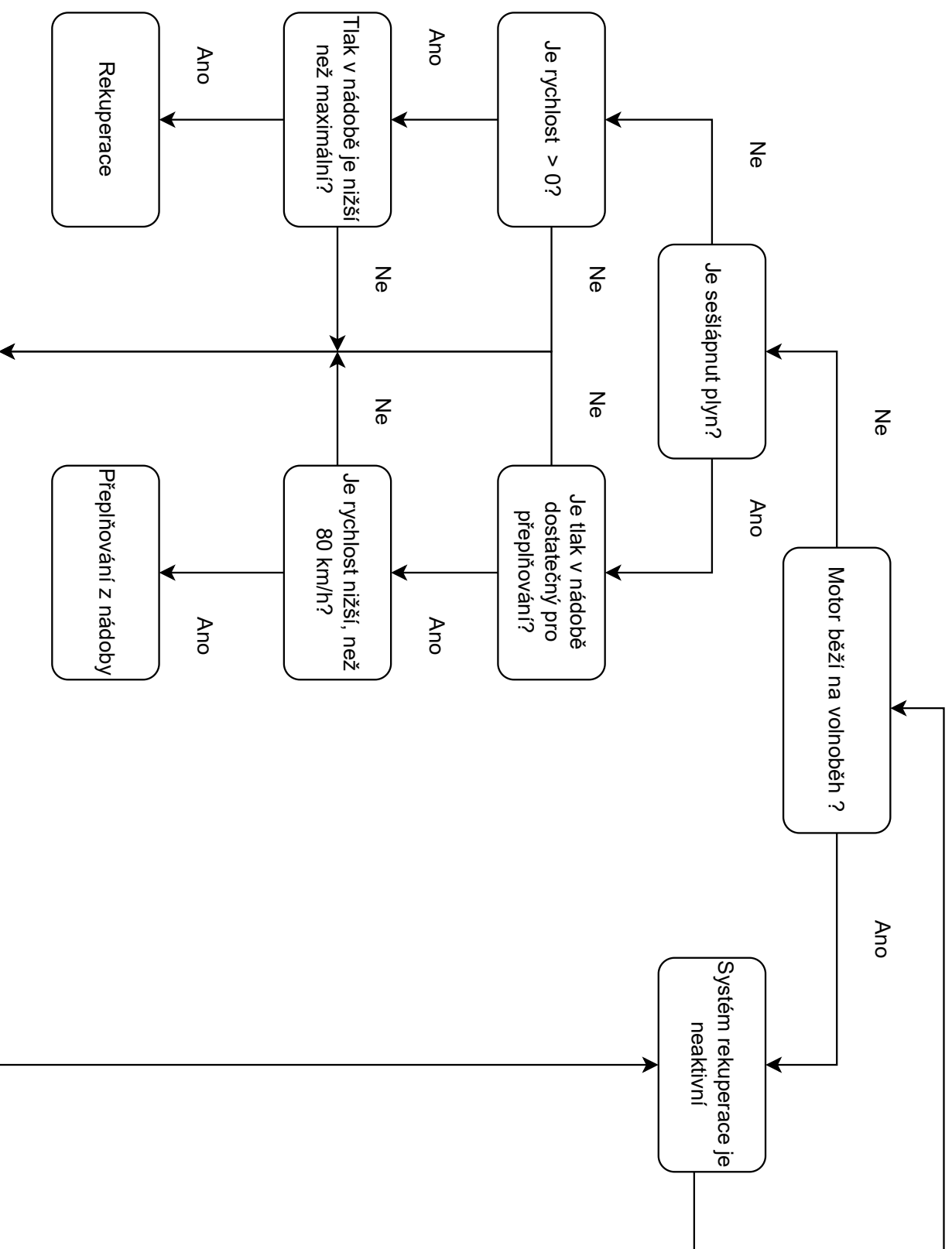
3.8 Postup fungování rekuperačního systému

Plnění z nádoby by mohlo fungovat následujícím způsobem. Musí se dosáhnout dostatečného tlaku a množství vzduchu, aby nedocházelo k poklesu plnicího tlaku⁹.

Dále následuje přibližné schéma fungování systému. Je to plně automatické, bude ale nadřazeno manuální ovládání v případě provedení testování, servisu nebo v případě různorodých problémů a dopravních situací.

Podle 3.6 je vidět, že důležitý je tlak v nádobě a pak podle toho, jestli je sešlápnut pedál plynu, budu rekuperovat nebo plnit. Nezáleží na tom, jestli je sešlápnut brzdový pedál, pokud jsou podmínky rekuperace splněné, bude motor vůz brzdít. To znamená, že je možné rekuperaci kombinovat s normálním brzděním.

⁹Tlak bude nastaven škrticím ventilem. Škrcení zpomalí celý proces, ale je to nezbytné pro ochranu motoru před vysokým tlakem.



Obrázek 3.6: Logické schéma fungování rekuperačního systému, vlastní tvorba

3.9 Vliv stylu jízdy na spotřebu

Je nutno zmínit, že spotřeba silně záleží na stylu řízení. Pokud člověk řídí sportovním stylem, tak samozřejmě bude mít vyšší spotřebu.

Vyzkoušel jsem porovnat spotřebu při klidné a o něco dynamičtější jízdě. Bylo použito vozidlo Škoda Fabia 1.0 TSI 70 kW, které má stejný malý tríválec s turbínou.



(a) Dlouhodobá spotřeba vozidla.

(b) Dynamičtější jízda

Obrázek 3.7: Vliv stylu jízdy na spotřebu

Z obrázku 3.7 je vidět o jak velký vliv jde. Podle mého názoru vozidlo, které by mělo mít relativně nízkou spotřebu musí člověk náležitě používat. Takže i zkoumaný způsob úspory paliva vyžaduje spíše klidnější styl řízení.

3.10 Další úspory

3.10.1 Brzdový systém

Také musím zmínit, že takový systém rekuperace zvyšuje životnost brzdového systému a samotného odpojeného turbodmychadla.

Kinetická energie vozidla se proměňuje na teplo v brzdách. Čím víc energie potřebujeme "zmařit" v kotoučích, tím víc se opotřebovávají. Jelikož část energie v našem případě použijeme pro rekuperaci, tak se brzdy budou méně zahřívat a vydrží déle.

Víme, že na jedno brzdění stlačíme 0,069 kg vzduchu. Vypočteme práci motoru, který je v daný moment poháněn koly. Platí, že

$$E_{br} = A_{ad} \cdot m_{stl2} = 272752 \cdot 0,069 = 18819 \text{ J}, \quad (3.31)$$

kde

m_{stl2} : Předpokládaná hmotnost stlačeného vzduchu na 1 brzdění [kg],

A_{ad} : Práce na stlačování vzduchu [J/kg],

E_{br} : Energie, která by namáhala brzdy, ale bude rekuperovaná motorem [J].

Ze vzorce 3.14 víme, že kinetická energie vozidla, které váží 1500 kg a jede rychlostí 50 km/h je přibližně 143 kJ. Bylo zvoleno, že rekuperovat z tohoto množství umíme 100 kJ. Z 3.31 je vidět, že teoreticky lze prodloužit životnost brzdových kotoučů a destiček o přibližně 19 procent.

3.10.2 Životnost turbodmyhadla

Jde o to, že turbodmyhadlo má také omezenou životnost. Jelikož podle výpočtu, 15 procent cesty zrychlujeme bez použití turbodmyhadla, tak se jeho životnost také prodlouží o těchto 15 procent. Tím ho méně namáháme jak tepelně, tak mechanicky.

3.11 Použití tohoto způsobu v nákladních vozidlech a autobusech

Jelikož pomocí takového způsobu rekuperace můžeme teoreticky dosáhnout určitých úspor paliva, je otázkou použití ve větších vozidlech. Mohou to být nákladní vozidla, nebo autobusy. Tyto vozidla mají ale často naftový motor.

To má na první pohled řadu výhod:

- Větší hmotnost - více rekuperované energie
- Naftový motor - větší komprese
- Větší rozměry - větší nádoba

Jenže tady přichází řada důvodů proti [34]:

- Turbodmyhadlo u dieselu má často variabilní geometrii lopatek
- Účinnost dieselu je dána také speciálním vstřikováním
- Složitější konstrukce - těžší zásah do pohonu

Jelikož hlavními důvody úspor jsou odpojení turbodmyhadla a zvýšení účinnosti, tak taková přestavba bude mít menší vliv na úsporný diesel. Z toho plyne, že v tomto případě je situace problematičtější. Vozidlo je schopné nakumulovat v nádobě větší množství energie - to je fakt. Potom ale přichází otázka, jak tuto energii využít. Víme, že největší úspory dosáhneme zvýšením účinnosti. U downsizového benzínového motoru platí jiné principy, než u těžkého naftového motoru. Podle mého názoru, takovým způsobem v naftovém motoru účinnost nestoupne tak, jak v benzinovém.

