ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ – FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV VOZIDEL A LETADLOVÉ TECHNIKY

OBOR AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A
KOLEJOVÝCH VOZIDEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BP 2015 – MV 01

Patrik Čeloud

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Vávrovi Ph.D., za podklady, rady a čas, který mi věnoval při přípravě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Ladislavu Mrázovi za rady a pomoc s vlastními frekvencemi.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce a konzultantů. Veškeré zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedené v seznamu literatury.

V Praze dne . . . . . .

Čeloud Patrik

Abstrakt

Obsahem bakalářská práce je navržení stanoviště pro malé spalovací motory se svislou osou. Část práce je zaměřena na návrh stanoviště a konstrukční řešení upínání spalovacího motoru. Další část se zabývá navržením jednotlivých komponentu pro něj. V závěrečné části je vytvořen jednoduchý program na výpočet vlastních frekvencí, kde zkoumáme vliv tuhosti spojek na vlastními frekvencemi tohoto stanoviště.

Klíčová slova: návrh motorového stanoviště, vlastní frekvence, setrvačník

Abstract

Content of this thesis is to design a habitat for small combustion engines with the vertical axis. Part of the work is focused on the design and construction of habitat clamping combustion engine. Another section deals with designing each component to it. The final part is proposing a simple program for calculating the natural frequencies which examines the influence of stiffness of joints in the natural frequencies of the station.

Keywords: design of engine habitat, natural frequency, flywheel

Obsah

Obsah 5

1.Úvod 7

2.Motorové stanoviště 8

2.1Návrh stanoviště pro malé spalovací motory 9

2.2Uložení motoru 11

3.Součásti stanoviště 13

3.1Převodovka 13

Parametry převodovky 14

Parametry převodovky v mm: 14

3.2Pružná spojka 15

Parametry spojky 16

Příklad výpočtu velikosti spojky 17

3.3Elektromotor 18

Výběr elektromotoru 19

Parametry motoru: 19

Rozměry motoru: 20

3.4Frekvenční měnič 21

Parametry měniče 21

Parametry snímače 22

3.5Setrvačník 23

Výpočet: 24

Návrh 24

3.6Ložisko 27

Parametry ložiska: 27
Výpočet ložiska: 27
4.Výpočet vlastních frekvencí (kmitání) 28
4.1Náhradní torsní soustava 28
4.2Výpočet momentu setrvačnosti motoru 29
Určení hmot ojnice 30
Výpočet momentu setrvačnosti 31
5.Závěr 35
Seznam použitých veličin 36
Použité informační zdroje 38

1. Úvod

Stanoviště pro malé spalovací motory navrhujeme pro následné měření výfukových emisí a částic. Jelikož tyto malé spalovací motory nepodléhají žádným emisním limitům, vypouštějí velké množství škodlivých látek do ovzduší. Předpokládáme, že tyto spalovací mory, které nemají žádné katalyzátory ani filtry, můžou produkovat velké množství emisí a částic. A s rozšiřováním zahradní techniky, kde se tyto malé spalovací motory rozšiřují čím dál víc, se zvyšují i škodlivé látky v ovzduší.

Na začátku práce se věnujeme navržení zkušebního stanoviště pro malé motory, které se bude skládat z pevné části, která se nebude měnit a z části odnímatelného rámu, na kterém se bude připravovat motor pro zkoušku. Na tomto rámu se bude dat nastavit osová výška a přesně nastavit polohu aby vše bylo souosé.

V následující části se zabýváme navržením jednotlivých komponentů do „pevné“ části stanoviště. Zde navrhujeme velikost pružných spojek, elektromotor, snímač krouticího momentu a další. Dále je zde vypočten a zkonstruován setrvačník, který nám vyrovnává nerovnoměrnost chodu jednoválce a životnost ložiska na kterém je setrvačník uložen.

V poslední části se zabýváme kmitáním soustavy a hlavně vlastními frekvencemi, abychom se těmto případným frekvencím mohli při měření vyhnout.

2. Motorové stanoviště

Motorové stanoviště se používá k zatěžování spalovacího motoru předem určeným způsobem zatížení, tím se poté simuluje reálné zatížení motoru, např.: jízda ve městě nebo po dálnici. Za použití měřící techniky pak můžeme získat například hodnoty emisí nebo výkonové parametry motoru. Díky těmto zkouškám a jimi získaným výsledky pak můžeme urychlit vývoj součástí motorů, nebo předejít špatnému navržení. Dále se také tímto způsobem dají rychle a snadno ověřit různé návrhy například chladicího systému.

Na spalovací motory není kladen pouze požadavek na levnou výrobu motoru, ale také jsou kladeny požadavky na spolehlivost, nízkou spotřebu a také na množství emisí co produkují. Ve spalinách z motoru jsou obsaženy látky, které negativně ovlivňují nejen životní prostředí ale i lidský organizmus. Jedná se především o oxid uhelnatý, nespálené uhlovodíky, oxid dusný a pevné částice. Kvůli těmto látkám jsou stanoveny předpisy EHK a EURO, které omezují množství vypouštění škodlivin do ovzduší.

Díky experimentům na zkušebních stanovištích můžeme postupně dosáhnout nízké spotřeby a snížení emisi na minimum. [1]

Složení motorového stanoviště:

- základní deska se systémem pro uchycení motoru, dynamometru a případně dalších potřebných komponentu
- dynamometr, který nám zajišťuje měření výkonových parametrů
- měřící stanoviště, kde se nachází obsluha stanoviště
- přístroje na měření spalin
- přístroje na měření spotřeby paliva, teplot kapalin motoru (oleje, chladicí kapaliny)
- přívody paliva, vzduchu a potřebných kapalin z externích nádrží

