

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2017

**JAN
POSPÍŠIL**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pospišil** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **419600**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojirenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Externí elektrický pohon čerpadla Commonrail

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Commonrail pump external drive

Pokyny pro vypracování:

1. Analyzujte možné provedení nezávislého elektrického pohonu vstřikovacího čerpadla na jednoválcovém motoru AVL.
2. Pro zvolené koncepční řešení navrhnete vhodný elektromotor a způsob pohonu čerpadla, ověřte výpočty.
3. Vytvořte 3D model zástavby a zpracujte kompletní výkresovou dokumentaci.
4. Vytvořte blokové schéma elektrického zapojení včetně integrace do řídicího systému zkušebního stanoviště.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miloslav Emrich Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

Anotace

Jméno autora:	Jan Pospíšil
Název BP:	Externí elektrický pohon čerpadla Commonrail
Akademický rok:	2016/2017
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí BP:	Ing. Miloslav Emrich, Ph.D.
Bibliografické údaje:	51 stran, 19 obrázků, 7 tabulek a 3 grafy
Klíčová slova:	palivové čerpadlo, spalovací motor, elektromotor, ozubený řemen

Bakalářská práce se zabývá osamostatněním pohonu palivového čerpadla Common Rail a výpočtem potřebného elektromotoru pro jeho pohon. Dále návrhem ozubeného řemenu pro přenos točivého momentu na čerpadlo, vytvořením 3D modelu celkové konstrukce včetně blokového schéma zapojení. Součástí práce je konstrukční výkresová dokumentace.

Anotation

Author:	Jan Pospíšil
Name of thesis:	Design of Commonrail pump external drive
Academical year:	2016/2017
Department:	Department of Automotive, Railway and Aerospace Engineering
Advisor:	Ing. Miloslav Emrich, Ph.D.
Work contents:	51 pages, 19 pictures, 7 tables and 3 diagrams
Keywords:	fuel pump, combustion engine, electric motor, timing belt

This Bachelor work deals with the drive separation of the Common Rail fuel pump and calculations for the required electric motor. Further, design of the timing belt for transfer of the torque to the pump, design of a 3D model for drive unite assembly structure and a schematic diagram.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7.6.2017

.....

podpis

Poděkování

Zde bych rád poděkoval především Ing. Miloslavu Emrichovi, Ph.D. za výborné vedení této práce a za všechny odborné a další cenné rady. A dále bych chtěl poděkovat svým přátelům a rodině za neustálou podporu.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Analýza	12
2.1	Výchozí stav motoru.....	12
2.2	Konstrukční varianty.....	13
2.2.1	Varianta A: zachování originálního rozvodového řemene ...	13
2.2.2	Varianta B: originální pozice palivového čerpadla.....	14
2.2.3	Zhodnocení a výběr varianty.....	16
2.3	Možnosti pohonu čerpadla.....	17
2.3.1	Pohon pomocí ozubeného řemenu	17
2.3.2	Pohon pomocí klínového řemenu	17
2.3.3	Zhodnocení a výběr varianty.....	18
3	Výpočtová část.....	19
3.1	Výběr elektromotoru.....	19
3.1.1	Výpočet potřebného kroutícího momentu elektromotoru ...	20
3.1.2	Ověření požadavku minimálního průtoku paliva	21
3.1.3	Odhadovaný maximální příkon čerpadla.....	22
3.2	Návrh převodu s ozubeným řemenem.....	24
3.2.1	Výpočet řemene mezi elektromotorem a palivovým čerpadlem.....	24
3.2.2	Výpočet řemene mezi klikovým a vačkovým hřídelem.....	28
3.3	Kontrola ložiska elektromotoru	29
4	Konstrukce.....	31
4.1	Svařovaný rám pro elektromotor	31
4.2	Axiální zajištění řemenice na hřídeli elektromotoru.....	34
4.3	Úprava držáku palivového čerpadla a napínací řemenice	34

4.4	Přesunutí snímače fáze	36
4.5	Úprava přetlakového ventilu	38
5	Elektroinstalace	40
5.1	Výběr frekvenčního měniče pro řízení elektromotoru	40
5.2	Způsob řízení frekvenčního měniče	41
5.3	Blokové schéma zapojení.....	42
6	Závěr	43
	Zdroje.....	44
	Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	46
	Tabulka komponent.....	48
	Přílohy.....	49

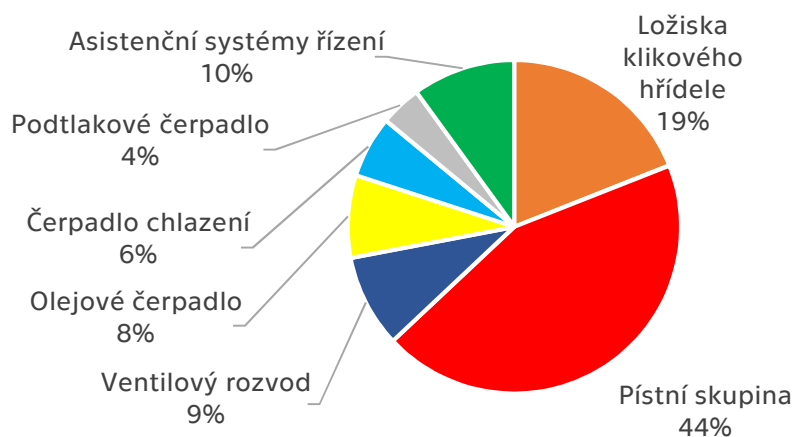
Značka	Jednotka	Název
a	[mm]	Osová vzdálenost
a_{kv}	[mm]	Osová vzdálenost klikového a vačkového hřídele
a_m	[mm]	Přibližná osová vzdálenost (z modelu)
b	[mm]	Šířka řemene
C	[N]	Dynamická únosnost ložiska
d_1	[mm]	Výpočtový průměr řemenice na hřídeli elektromotoru
d_2	[mm]	Výpočtový průměr řemenice palivového čerpadla
F_1	[N]	Síla v zatížené části řemene
F_2	[N]	Síla v odlehčené části řemene
F_e	[N]	Testovací síly pro kontrolu napnutí řemene
F_r	[N]	Výsledná radiální síla na hřídeli elektromotoru
F_s	[N]	Předpětí řemene
F_u	[N]	Efektivní tažná síla řemene
F_v	[N]	Tažná síla řemene
i_{12}	-	Převodový poměr mezi elektromotorem a čerpadlem
i_{12}	-	Převodový poměr
k_M	-	Konstanta přetěžování asynchronního motoru
L_f	[mm]	Volná délka řemene
L_h	[hod]	Únosnost ložiska
L_{wp}	[mm]	Předběžná délka řemene
$M_{\check{c}d}$	[Nm]	Odebíraný točivý moment čerpadlem Delphi
M_k	[Nm]	Stálý odebíraný moment čerpadlem
M_m	[Nm]	Maximální hodnota odebíraného momentu čerpadlem
M_M	[Nm]	Točivý moment asynchronního motoru
n_1	[min ⁻¹]	Otáčky řemenice na elektromotoru
n_2	[min ⁻¹]	Otáčky řemenice čerpadla
$n_{\check{c}}$	[min ⁻¹]	Otáčky čerpadla
$n_{\check{c}d}$	[min ⁻¹]	Otáčky čerpadla Delphi
n_M	[min ⁻¹]	Otáčky elektromotoru
o_v	[mm]	Osová výška
P	[W]	Teoretický příkon čerpadla

Seznam zkratek

$p_{\check{c}}$	[bar]	Maximální pracovní tlak čerpadla
p_d	[bar]	Tlak paliva z čerpadla Delphi
P_M	[W]	Výkon elektromotoru
P_{teor}	[W]	Teoretický příkon čerpadla Delphi
Q	[l*min ⁻¹]	Průtok paliva čerpadlem
$Q_{\check{c}d}$	[l*min ⁻¹]	Průtok paliva čerpadlem Delphi
t	[mm]	Rozteč
t_e	[mm]	Dovolený průhyb řemene
v	[m/s]	Obvodová rychlost řemene
z_1	-	Počet zubů řemenice na elektromotoru
z_2	-	Počet zubů řemenice čerpadla
β_1	[°]	Úhel opásání řemenice na hřídeli elektromotoru
β_2	[°]	Úhel opásání řemenice palivového čerpadla
β_m	[°]	Přibližná hodnota úhlu opásání
η	[%]	Odečtená účinnost čerpadla

1 Úvod

Předmětem této práce je osamostatnění pohonu palivového okruhu výzkumného spalovacího motoru AVL, přesněji napojení vysokotlakého čerpadla Common Rail k externímu elektromotoru. Palivový okruh je posledním příslušenstvím motoru, který zatím není poháněn externím zdrojem. Mazací a chladicí okruh jsou již v současném stavu napojeny na vlastní pohony. Díky těmto změnám bude možné přesněji měřit pasivní odpor motoru a vyhodnotit jednotlivé ztrátové příspěvky způsobené příslušenstvím motoru. Vznětový jednoválec o objemu 511 ccm je umístěn v laboratořích ČVUT v Praze v budově VTP Roztoky. Motor je schopen spalovat naftu nebo směs s většinovým podílem zemního plynu a minimem nafty. Dle měření značky Renault na svém vznětovém agregátu o zdvihovém objemu 1461 ccm byly ztrátové příspěvky jednotlivých částí motoru a jeho příslušenství v procentech vyčísleny do grafu níže. Je patrné, že ztráty způsobené příslušenstvím motoru, tedy (olejové čerpadlo, čerpadlo chlazení, podtlakové čerpadlo a asistenční systémy řízení) jsou okolo 28 % z celkových ztrát v motoru. Jednotlivé ztrátové příspěvky jsou závislé na mnoha faktorech, jako otáčkách motoru, teplotě, druhu spalované směsi, odebíraném momentu z motoru, atd. U zmíněného vysokotlakého palivového čerpadla dále ještě závisí na tlaku dodávaného paliva do Common Railu a jeho objemu vstříkovaného do spalovací komory motoru. [1]



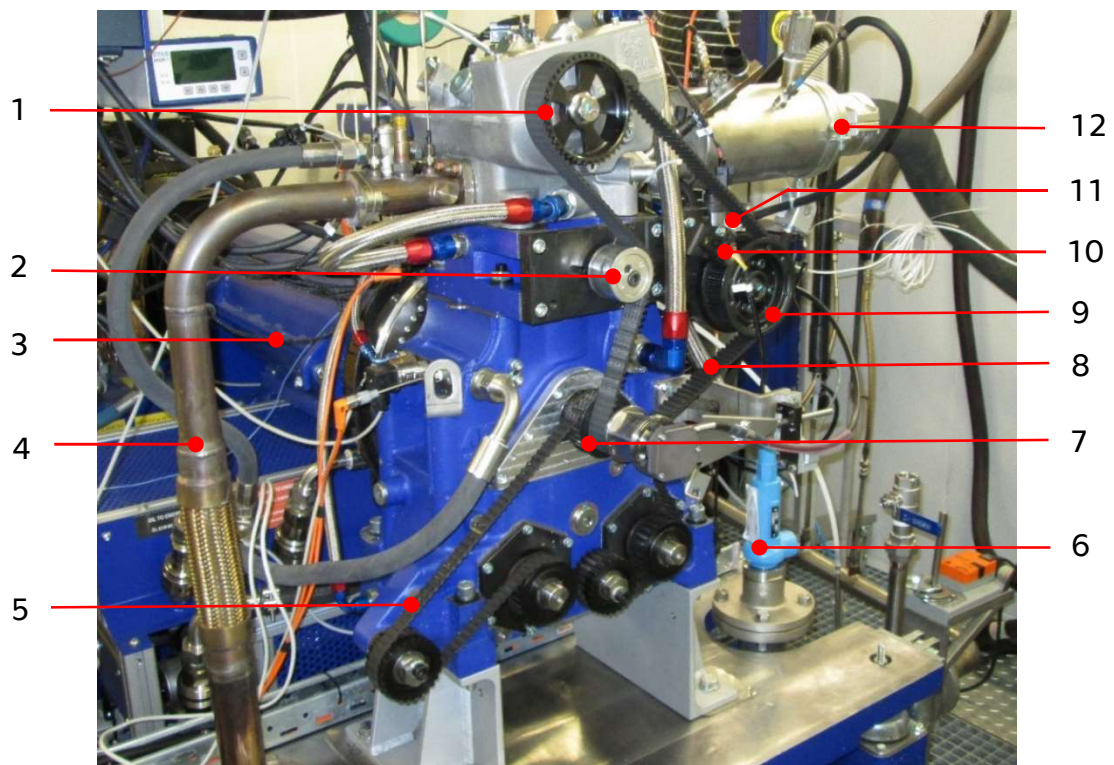
Obr. 1 - Ztrátové příspěvky v motoru Renault 1,5dci [1]

2 Analýza

Pro vyřešení zadaného úkolu jsem se nejprve musel seznámit s měřícím stanovištěm jako celkem a dále i podrobně funkcí jednotlivých dílů sestavy, elektrickým zapojením a systémem řízení motoru. Změřil jsem pečlivě všechny potřebné rozměry motoru a jeho částí za účelem vytvoření 3D modelu vhodného pro další práci na konstrukčním řešení pohonu čerpadla

2.1 Výchozí stav motoru

Na obrázku níže jsou popsány vybrané části vznětového motoru.