Tady by nejlepší variantou byl setrvačnick nebo baterie. energii můžeme použít samostatně, zatímco vzduchem jenom zvyšujeme účinnost. Jednoduše řečeno, to auto na vzduch nepojede. Tady jde spíše o optimalizaci tlaku objemu a možnosti rekuperace. Nemá cenu mít předdimenzovanou nádobu a celý systém - nevyplatí se to. Pro malý benzinový přeplňovaný motor je to nejvhodnější z následujících důvodů:

- Benzinový motor má teplejší zplodiny hoření [22]
- Díky vyšším otáčkám je možné dosáhnout vyššího výkonu

Také je třeba zvážit to, že se v Evropě uvažuje o zákazu používání naftových motorů v blízké budoucnosti.

Tímto bych uzavřel směr použití této přestavby ve větších vozidlech, obzvláště s naftovými motory. Podle mého názoru je tady výhodnější použití setrvačnicku nebo baterie/kondenzátoru. Setrvačnick by zhoršil jízdní vlastnosti - ve velkém užitkovém voze to ale nevadí. Baterie by se hodila pro pohon pomocného elektromotoru, nebo jiných zařízení ve voze. Jednoduše řečeno, energii můžeme použít, jak je v daný okamžik vhodné.

3.11.1 Volba většího vozu

Pro přehlednější porovnání v ekonomické části, jsem se rozhodl použít nějaké větší vozidlo s moderním přeplňovaným motorem. Jedná se o Ford F-150 2,7 Ecoboost¹⁰. Vozidlo váží kolem 2 400 kg a má větší motor, který ale funguje na podobném principu, jako jako u malého 1.0 TSI [35]. Jelikož beru toto auto jako užitkový vůz, který často bude vozit/tahat náklad, počítáme s hmotností 3000 kg.

Pro výpočet úspor budeme vycházet z následujících předpokladů:

- Úspory vznikají podle stejného principu
- Motoru nechybí kubatura, má jednodušší rozjezdy
- Umíme natlačit více vzduchu - plníme déle
- Tlak v nádobě bude stejný, změní se množství vzduchu
- Systém bude navržen na správné plnění motoru, aby se dalo nahradit přeplňování

Tímto způsobem bych uvažoval o tom, že motor bude mít procentuálně přibližně stejnou úsporu. Brzdy jsou u větších aut dimenzovány na odpovídající hmotnost a výkon ušetříme v poměru stejně, lišit se bude cena dílů.

Úspory činily u Škoda Octavia 1.0 TSI podle vzorce 3.30 zhruba 1,008 litrů. Při uvažované spotřebě 7 litrů na 100 km, je to kolem 15 % uspořené paliva.

¹⁰Neuvažujeme srovnání těchto rozdílných automobilů, jde spíše o vyhodnocení této přestavby ve větším voze.

3.11.2 Přibližný výpočet úspor Ford F-150

Z 3.14 plyne, že kinetická energie vozidla s hmotností 3000 kg při rychlosti 50 km/h je

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{3000 \cdot 13,8^2}{2} = 285660 \text{ J}, \quad (3.32)$$

kde

E_{kin} : Kinetická energie [J],
 m : Hmotnost vozidla [kg],
 v : Rychlost [m/s].

Jelikož kinetická energie je dvakrát větší, než v příkladě s menším vozem, můžeme počítat s dvakrát větší úsporou. Toto platí při stejné výhřevnosti paliva a při stejném zvýšení účinnosti při rozjezdech.

Z 3.30 plyne, že pro toto vozidlo ušetříme na rozjezdech přibližně 2,016 litrů na 100 km. Spotřeba ve městě se udává 12,7 litrů na 100 km [36]. Pokud počítáme s o něco větší spotřebou, než je udávaná (například 14 litrů), tak výpočet vyjde procentuálně podobně¹¹, jako u menšího vozidla.

Nádoby bych zvolil se stejným tlakem, ale dvakrát větší. To je dáno hmotností a větším motorem. Takže zde to bude 70 litrů.

¹¹Úsporu při odpojení turbodmychadla považujeme za stejnou, případné rozdíly zanedbáme.

Kapitola 4

Ekonomické vyhodnocení

4.1 Úvod

Cílem této části je ekonomické vyhodnocení investice do přestavby vozidla popsáním způsobem. Podle základních investic a nákladů na provoz můžeme zvážit, jestli se investice vyplatí. Také samotné uvádění nového výrobku na trh (v našem případě nového způsobu přestavby vozidla), vyžaduje analýzu samotného výrobku.

Za konkurenci v se v tomto případě dají považovat hybridní pohony, avšak na hybrid nemůžeme přestavit obyčejné vozidlo. Pokud se bude uvažovat koupě nového vozidla s takovým pohonem s možností takové „pneumatické“ rekuperace, dalo by se to porovnat s hybridními auty. Jedná se spíše o mild-hybrid vozidla, která neumožňují jízdu na čistou elektriku, umí jenom podpořit motor při jízdě a také nastartovat vozidlo.

Další konkurence je přestavba vozidla na LPG/CNG. Ve spalovacím motoru nemusíme spalovat jen klasická paliva, ale i plyn – propan-butan (LPG) a zemní plyn (CNG). Tato možnost má své nevýhody, ale prokazatelně snižuje provozní náklady, obzvlášť při velkých nájezdech. Také je nutno zmínit, že tato paliva jsou šetrnější vůči životnému prostředí.

Mezi nevýhody patří menší počet čerpacích stanic, nebo například zákaz vjezdu do podzemních garáží.

4.2 Ekonomické ukazatele

Pro vyhodnocení investice budou použity základní ekonomické ukazatele NPV a RCF.

4.2.1 NPV

Čistá současná hodnota (zkráceně NPV z anglického net present value) je finanční veličina vyjadřující celkovou současnou (tj. diskontovanou) hodnotu všech peněžních toků souvisejících s investičním projektem [37].

$$NPV = \sum_{t=0}^n CF_t \cdot (1+r)^{-t}, \quad (4.1)$$

kde

- NPV : Čistá současná hodnota [Kč],
- n : Doba životnosti investice [rok],
- CF_t : Hotovostní tok v roce t [Kč],
- r : Diskontní míra [%].

4.2.2 RCF

Roční ekvivalentní peněžní tok se používá pro zhodnocení investic s rozdílnou dobou životnosti. Jedná se o NPV vynásobené anuitním faktorem. Anuitní faktor závisí na diskontu a na době životnosti investice. Jelikož pro každý případ má auto různou dobu životnosti, toto kritérium může dát reprezentativní výsledky [37].

$$RCF = NPV \cdot a = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \cdot NPV, \quad (4.2)$$

kde

- a : Anuita [-],
- T : Počet období [rok],
- r : Diskontní míra [%],
- NPV : Čistá současná hodnota [Kč],
- RCF : Roci cash flow [Kč].

4.2.3 Stanovení diskontu

Diskontní sazba je nástroj na přepočtení budoucích toků peněz na současnou hodnotu. Demonstruje minimální požadovanou míru výnosnosti. To je taky možné chápat tak, že diskont zohledňuje cenu alternativní investice. Tou může být například výnos z peněz na spořicímu účtu, nebo jiná investice.

V našem případě u toho běžného řidiče stanovíme diskont na 6 procent, kdyby například nechal peníze na spořicímu účtu. U firemního vozidla a vozidla taxi je diskont jiný, protože očekávají od auta nějaký výnos, tak bych řekl, že diskont bude vyšší.

Případně mohou investovat peníze ne do přestavby, ale do reklamy, čili investičních produktů. Pro tento případ počítejme diskont 9 procent [38]. Pro větší vozidlo taky budeme počítat s 6 procenty pro malý nájezd a pro střední a velký nájezd 9 procent.

4.3 Výpočet vstupních investic

Toto je docela problematickým bodem zadání, protože nejsou žádné zdroje ohledně takových přestaveb. Takže výpočet bude proveden na základě cen jednotlivých dílů a služeb. Jednotlivé ceny se mohou lišit v závislosti na vozidle a typu motoru a dalších okolnostech.

Tyto hodnoty byly zvoleny při prozkoumání internetových obchodů. Při úpravě softwaru počítám s prací programátora a také s možnou instalací další řídicí jednotky. To by mohlo stát přibližně jako chiptuning vozidla. Mechanická přestavba je vlastně práce servisního mechanika, pokud si servis účtuje 400 korun za hodinu, tak za den práce to bude 3200 korun.

Také jsem se rozhodl, že bude nutností přidat manuální ovládání celého systému a také jeho indikaci. To může vypadat jako malý indikátor u vozidel na LPG. V případě nějaké poruchy bude možnost vypnout rekuperaci, například pokud je vozidlo vlečeno na laně¹.

4.3.1 Škoda Octavia 1.0 TSI

Vstupní investice	
Tlaková nádoba, [Kč]	2000
Mechanické díly, [Kč]	1500
Indikace a manuální ovládání, [Kč]	700
Úprava softwaru, [Kč]	5000
Mechanická přestavba, [Kč]	3200
Celkem, [Kč]	12 400

Tabulka 4.1: Vstupní investice Škoda Octavia

Ceny na úpravu softwaru a tlakovou nádobu jsou voleny podle [39], [40]. Indikace a ovládání jsou zvoleny přibližně podle ceny LED indikace LPG.