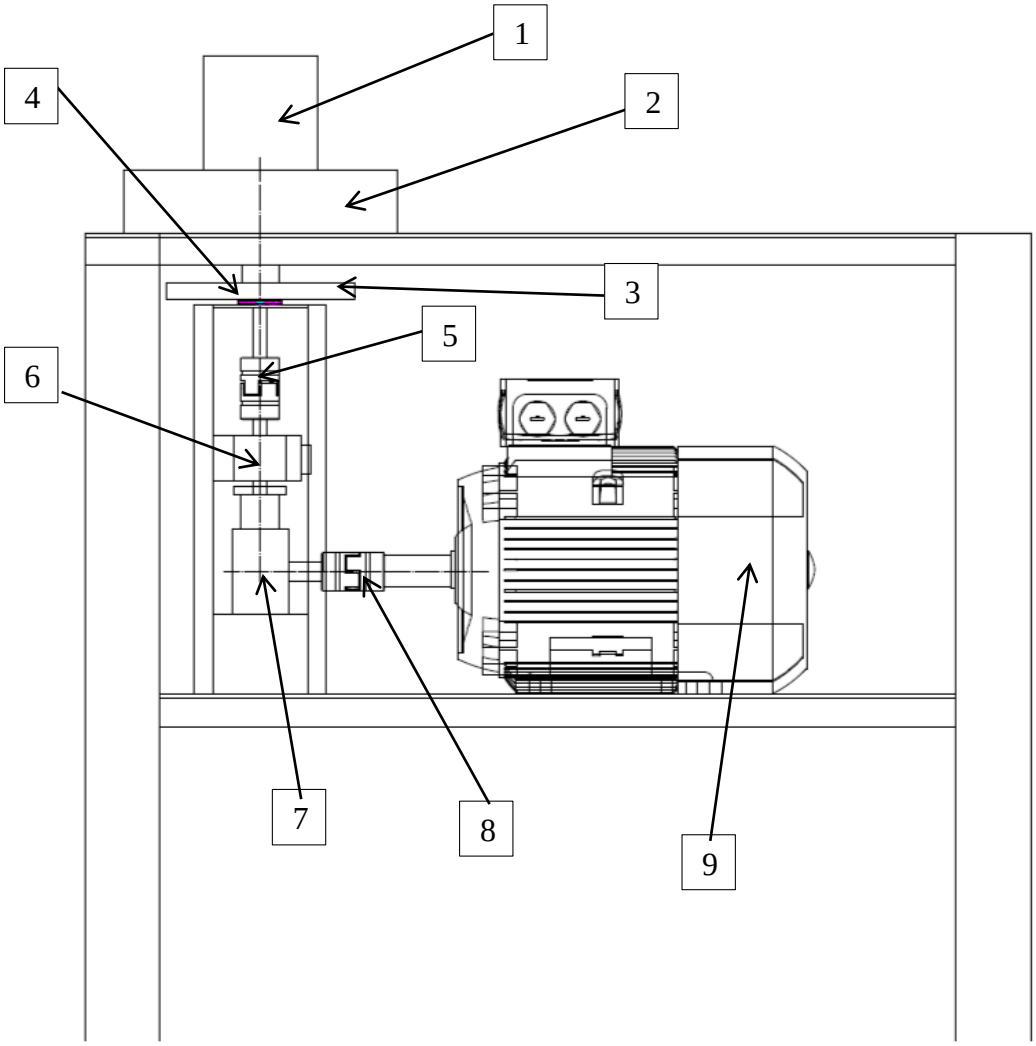
- vzduchotechnika, která přivádí čerstvý vzduch a odvádí spaliny, případně použita k vnějšímu chlazení komponentů

Princip motorového stanoviště

Motorové stanoviště má motor vyndán z automobilu, na rozdíl od válcové zkušebny, kde je motor zkoušen v přímo ve vozidle. Motor je uchycen na stanovišti a k němu je následně připojen dynamometr a další potřebné komponenty. Například startér motoru, řídící jednotka, chladič a další komponenty.
Motory mají popsán průběh měření normou ISO 1585:1992 Road vehicles, Engine test code, Net power.

2.1 Návrh stanoviště pro malé spalovací motory

Stanoviště pro malé spalovací motory navrhujeme jako svařovanou konstrukci. Nohy stanoviště jsou z L-profily o rozměrech 80x60x6. Mezi nohami jsou svařena dvě patra z čtvercových trubek (30x30x3), na kterých je posazena deska o tloušťce 4mm. Na vrchní desce je posazen upínací rám motoru a případně lze přidělat větrák, který by nám chladil motor. Na spodní desce je přidělán elektromotor a další menší rám. Tento rám je zde ze dvou důvodu. První je ten abychom vyrovnali rozdílné osové vzdálenosti mezi převodovkou a elektromotorem. A druhý je ten, že na vrchní části rámu je umístěn setrvačník. V tomto rámu je také na boku upevněn snímač točivého momentu.



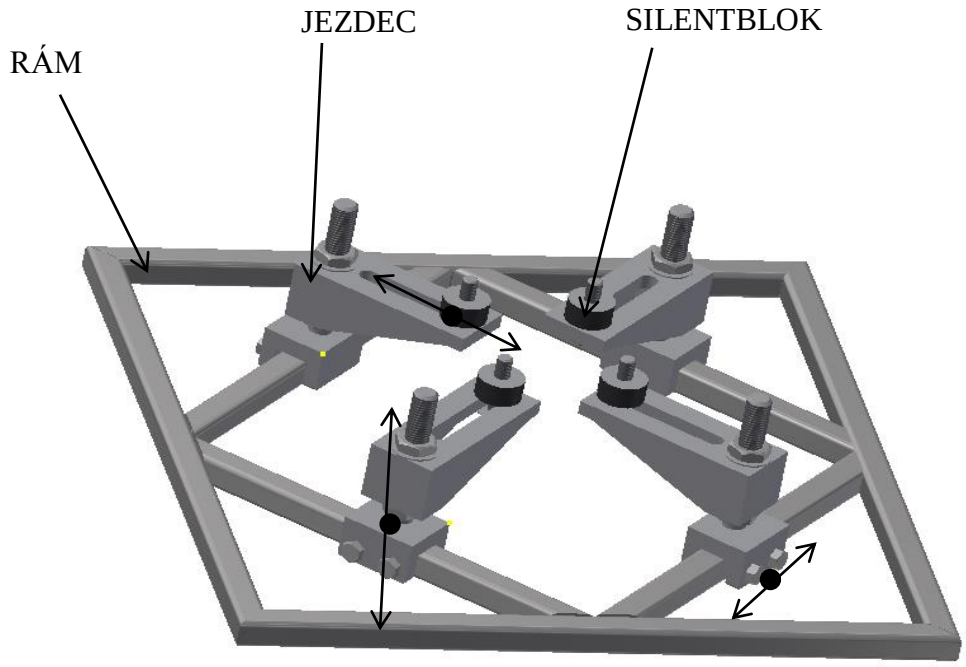
Obrázek 1-Schéma motorového stanoviště

1- spalovací motor
2- rám na upevnění (viz kap. 2.2)
3- setrvačník (viz kap. 3.6)
4- válečkové ložisko
5- pružná spojka – svěrná
6- snímač krouticího momentu
7- převodovka
8- pružná spojka
9- elektromotor

2.2 Uložení motoru

Spalovací motor uložíme na stanoviště pomocí rámu, který je možné přizpůsobit na různé velikosti motorů. Na tomto rámu se da nastavovat výška motoru, a také jeho umístění, aby byl souosí s pevnou částí stanoviště. Rám se skládá z pevné části, která se připevňuje ke stanovišti, a dále z nastavovacích komponentů. Připevnění motoru k rámu bude pomocí silentbloků. Silentbloky ke snižování přenosu hluku a vibrací ze spalovacího motoru do rámu stanoviště. Dříve byla konstrukce jednoduchá válcové tvary, vyrobené z gumy. Dnešní silenbloky se navrhují už podle místa použití. Pro naše stanoviště budou stačit obyčejné válcové silentbloky.

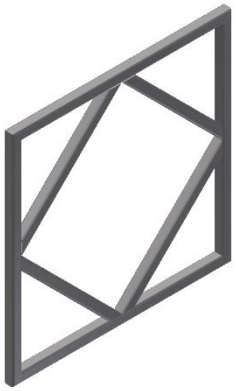
[1]



Obrázek 2-Rám pro upevnění motoru

[1] Šipky na obrázku znázorňují možný pohyb jednotlivých částí

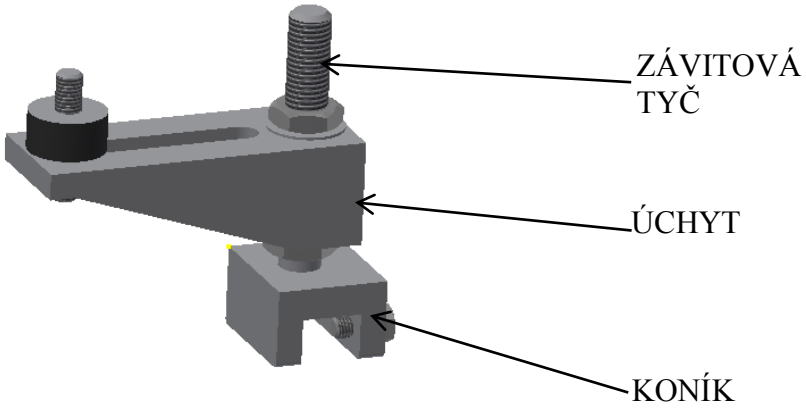
Rám je svařen z trubek čtvercového průřezu 20x20x2. Přesné usazení na stanovišti zajišťují čtyři šrouby.