Obr. 2 - Výchozí stav vznětového motoru AVL, zdroj Ivan Bortel

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1 – řemenice vačkového hřídele | 7 – řemenice klikového hřídele |
| 2 – napínací kladka ozubeného řemene | 8 – ozubený rozvodový řemen |
| 3 – motorová brzda | 9 – řemenice palivového čerpadla |
| 4 – výfukové potrubí | 10 – snímač fáze motoru |
| 5 – ozubený řemen vyvažovacích hřídelů | 11 – palivové čerpadlo |
| 6 – pojistný přetlakový ventil | 12 – sání |

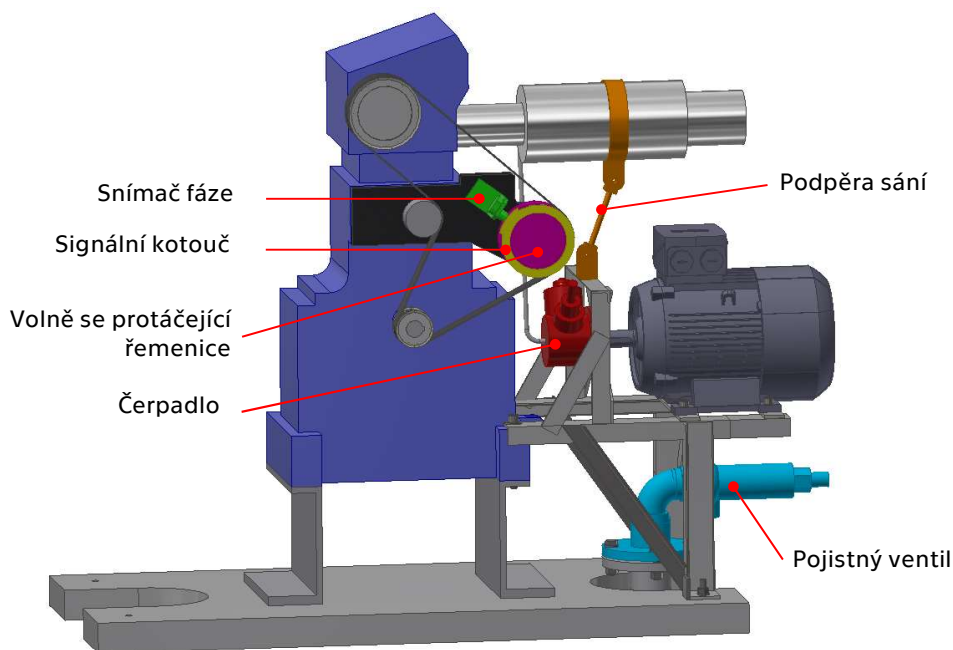
Výzkumný vznětový motor je umístěn na tuhé ocelové podložce, která je tlumícími členy připevněná k nohám ukotveným k podlaze místnosti. Na výstupní hřídel je připojený dynamometr s brzdou pro řízení zátěže spalovacího motoru. Umožňuje také jeho protáčení. Základní chod motoru zajišťuje originální řídicí jednotka výrobce. Pro další variantní možnosti ovládání chodu motoru je připojena programovatelná jednotka firmy Ricardo.

2.2 Konstrukční varianty

3D Model experimentálního vznětového motoru jsem zpracoval na základě mnou změřených rozměrů. Firma AVL poskytla modelovou obálku svého motoru, díky které jsem byl schopen zpřesnit a verifikovat svůj model. Takto ověřený model dále používám pro návrh svařované konstrukce uchycení elektromotoru.

2.2.1 Varianta A: zachování originálního rozvodového řemene

Tato možná konstrukční varianta spočívá v zachování originálního rozvodového řemene a ponechání řemenic v původní rovině. Čerpadlo se připojí hřídelovou spojkou k elektromotoru a umístí na samostatný rám.

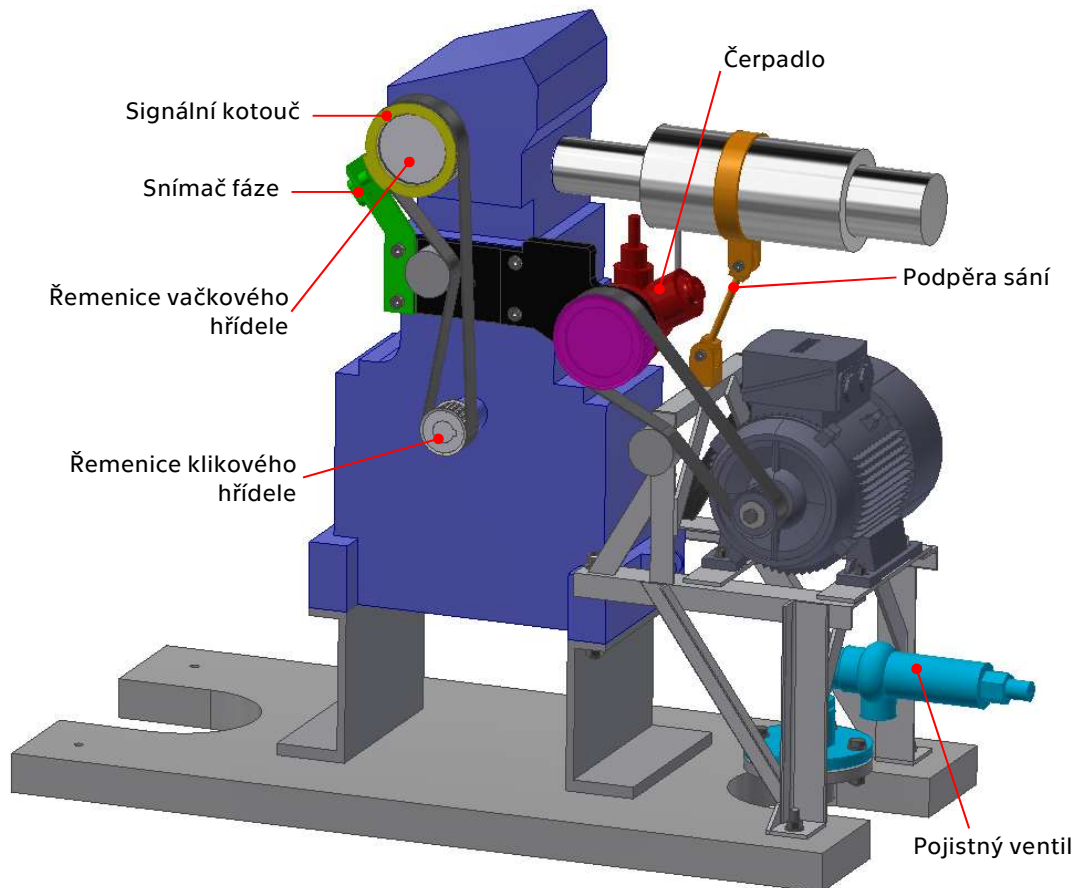


Obr. 3 - Konstrukční varianta A – vytvořeno v programu Inventor

Díky zachování originální pozice řemenice čerpadla je možné ponechat senzor fáze (na Obr. 3 - Konstrukční varianta A – vytvořeno v programu Inventor zvýrazněn zelenou barvou) v původní pozici, kde je nasměrován proti kotouči s vymezenou snímací plochou (na Obr. 3 zvýrazněn žlutou barvou). Senzor fáze předává signál o poloze pístu ve válci, který se v řídicí jednotce spolu s dalšími signály vyhodnotí a řídí vstřikování směsi. Musela by se nahradit řemenice čerpadla za řemenici volně se protáčející (na Obr. 3 znázorněna fialovou barvou). Palivové čerpadlo Bosch (na Obr. 3 zvýrazněno červenou barvou) by se muselo odmontovat a připevnit na přídavnou svařovanou konstrukci. Elektromotor by se upevnil také na svařovanou konstrukci a pružnou hřídelovou spojkou by se propojil s palivovým čerpadlem. Dále by se muselo prodloužit vysokotlaké vedení z původních cca 330 mm na nejméně 500 mm od čerpadla k zásobníku Common Rail. Další nutnou úpravou je přesunutí podpěry sání (na Obr. 3 zvýrazněno oranžovou barvou) a připevnění na svařovanou konstrukci. Poslední úpravou je nasměrování pojistného přetlakového ventilu (na Obr. 3 zvýrazněn azurovou barvou) tak, aby nepřekážel umístění nosné konstrukce elektromotoru. To by se vyřešilo použitím pravoúhlého kolena.

2.2.2 Varianta B: originální pozice palivového čerpadla

Další možná varianta spočívá v ponechání palivového čerpadla na svém originálním místě a jeho pohon by se vyřešil druhým ozubeným řemenem. Viz (Obr. 4 - Konstrukční varianta B – vytvořeno v programu Inventor) na další stránce.



Obr. 4 - Konstrukční varianta B – vytvořeno v programu Inventor

V důsledku toho se bude muset vyměnit originální ozubený řemen a nahradit jej kratším, který bude pouze mezi řemenicí klikového hřídele a řemenicí vačkového hřídele (na Obr. 4 obě řemenice světle šedou barvou). K tomuto řemenu je zapotřebí přesunout do správné pozice také napínací řemenici pro správný chod řemene. Snímač fáze (na Obr. 4 znázorněn zelenou barvou) se bude muset přesunout k řemenici vačkového hřídele a nasměrovat na snímací kotouč (na Obr. 4 znázorněn žlutou barvou), který se připevní k řemenici. Elektromotor by se umístil na svařovanou konstrukci. Pohon palivového čerpadla by zajišťoval druhý ozubený řemen s napínací řemenicí umístěnou na stejné konstrukci jako elektromotor. Podpěra sání (na Obr. 4 znázorněna oranžovou barvou) by se přemístila na svařovanou konstrukci k elektromotoru. I v této variantě by se musel přetlakový ventil napojit pravoúhlým kolenem.

2.2.3 Zhodnocení a výběr varianty

Shrnutí výhod a nevýhod obou konstrukčních variant jsem zaznamenal do tabulky níže.

	Varianta A	Varianta B
Výhody	řemenice v původní rovině s originálním řemenem	zachování čerpadla na originální pozici
	již vyrobená volně se protáčející řemenice	originální vysokotlaké vedení paliva
	senzor fáze v originální poloze	
Nevýhody	prodloužení vysokotlakého vedení paliva	nutné přesunutí senzoru fáze
	přímý pohon čerpadla přes hřídelovou spojku	návrh řemenového pohonu

Tab. 1 - Shrnutí konstrukčních variant

Volím konstrukční variantu B z důvodu zachování originálního vysokotlakého vedení paliva do zásobníku Common Rail. Při změně délky vedení může dojít ke vzniku turbulencí v palivu a k následnému kmitání vedení po celé jeho délce. Pokud potrubí není dobře připevněné a utlumené může dojít k jeho porušení. Dalším rozhodovacím důvodem je, že pokud se připojí čerpadlo přímo přes hřídelovou spojku k elektromotoru, pružné spojky většinou nevydrží stanovený počet hodin, a to ani při předimenzovaných rozměrech. Je to způsobené velkou nerovnoměrností chodu vysokotlakého čerpadla s jedním pístem. Nevýhody konstrukčního řešení varianty B se dají lehce odstranit. Dle informací od firmy AVL lze senzor fáze přesunout i se signálním kotoučem na řemenici vačkového hřídele a zajistit tedy správné časování chodu motoru.

2.3 Možnosti pohonu čerpadla

Pro zvolenou konstrukční variantu se nejlépe na pohon čerpadla hodí řemenové převody. Řemeny zvládnou přenést požadovaný kroutící moment, i částečně odtlumí rázy způsobené palivovým čerpadlem.

2.3.1 Pohon pomocí ozubeného řemenu

„Převody se synchronními (ozubenými) řemeny mají účinnost až 98 %, po celou dobu jejich provozní životnost. Používají princip, kdy dochází k záběru zubů na řemenu s drážkami na řemenici, proto zde nenastává žádný prokluz jako u klínových řemenů. Synchronní řemeny se používají tam, kde pohyby vstupního a výstupního hřídele musí být naprosto stejné. Tento typ řemenů přináší pro uživatele výhody, jako vyšší jmenovitý výkon, vyšší přenos sil, přičemž prakticky nevyžadují údržbu. Není nutné je mazat ani během provozu dopínat. Ušetří místo, hmotnost a peníze včetně snížení spotřeby energie při určitých aplikacích“ [2]. V konstrukční variantě B (viz 2.2.2) se jeví pohon pomocí ozubeného řemene jako velmi dobrá varianta i vzhledem k tomu, že není nutné měnit originální ozubenou řemenici HTD.

2.3.2 Pohon pomocí klínového řemenu

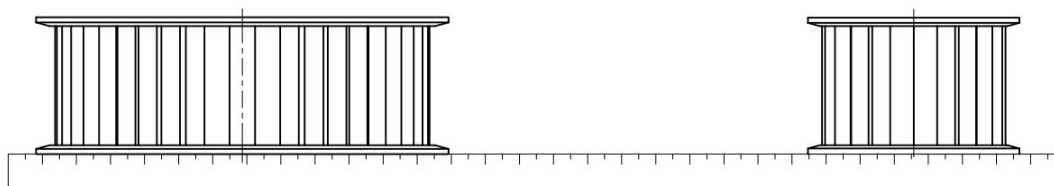
„Obvodová síla se přenáší z hnacího na hnaný hřídel pomocí řemene, kterým jsou opásány hnací i hnaná řemenice. Mezi řemenem a řemenicí vzniká třecí síla, která musí být větší nebo rovna síle obvodové ($F_t \geq F_o$), pohyb se poté přenáší pásem na hnaný kotouč. Převody klínovými řemeny se používají k přenosu větších výkonů. Na hnacím i hnaném hřídeli jsou uchyceny perovým spojem řemenice (z šedé litiny, oceli, hliníku a dalších materiálů) s klínovitou lichoběžníkovou drážkou na obvodu věnce řemenic, do které zapadá klínový řemen. Drážka, tvar i rozměry klínových řemenů jsou normalizovány normou ČSN 02 3110. Pro zvětšení přenášeného výkonu je možno použít více řemenů“ [3].