¹Při vlečení na laně může rekuperace mírně přibrzďovat vlečené vozidlo, aby bylo udržováno lano v napnutém stavu. Tuto možnost bych ale nepoužíval. Vozidlo na laně má pravděpodobně nějakou poruchu a proto použití rekuperace může ohrozit motor a také nemusí fungovat správně.

4.3.2 Ford F-150 2.7 Ecoboost

Vstupní investice	
Tlaková nádoba, [Kč]	4000
Mechanické díly, [Kč]	2000
Indikace a manuální ovládání, [Kč]	700
Úprava softwaru, [Kč]	5000
Mechanická přestavba, [Kč]	3200
Celkem, [Kč]	14 900

Tabulka 4.2: Vstupní investice Ford F-150

Zdroje cen: [41]

4.4 Provozní náklady

K provozním nákladům patří kromě palivových nákladů možné opravy a revize. Jelikož se jedná o přestavbu, tak vozidlo potom musí projít kontrolou. U známých typů přestaveb toto už není problém, ale u nového typu to nebude na začátku zcela jednoduché. Pokud se technologie stane rozšířenou, tak už tato diskuze pozbývá smysl.

V nádrži je jenom stlačený vzduch, ale je to tlaková nádoba. Ta by měla být revizovaná. Jde zejména o provozní revize a tlakové zkoušky. Provozní revize se provádí jednou ročně a nejde o nic složitějšího. Tlaková zkouška se provede jednou za 10 let [42].

Dalším bodem jsou opravy. Systém by neměl nějakým způsobem ohrožovat motor, protože správný tlak bude nastaven. Jediná věc která by mohla být problém, je těsnění v motoru. Jelikož motor pracuje častěji s vyšším tlakem než při standardním provozu, tak to může způsobit snížení životnosti těsnění hlavy válců. Těsnění hlavy válců budeme uvažovat jenom u středního a vyššího nájezdu. Uvažujeme také mechanické přepínače v motoru, ty by ale v praxi měly vydržet dlouho.

4.4.1 Volba nájezdů a životnosti vozidla

Pro smysluplný výpočet si musíme zvolit nějaké orientační hodnoty nájezdu. Budeme mít tři referenční typy nájezdu. „Malý“, „střední“ a „velký“.

Roční nájezd Škoda Octavia

Budeme uvažovat tři varianty ročního nájezdu²:

Druh nájezdu	Roční nájezd [km/rok]	Použití vozidla
Malý	10000	Běžný řidič
Střední	25000	Firemní vozidlo (např. doprava opravářů)
Velký	50000	Vozidlo taxislužby, rozvozu

Tabulka 4.3: Referenční nájezdy Škoda Octavia

Roční nájezd Ford F-150

Tabulka nájezdů je následující:

Druh nájezdu	Roční nájezd [km/rok]	Použití vozidla
Malý	20000	Běžné použití v osobních účelech
Střední	30000	Rozvoz nákladu, odtah
Velký	40000	Stěhovací vůz

Tabulka 4.4: Referenční nájezdy Ford F-150

4.4.2 Doba životnosti vozidla

Škoda Octavia

Považuji za vhodné zvolit životnost 10 let pro běžného řidiče, pro firemní vozidlo 6 let a pro taxi/rozvoz 3 roky. Při takovém nájezdu by motor ještě neměl mít vytahané rozvody, ale už by mohl být zanesený karbonem. Taxikáři prodávají svá auta po relativně krátké době, firmy si nechají auta déle, ale občas je mají na leasing, což by mohlo dělat problém s povolení na přestavbu. Pro náš případ budeme počítat s tím, že auto není půjčené na leasing, ale koupené za vlastní kapitál nebo na úvěr.

Ford F-150

U velkého vozu zvolíme pro osobní použití 10 let, pro rozvoz nákladu 7 let, pro stěhovací vůz 5 let. Toto respektuje časté a větší zatížení vozu.

²Jedná se o nájezd ve městě, po vyjetí na dálnici rekuperace nebude mít výrazný vliv na spotřebu paliva. Vždycky bude možnost manuálního ovládní režimů.

U malého nájezdu uvažujeme dojíždění do práce, na nákup apod. U toho středního je nutno počítat s častějším využitím, střídáním řidičů. Při velkém nájezdu je vozidlo hodně využíváno ve městě, také ve špičky.

4.4.3 Odhad údržby a oprav

Škoda Octavia

Roční provozní náklady 10 let/malý nájezd	
Zdražení TK (TK - Technická kontrola), [Kč]	100
Opravy mechanických částí, [Kč]	500
Celkem, [Kč]	600

Tabulka 4.5: Roční provozní náklady pro osobní vozidlo

Roční provozní náklady 6 let/středně velký nájezd	
Zdražení TK, [Kč]	100
Dodatečná výměna těsnění, [Kč]	1000
Opravy mechanických částí, [Kč]	500
Celkem, [Kč]	1600

Tabulka 4.6: Roční provozní náklady pro firemní vozidlo

Roční provozní náklady 3 let/velký nájezd	
Zdražení TK, [Kč]	100
Dodatečná výměna těsnění, [Kč]	1000
Opravy mechanických částí, [Kč]	1000
Celkem, [Kč]	2100

Tabulka 4.7: Roční provozní náklady pro vozidlo taxislužby

Ford F-150

Roční provozní náklady 10 let/malý nájezd	
Zdražení TK, [Kč]	100
Opravy mechanických částí, [Kč]	500
Celkem, [Kč]	600

Tabulka 4.8: Roční provozní náklady pro 10 let

Roční provozní náklady 7 let/středně velký nájezd	
Zdražení TK, [Kč]	100
Dodatečná výměna těsnění, [Kč]	2000
Opravy mechanických částí, [Kč]	500
Celkem, [Kč]	2600

Tabulka 4.9: Roční provozní náklady pro 7 let

Roční provozní náklady 5 let/velký nájezd	
Zdražení TK, [Kč]	100
Dodatečná výměna těsnění, [Kč]	2000
Opravy mechanických částí, [Kč]	1000
Celkem, [Kč]	3100

Tabulka 4.10: Roční provozní náklady pro 5 let

4.4.4 Úspora pohonných hmot a zohlednění opotřebení vozidla

Celková úspora se skládá z několika položek. To jsou hlavně úspory za pohonné hmoty, potom prodloužení životnosti brzdových destiček a kotoučů, a nakonec také prodloužení životnosti turbodmychadla.

Při ceně benzínu 41 korun za litr je celková úspora znázorněna v tabulce 4.11 [43].

Také musím zmínit úspory způsobené menším opotřebením brzdné soustavy a turbodmychadla. Rozhodl jsem se zvolit, že ušetříme jednu výměnu brzdových destiček, které mají kratší životnost než kotouče. V městském provozu se navíc více opotřebovávají.

Kotouče vydrží mnohem déle, takže při zvoleném nájezdu nebudeme počítat, že ušetříme za výměnu. Také by bylo nutné rozdělit energii pro kotouče a destičky.

Turbodmychadlo se také méně opotřebovává, ale při takovém nájezdu nepočítáme s nějakými velkými problémy.

Škoda Octavia

Úspory Škoda Octavia	
Pohonné hmoty, [Kč/100km]	41,328
Brzdové destičky, [Kč]	1900

Tabulka 4.11: Úspory pro menší vůz

Ford F-150

Úspory Ford F-150	
Pohonné hmoty, [Kč/100km]	82,656
Brzdové destičky, [Kč]	2600

Tabulka 4.12: Úspory pro větší vůz

Ceny na náhradní díly byly zvoleny podle [44], [45].

4.5 Ekonomické ukazatele úspor

V příloženém souboru byly vypočteny RCF a NPV investic pro každou variantu.