Obrázek 3- Pevný rám

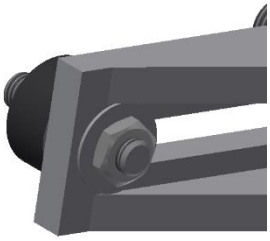
Na tomto rámu jsou nasazeny jezdci, kterými provádíme nastavení.

Jezdec se skládá z 3 částí: závitové tyče, koníka a úchytu.



Obrázek 4-Jezdec

Polohu koníku na pevném rámu zajišťujeme pomocí dotažení dvou šroubů z boku koníku. Úchytem nastavujeme nejen výšku ale i částečně polohu. Výšku nastavujeme pomocí matice, která je umístěna zespod, jejím utahováním nebo povolováním koníka posouváme nahoru nebo dolu. Z vrchu je dána pojistná matice, která nám dotáhne úchyt. Další nastavování na úchytu je pomocí drážky, ve které se pohybuje silentblok a jeho polohu zajistíme zespodu pomocí podložky a matice.



Obrázek 5-pohled na upevnění silentbloku

3. Součásti stanoviště

Stanoviště pro malý spalovací čtyřdobý motor bude složeno z komponentů, které jsou dostupné na trhu. Pokud se ty komponenty sériově nevyrábějí, nechají se vyrobit na zakázku. Na stanoviště je potřeba asynchronní motor, který nám bude rozbíhat a následně simulovat zátěž motoru. Abychom mohli simulovat zátěž motoru, potřebujeme kompatibilní frekvenční měnič, který nám nastaví otáčky asynchronního motoru. Dále je potřeba vhodná převodovka, která nám převede výkon ze svislé osy do horizontální. A naposled na propojení jednotlivých komponentů potřebujeme spojky.

Předpokládáme, že spalovací motor bude mít výkon maximálně 7,5kW a bude dosahovat otáček až 5000. Pro tyto otáčky a tento výkon jsme nenalezli žádný běžně vyráběný elektromotor. Elektromotory byli buď s vysokým výkonem a malými otáčkami nebo vysokými otáčkami a malými výkony. Z tohoto důvodu jsme museli najít vhodnou redukční převodovku, která nám zredukuje otáčky z 5000 na otáčky pod 3000. Pro tyto otáčky se už běžně vyrábí elektromotory s potřebným výkonem.

3.1 Převodovka

Jelikož sekačkový spalovací motor má výstupní osu svislou a motor má vstupní osu svislou, potřebujeme převodovku, která nám převede výkon ze svislého do horizontálního směru. Další požadavek na převodovku je, aby nám snížila otáčky z 5000 otáček spalovacího motoru na otáčky pod 3000. Z těchto důvodů jsme zvolili redukční hypoidní převodovku od firmy ATEK typ VPC 115. Volíme variantu s přírubou a spojkou uvnitř, To se nám hodí dále pro upevnění snímače krouticího momentu z kapitoly 3.5.

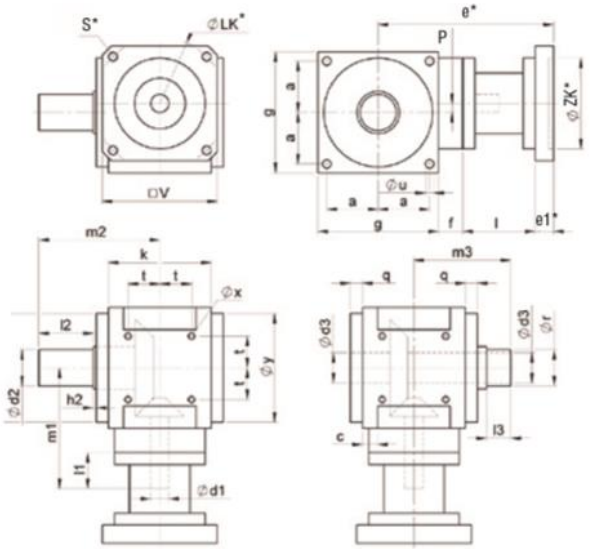
Parametry převodovky

Tabulka 1- Hlavní parametry převodovky

Převodový poměr	-	3:01
Jmenovitý výstupní moment	Nm	70
Maximálni akcele-race momentu	Nm	105
Nouzový vypínací moment	Nm	140
Životnost	h	>30 000

Maximální otáčky	1/min	8000
Nominální otáčky	1/min	6000
Účinnost	%	>96
Moment setr-vačnosti	$kg.cm^2$	1,32
Hmotnost	kg	3

Zdroj:[11]



Obrázek 6-Výkres převodovky

Parametry převodovky v mm:

Tabulka 2-Rozměrové parametry převodovky

a	c	$d1_{j6}$	$d2_{k6}$	$d3^{H7}$	P	f	g	h1
49	10	18	24	25	14	28,5	115	10,5

h2	j	k	l1	l2	l3	m1	m2	m3
1,5	76	80	25	40	25	123	90	79,5

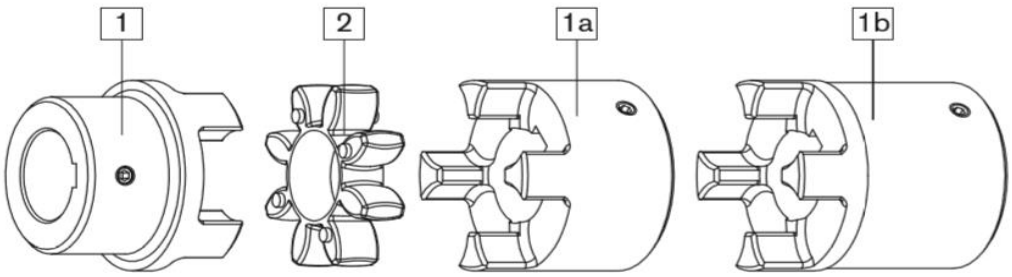
n	q	r_{f7}	b	t	u	W	X	Y_{g6}
78	8,5	30	90	27	9	M6	M8	105

Zdroj:[11]

3.2 Pružná spojka

Pro spojení komponentů použijeme pružné spojky. Hlavní vlastností těchto spojek je totiž snižování rázu krouticího momentu. Dále umožňují chránit před rezonančními torzními kmity. Také tyto spojky dokáží vyrovnat osové a úhlové výchylky, které vzniknou nesouosostí hřídelů. Torzní kmity jsou vyvolávány nerovnoměrným chodem jednoválcového spalovacího motoru.

Tyto spojky se skládají ze dvou pevných částí. Mezi těmito částmi je vložen pružný člen, který může být vyroben z kůže, plastu, pryže nebo oceli. Tyto pružné členy se liší od sebe tuhostí, materiálu z jakého jsou vyrobeny (u plastových a pryžových jsou rozlišovány barvou). Ale nejen materiál ovlivní tuhost spojky, ale velké význam má rozměr a konstrukce pružného členu. [2]



Obrázek 7-Schéma složeni spojky

Pro stanoviště navrhujeme spojky od společnosti KTR typ ROTEX.