2.3.3 Zhodnocení a výběr varianty

	Ozubený řemen	Klínový řemen
Výhody	zachování originální řemenice na čerpadle	menší napínací síla
	menší rozměry pro přenos vyššího kroutícího momentu	menší radiální síla na hřídel elektromotoru
	vyšší účinnost	není nutné zajistit sousost a polohu řemenic v jedné rovině
Nevýhody	nutné zajištění sousosti řemenic a jejich poloha v jedné rovině	nahrazení řemenice na čerpadle za klínovou
		nižší účinnost
		větší rozměry soukolí s řemenem

Tab. 2 - Shrnutí vlastností ozubeného a klínového řemenu

Po zhodnocení obou variant volím pohon čerpadla ozubeným řemenem. Jako hlavní rozhodovací výhodu považuji zachování originální řemenice na palivovém čerpadle. Dále hraje roli velikost soukolí, kde u řešení s ozubeným řemenem jsou rozměry obou řemenic i samotného řemene menší. V poslední řadě i účinnost ozubeného řemene je lepší, dosahuje 98 %, v porovnání s klínovým řemenem, kde je účinnost 96 % [4]. Jedinou nevýhodou ozubeného řemene je tedy, že se musí docílit vyrovnaní obou řemenic do jedné roviny. To se dá vyřešit při montáži například přiložením rovného pravítka kolmo na obě řemenice a dotyk musí být po celé ploše řemenic. Metodu znázorňuje následující Obr. 5.

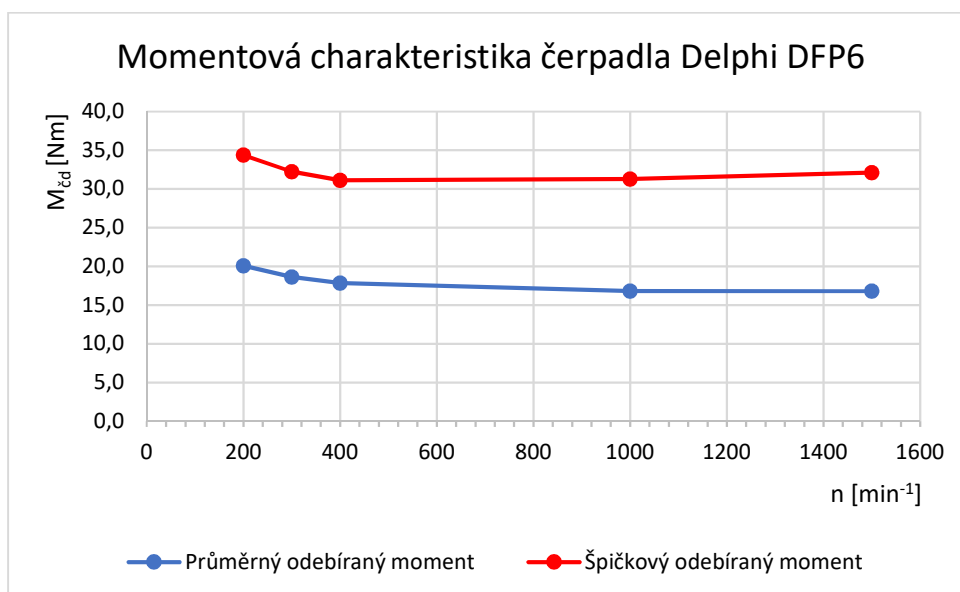


Obr. 5 - Vyrovnaní řemenic do roviny

3 Výpočtová část

3.1 Výběr elektromotoru

Pro správný výběr elektromotoru je nutné znát momentovou charakteristiku při zatěžování vysokotlakého čerpadla systému Common Rail a dodávaný průtok paliva při měnících se otáčkách. Jedná se o pumpu značky Bosch, typ CP4.1 s jedním tlačným pístem, schopnou natlakovat palivo v zásobníku na hodnotu 1800 bar. Proto budu vycházet z dat získaných z databáze ČVUT, kde bylo změřeno podobné vysokotlaké čerpadlo. V experimentu bylo použito čerpadlo značky Delphi DFP 6, které se také používá v systémech Common Rail a také se jedná o provedení s jedním pístem. Z následujícího grafu momentové charakteristiky je patrné, že průměrná hodnota odebíraného momentu čerpadlem je mezi 15 Nm až 20 Nm. Maximální špičková hodnota je mezi 30 Nm až 35 Nm.



Graf 1 - Momentová charakteristika čerpadla Delphi DFP6

Dalším vstupním parametrem je řemenice palivového čerpadla Bosch. Je osazeno řemenicí HTD s počtem 44 zubů. Poslední určující parametr pro výpočet je minimální průtok paliva do zásobníku Common Rail. Odhadovaná průměrná měrná spotřeba je 250 g/kWh při výkonu motoru 25 kW, což je 0,135 l \cdot min $^{-1}$ při hustotě nafty 773 kg \cdot m $^{-3}$, dále se k této spotřebě musí přičíst objem paliva ztracený průsakem okolo

pístku. Tato hodnota činí cca $0,12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ nafty (viz Graf 2 - Závislost průtoku nafty na otáčkách - Delphi DFP6) a je prakticky neměnná s otáčkami čerpadla. Celkový objemový průtok je tedy $0,255 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ nafty

3.1.1 Výpočet potřebného kroutícího momentu elektromotoru

Maximální špičkovou hodnotu odebíraného momentu pro výpočet tedy volím $M_m=35 \text{ Nm}$, podle maximální hodnoty momentu (viz Graf 1 - Momentová charakteristika čerpadla Delphi DFP6), konstantu přetěžování asynchronního motoru volím $k_M=1,4$. Z těchto parametrů dle výpočtu vychází hodnota stálého odebíraného momentu.

$$M_k = \frac{M_m}{k_M} = \frac{35}{1,4} = 25 \text{ Nm} \quad (1)$$

Řemenice osazená na čerpadle má počet zubů $z_2=44$. Pro maximální znásobení kroutícího momentu od elektromotoru volím nejmenší normovanou řemenici s počtem zubů $z_1=22$. Z výsledku výpočtu vyjde převodový poměr mezi čerpadlem a externím elektromotorem.

$$i_{12} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{44}{22} = 2 \quad (2)$$

Z vypočítaného kroutícího momentu z rovnice (1) a převodového poměru z rovnice (2) dopočítám minimální kroutící moment asynchronního motoru.

$$M_M = \frac{M_k}{i_{12}} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ Nm} \quad (3)$$

Z nabídky firmy Siemens vybírám asynchronní dvoupólový elektromotor typ 1LE1002-1BA23. Parametry motoru jsou v tabulce níže, zbylé parametry jsou v příloze 7.

Výkon	$P_M = 4 \text{ kW}$
Otáčky	$n_M = 2930 \text{ min}^{-1}$
Kroutící moment	$M_M = 13 \text{ Nm}$
Osová výška	$o_v = 112 \text{ mm}$
Napájecí napětí	$U = 400/690 \text{ V}$ při 50 Hz
Momentová třída	16
Nominální proud	$I_N = 8,1 \text{ A}$

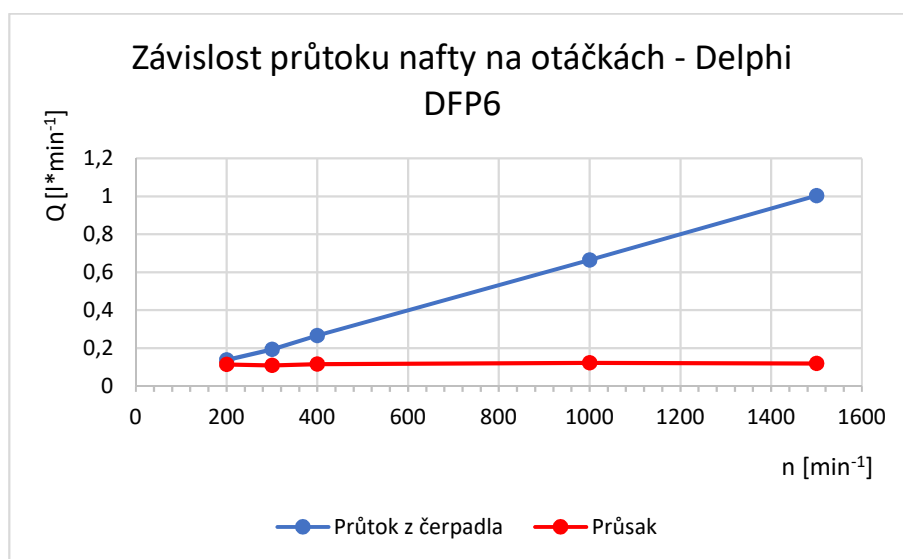
Tab. 3 - Parametry elektromotoru Siemens 1LE1002-1BA23 [5]

3.1.2 Ověření požadavku minimálního průtoku paliva

Ze známých otáček zvoleného asynchronního motoru a z výsledného převodového poměru dokáži vypočítat výsledné maximální otáčky vysokotlakového palivového čerpadla.

$$n_{\zeta} = \frac{n_M}{i_{12}} = \frac{2930}{2} = 1465 \text{ min}^{-1} \quad (4)$$

Kontrolu provedu porovnáním s výsledky měření čerpadla Delphi DFP 6. Z následujícího grafu jsem odečetl hodnotu průtoku pro otáčky čerpadla 1465 min^{-1} , která činí přibližně $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ nafty.



Graf 2 - Závislost průtoku nafty na otáčkách - Delphi DFP6

S dostatečnou rezervou tedy splňuje minimální požadavek na průtok paliva do zásobníku Common Rail, který je $0,255 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

3.1.3 Odhadovaný maximální příkon čerpadla.

Hodnotu teoretického maximálního příkonu jsem vypočítal z průtoku $Q=1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ při otáčkách daných převodovým poměrem a maximálního pracovního tlaku palivového čerpadla $p_{\zeta}=1800 \text{ bar}$.

$$Q=1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 1,66 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_{\zeta}=1800 \text{ bar} = 1,8 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$P = p_{\zeta} * Q = 1,8 \times 10^8 * 1,66 \times 10^{-5} = 3000 \text{ W} \quad (5)$$

Z měření čerpadla Delphi jsem vybral potřebná data pro výpočet jeho teoretické účinnosti. Tím dále zajistím bezpečnost u výpočtu maximálního příkonu palivového čerpadla Bosch.

n_{ζ}	$Q_{\zeta d}$	$M_{\zeta d}$	p_d	P_{skut}	P_{teor}	η
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Nm}]$	$[\text{bar}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\%]$
200	4,00E-07	20,1	1600	420,55	64	15,2
300	1,40E-06	18,6	1600	585,84	224,00	38,2
400	2,48E-06	17,8	1600	747,28	396,80	53,1
1000	9,05E-06	16,8	1600	1761,81	1448,00	82,2
1500	1,48E-05	16,8	1600	2638,94	2368,00	89,7

Tab. 4 - Vybraná data z měření čerpadla Delphi

Nejdříve jsem vypočítal skutečný příkon čerpadla z otáček a odebíraného točivého momentu.

$$P_{skut} = M_{\zeta d} * \frac{2 * \pi * n_{\zeta}}{60} \quad (6)$$

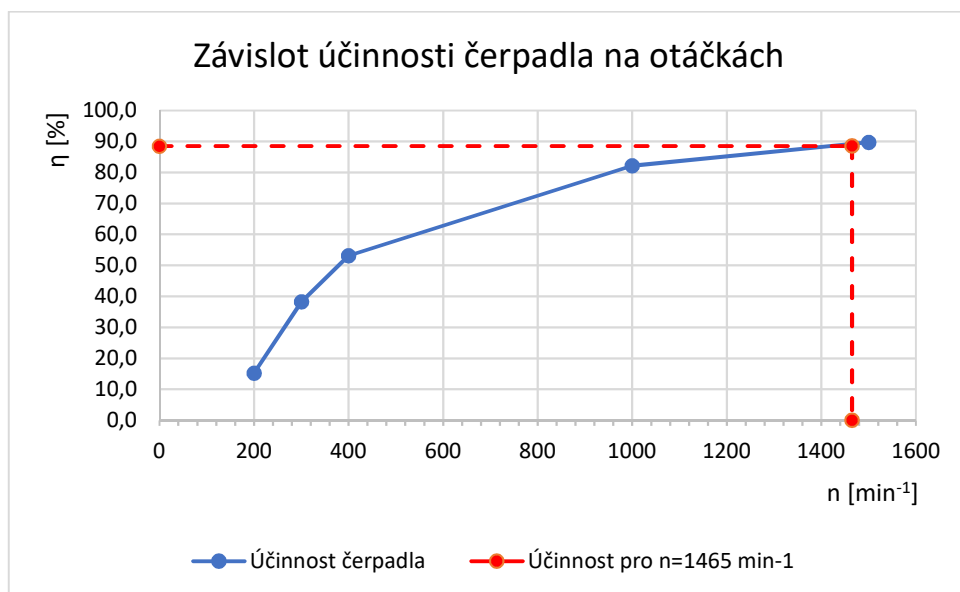
Dále jsem vypočítal teoretický příkon čerpadla z hodnoty objemového průtoku paliva $Q_{\dot{c}d}$ a tlaku p_d .

$$P_{teor} = p_d * Q_{\dot{c}d} \quad (7)$$

Účinnost dostanu podílem teoretického a skutečného příkonu čerpadla.

$$\eta_{\dot{c}} = \frac{P_{teor}}{P_{skut}} \quad (8)$$

Vypočítané hodnoty účinnosti čerpadla jsem vynesl do grafu níže. Je vidět, že při nízkých otáčkách je účinnost velmi malá. Odečetl jsem hodnotu účinnosti pro otáčky $n_{\dot{c}} = 1465 \text{ min}^{-1}$, tedy pro maximální otáčky čerpadla Bosch. Hodnota je $\eta = 88,5\%$, v grafu zvýrazněno červenou barvou.