4.5.1 Škoda Octavia

RCF	[Kč]	2 041
NPV	[Kč]	15 022

Tabulka 4.13: RCF a NPV pro malý nájezd Škoda Octavia

RCF	[Kč]	6 295
NPV	[Kč]	28 238

Tabulka 4.14: RCF a NPV pro střední nájezd Škoda Octavia

RCF	[Kč]	14 297
NPV	[Kč]	36 190

Tabulka 4.15: RCF a NPV pro velký nájezd Škoda Octavia

4.5.2 Ford F-150

RCF	[Kč]	14 171
NPV	[Kč]	104 298

Tabulka 4.16: RCF a NPV pro malý nájezd Ford F-150

RCF	[Kč]	19 635
NPV	[Kč]	98 823

Tabulka 4.17: RCF a NPV pro střední nájezd Ford F-150

RCF	[Kč]	26 694
NPV	[Kč]	103 832

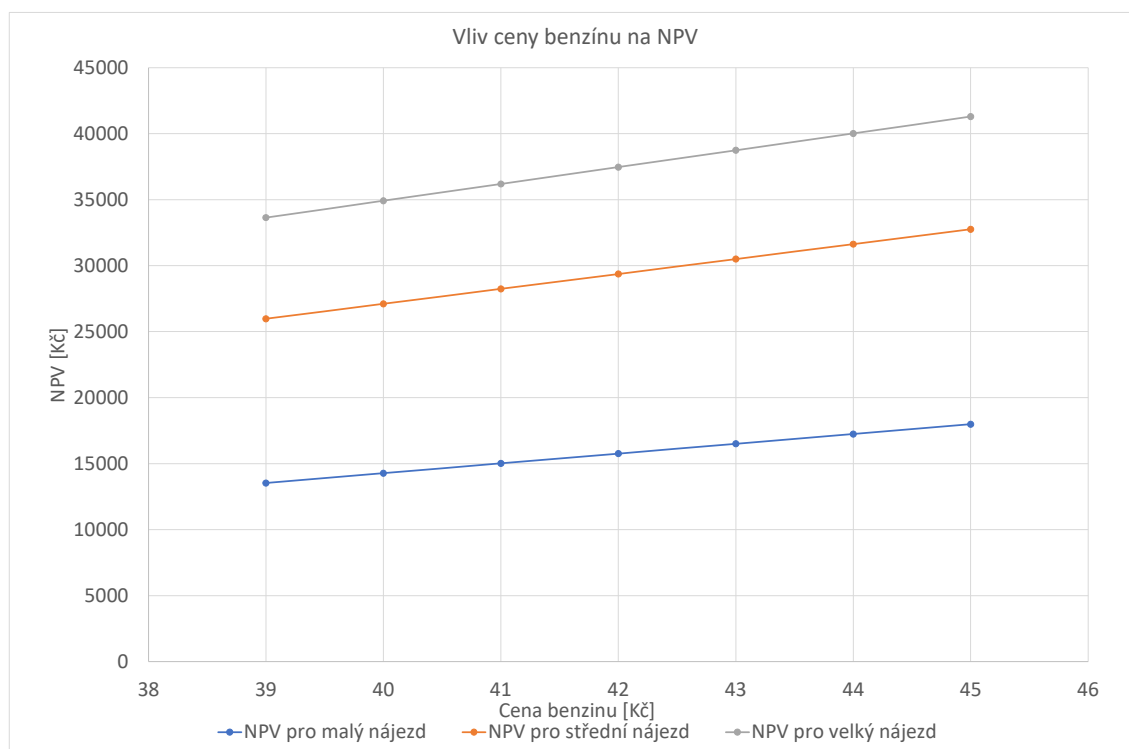
Tabulka 4.18: RCF a NPV pro velký nájezd Ford F-150

Z těchto tabulek je vidět, že RCF roste s větším nájezdem a je obecně větší pro těžší vozidlo. Toto ale neznamená, že se pro běžného řidiče tato investice nevyplatí. Pro firemní vozidla tato možnost také není vůbec špatná. Pro velký nájezd tato investice je velice výhodná a šetřila by desetitisíce ročně. Podle mého názoru je úspora za pohonné hmoty hlavním důvodem, proč se do taxislužeb a firemních flotil nakupují vozidla na CNG, hybridy a elektromobily.

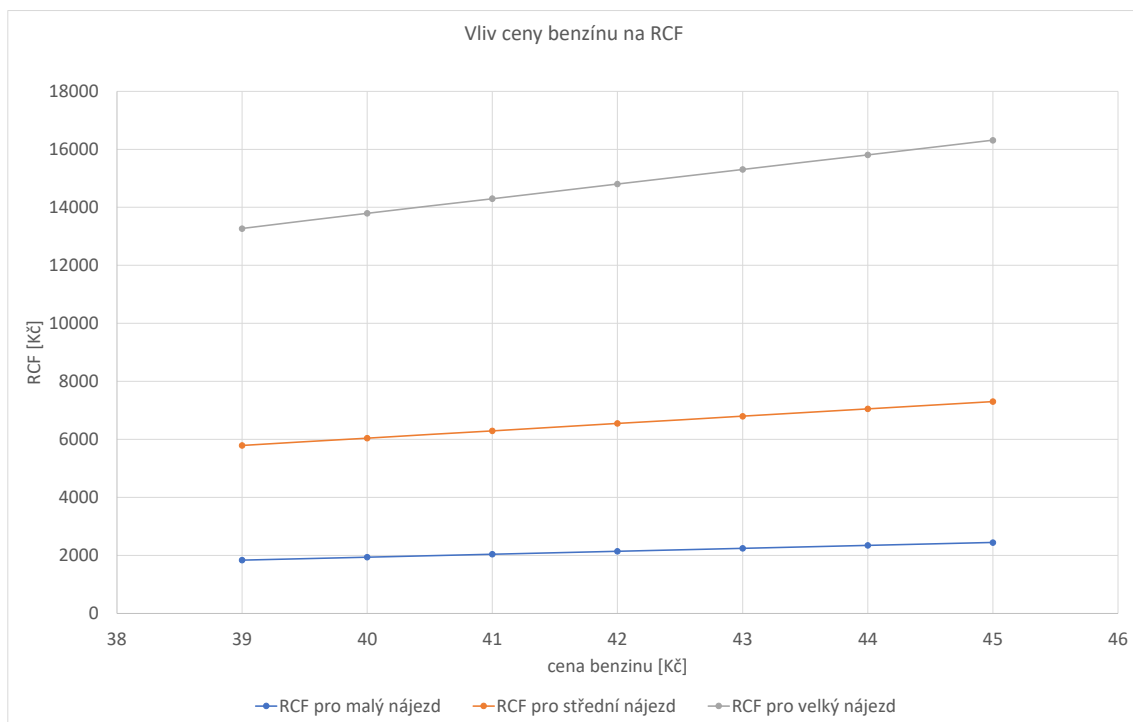
4.6 Citlovostní analýza

Citlivostní analýza se používá tehdy, když se nějaký ze vstupních parametrů může změnit. V našem případě to může být diskontní sazba a také cena benzínu. Pro tyto dva parametry byla provedena citlivostní analýza [46].