Ve stanovišti musíme použít dva typy spojek. Liší se pouze konstrukčním provedením, jinak pružný člen zůstává stejný u obou. Jedná se o konstrukční řešení se svěrným spojením, tuto spojku použijeme mezi setrvačníkem a snímačem krouticího momentu. A druhá spojka, která je mezi převodovkou a elektromotorem, je klasické provedení spojky. Zde je přenos krouticího momentu zajištěn pomocí pera.

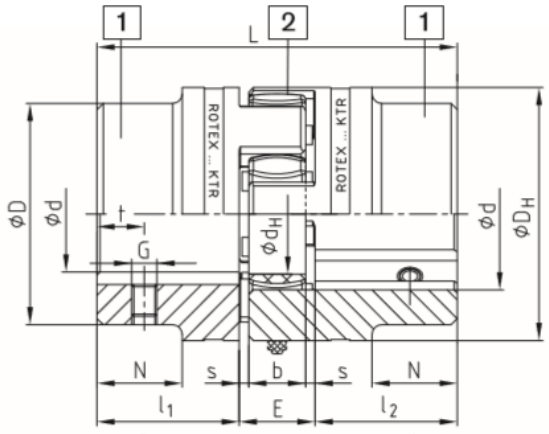
Parametry pružného člene

Tabulka 3-Touhosti spojek

Velokost	Max. rychlost		Úhel zkroucení		Moment [Nm]			Tlumící energie [W]	Torsní tuhost [Nm/rad]			
	V=35m/s litina	V=40m/s ocel	T_{KN}	$T_{KN\,max}$	Jmenovitý T_{KN}	Max $T_{KN\,max}$	Vibrační T_{KW}		1,0 T_{KN}	0,75 T_{KN}	0,5 T_{KN}	0,25 T_{KN}
14	22200	25400	6,4°	10°	7,5	15	2	-	380	310	240	140
19	16700	19000	3,2°	5°	10	20	2,6	4,8	1280	1050	800	470
24	12100	13800			35	70	9,1	6,6	4860	3980	3010	1790
28	10100	11500			95	190	25	8,4	10900	8940	6760	4010

Zdroj:[3]

Parametry spojky

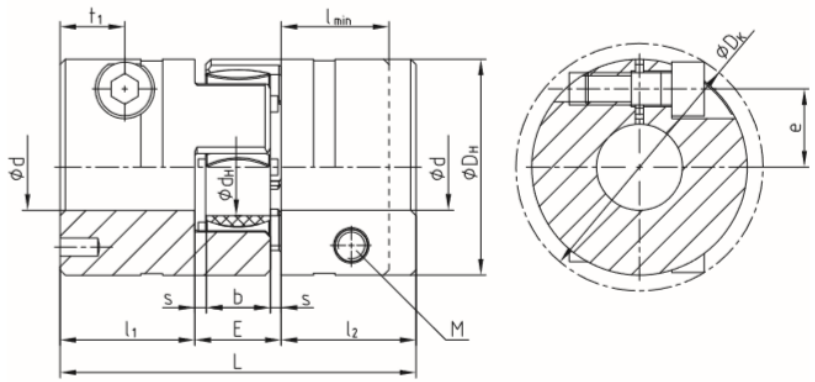


Obrázek 8-Výkres pružné spojky

Tabulka 4-Rozměry pružné spojky

Velikost	Komponenty	Parametry [mm]									
		Velikost díry (min - max)	L	l1;l2	E	b	s	D_H	d_H	D	G
14	1a	0-16	35	11	13	10	1,5	30	10	30	M4
	1b		50	18,5							
19	1a	0-25	66	25	16	12	2	40	18	40	M5
	1b		90	37							
24	1a	0-35	78	30	18	14	2	55	27	55	M5
	1b		118	50							
28	1a	0-40	90	35	20	15	2,5	65	30	65	M8
	1b		140	60							

Zdroj:[3]



Obrázek 9-Výkres pružné spojky se svěrným spojem

Tabulka 5-Rozměry svěrné pružné spojky

Velikost	Parametry [mm]													
	Velikost díry max	L	l1;l2	lmin	E	b	s	D_H	$_{dH}$	D	t1	e	M	T_A [Nm]
19	20	66	25	20	16	12	2	40	18	46	12	14,5	M6	14
24	28	78	30	25	18	14	2	55	27	57,5	12	20	M6	14
28	38	90	35	30	20	15	2,5	65	30	73	14	25	M8	35

Zdroj:[3]

Příklad výpočtu velikosti spojky

Velikost spojky a tím pádem i tuhost, se muže lišit podle výkonu testovaného motoru. Pro příklad výpočtu spojky volíme výkon motoru P=3,51[kW], otáčky n=2500[1/min], krouticí moment M_k=6,8[Nm], moment setrvačnosti spalovacího motoru + setrvačník I_{sm}=0,06701[kg.m^2].

Krouticí moment vypočteme z výkonu motoru a otáček motoru

Produkovaný krouticí moment je závislí na s_t, které je voleno podle provozní teploty prostředí. Pro teplotu ±30°C s_t=1.

$$T_{KN} \geq M_k \cdot s_t = 6{,}7 \cdot 1 = 6{,}7[Nm]$$

Hnací moment je dvojnásobná hodnota krouticího momentu

$$T_{AS} = 2 \cdot T_{KN} = 2 \cdot 6{,}7 = 13{,}4[Nm]$$

Rotační inerciální koeficient řízené strany je závislost momentu setrvačnosti spalovacího motoru a momentech setrvačnosti jednotlivých dílů spojky. Předběžný odhad velikosti spojky je velikost 19 – I_L=0,00002[kg.m^2]; T_{KN}=10[Nm]; $T_{K\,max.}$=20[Nm]

$$M_A = \frac{I_{sm}}{(I_{sm}+I_L)} = \frac{0{,}06701+0{,}00002}{0{,}06701+2\cdot 0{,}00002} = 0{,}988$$

Maximální krouticí moment vypočteme z rotačního koeficientu, hnacího momentu a z koeficientu možnosti otřesu S_A pro male možnosti otřesu volíme hodnotu 1,5

$$T_S = T_{AS} \cdot M_A \cdot s_A = 13{,}4 \cdot 0{,}988 \cdot 1{,}5 = 19{,}85[Nm]$$

Maximální točivý moment spojky je znázorněn ve vzorci.

$$T_{K\,max} \geq T_S \cdot s_Z \cdot s_t = 20{,}0799 \cdot 1 \cdot 1 = 19{,}85[Nm]$$

Kde je koeficient startovací frekvence S_Z, ten volíme 1

$$T_{K\,max}\ 20[Nm] \geq 19{,}85[Nm]$$

Vyšel nám maximální krouticí moment, který je menší než s maximální velikosti krouticího momentu z katalogu. Z toho jde vyvodit závěr, že spojka vydrží toto zatížení a je vhodná pro použití. Zdroj:[3]

3.3 Elektromotor

Musíme vybrat vhodný asynchronní motor. Vybíráme asynchronní motor, protože tento motor dokáže pracovat ve 3 stavech: motor, generátor a brzda. My potřebujeme hlavně stavy motor pro rozběh motoru. A brzda, která nám bude simulovat zatížení motoru. Pro rozběh spalovacího motoru použijme asynchronní motor tak, že přivedeme na asynchronní motor proud. Až se nám spalovací motor rozběhne, tak na rotor asynchronní motor bude moment příliš velký a motor se zastaví. A poté se začne otáčet proti směru točivého pole a stane se brzdou.