Graf 3 - Závislost účinnosti čerpadla na otáčkách

Vypočítanou hodnotu příkonu dle rovnice (5) vydělím účinností odečtenou z (Graf 3 - Závislost účinnosti čerpadla na otáčkách) a dostanu výslednou návrhovou hodnotu příkonu čerpadla Bosch.

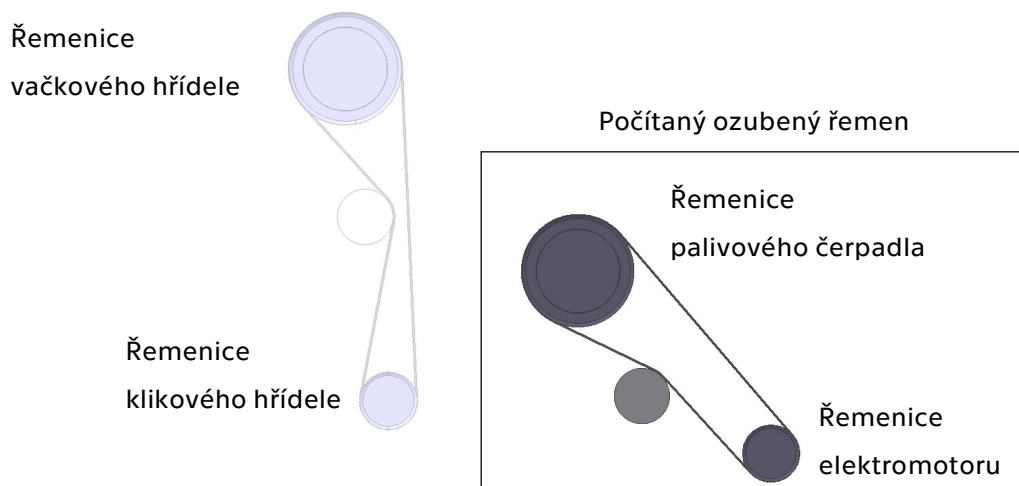
$$P_v = \frac{P}{\eta} = \frac{3000}{0,885} = 3390 \text{ W} \quad (9)$$

Výsledný příkon čerpadla je 3390 W, a tedy nepřekračuje hodnotu výkonu zvoleného asynchronního elektromotoru, která činí 4000 W (viz Tab. 3 - Parametry elektromotoru Siemens 1LE1002-1BA23 [5])

3.2 Návrh převodu s ozubeným řemenem

Pro přenos výkonu z elektromotoru na palivové čerpadlo jsem zvolil v kapitole 2.3 variantu pomocí ozubeného řemene. Pohon vačkového hřídele je původní, také pomocí ozubeného řemene. Je tedy nutné provést pouze výpočet jeho nové délky.

3.2.1 Výpočet řemene mezi elektromotorem a palivovým čerpadlem



Obr. 6 - Schéma ozubeného řemenu mezi palivovým čerpadlem a elektromotorem

Tabulka vstupních parametrů pro výpočet, který jsem provedl dle příručky od firmy Continental. [6]

Přenášený výkon	$P_M=4 \text{ kW}$
Přenášený točivý moment	$M_M=13 \text{ Nm}$
Otáčky řemenice na elektromotoru	$n_1=2930 \text{ min}^{-1}$
Otáčky řemenice čerpadla	$n_2=1465 \text{ min}^{-1}$
Počet zubů řemenice na elektromotoru	$z_1=22$
Počet zubů řemenice čerpadla	$z_2=44$
Převodový poměr	$i_{12}=2$
Šířka řemene	$b=30 \text{ mm}$
Rozteč	$t=8 \text{ mm}$
Přibližná osová vzdálenost (z modelu)	$a_m=280 \text{ mm}$
Přibližná hodnota úhlu opásání	$\beta_m=170$

Tab. 5 - Hodnoty pro výpočet ozubeného řemene mezi elektromotorem a čerpadlem

Výpočtové průměry obou ozubených řemenic:

$$d_1 = \frac{z_1 * t}{\pi} = \frac{22 * 8}{\pi} = 56,023 \text{ mm} \quad (10)$$

$$d_2 = \frac{z_2 * t}{\pi} = \frac{44 * 8}{\pi} = 112,045 \text{ mm} \quad (11)$$

Předběžný návrh délky řemene počítaný s přibližnou osovou vzdáleností a_m a odhadnutým úhlem opásání pro menší řemenici β_m :

$$L_{wp} = 2 * a_m * \sin \frac{\beta_m}{2} + \frac{t}{2} * \left[z_1 + z_2 + \left(1 - \frac{\beta_m}{180} \right) * (z_1 + z_2) \right] \quad (12)$$

$$L_{wp} = 2 * 280 * \sin \frac{170}{2} + \frac{8}{2} * \left[22 + 44 + \left(1 - \frac{170}{180} \right) * (22 + 44) \right] = 836,5 \text{ mm}$$

Z vypočítané předběžné délky volím normalizovanou délku ozubeného řemene dle výrobce. Skutečná délka řemene $L_w=840 \text{ mm}$

Ze skutečné délky řemene vypočítám reálnou potřebnou osovou vzdálenost:

$$a = 0,25 * \left((L_w - \frac{t}{2} * (z_1 + z_2)) + \sqrt{(L_w - \frac{t}{2} * (z_1 + z_2))^2 - 2 * (\frac{t}{\pi} * |z_1 - z_2|)^2} \right) \quad (13)$$

$$a = 0,25 * \left((840 - \frac{8}{2} * (22 + 44)) + \sqrt{\left(840 - \frac{8}{2} * (22 + 44)\right)^2 - 2 * \left(\frac{8}{\pi} * |22 - 44|\right)^2} \right) \\ = 286,63 \text{ mm}$$

Úhly opásání obou řemenic:

$$\beta_1 = 2 * \cos^{-1} \left(\frac{t * (z_2 - z_1)}{2 * \pi * a} \right) = 2 * \cos^{-1} \left(\frac{8 * (44 - 22)}{2 * \pi * 286,63} \right) = 168,76^\circ \quad (14)$$

$$\beta_2 = 360^\circ - \beta_1 = 360^\circ - 168,76^\circ = 191,24^\circ \quad (15)$$

Kontrola rychlosti řemene:

$$v = \frac{t * z_1 * n_1}{60 \times 10^3} = \frac{8 * 22 * 1465}{60 \times 10^3} = 4,3 \text{ m/s} \quad (16)$$

Maximální rychlost řemene HTD 8M je 33 m/s. Vypočítaná hodnota je menší.

Výpočet tažné síly v řemenu:

$$F_v = \frac{60 \times 10^6 * P_M * \sin\left(\frac{\beta_1}{2}\right)}{t * z_1 * n_1} = \frac{60 \times 10^6 * 4 * \sin\left(\frac{168,76}{2}\right)}{8 * 22 * 1465} = 926 \text{ N} \quad (17)$$

Statické předpětí řemene:

$$F_s = \frac{F_v}{2 * \sin\left(\frac{\beta_1}{2}\right)} = \frac{926}{2 * \sin\left(\frac{168,76}{2}\right)} = 465,23 \text{ N} \quad (18)$$

Efektivní tažná síla:

$$F_u = \frac{60 \times 10^6 * P_M}{t * z_1 * n_1} = \frac{60 \times 10^6 * 4}{8 * 22 * 1465} = 930,8 \text{ N} \quad (19)$$

Volná délka řemene:

$$L_f = a * \sin\left(\frac{\beta_1}{2}\right) = 286,63 * \sin\left(\frac{168,76}{2}\right) = 285,25 \text{ mm} \quad (20)$$

Testovací síla pro kontrolu napnutí řemene:

$$F_e = b + 50 = 30 + 50 = 80 \text{ N} \quad (21)$$

Z grafu v příručce z hodnoty efektivní tažné síly dostanu hodnotu koeficientu předpětí pro typ řemene HTD 8M, jeho hodnota je 25. Koeficient je potřeba pro výpočet dovoleného průhybu řemene:

$$t_e = \frac{L_f}{1000} * \text{koeficient předpětí} = \frac{285,25}{1000} * 25 = 7,1 \text{ mm} \quad (22)$$

Pro výpočet působící radiální síly na hřídeli elektromotoru jsem nejdříve spočítal sílu působící v zatížené části řemene F_1 a sílu v odlehčované části řemene F_2 :

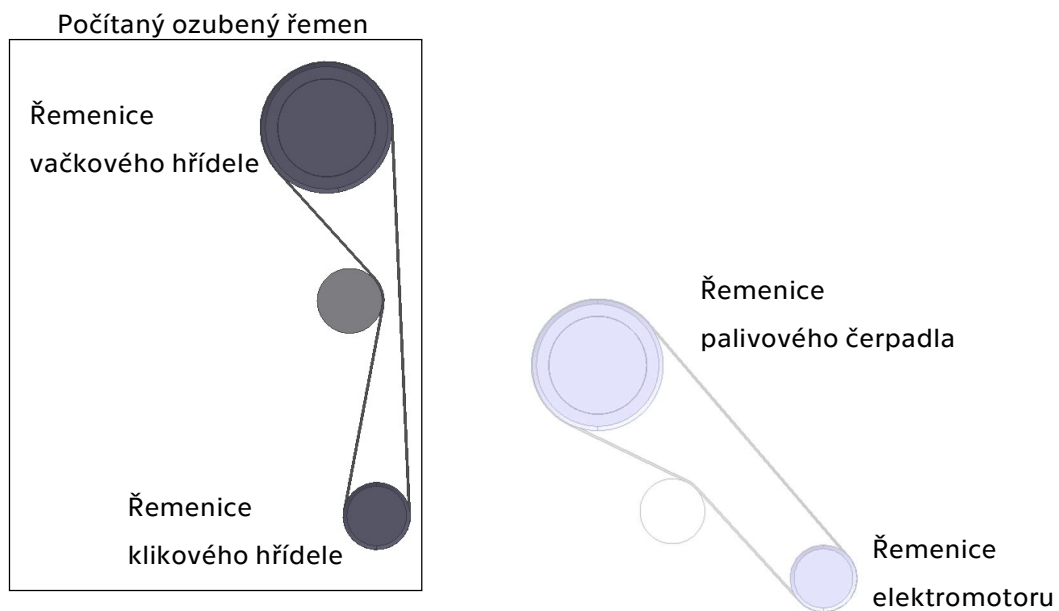
$$F_2 = 0,2 * F_u = 0,2 * 930,8 = 186,16 \text{ N} \quad (23)$$

$$F_1 = F_u - F_2 = 930,8 - 186,16 = 744,64 \text{ N} \quad (24)$$

$$F_r = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2 * F_1 * F_2 * \cos(\beta_1)} \\ = \sqrt{744,64^2 + 186,16^2 - 2 * 744,64 * 186,16 * \cos(168,76)} = 928 \text{ N} \quad (25)$$

Z návrhových výpočtů mi vyšel řemen typu HTD-8M-840-30. Tedy řemen s roztečí $t=8$ mm, délkou řemene $L_w=840$ mm a šířkou $b=30$ mm. Také jsem spočítal síly působící v řemeni a výslednou radiální sílu $F_r=928$ N, která bude zatěžovat výstupní ložisko asynchronního elektromotoru.

3.2.2 Výpočet řemene mezi klikovým a vačkovým hřídelem



Obr. 7 - Schéma ozubeného řemenu mezi klikovým a vačkovým hřídelem

Ze zvolené konstrukční varianty vychází záměna originálního řemene za kratší a natažení pouze mezi klikovým hřídelem a vačkovým hřídelem. Na obou hřídelích zůstanou originální řemenice pro ozubený řemen typu 8M a šířky 30 mm. Na klikovém hřídeli je řemenice s počtem $z_3 = 22$ zubů a na vačkovém hřídeli je s počtem $z_4 = 44$ zubů. Z modelu také vyplývá nezměněná osová vzdálenost řemenic $a_{kv} = 361,97$ mm.