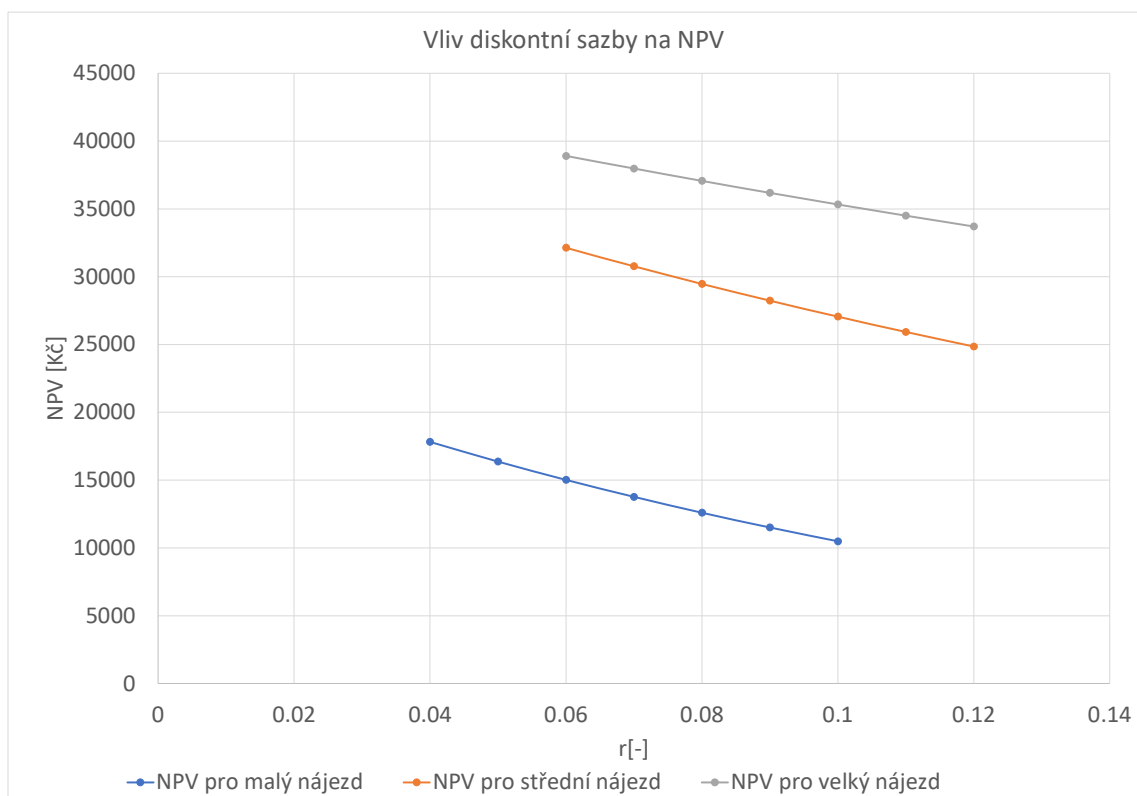
4.6.1 Škoda Octavia



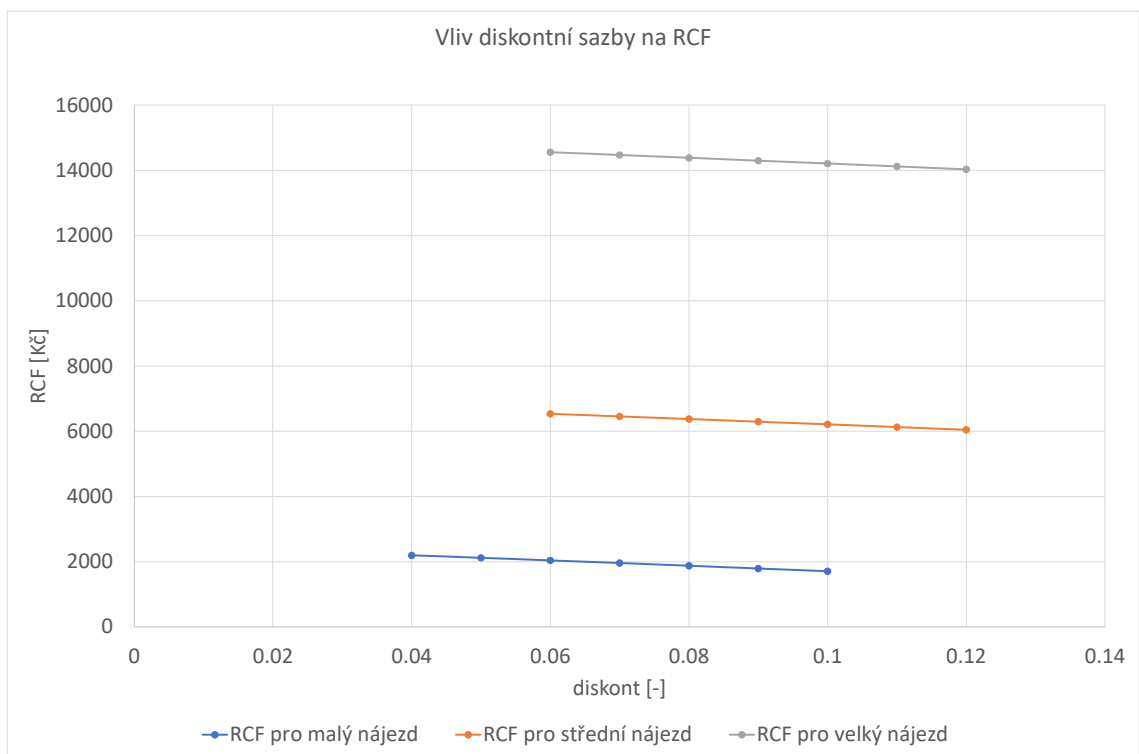
Obrázek 4.1: Vliv ceny benzínu na NPV investice Škoda Octavia