Výběr elektromotoru

Díky redukční převodovce nemusíme hledat 7,5kW motor s 5000 otáčkami (nevyrábí se). Musíme použít motor o výkonu 7,5kW a s otáčkami kolem 3000 *1/min*. Nalezli jsme vhodný 3-fázový asynchronní motor 2-pólový od firmy SIEMENS 1LE1002-1CA1.

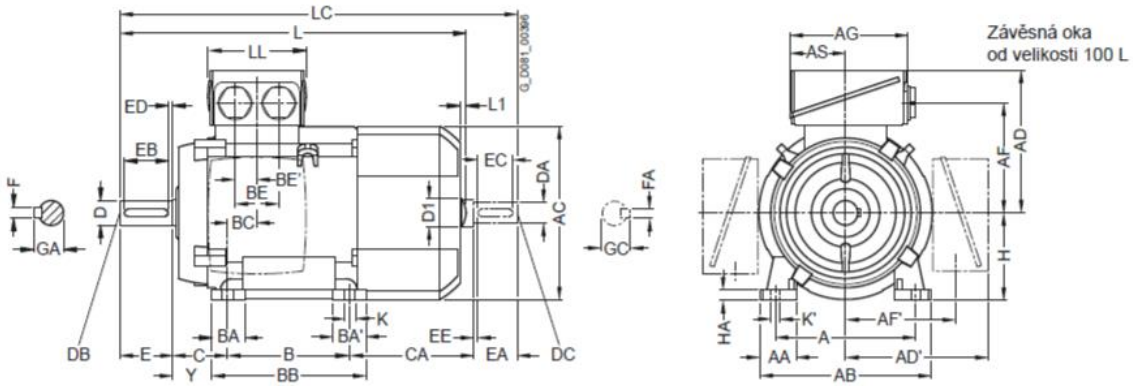
Parametry motoru:

Tabulka 6-Hlavní parametry elektromotoru

Výkon PN 50Hz	Výkon PN 60Hz	Provozní hodnoty při jmenovitém výkonu			
		Otáčky n_N 50Hz	Moment M_N 50Hz	Hmotnost $m_{IM\ B3}$	Moment setr-vačnosti I_{elm}
[kW]	[kW]	[1/min]	[Nm]	[kg]	[kgm^2]
7,5	8,6	2925	24	40	0,016

Zdroj:[4]

Rozměry motoru:



Obrázek 10-Výkres elektromotoru

Tabulka 7-Rozměry elektromotoru

ROZMĚRY S OZNAČENIM PODLE IEC [mm]										
A	AA	AB	AC	AD	AD´	AF	AG	AQ	AS	B*
216	53	256	262	202	202	159,5	155	260	70,5	140
BA	BA´´	BB	BC	BE	BE´	C1	CA*	H	HA	Y1
38	76	218	26,5	45	24	89	125,5	132	15	69
HH	K	K´	L	L1	D1	LC	LL	D	DB	E
115,5	12	16	465	8,5	39	535,5	130	38	M12	80
EB	ED	F	GA	DA	DC	EA	EC	EE	FA	GC
70	5	10	41	28	M10	60	50	5	8	31

Zdroj:[4]

Nás zatím pro návrh stanoviště nejvíce zajímají základní parametry: D-průměr výstupního hřídele, H – osová výška výstupního hřídele, B – rozteč děr pro šrouby v patkách a celkové rozměry L, AB a AD+H.

Průměr výstupního hřídele na elektromotoru musíme zmenšit na ø35mm, kvůli spojce

3.4 Frekvenční měnič

Pro ovládání elektromotoru a jeho nastavování potřebujeme vybrat vhodný frekvenční měnič. Frekvenční měnič volíme podle elektromotoru. Když máme

elektromotor o výkonu 7,5kW zvolíme frekvenční měnič také s výkonem 7,5kW. Volíme měnič SV075iG5A- 7,5kW(3x380-400V) – od firmy ZEFIN s.r.o. Tento měnič má vektorové řízení bez zpětné vazby a má také možnost naprogramování 3x zakázaných frekvencích, které přeskočí.

Parametry měniče

Tabulka 8-Hlavní parametry frekvenčního měniče

Výkon motoru	HP	10
	kW	7,5
Hmotnost	kg	3,66

Vstup		
Napětí	V	3 fázové 380-480
Frekvence	Hz	50~60(±5%)

Výstup		
Zdánlivý výkon	kVA	12,2
Proud	A	16
Napětí	V	3 x 0 až vstupní napětí
Frekvence	Hz	0,1~400

Zdroj:[5]

3.5 Snímač točivého momentu s otáčkoměrem

Pro provedení výzkumu, potřebujeme snímat velikost točivého momentu, a tak simulovat zatížení. A dále zjišťovat velikost otáček motoru, abychom se mohli vyhnout nebo rychle přejít vlastní frekvence, které by ohrozili stanoviště.

Pro měření zvolíme snímač krouticího momentu od firmy HBP měřící technika s.r.o. typ T22. Tento snímač je určen pro otáčející sestavu a přenos z rotující časti je realizován bezkontaktní telemetrií.

Snímač T22 se dodává v těchto rozsazích 0–5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000 [Nm].

Parametry snímače

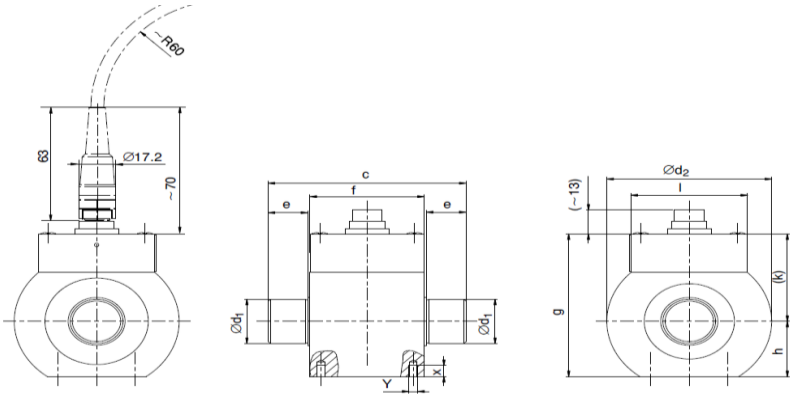
Všechny parametry snímače jsou pro všechny rozsahy stejné

Tabulka 9-Hlavní parametry snímače krouticího momentu

Citlivost (0-Jmenovitý krouticí moment)			Tolerance citlivosti			výstupní signál při točivém momentu 0		
Výstupní napětí	V	5	Výstupní napětí	%	±0,2	Výstupní napětí	V	0±0,2
Výstupní proud	mA	8	Výstupní proud	%	±0,2	Výstupní proud	mA	10±0,2

Nominální otáčky	1/min	16000			12000			9000	
Limit točivého momentu	%	200							
Podélná mezní síla	kN	0,9	0,9	0,9	1,6	1,6	1,6	4	4
boční mezní síla	N	25	45	90	210	420	850	1400	2800
ohybový mezní moment	Nm	0,5	1,9	5,5	5,5	11	22	54	109

Zdroj:[7]