Výpočtové průměry obou ozubených řemenic:

$$d_3 = \frac{z_3 * t}{\pi} = \frac{22 * 8}{\pi} = 56,023 \text{ mm} \quad (26)$$

$$d_4 = \frac{z_4 * t}{\pi} = \frac{44 * 8}{\pi} = 112,045 \text{ mm} \quad (27)$$

Úhly opásání obou řemenic:

$$\beta_3 = 2 * \cos^{-1} \left(\frac{t * (z_2 - z_1)}{2 * \pi * a} \right) = 2 * \cos^{-1} \left(\frac{8 * (44 - 22)}{2 * \pi * 286,63} \right) = 168,76^\circ \quad (28)$$

$$\beta_4 = 360^\circ - \beta_1 = 360^\circ - 168,76^\circ = 191,24^\circ \quad (29)$$

Výpočet délky řemene:

$$L_{w2} = 2 * a_{kv} * \sin \frac{\beta_3}{2} + \frac{t}{2} * \left[z_1 + z_2 + \left(1 - \frac{\beta_3}{180} \right) * (z_1 + z_2) \right] \quad (30)$$

$$\begin{aligned} L_{w2} &= 2 * 361,97 * \sin \frac{168,76}{2} + \frac{8}{2} * \left[22 + 44 + \left(1 - \frac{168,76}{180} \right) * (22 + 44) \right] \\ &= 1060,65 \text{ mm} \end{aligned}$$

Z vypočítané délky řemenu volím dle norem výrobce délku řemene 1064 mm. Přesný typ řemene mezi klikovým a vačkovým hřídelem je HTD-8M-1064-30.

3.3 Kontrola ložiska elektromotoru

Vybraný asynchronní elektromotor Siemens 1LE1002-1BA23 je osazen kuličkovým ložiskem SKF 6206 2ZC3. „Je to nerozebíratelné jednořadé radiální ložisko s ocelovou klecí vedenou kuličkami s oboustranným bezdotykovým plechovým těsněním a s vyšší radiální vůlí než normální (určeno parametrem C3). Je určeno pro uložení s rotujícím vnitřním kroužkem a je naplněno kvalitním mazivem s teplotním rozsahem od -40 °C do +100 °C pro celou dobu životnosti ložiska“ [7]. Požadavek na únosnost radiálního ložiska elektromotoru je asi 25000 hodin. Vstupní parametry pro výpočet jsou sepsány v následující tabulce. Výpočet únosnosti ložiska jsem provedl dle skript Projekt III [8].

Dynamická únosnost ložiska	C = 20,3 kN
Zatěžující radiální síla	F _r = 928 N
Otáčky elektromotoru	n _M = 2930 min ⁻¹

Tab. 6 - Parametry pro výpočet životnosti ložiska

Výpočet únosnosti ložiska v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C}{F_r}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * n_M} = \left(\frac{20300}{928}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 2930} = 59524 \text{ hod} \quad (31)$$

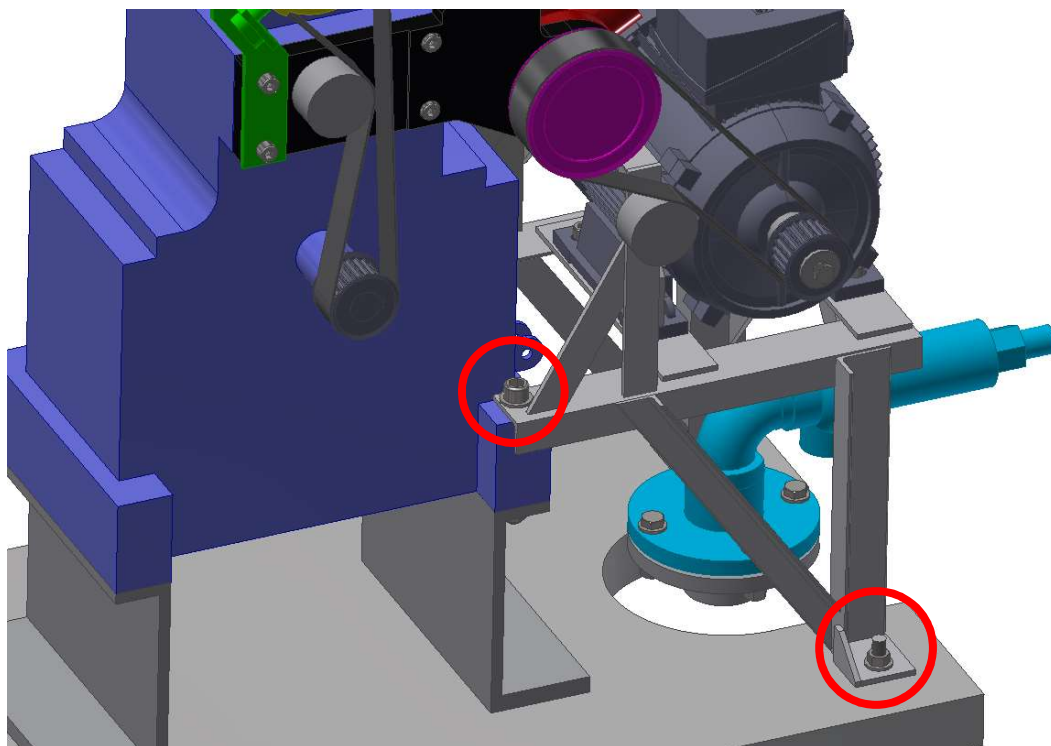
Vypočítaná hodnota únosnosti ložiska pro vypsané vstupní parametry je L_h = 59524 hodin, což je více než dvojnásobek požadované únosnosti. Ložisko elektromotoru je možné ponechat základní, není nutné ho vyměňovat za jiné nabízené ložisko.

4 Konstrukce

Popisuje tvorbu nosného rámu pro elektromotor a jeho uchycení k motoru a pevné podložce. Dále jsou v této kapitole popsány nutné úpravy jednotlivých částí pro správné fungování výzkumného motoru.

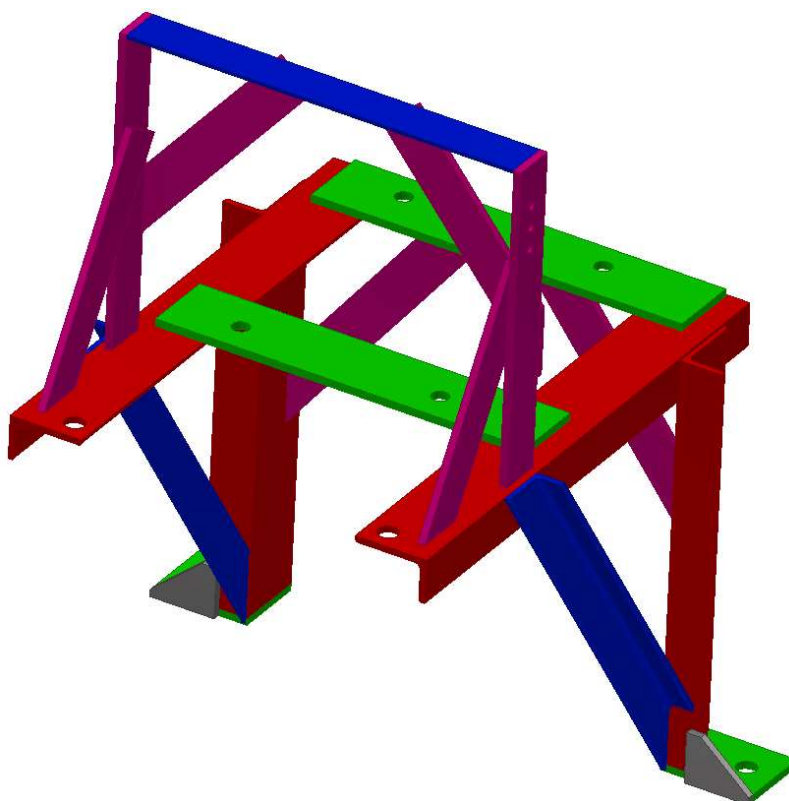
4.1 Svařovaný rám pro elektromotor

Rám pro uchycení elektromotoru jsem navrhl v programu Autodesk Inventor 2017 z úhlových profilů a plochých plechů různých velikostí. K ukotvení rámu jsem použil závitové tyče v nosné desce pod spalovacím motorem a šrouby držící motor na distančních podložkách. Obě místa jsou na následujícím obrázku (Obr. 8) zakroužkována červenou barvou. Samotný rám nese váhu elektromotoru, zachytává reakci napínací řemenice a drží podpěru sání spalovacího motoru.



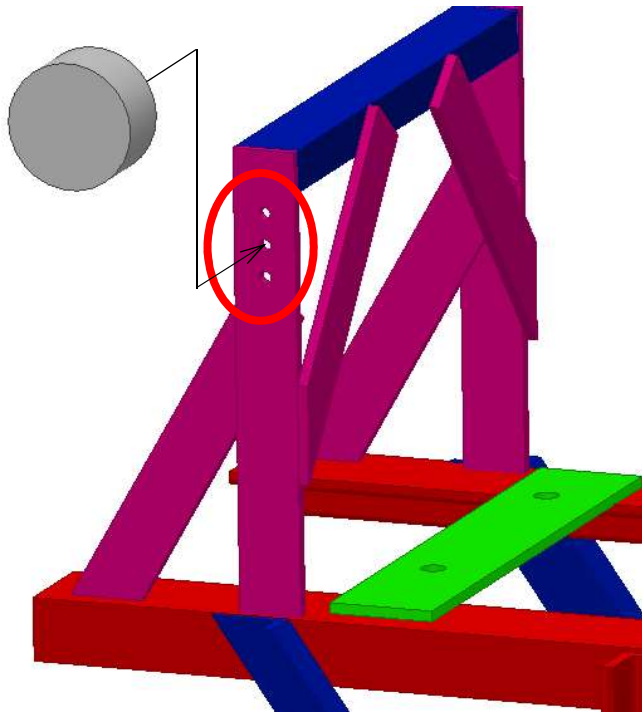
Obr. 8 - Uchycení rámu

Průměry děr pro uchycení závitovými tyčemi M12 jsou velikosti 13,5 mm, díry šrouby M14 procházejícími motorem jsou velikosti 15,5 mm. Průměry děr pro uchycení elektromotoru jsou velikosti 12 mm. Rám je vyztužen do všech směrů pohybu.



Obr. 9 - Detail svařovaného rámu

Svařovaný rám se skládá ze dvou typů profilů. Základem jsou nerovnoramenné „L“ profily ČSN 42 5545.01 z konstrukční oceli 11 373 válcované zatepla. Ostatní prvky konstrukce jsou ploché tyče ČSN 42 5522.01 z konstrukční oceli 11 373 také válcované zatepla. Na (Obr. 9 - Detail svařovaného) jsou hlavní nosné profily „L“ zvýrazněny červenou barvou a jsou velikosti L 50x30x4, modře zobrazené „L“ profily jsou velikosti L 30x20x3, zeleně zvýrazněné plechy jsou na přidělení elektromotoru a patky na přidělení rámu jsou velikosti PLO 50x5, fialově zvýrazněné plechy konstrukce jsou velikosti PLO 30x5 a zbylé šedé vyztuže patek rámu jsou také z plechu velikosti PLO 30x5.

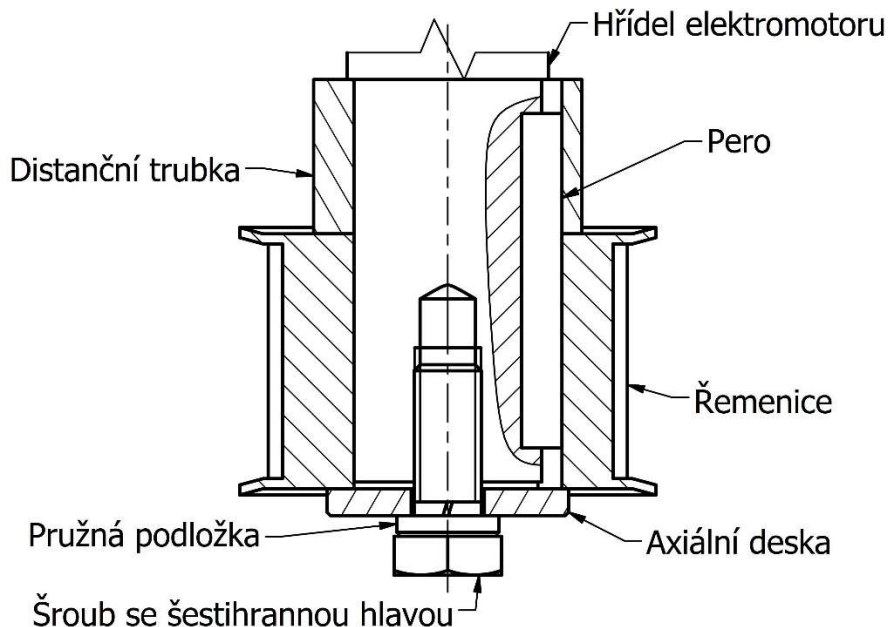


Obr. 10 - Detail části rámu pro napínací řemenici

Na (Obr. 10 - Detail části rámu pro napínací řemenici) jsou vidět v červeně zakroužkované oblasti závitové díry velikosti M10 pro přichycení napínací kladky pro ozubený řemen. Napínací řemenici jsem vybral podle rozměrů použité kladky na rozvodovém řemeni a tedy pro napínání řemene mezi elektromotorem a palivovým čerpadlem jsem zvolil SKF VKM13244 s průměrem 60 mm a šířkou 34 mm s úchytným, excentricky umístěným šroubem M10.