Obrázek 4.2: Vliv ceny benzínu na RCF investice Škoda Octavia

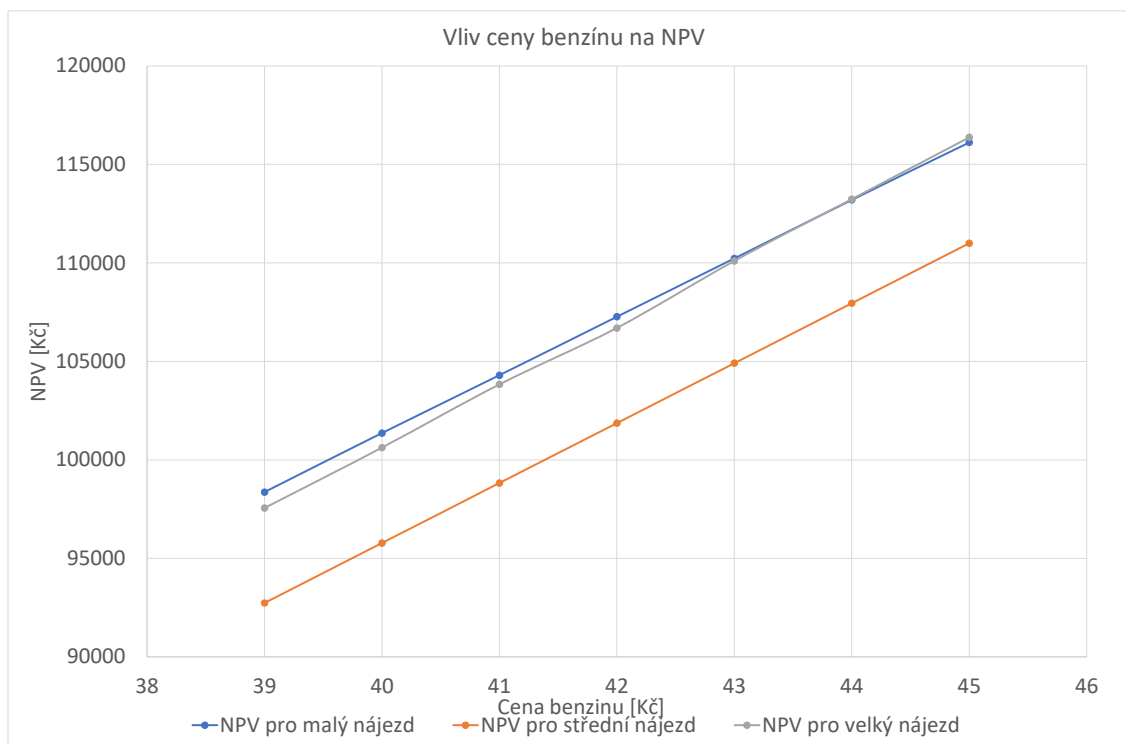


Obrázek 4.3: Vliv diskontní sazby na NPV investice Škoda Octavia

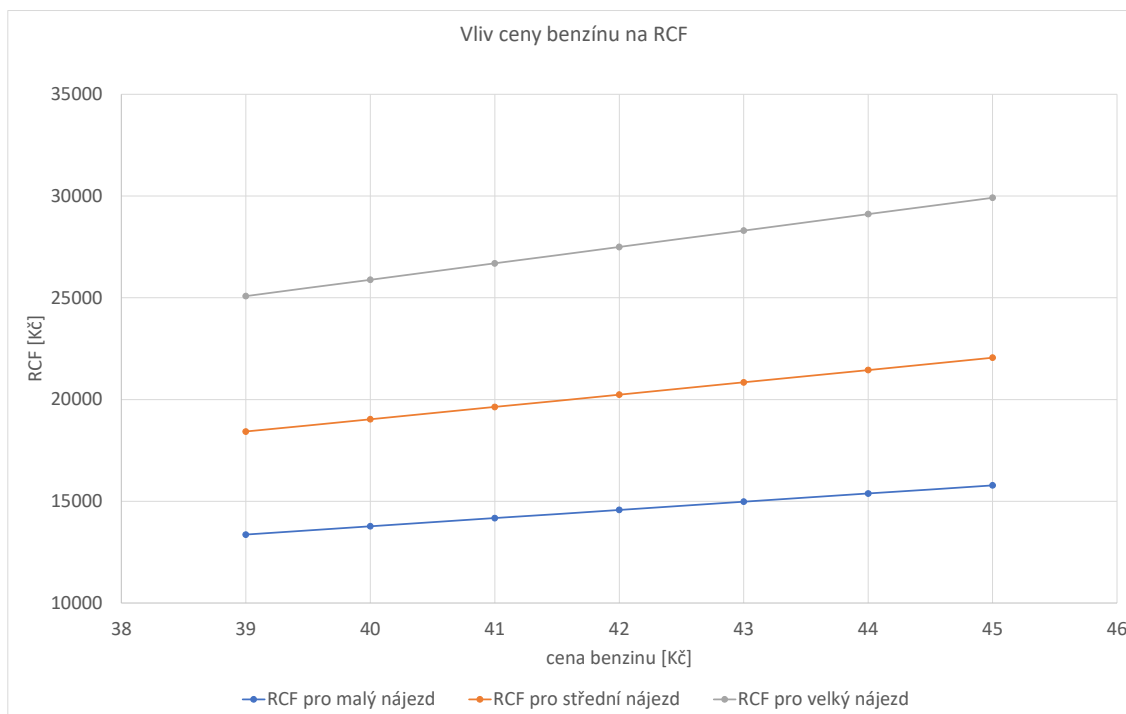


Obrázek 4.4: Vliv diskontní sazby na RCF investice Škoda Octavia

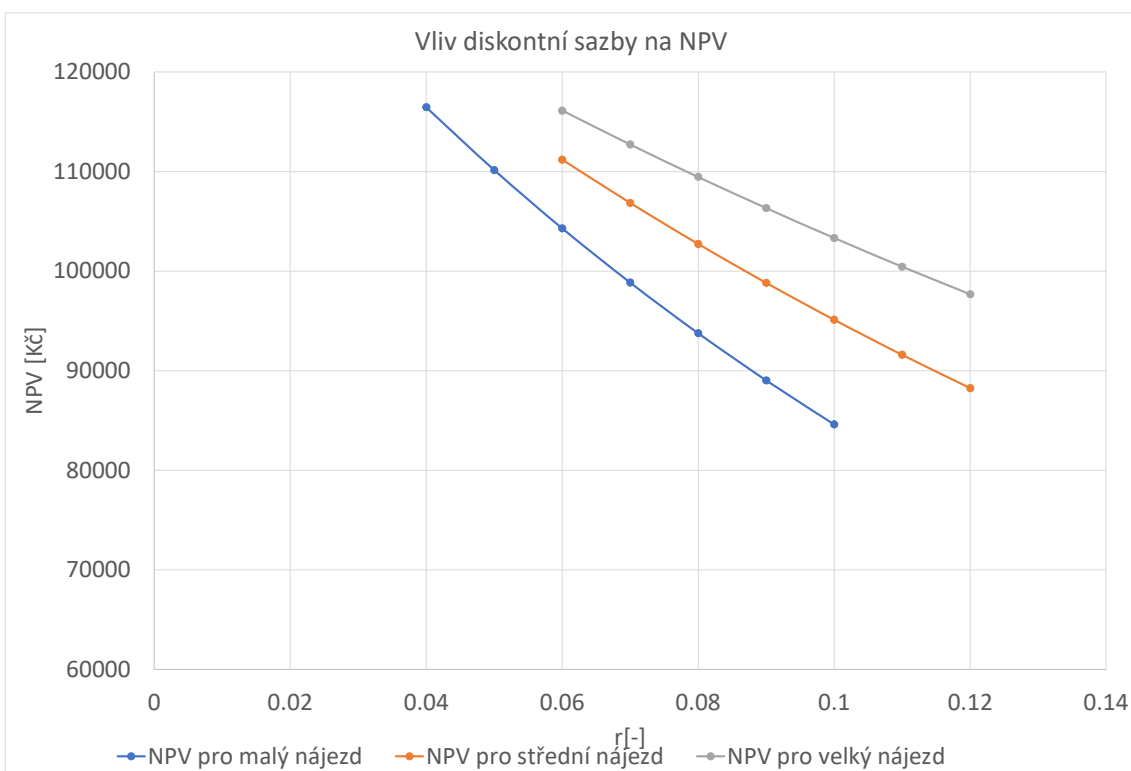
4.6.2 Ford F-150



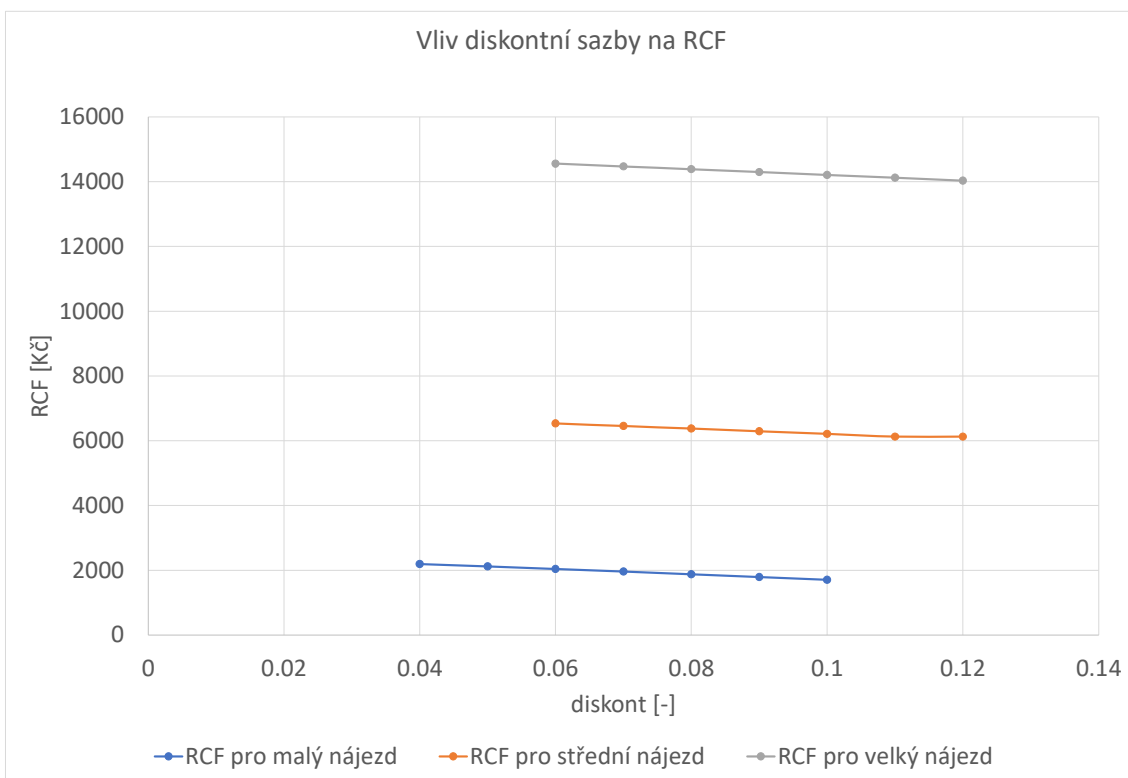
Obrázek 4.5: Vliv ceny benzínu na NPV investice Ford F-150



Obrázek 4.6: Vliv ceny benzínu na RCF investice Ford F-150



Obrázek 4.7: Vliv diskontní sazby na NPV investice Ford F-150



Obrázek 4.8: Vliv diskontní sazby na RCF investice Ford F-150

Jak je vidět, se zvyšováním diskontu, klesá NPV, což je logické. Vliv ceny za litr benzínu má největší vliv na variantu s velkým nájezdem. Celkový trend je zvyšování všech tří veličin.

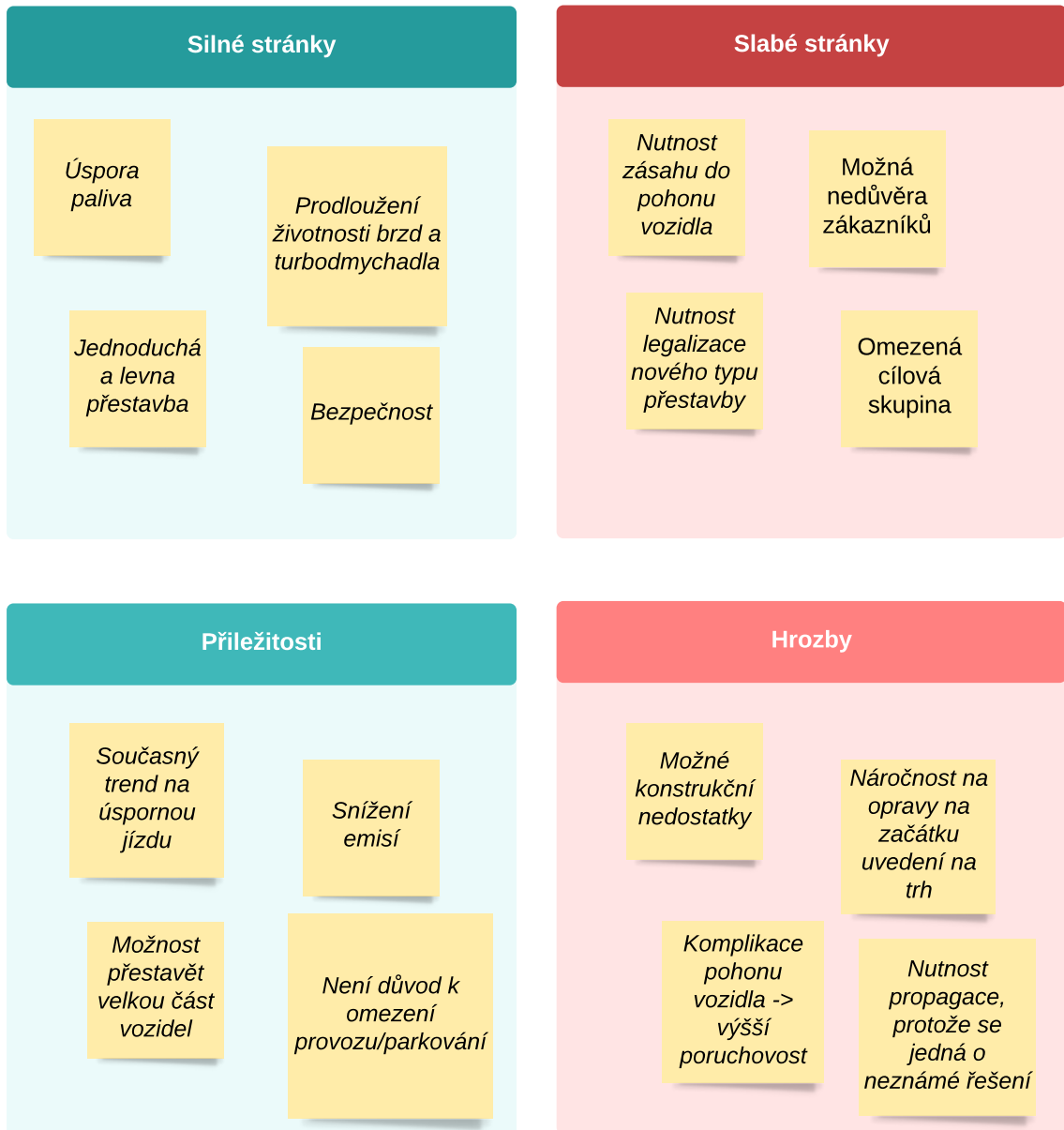
Při větších nájezdech je investice výhodnější, diskont může ale značně ovlivnit výsledný hotovostní tok. Stejně ale investice zůstává výhodná, obzvláště kvůli levnější ceně přestavby, než u LPG/CNG.