Obrázek 11-Výkres snímače krouticího momentu

Rozměry snímače

Tabulka 10-Rozměry snímače krouticího momentu

Měřící rozsah	Rozměry [mm]												
	a	b	c	e	f	g	h	(k)	l	ød1	ød2	Y	X
0-5;10;20	39	31	80	15	48	72	28	44	52,75	15	70	M4	6
0-50;100;200	42	35	90	18	52	77,5	30	47,5	53	24	75	M4	6
0-500;1000	50	55	120	26	65	97,5	40	57,5	57,5	40	105	M5	10

Zdroj:[7]

3.5 Setrvačník

Musíme navrhnout setrvačník, abychom co nejvíce eliminovali nerovnoměrný chod jednoválcového spalovacího motoru. Setrvačník navrhneme z parametru nože v sekačce. Zjistíme váhu nože (m) a jeho poloměr (r^2). Z těchto parametrů následně vypočteme moment setrvačnosti podle vzorce:

$$I = m \cdot r^2$$

Výpočet setrvačnosti je zobrazen v tabulce 11. Pokud známe moment setrvačnosti, poté budeme volit poloměr a hmotnost kotouče, tak aby nám vyšel podobný nebo stejný moment setrvačnosti listu. Tento proces nám pomůže zajistit

náhradu nože, který funguje jako setrvačník, kotoučem, jenž nám zajistí větší bezpečnost modelu stanoviště.

Setrvačník budeme přidělávat k výstupnímu hřídeli motoru podobně jako na sekačce pomocí matice. Tato matice bude přivařena ke kotouči. Je nutno zajistit propojení setrvačníku a převodovky. To bude provedeno pomocí přivařené hřídele, která bude spojovat pomocí tyto dvě součástky pomocí pružné spojky.

Uložení setrvačníku bude na axiálním ložisku. Více informací o uložení a ložisku je součástí *kapitoly 3.7.*

Výpočet:

Tabulka 11-Parametry listu sekačky

Parametry listu sekačky		
Hmotnost - m	0,66	kg
Průměr - D	460	mm
Moment setrvačnosti - I_l	0,0349	$kg.m^2$

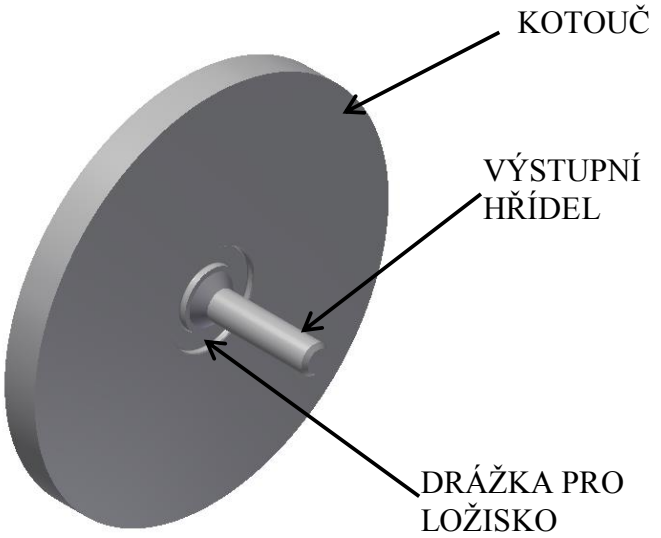
Návrh

Tabulka 12-Návrhová tabulka setrvačníku

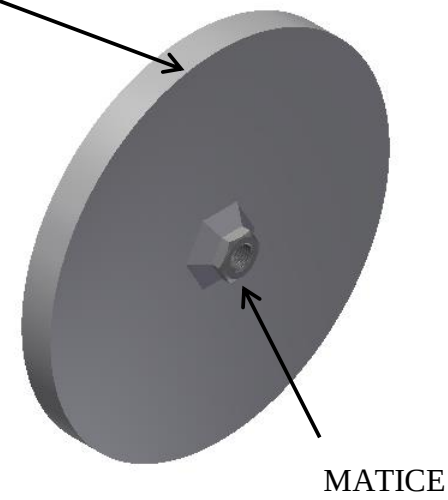
	Hmotnost m [kg]	Tloušťka kotouče t [mm]	Průměr D [mm]	Moment setrvačnosti I_{str} [$kg.m^2$]
1.	9,86	10	400	0,394
2.	7,55	10	350	0,231
3.	3,85	10	250	0,0601
4.	4,276	17	200	0,04276
5.	2,77	20	150	0,01558

Jelikož není možné použít výchozí hodnoty hmotnosti a průměru listu sekačky, je nutno nalézt nejlepší možný adekvátní poměr těchto veličin mající moment setrvačnosti co nejbližší výpočtu. V tabulce 2 jsou vidět různá řešení tohoto problému.

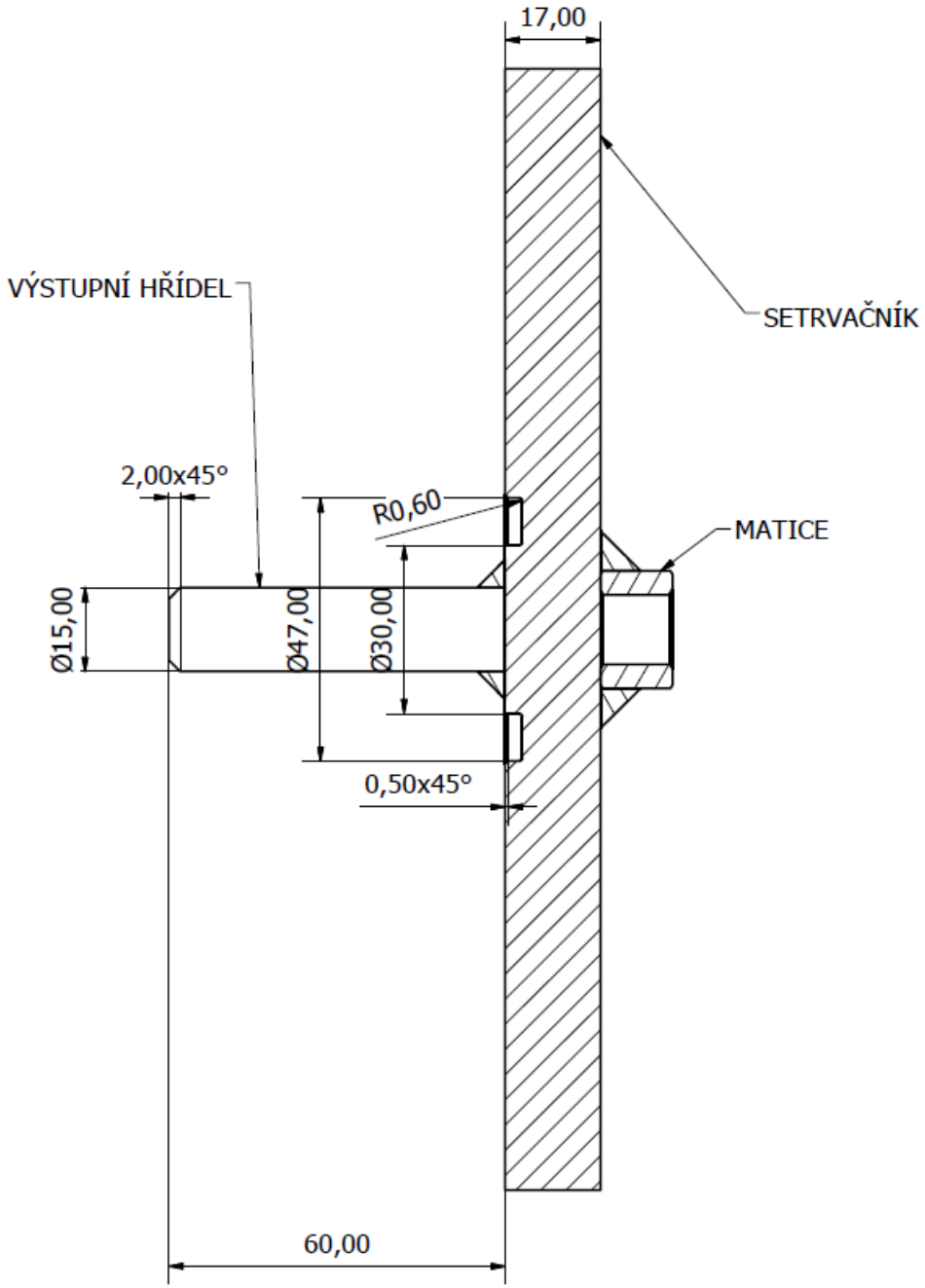
První možnost je nevhodná, protože velikost disku by byla velice velká a aby moment setrvačnosti odpovídal. Disk by byl velice tenký. U varianty 2 a 3 máme stejný problém jako u varianty 1. Ve variantě 5, i když je kotouč přiměřeně velký tak jeho tloušťka by byla nepřiměřená. Z těchto důvodů volíme variantu 4, která má přiměřenou tloušťku a velikost kotouče. A také se ve 4 variantě přibližujeme nejblíže k požadovanému momentu setrvačnosti.