4.2 Axiální zajištění řemenice na hřídeli elektromotoru

Axiální zajištění řemenice jsem vyřešil pomocí přitlačné desky a šroubu se šestihrannou hlavou. Princip je zřetelný z následujícího obrázku.



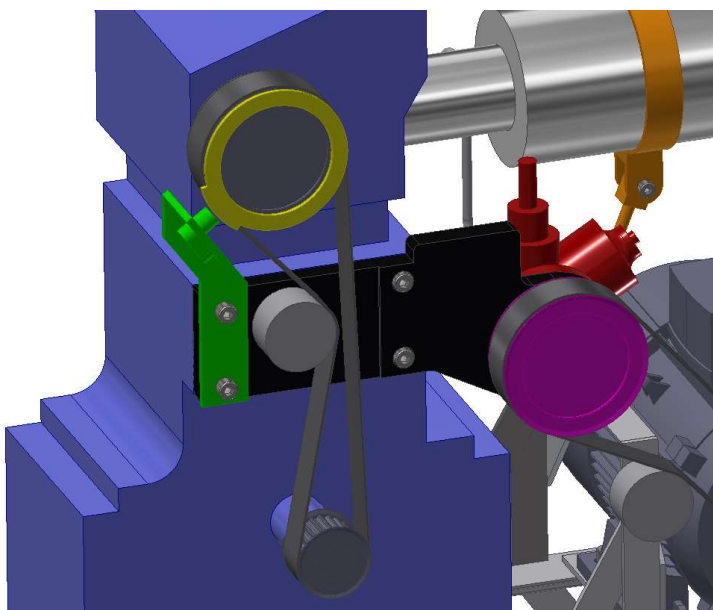
Obr. 11 - Detail axiálního zajištění řemenice

Hřídel elektromotoru je průměru 28 mm k tomu dle tabulek odpovídá velikost axiálního zajištění typu deska ČSN 02 2703 – 36 zajištěná šroubem se šestihrannou hlavou M10x25. Distanční trubka zajišťuje opření řemenice o osazení na hřídeli.

4.3 Úprava držáku palivového čerpadla a napínací řemenice

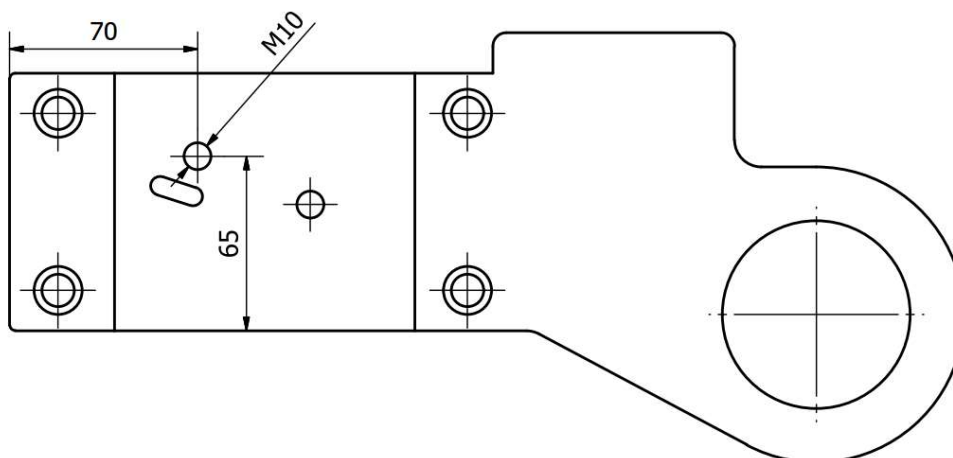
Originální držák nevyžaduje moc úprav. Díky zvolené konstrukční variantě může zůstat nezměněná poloha palivového čerpadla. Jedinou změnu, kterou jsem provedl je přesunutí napínací kladky ozubeného

řemene mezi klikovým a vačkovým hřídelem pro jeho správný chod. Na dalším obrázku je držák zvýrazněn černou barvou.



Obr. 12 - Detail držáku palivového čerpadla

Držák je připevněný čtyřmi šrouby M10 do těla motoru. Na dalším obrázku je znázorněna původní pozice díry pro šroub napínací kladky a také okótovaná pozice nově vytvořené díry pro nové umístění kladky. Obě díry jsou se závitem velikosti M10. Výkres jsem vytvořil v programu Autodesk Inventor 2017.



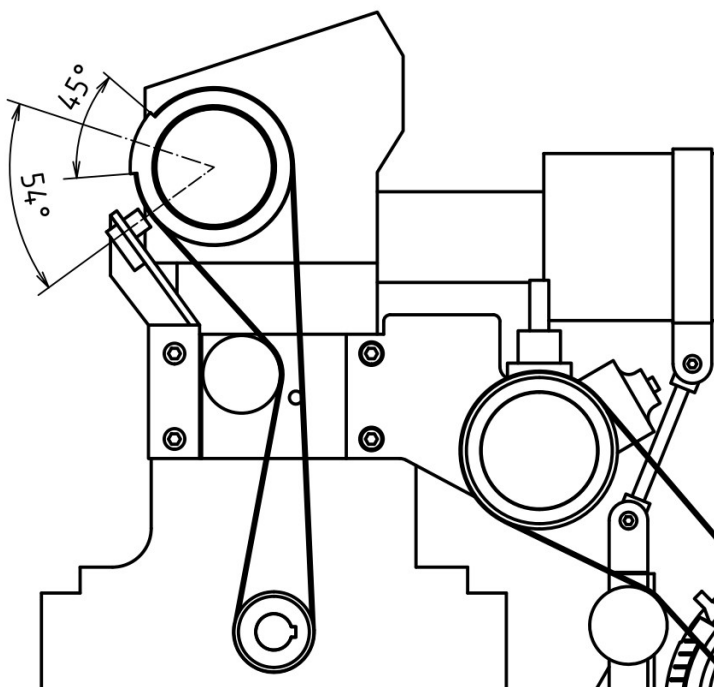
Obr. 13 - Okótovaná pozice díry pro kladku – vytvořeno v programu Inventor

4.4 Přesunutí snímače fáze

Pro správný chod spalovacího motoru je nutné zachovat signál o poloze pístu ve válci. Kvůli zvolené konstrukční variantě (použití dvou ozubených řemenů) nemůže zůstat snímač fáze nasměrovaný na signální kotouč připevněný k řemenici čerpadla, protože již nemá synchronní otáčky s otáčkami spalovacího motoru. Je tedy nutné přesunout jak signální kotouč, tak snímač fáze. Podle informací od firmy AVL je možné přesunout signální kotouč na řemenici vačkového hřídele a snímač připevnit do předepsané polohy.

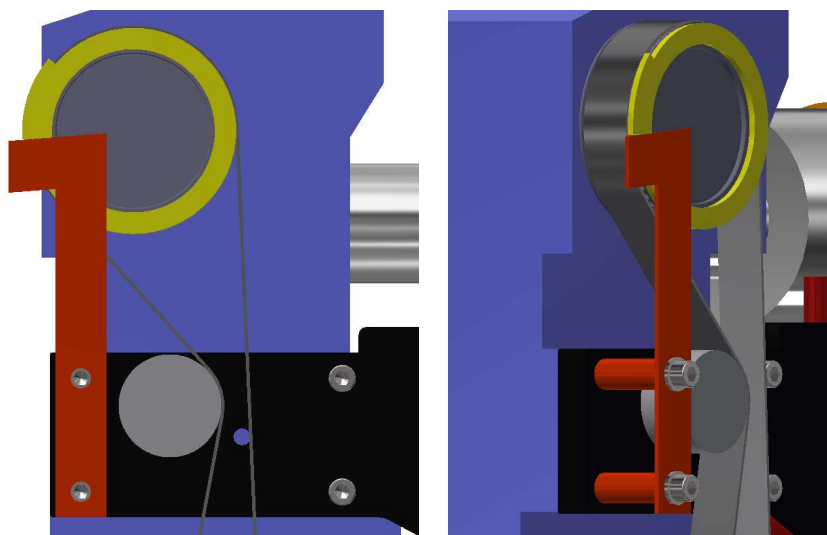
Upevnění signálního kotouče do správné polohy

Signální kotouč, který je na (Obr. 12 - Detail držáku palivového čerpadla) zvýrazněn žlutou barvou, je třeba upevnit do správné polohy vůči snímači fáze. Nastavení vychází z technické příručky AVL. Píst spalovacího motoru se nastaví do horní úvratí v cyklu vznětu. Snímač a kotouč musí svírat předepsaný úhel, tedy aby střed signální plochy s osou snímače svíral 54° , viz příloha 8. Pro přesunutý snímač a kotouč je nastavení patrné z následujícího obrázku.



Obr. 14 - Úhel nastavení signálního kotouče

Pro jednoduché seřízení kotouče na správný úhel jsem vytvořil přípravek, který se přišroubuje na pozdější místo držáku snímače, musejí se použít delší šrouby M10, než jsou použity v originální montáži držáku palivového čerpadla. Pozice přípravku je zřetelná na následujícím obrázku. Pro přípravek je také zpracovaná výkresová dokumentace.

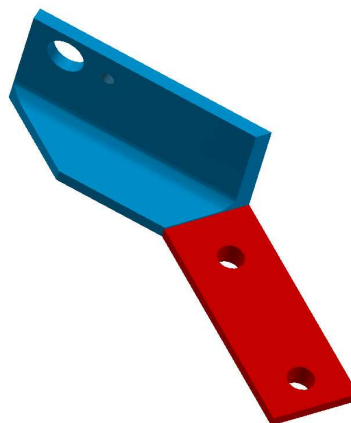


Obr. 15 - Detail připevněného přípravku pro seřízení signálního kotouče

Signální kotouč se přišroubuje na řemenici do takové pozice, aby spodní hrana jeho výstupku lícovala s hranou přípravku.

Držák snímače fáze

Je vyrobený ze dvou profilů svařených k sobě.

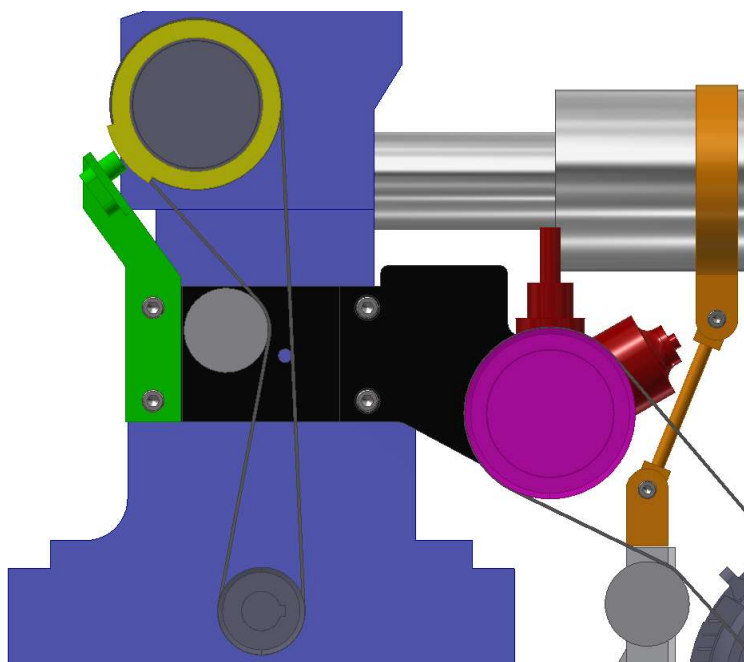


Obr. 16 - Držák snímače fáze

Modrá část držáku snímače fáze je vyrobená z profilu L 75x50x6 mm z konstrukční oceli ČSN 11 375 s dírou pro snímač průměru 17 mm a dírou

se závitem M6 pro montáž snímače. Červená přivařená část je z plechu PLO 40x5 mm s dírami o průměru 12 mm pro přidělení celého držáku. Potřebné rozměry pro výrobu držáku jsou ve výkresové dokumentaci.

Na dalším obrázku je již přesunutý snímač ve správné poloze vůči kotouči.

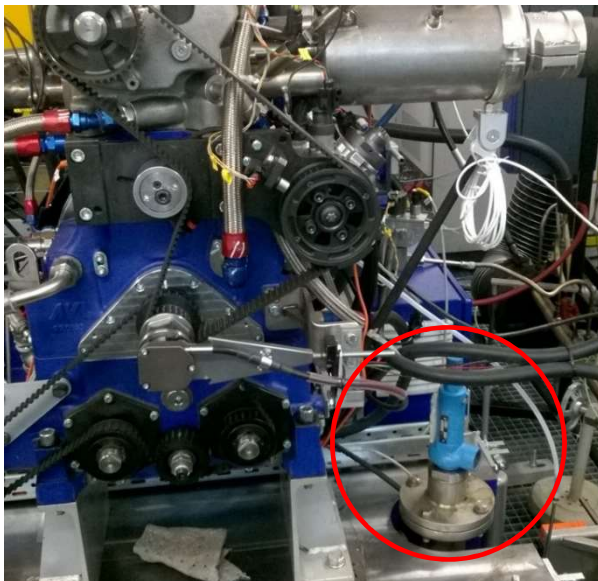


Obr. 17 - Detail přesunutého snímače fáze

Snímač fáze i s držákem je zvýrazněn zelenou barvou a je připevněný k motoru šrouby M10 procházející také držákem palivového čerpadla.