4.7 SWOT analýza

Zkratka SWOT znamená Strengths, Weaknesses, Opportunities a Threats. Tyto čtyři faktory SWOT analýza zkoumá. To znamená, že se budeme zabývat silným a slabými stránkami projektu. Také potom budeme zkoumat příležitosti a hrozby této investice [47].

Zpracování SWOT analýzy je na obrázku 4.9.

SWOT analýza



Obrázek 4.9: SWOT analýza, vlastní tvorba

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat možnosti rekuperace kinetické energie v automobilech. Byl navržen způsob rekuperace pomocí přestavby motoru na pístový kompresor a pak plnění motoru z nádoby. Úspory vznikaly z důvodu odpojení turbodmyhadla a také zvyšování účinnosti motorů, přičemž druhý bod měl citelně větší vliv. Toto podle mě, potvrzuje efektivnost moderních přeplňovaných motorů. Pak tato přestavba byla vyhodnocena ekonomicky.

V první kapitole byly prozkoumány způsoby rekuperace energií a principy fungování přeplňovaného spalovacího motoru.

V druhé kapitole byl navržen způsob provedení přestavby motorů na kompresor a celkového rekuperačního systému.

V třetí kapitole byl proveden výpočet pomocí „p -V“ diagramu a kinetické energie. Byl zvolen moderní přeplňovaný motor a byl proveden výpočet. Nádoba byla zvolena s přetlakem 10 barů a objemem 35 litrů. Bylo prokázáno, že po několika brzděních rekuperační systém by měl bezproblémově fungovat. Pak byla vypočítána úspora paliva. Logicky jsem se pak pokusil o vyhodnocení takové investice do většího a těžšího vozidla. Úspora u Fordu byla samozřejmě větší, ale tady musíme počítat také s větší cenou a jiným použitím tohoto vozidla. Přestavba by se ale mohla vyplatit, obzvlášť pokud vozidlo hodně jezdí ve městském provozu.

Ve čtvrté kapitole bylo provedeno ekonomické vyhodnocení investice. Došel jsem k závěru, že tato přestavba je výhodná jak pro běžného řidiče, tak i pro firemní vozidla. Při větších nájezdech tato investice začne rychle přinášet zisk.

Téma bylo zajímavé z toho důvodu, že se jedná o alternativy k akumulátorům, případně superkondenzátorům u hybridů. Další varianta by mohla být setrvačnická, ale to pak zhoršuje jízdní vlastnosti.

Dalo by se očekávat, že zjistíme, že to není lepší než baterie, což by nevadilo, alespoň bychom uzavřeli směr, který nemá cenu dál zkoumat. U hybridu potřebujeme ještě elektromotor, tady žádný další motor nepotřebujeme, pístový motor může fungovat bez větších úprav i jako kompresor.

Kdyby chlazení bylo vícestupňové, mohlo by nakonec dojít i ke zkapalnění vzduchu. Tím by byla zajištěna také akumulace energie do kapalného vzduchu, který by se mohl při akceleraci vstříknout do válce při kompresi místo paliva pod velkým tlakem. To ale to už je příliš technicky náročné, je potřeba nádoba na kapalný vzduch a další úpravy.

Při větších nájezdech může tato investice vydělat relativně slušné částky. Při velkém nájezdu a ceně benzínu 41 korun pro menší vozidlo vyšlo RCF 14 297 Kč a NPV 36 190 Kč, a pro větší vůz RCF 26 694 Kč a NPV 103 832 Kč. Pak je vidět, že velice důležitým bodem je cena paliva a diskont.

Ve SWOT analýze jsem zhodnotil další faktory, které by mohly mít vliv.

Dá se říct, že technologie, které umožňují levnější provoz motorových vozidel, jsou dnes žádaným odvětvím. Hybridní vozidla a také elektromobily mají své nedostatky, v našem případě motor neztratí výkon, vozidlo bude o něco technicky komplikovanější, ale bude úspornější. Oproti pohonu na LPG/CNG je naše řešení jednodušší a nabízí řešení bez nutnosti regulací spojených s pohonem na plyn, například možnost parkování v podzemních garážích. Proto je tento směr perspektivní a další prozkoumání možností rekuperace považuji za vhodné.

Samořejmě, uvedení na trh nebude jednoduché. Mohou vzniknout další nečekané překážky. Avšak tato technologie má svoje výhody, které ale stojí za případný risk.

Bibliografie

- [1] *How many cars are there in the world in 2021? stats by country.* URL: <https://hedgescompany.com/blog/2021/06/how-many-cars-are-there-in-the-world/> (cit. 04.10.2021).
- [2] *Oil Refining - Energy European Commission.* URL: https://ec.europa.eu/energy/topics/oil-gas-and-coal/oil-refining_en (cit. 04.10.2021).
- [3] *Fuel types of new passenger cars in the EU.* URL: <https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/> (cit. 04.10.2021).
- [4] *Ceny pohonných hmot od roku 2001.* URL: <https://www.czso.cz/csu/czso/ceny-pohonných-hmot-od-roku> (cit. 05.10.2022).
- [5] Felix Leach et al. „The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines“. In: *Transportation Engineering* 1 (2020), s. 100005.
- [6] Mirosław Luft a Paweł Olszowiec. „Losses of IC engine—a chance for electrical energy recuperation“. In: *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* (2012), s. 78–82.
- [7] *Spalovací Motor.* URL: https://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovac%C3%AD_motor (cit. 04.10.2021).
- [8] *Jaká je účinnost Spalovacího Motoru? Efektivita Není Nijak Závratná!* URL: <https://www.portalridice.cz/clanek/jaka-je-ucinnost-spalovaciho-motoru-a-co-ji-ovlivnuje> (cit. 04.10.2021).
- [9] *Teplná bilance spalovacího motoru.* URL: <https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/149326/51bilancepreplnovani.pdf?sequence=6&isAllowed=y> (cit. 04.10.2021).
- [10] *Energetická bilance spalovacího motoru.* URL: <http://enman.com.au/energy-audit.html> (cit. 05.10.2021).
- [11] *Turbodmychadlo.* URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Turbodmychadlo> (cit. 05.10.2021).
- [12] *Přeplňování motoru.* URL: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1462> (cit. 05.10.2021).
- [13] Sheng Qiao et al. „Application of engine intelligent start-stop system in technology of vehicle fuel saving“. In: *2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation.* IEEE. 2014, s. 128–131.

- [14] *Rekuperace*. URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rekuperace> (cit. 08. 10. 2021).
- [15] Anmol Raj, Abhishek Kumar a JP Kesari. „RECUPERATION OF KINETIC ENERGY–REGENERATIVE BRAKING“. In: *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science* (n.d.).
- [16] *Superkondenzátor vs baterie*. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti> (cit. 08. 10. 2021).
- [17] *Regenerative braking*. URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Regenerative_braking (cit. 08. 10. 2021).
- [18] *How turbocharger and Superchargers differ: Mobil™ Motor Oils*. URL: <https://www.mobil.com/en/lubricants/for-personal-vehicles/auto-care/all-about-oil/turbocharger-vs-superchargers> (cit. 09. 10. 2021).
- [19] *Jak kompresory fungují ?* URL: <https://www.dum-dilna.cz/jak-kompresory-funguji/> (cit. 09. 10. 2021).
- [20] *Polovina čechů neví, Jaké Náradí se používá k výměně Kola U Auta, Každý Desátý Nemá náhradní kolo*. URL: <https://auto-mania.cz/polovina-cechu-nevi-jake-naradi-se-pouziva-k-vymene-kola-u-auta-kazdy-desaty-nema-nahradni-kolo/> (cit. 06. 11. 2021).
- [21] RADEK ŠEBESTA. „VZNĚTOVÉ MOTORY PRO ARMÁDNÍ ÚČELY“. Bakalářská práce. VUT, Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [22] Kožoušek Josef. *Teorie Spalovacích motorů: Vysokošk. učebnice Pro Studenty Strojních fakult vys. škol techn. směru*. SNTL, 1971.
- [23] *VW EA211*. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/VW_EA211#1,0-1-Dreizylinder_\(1.0_TSI\)](https://de.wikipedia.org/wiki/VW_EA211#1,0-1-Dreizylinder_(1.0_TSI)) (cit. 18. 11. 2021).
- [24] *Powerful and efficient*. URL: <https://www.skoda-storyboard.com/en/skoda-world/innovation-and-technology/powerful-and-efficient/> (cit. 18. 11. 2021).
- [25] *Vlastnosti vzduchu*. URL: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/vlastnosti-vzduchu> (cit. 22. 10. 2022).
- [26] *TEST ŠKODA SCALA 1.0 TSI 81 KW*. URL: <https://www.e-flotila.cz/2021/08/01/test-skoda-scala-1-0-tsi-81-kw-slabsi-litr-lepsi-vykon/> (cit. 22. 10. 2022).
- [27] *Wiki-fire.org*. URL: <https://szemp.ru/raznoe/energiya-szhatogo-vozduha-formula.html> (cit. 09. 12. 2021).
- [28] *State Equations*. URL: <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/courses/me354/lectures/pdffiles/ch2.pdf> (cit. 09. 12. 2021).
- [29] Lina Wu et al. „The influence of intersections on fuel consumption in urban arterial road traffic: A single vehicle test in Harbin, China“. In: *PloS one* 10.9 (2015), e0137477.