Obrázek 13-Pohled na setrvačník zespodu



Obrázek 12-Pohled na setrvačník z vrchu



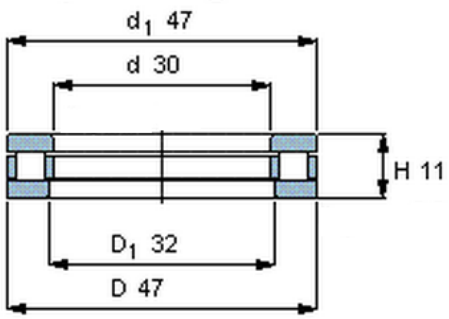
Obrázek 14-Výkres setrvačníku

3.6 Ložisko

Setrvačník bude umístěn na axiálním ložisku, které bude zajišťovat plynulý pohyb ložiska. Předpokládáme, že na ložisko bude působit pouze síla, která vzniká gravitační silou od setrvačníku.

Volíme axiální válečkové ložisko od firmy SKF - 81106 TN.

Parametry ložiska:



Obrázek 15-Výkres válečkového ložiska

Tabulka 13-Rozměry ložiska

d	D	H	C	C_o	A	Referenční otáčky	Maximální otáčky
mm	mm	mm	kN	kN	-	1/min	1/min
30	47	11	27	78	0,00049	3000	6000

A – Součinitel minimálního zatížení

Výpočet ložiska:

Minimální zatížení

$$F_{am} = 0{,}0005 \cdot C_0 + A \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 = 0{,}0005 \cdot 78 + 0{,}00049 \cdot \left(\frac{2500}{1000}\right)^2 = 0{,}04276$$

Životnost v hodinách

$$L_{10,h} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{27}{0{,}043}\right)^{3{,}33} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 2500} = 1{,}4 \cdot 10^{10}$$

Zdroj:[8]

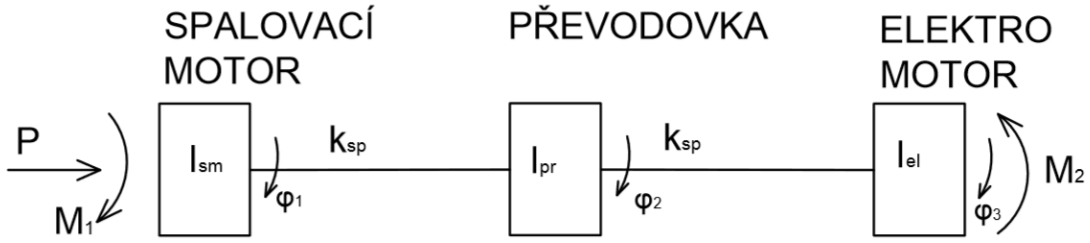
4. Výpočet vlastních frekvencí (kmitání)

Vlastní kmitání je harmonický pohyb, který vzniká vybuzením pomocí vnějšího impulzu, ale dále pokračuje i bez tohoto impulzu. Pokud by nedocházelo ke ztrátám pomocí pasivních odporů, mohlo by toto kmitání trvat nekonečně dlouhou dobu. Vlastní frekvence je u každé soustavy jiná, protože je ovlivněna momenty setrvačnosti jednotlivých hmot a tuhostmi mezi těmito hmotami.

Abychom mohli vypočítat vlastní frekvenci stanoviště, musíme soustavu převést na jednoduší náhradní soustavu tří hmot. Z této náhradní soustavy zjistíme frekvence vlastního kmitání a následně i kritické otáčky motoru. [9]

4.1 Náhradní torsní soustava

Původní soustavu nahradíme pomocí dynamicky rovnocenné soustavy. Ta se skládá z hmotných kotoučů spojenými nehmotnými hřídelemi s určitou torsní tuhostí.



Obrázek 16-Schéma náhradní 3-hmotové soustavy

Ze schéma vidíme, že potřebujeme zjistit momenty setrvačnosti spalovacího motoru, převodovky a elektromotoru. Dále také potřebuje tuhosti spojovacích

hřídelů (pružné spojky) tyto parametry získáme z katalogu pružných spojek firmy KTR - ROTEX. [10]

4.2 Výpočet momentu setrvačnosti motoru

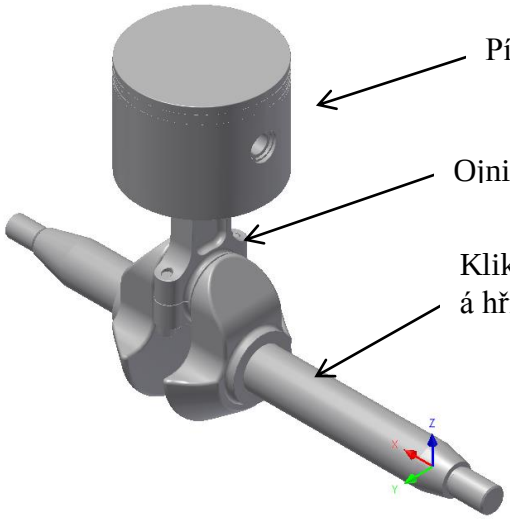
Pro výpočet vlastních frekvencí tří hmotové soustavy je potřeba moment setrvačnosti jednotlivých hmot. Setrvačné hmoty elektro motoru a spojky jsou zjištěny z katalogu výrobců. Moment setrvačnosti motoru musíme vypočítat.