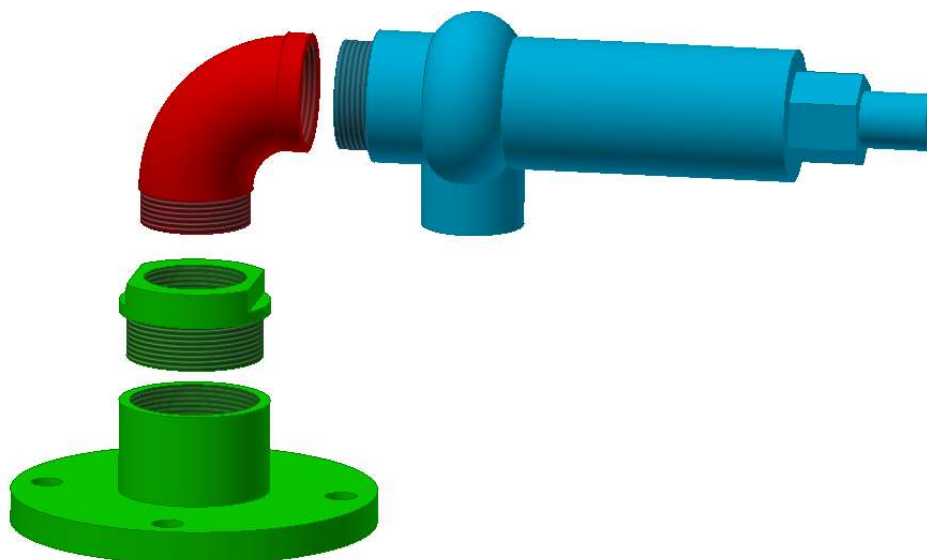
4.5 Úprava přetlakového ventilu

Jedná se o pojistný přetlakový ventil Niezgodka typ 1.1C se světlostí 27 mm [10]. V originální poloze (tedy svise vzhůru) brání umístění navržené svařované konstrukce pro elektromotor. Na následujícím obrázku je pojistný ventil v originální poloze a je červeně zakroužkovaný.



Obr. 18 – AVL motor s vyznačeným pojistným ventilem

Princip úpravy ventilu je zřetelný z následujícího obrázku rozpadu sestavy na jednotlivé díly.



Obr. 19 - Sestava dílců pojistného ventilu

Zeleně zvýrazněné části sestavy jsou originální a zůstanou stejné, jedná se o přírubu DN 65 ČSN 13 1222 [11] a redukci s vnějším závitem G 2" a vnitřním závitem R 1-1/2". Červeně zvýrazněná část je pravoúhlé koleno z nerezové oceli s vnějším závitem G 1-1/2" a vnitřním R 1-1/2" [12] pro připojení modře zvýrazněného přetlakového ventilu. Příruby jsou k sobě přišroubované čtyřmi šrouby M12. Díky této úpravě se ventil vejde pod svařovanou konstrukci.

5 Elektroinstalace

Samotný spalovací motor je řízený vlastní jednotkou dodanou od firmy AVL, kterou nelze přeprogramovat a zajišťuje fungování motoru na základní úrovni. Druhotné, už programovatelné řízení je zprostředkováno řídicí jednotkou typu rCube2 od firmy Ricardo. V této jednotce je možné nastavit různé podmínky pro spalování, časování ventilů, předstihu, tlaku paliva v Common Railu a další vlastnosti pro testování. Přes sběrnici komunikuje s řídicím panelem. Další jednotka zapojená do okruhu je CompactRIO od firmy National Instrument (zkráceně NI cRIO). Tato jednotka je zodpovědná za sběr dat a také komunikuje se zobrazovacím panelem.

5.1 Výběr frekvenčního měniče pro řízení elektromotoru

Obě řídicí jednotky jak rCube2, tak NI cRIO disponují analogovými výstupy, které budou použity pro přenos řídicího signálu o aktuálním stavu otáček spalovacího motoru, podle kterých se upraví pomocí frekvenčního měniče otáčky elektromotoru. Prvním požadavkem tedy je, aby měl frekvenční měnič analogový vstup. Dalším požadavkem je třífázové napájení z důvodu vybraného typu asynchronního elektromotoru.

Výběr frekvenčního měniče jsem provedl porovnáním hodnot nominálního proudu v elektromotoru a trvalých výstupních proudů z různých typů měničů [14]. Nominální proud v elektromotoru $I_N = 8,1 \text{ A}$ (viz Tab. 3 - Parametry elektromotoru Siemens 1LE1002-1BA23 [5]). Na základě této hodnoty proudu jsem vybral třífázový frekvenční měnič firmy Emerson typ M200-03-4-00094-A. Technické specifikace jsou v následující tabulce a příloze 9.

Vstupní napětí	3 x 400 V
Trvalý výstupní proud	9,4 A
Výkon	4 kW
Analogové vstupy	2x
Digitální vstupy	4x
Analogový výstup	1x
Digitální výstup	1x

Tab. 7 - Technické parametry frekvenčního měniče M200 [15]

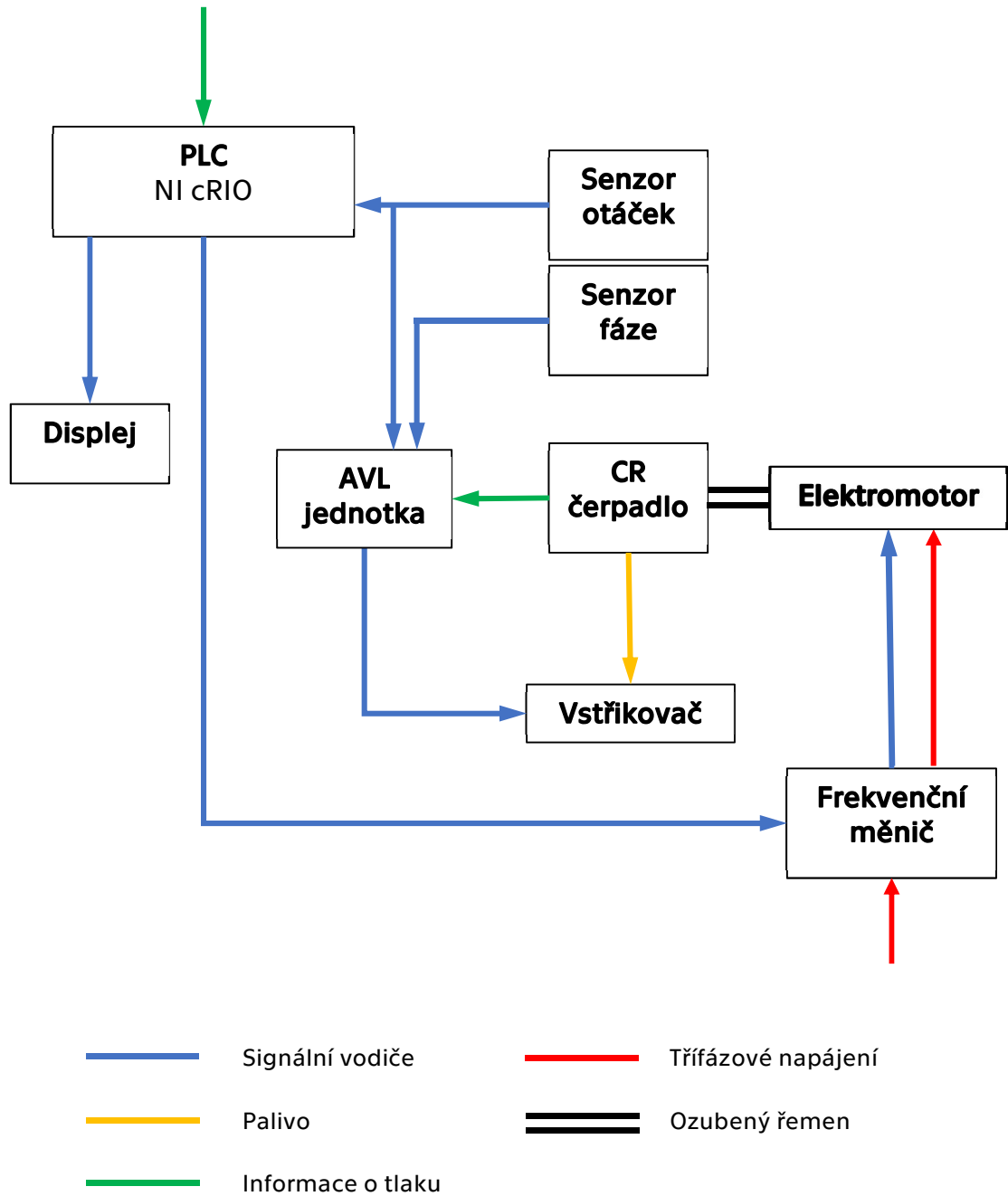
5.2 Způsob řízení frekvenčního měniče

Analogový signál s hodnotou aktuálních otáček spalovacího motoru mohou poskytnout frekvenčnímu měniči obě řídicí jednotky. Jsou tedy dvě možnosti řízení.

- a) Pomocí jednoty Ricardo rCube2
 - Má napěťový výstupní analogový signál
 - Zná požadavek na tlak paliva
- b) Pomocí jednotky NI cRIO
 - Má napěťový i proudový výstupní analogový signál
 - Nemá informace o požadavku tlaku paliva

Volím variantu řízení pomocí NI cRIO, tato jednotka je určena především pro sběr dat a zabezpečení v případě poruchy, proto se neuvažuje o její výměně. Naopak jednotka pro řízení spalování se může časem změnit. Další výhodou je, že palivové čerpadlo se bude schopno točit bez nutnosti aktivního spalovacího motoru. Nevýhodou tohoto řízení je, že se bude muset přivést vstupní signál o požadavku tlaku v Common Railu. Vyřeší se propojením s jednotkou rCube2, ve které je tato hodnota obsažena.

5.3 Blokové schéma zapojení



6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo osamostatnit pohon palivového čerpadla Common Rail a navrhnout vhodný elektromotor.

Provedl jsem analýzu stanoviště a vytvořil 3D model. Dále jsem navrhl dvě možná konstrukční řešení. Na základě porovnání jejich výhod a nevýhod jsem vybral variantu se dvěma ozubenými řemeny s tím, že palivové čerpadlo zůstane na originálním místě.

Podle dostupných dat jsem vypočítal parametry vhodného elektromotoru pro pohon čerpadla. Z nabídky firmy Siemens jsem vybral asynchronní třífázový elektromotor s výkonem 4 kW, kroutícím momentem 13 Nm a otáčkami 2930 min⁻¹.

Pro řemen mezi elektromotorem a čerpadlem jsem provedl návrhový výpočet, jehož výsledkem je ozubený řemen typu HTD-8M-840-30. Druhý ozubený řemen natažený mezi klikovým a vačkovým hřídelem je stejného typu, jen se liší v délce, kterou jsem zjistil na základě výpočtu z osové vzdálenosti. Druhý řemen vychází tedy HTD-8M-1064-30.

V konstrukční části jsem navrhl svařovaný rám pro uchycení elektromotoru a upravil pojistný ventil. Vytvořil jsem celkový 3D model zástavby. Dále jsem zpracoval popis a modely pro potřebné úpravy různých částí, aby bylo zajištěno správné fungování motoru. Pro všechny navržené dílce a sestavy jsem zpracoval detailní výkresovou dokumentaci.

Poslední částí práce bylo vytvořit blokové schéma zapojení. K tomu jsem pro elektromotor vybral na základě hodnoty jmenovitého proudu motoru správný frekvenční měnič, aby bylo možné řídit jeho otáčky. Typ třífázového frekvenčního měniče je Emerson M200-03-4-00094-A s výkonem 4 kW.

Také jsem provedl přibližnou kalkulaci ceny přestavby a shrnul do tabulky komponent.