- [30] *Octavia Active 1.0 TSI 85 kW 6-stup. mech.* URL: <https://www.autonaoperak.cz/sites/default/files/perm/car-pdf/octavia-10-tsi-85-kw-active-konfig.pdf> (cit. 22.10.2022).
- [31] Dominique Petitjean et al. *Advanced gasoline engine turbocharging technology for fuel economy improvements*. Tech. zpr. SAE Technical Paper, 2004.
- [32] Dakhil Al-shehab et al. *Air-fuel ratio*. URL: <https://x-engineer.org/air-fuel-ratio/> (cit. 09.12.2021).
- [33] *Density of Fuel 2022*. URL: <https://materials.gelsonluz.com/2019/06/density-of-fuel.html> (cit. 22.10.2022).
- [34] *Toto je 6 typů turbodmychadel. Jaké mají výhody a jaké nevýhody?* URL: <https://www.autoforum.cz/technika/toto-je-6-typu-turbodmychadel-jake-maji-vyhody-a-jake-nevyhody/> (cit. 28.10.2022).
- [35] *2021 Ford F-150 2.7L 4X4 First Test: Not All-New But Definitely Improved*. URL: <https://www.motortrend.com/reviews/2021-ford-f-150-2-7l-ecoboost-4x4-first-test-review/> (cit. 28.10.2022).
- [36] *WHY YOU SHOULD ADD THE 2.7L ECOBOOST ENGINE TO YOUR F-150*. URL: <https://www.kentwoodford.com/2019/02/12/2-7-litre-ecoboost-engine.html> (cit. 28.10.2022).
- [37] *Ukazatelé ekonomické efektivnosti*. URL: <https://www.algoritmy.net/article/149/Ekonomicka-efektivnost> (cit. 10.10.2022).
- [38] *Diskontní sazba*. URL: <http://www.finance-management.cz/080vypisPojmu.php?IdPojPass=116#:~:text=Stanoven%C3%AD%20diskontn%C3%AD%20sazby,sc%C3%A9n%C3%A1%5C%99%C5%AF%20v%C2r%C3%A1mci%20anal%C3%BDzy%5C%20rizik>. (cit. 28.10.2022).
- [39] *Chiptuning škoda Fabia 1.0 TSI 81kw*. URL: <https://www.chiptuning.cz/detail/0sobn%C3%AD%20automobil/skoda-fabia-3-fabia-1-0-tsi-81kw> (cit. 28.12.2021).
- [40] *Prodej a výroba náhradních dílů, TRUCK servis*. URL: <https://www.skarab.cz/nahradni-dily/dle-kategorie/nadrze-a-vzduchojemy/> (cit. 28.12.2021).
- [41] *Vzduchojemy*. URL: <https://eshop.svetlуска.cz/nahradni-dily-dle-kategorie/vzduchotechnika/vzduchojemy/>.
- [42] *Revize tlakových nádob*. URL: <https://kompresorypema.cz/analyzy-mereni/revize-tlakovych-nadob/> (cit. 18.12.2022).
- [43] *Průměrné ceny benzínu*. URL: <https://www.mbenzin.cz/Prumerne-ceny-benzinu> (cit. 10.10.2022).
- [44] *Škoda-Díly.cz*. URL: <https://www.skoda-dily.cz/katalog/fabia-3/nahradni-dily/podvozek-8.html> (cit. 28.12.2021).
- [45] *Sada brzdových destiček*. URL: https://www.automobilovedily24.cz/ford-usa/f-150-crew-cab-pickup/108096/10130/brzdova_desticka.
- [46] *Sensitivity analysis*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_analysis (cit. 03.11.2022).

- [47] *SWOT analysis*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/SWOT_analysis (cit. 03.11.2022).

Seznam obrázků

1	Vývoj ceny benzínu Natural 95 [4]	10
1.1	Princip fungování zážehového spalovacího motoru [7]	11
1.2	Energetická bilance spalovacího motoru [10]	12
1.3	Mechanicky pohaněný kompresor [12]	13
1.4	Turbodmychadlo pohaněné výfukovými plyny [12]	14
2.1	Kompresor poháněný motorem [18]	17
2.2	Princip pístového kompresoru [19]	18
2.3	Schéma okruhu s tlakovou nádobou verze 1, vlastní tvorba	19
2.4	Schéma okruhu s tlakovou nádobou verze 2, vlastní tvorba	21
3.1	Teoretický tlakový diagram čtyřdobého motoru, přeplňovaného dmychadlem, které je poháněno turbínou na výfukové plyny a je-li plnicí tlak stejně velký jako tlak plynů před turbínou [22]	22
3.2	Teoretický tlakový diagram čtyřdobého motoru přeplňovaného turbodmychadlem, je-li plnicí tlak vyšší než tlak plynů před turbínou [22]	23
3.3	Závislost tlaku plnění p_6 na tlaku $p_{13'}$ před turbínou pro různou teplotu $T_{13'}$ před lopatkami turbíny a pro neproměnnou účinnost turbodmychadla $\eta_{TD} = 50\%$ [22]	26
3.4	Závislost tlaku plnění p_6 na tlaku $p_{13'}$ před turbínou a účinnosti turbodmychadla při neproměnné teplotě $T_{13'}$ pro proměnnou účinnost turbodmychadla [22].	27
3.5	Diagram polohy a rychlosti vozidla v jedné z křižovatek [29]	33
3.6	Logické schéma fungování rekuperačního systému, vlastní tvorba	38
3.7	Vliv stylu jízdy na spotřebu	39
4.1	Vliv ceny benzínu na NPV investice Škoda Octavia	51
4.2	Vliv ceny benzínu na RCF investice Škoda Octavia	52

4.3	Vliv diskontní sazby na NPV investice Škoda Octavia	52
4.4	Vliv diskontní sazby na RCF investice Škoda Octavia	53
4.5	Vliv ceny benzínu na NPV investice Ford F-150	54
4.6	Vliv ceny benzínu na RCF investice Ford F-150	54
4.7	Vliv diskontní sazby na NPV investice Ford F-150	55
4.8	Vliv diskontní sazby na RCF investice Ford F-150	55
4.9	SWOT analýza, vlastní tvorba	57

Seznam tabulek

4.1	Vstupní investice Škoda Octavia	45
4.2	Vstupní investice Ford F-150	46
4.3	Referenční nájezdy Škoda Octavia	47
4.4	Referenční nájezdy Ford F-150	47
4.5	Roční provozní náklady pro osobní vozidlo	48
4.6	Roční provozní náklady pro firemní vozidlo	48
4.7	Roční provozní náklady pro vozidlo taxislužby	48
4.8	Roční provozní náklady pro 10 let	48
4.9	Roční provozní náklady pro 7 let	48
4.10	Roční provozní náklady pro 5 let	49
4.11	Úspory pro menší vůz	49
4.12	Úspory pro větší vůz	49
4.13	RCF a NPV pro malý nájezd Škoda Octavia	50
4.14	RCF a NPV pro střední nájezd Škoda Octavia	50
4.15	RCF a NPV pro velký nájezd Škoda Octavia	50
4.16	RCF a NPV pro malý nájezd Ford F-150	50
4.17	RCF a NPV pro střední nájezd Ford F-150	50
4.18	RCF a NPV pro velký nájezd Ford F-150	50

Seznam použitých zkratek a symbolů

CNG Compressed Natural Gas, stlačený zemní plyn

EU Evropská unie

IRR vnitřní výnosové procento

Kč Koruna česká

LPG Liquefied Petroleum Gas, zkapalněný ropný plyn

NPV čistá současná hodnota

ot/min otáčky za minutu

p-V tlak-objem

RCF roční cash flow

SWOT Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats

TK Technická kontrola

Příloha A

Přiložené soubory

Ekonomické_vyhodnocení.xlsx