Zdroje:

- [1] Passenger Car Diesel Engine with Steel Piston. SIA Powertrain [online]. [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.sia.fr/publications/271-passenger-car-diesel-engine-with-steel-piston?lng=en>
- [2] Synchronní řemeny. PK servis [online]. Tábor: PK servis [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.ozubene-remeny.com/cz/synchronni-remeny>
- [3] DOČKAL, Lubomír. Převody řemenové – klínovými řemeny. In: *SPŠ Vsetín* [online]. Střední průmyslová škola strojnická Vsetín: SPŠ Vsetín, 2014 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: http://www.spssvsetin.cz/assets/vy_32_inovace_14_04.pdf
- [4] Tima účinnost řemenů. Tima [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/caste-dotazy/ucinnost-remenu/>
- [5] Produktový katalog Siemens. Elektromotory [online]. 2015 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_1le1.pdf
- [6] Continental: Timing belts. Continental [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: http://www.contitech.de/pages/produkte/antriebsriemen/antrieb-industrie/download/TD_Synchrobelt_HTD_en.pdf
- [7] Ložisko 6206-2Z/C3 SKF. *PRO Průmysl* [online]. Hrušovany nad Jeviškou: PRO Průmysl [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://proprumysl.cz/lozisko-6206-2z-c3-skf/>
- [8] Otmar KUGL, Jiří HOUKAL, Pavel TOMEK a Jiří ZÝMA. *Projekt III. ročník*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000
- [9] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 80-86490-74-2.
- [10] Relief Valve. Niezgodka [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: https://www.niezgodka.de/admin_cms/upload/dokumente/Typ001DB LGB.pdf
- [11] Příruba DN65. Feron [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=41601>
- [12] Závitové armatury z nerezové oceli. RS Components [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://cz.rs-online.com/web/p/zavitove-armatury-z-nerezove-oceli/4993366/>
- [13] Trubkové závitky podle DIN/ISO 228. Norma [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: http://www.noma.cz/informace/2_3.php

[14] Dimenzování frekvenčních měničů. Pohon na technika [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/dimenzovani-fm>

[15] Frekvenční měniče. Control techniques [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.pohony-menice.cz/menic-unidrive-m200-034-00094-a-4kw>

Seznam obrázků, tabulek a grafů:

Obrázky:

Obr. 1 - Ztrátové příspěvky v motoru Renault 1,5dci [1].....	11
Obr. 2 - Výchozí stav vznětového motoru AVL, zdroj Ivan Bortel	12
Obr. 3 - Konstrukční varianta A – vytvořeno v programu Inventor	13
Obr. 4 - Konstrukční varianta B – vytvořeno v programu Inventor	15
Obr. 5 - Vyrovnání řemenic do roviny.....	18
Obr. 6 - Schéma ozubeného řemenu mezi palivovým čerpadlem a elektromotorem.....	24
Obr. 7 - Schéma ozubeného řemenu mezi klikovým a vačkovým hřídelem	28
Obr. 8 - Uchycení rámu.....	31
Obr. 9 - Detail svařovaného rámu.....	32
Obr. 10 - Detail části rámu pro napínací řemenici.....	33
Obr. 11 - Detail axiálního zajištění řemenice	34
Obr. 12 - Detail držáku palivového čerpadla.....	35
Obr. 13 - Okótovaná pozice díry pro kladku – vytvořeno v programu Inventor.....	35
Obr. 14 - Úhel nastavení signálního kotouče.....	36
Obr. 15 - Detail připevněného přípravku pro seřízení signálního kotouče	37
Obr. 16 - Držák snímače fáze	37
Obr. 17 - Detail přesunutého snímače fáze.....	38
Obr. 18 – AVL motor s vyznačeným pojistným ventilem	39
Obr. 19 - Sestava dílců pojistného ventilu.....	39

Tabulky:

Tab. 1 - Shrnutí konstrukčních variant	16
Tab. 2 - Shrnutí vlastností ozubeného a klínového řemenu	18
Tab. 3 - Parametry elektromotoru Siemens 1LE1002-1BA23 [5].....	21
Tab. 4 - Vybraná data z měření čerpadla Delphi.....	22
Tab. 5 - Hodnoty pro výpočet ozubeného řemene mezi elektromotorem a čerpadlem	25
Tab. 6 - Parametry pro výpočet životnosti ložiska	30
Tab. 7 - Technické parametry frekvenčního měniče M200 [15].....	41

Grafy:

Graf 1 - Momentová charakteristika čerpadla Delphi DFP6	19
Graf 2 - Závislost průtoku nafty na otáčkách - Delphi DFP6.....	21
Graf 3 - Závislost účinnosti čerpadla na otáčkách.....	23

Tabulka komponent

Tabulka komponent:

Komponenta	Dostupná z	Cena	Množství
Elektromotor Siemens 1LE1002-1BA23	http://www.elektromotory.net/siemens/1la7-3000-otacek/1le1001-5-5.html	5203 Kč	1
Řemenice 22 zubů	https://www.tyma.cz/produkty/detail/22-08m-20-6f-9771/	130 Kč	1
Řemen 8M-840-30	https://www.tyma.cz/produkty/detail/08m-0840-30-pts-12682/	665 Kč	1
Řemen 8M-1064-30	https://www.tyma.cz/produkty/detail/08m-1064-30-17685/	788 Kč	1
Kladka SKF	https://www.autokseft.cz/SKF-Napinaci-kladka-ozubeny-remen-SK-VKM13244-VKM13244-nd336323?zenid=89626bd867f2409b9171f85054cc9cc9	469 Kč	1
L 50x30x4	http://www.kondor.cz/l-50x30x4/d-78321/	64,74kč/m	1296mm
L 30x20x3	http://www.kondor.cz/l-30x20x3/d-78342/	38,9kč/m	972 mm
PLO 50x5	http://www.kondor.cz/plocha-ocel-50x5/d-78786/	42,32kč/m	650 mm
PLO 30x5	http://www.kondor.cz/plocha-ocel-30x5/d-78752/	27,50kč/m	1670mm
PLO 70x5	http://www.kondor.cz/plocha-ocel-70x5/d-78977/	63,87kč/m	200 mm
PLO 50x6	http://www.kondor.cz/plocha-ocel-50x6/d-78761/	50,98kč/m	55 mm
Pravoúhlé koleno	http://cz.rs-online.com/web/p/zavitove-armatury-z-nerezove-oceli/4993366/	458 Kč	1
Frekvenční měnič	https://www.pohony-menice.cz/menic-unidrive-m200-034-00094-a-4kw	9 200 Kč	1
	Přibližná celková cena	17 176 Kč	

Přílohy:

Příloha 1: Výkres svařence rámu (BP_001)

Příloha 2: Výkres držáku snímače (BP_002)

Příloha 3: Výkres sestavy (BP_003)

Příloha 4: Výkres přípravku pro seřízení signálního kotouče (BP_004)

Příloha 5: 3D model konstrukční varianty A (BP_sestava_A.step) na CD

Příloha 6: 3D model zvolené konstrukční varianty B (BP_sestava_B.step) na CD

Příloha 7: Katalogové parametry elektromotoru Siemens

Vezměte na vědomí
normu
ČSN EN IEC 60034-30
o nové třídě účinnosti

Standardní motory SIMOTICS GP 1LE1

Motory se standardní účinností (Standard efficiency) IE1

IE1

Motory s vlastním chlazením
Hliníková řada 1LE1002

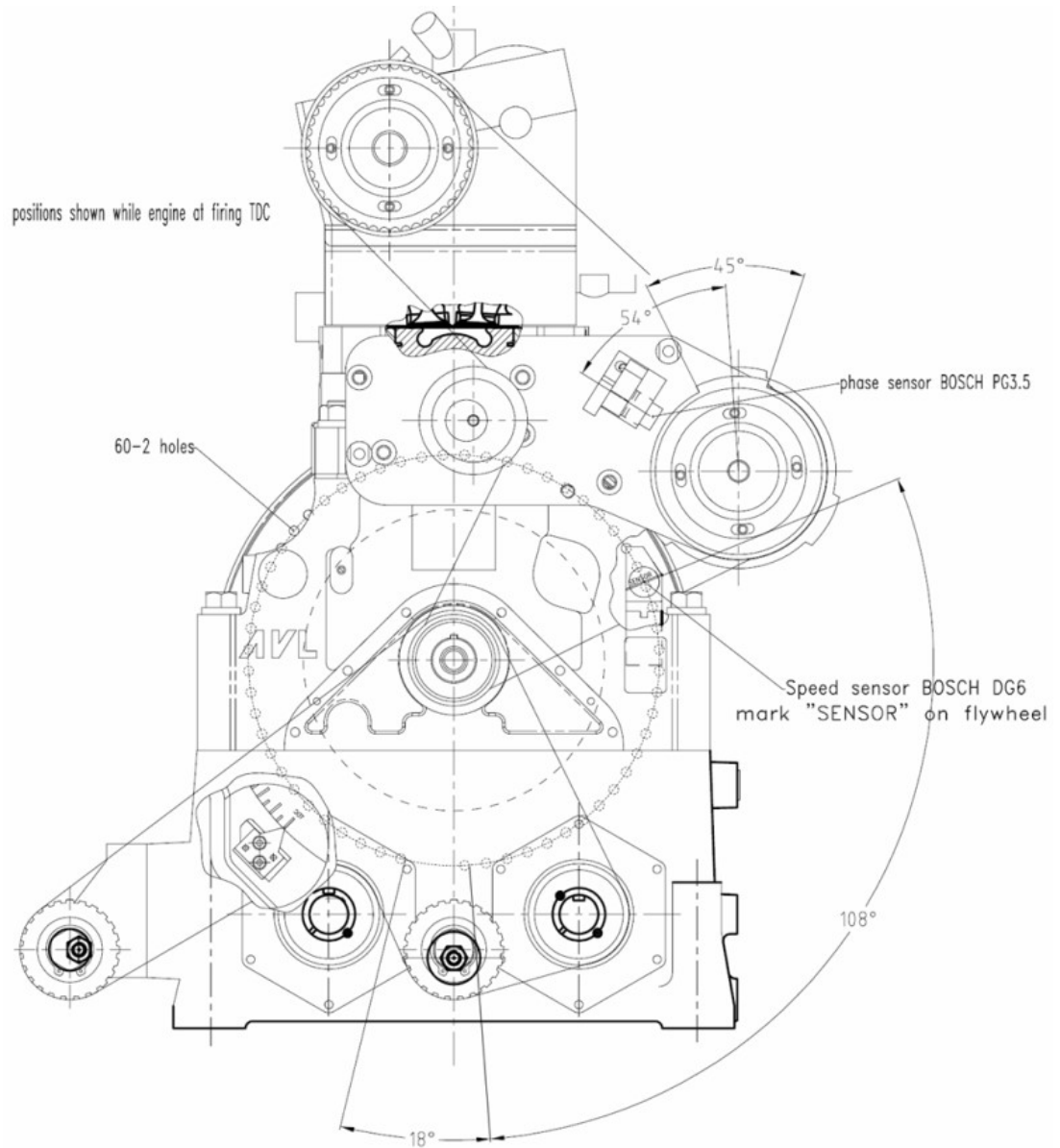
Volba a objednávání

P _N 50 Hz	P _N 60 Hz ¹⁾	Velikost	Provozní hodnoty při jmenovitém výkonu												Hliníková řada 1LE1002	m _{M B3}	J	Momentová třída															
			n _N 50 Hz	M _N 50 Hz	IE třída	η _N 50 Hz	η 3/4	η 2/4	η 1/4	cos φ _N 50 Hz	I _N 50 Hz	M _K 50 Hz	I _K 50 Hz	M _K 50 Hz					L _{DBA} 50 Hz	L _{WA} 50 Hz	Objednací číslo	kg	kgm ²	KL									
kW	kW	min ⁻¹	Nm	%	%	%	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	3,45	100 L	2835	10	IE1	81,5	82,8	82,1	0,87	6,1	3,2	6,2	2,9	67	79	1LE1002-1AA4	20	0,0034	16														
4	4,55	112 M	2930	13	IE1	83,1	83,8	82,2	0,86	8,1	2,7	7,3	3,7	69	81	1LE1002-1BA2	25	0,0067	16														
5,5	6,3	132 S	2905	18	IE1	84,7	85,7	85,0	0,89	10,5	1,9	5,6	2,5	68	80	1LE1002-1CA0	35	0,013	16														
7,5	8,6	132 S	2925	24	IE1	86,0	86,9	85,8	0,87	14,5	2,1	6,3	3,2	68	80	1LE1002-1CA1	40	0,016	16														
11	12,6	160 M	2925	36	IE1	87,6	87,6	86,1	0,85	21,5	2,0	5,8	2,6	70	82	1LE1002-1DA2	60	0,030	16														
15	17,3	160 M	2930	49	IE1	88,7	89,0	88,0	0,84	29	2,5	6,1	3,1	70	82	1LE1002-1DA3	68	0,036	16														
18,5	21,3	160 L	2935	60	IE1	89,3	90,0	89,7	0,86	35	2,5	7,0	3,2	70	82	1LE1002-1DA4	78	0,044	16														

2-pólové: 3000 min⁻¹ při 50 Hz, 3600 min⁻¹ při 60 Hz¹⁾

- Chlazení: vlastní chlazení (IC 411), resp. se zkráceným označ. F90 cizí chlazení bez vnějšího ventilátoru a krytu ventilátoru (IC416)
- Účinnost: standardní účinnost IE1 (Standard efficiency), servisní faktor 1,1 (SF uveden na výkonnostním štítku)
- Izolační systém: tepelná třída 155 (F), využití na tepelnou třídu 130 (B), ochrana krytem IP55

Příloha 8: Nastavení signálního kotouče vůči snímači fáze



Příloha 9: Parametry frekvenčního měniče

Unidrive M200 feature and specification table

Performance	Current loop update: 166 μ s
	Heavy Duty peak rating: 180 % (3 s), 150 % (60 s)
	Maximum output frequency: 550 Hz
	Switching frequency range: 0.67, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16 kHz (3 kHz default)
Mechanical attributes	DIN rail mountable (size 1 and 2)
	Commander SK compatible mechanical footprint either as standard or with conversion plates
Parameter back-up	Serial port cloning (using optional AI-485 Adaptor)
	SD card (using optional AI-Back-up Adaptor)
Onboard I/O	2 x Analog inputs, 1 x Analog output
	4 x Digital inputs, 1 x Bidirectional digital input or output
	1 x Relay output (size 1 to 4), 2 x Relay outputs (size 5 and 6)
Back-up power	24 V control back-up (using optional AI-Back-up Adaptor)
Other	Temperature controlled fan with standby (off)
	User replaceable fan(s)
	Conformal coating
	Standby mode (energy saving)
	User defined security levels (e.g. restricted access or read-only parameters via user defined security code)

Vstupy a výstupy frekvenčního měniče

Terminal Layout