Veškeré parametry motoru byli získány z modelu vytvořeného v AUTODESK INVENTRO 2015

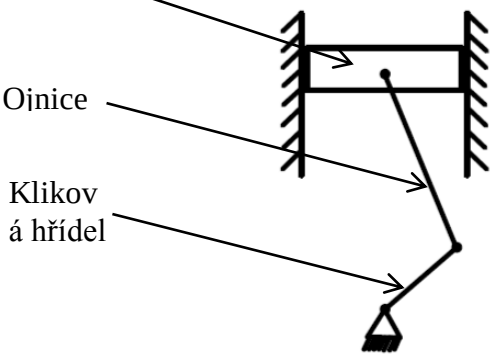
Parametry motoru LawBoy:

Tabulka 14-Základní parametry motoru

Hmotnost pístu	m_p	0,607	kg
Hmotnost ojnice	m_o	0,581	kg
Délka ojnice	l	115	mm
Poloměr zalomeni klikové hřídele	r	37,5	mm
Hmotnost klikové hřídele	m_{kl}	3,726	kg
Moment setrvačnosti klikové hřídele	I_{kl}	0,0224771	kgm^2

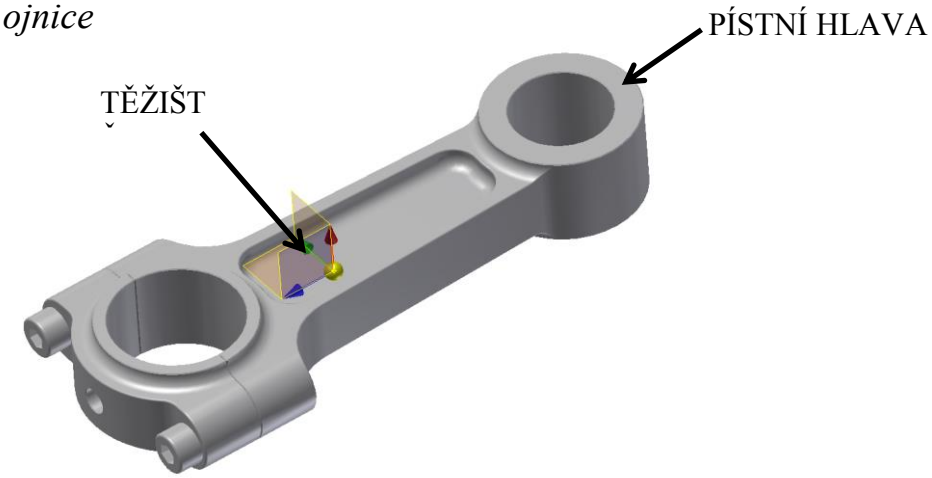


Obrázek 17-3D model motoru



Obrázek 18-Schéma motoru

Určení hmot ojnice



Obrázek 19-3D model ojnice s naznačenou polohou těžiště

Ojnice musí být rozdělena na dvě části. Na část posuvných hmot a na část rotačních hmot. Toto rozdělení se provede tak, že určíme vzdálenost *a* těžiště od středu pístní hlavy. A vypočteme pomocí následných vzorců: a=50,938mm

Rotační část - $m_{ro} = \frac{a}{l} \cdot m_o = \frac{50,938}{115} \cdot 0,581 = 0,257kg$

Posuvná část - $m_{po} = m_o - m_{ro} = 0,581 - 0,257 = 0,324kg$

Výpočet momentu setrvačnosti

Moment setrvačnosti všech rotujících části se vypočte následovně:

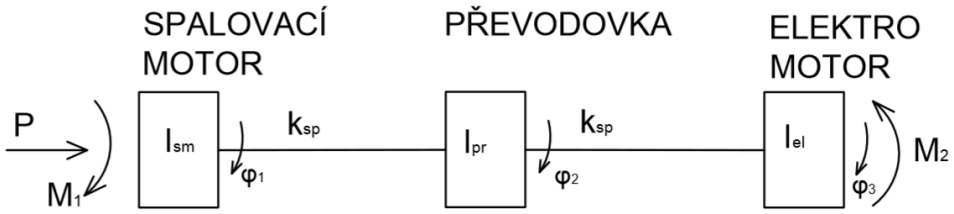
$$I_{cmot} = I_{kl} + z \cdot m_{ro} \cdot r^2 = 0,024252563 + 1 \cdot 0,257 \cdot 0,0375^2 = 0,02425kgm^2$$

z- je počet válců

K celkovému momentu setrvačnosti motoru přičteme moment setrvačnosti setrvačníku, který je přímo připevněn na motoru. To to lze udělat, protože velká tuhost se zanedbá a momenty setrvačnosti se sečtou.

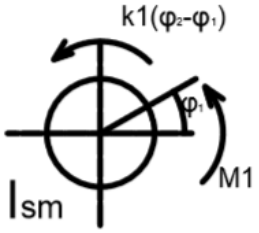
$$I_{sm} = I_{cmot} + I_{str} = 0,02425 + 0,04276 = 0,06701kg \cdot m^2$$

[10]



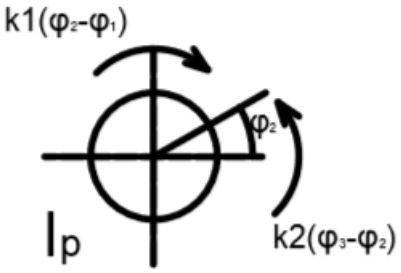
Obrázek 20-Schéma 3-hmotové soustavy

Ze schéma 3-hmotové soustavy si vytvoříme 3 rovnice



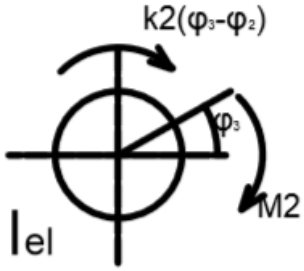
$$I_{sm} \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_1 + k_1(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Obrázek 21-Schéma ve spalovacím motoru



$$I_p \cdot \ddot{\varphi}_2 = k_2(\varphi_3 - \varphi_2) - k_1(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Obrázek 22-Schéma v převodovce



$$I_{el} \cdot \ddot{\varphi}_3 = -M_2 - k_2(\varphi_3 - \varphi_2)$$

Obrázek 23-Schéma ve elektromotoru

Tyto 3 rovnice převedeme do maticového tvaru.

$$\begin{bmatrix} I_{sm} & 0 & 0 \\ 0 & I_p & 0 \\ 0 & 0 & I_{elm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ 0 \\ M_2 \end{bmatrix}$$

M $\ddot{\varphi}$ K φ F

Poté pomocí příkazu [V,L]=eig(K,M); v programu MATLAB nám vyjdou dvě matice: V – matice vektoru a matice

L – matice vlastních frekvencí.

Z matice $L = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$ poté pomocí úprav $\lambda = \Omega^2$ a $f = \frac{\Omega}{2\pi}$ vyjdou vlastní frekvence v hercích.

Výpočet vlastních frekvenci byl poté proveden pomoci programu MATLAB. Kde jsme vytvořili následující program.

```
% vlastní fekvence motoru
clc
I1=0.067017;                          %momenty setrvačnosti
I2=0.000132;
I3=0.016;
k1=140;                               %tuhosti spojek
k2=k1;


M=[ I1   0  0
    0   I2  0                         %matice setrvačností
    0    0  I3];

K=[     k1    -k1          0
       -k1    k1+k2      -k2          %matice tuhostí
        0      -k2        k2];

[V,L]= eig(K,M);

V ;                         %matice vektorů
L  ;                        %matice frekvence

lam1=L(1,1);
lam2=L(2,2);                %vypsani jednotlivých lambda z matice frekvencí
lam3=L(3,3);


Om1=((sqrt(lam1))/(2*pi)),
Om2=((sqrt(lam2))/(2*pi)),   %uprava lambd na herze
Om3=((sqrt(lam3))/(2*pi)),
```

Obrázek 24-Výpis programu z MATLABU

Momenty setrvačnosti jednotlivých součástí

I_{sm}=0,06701 kg.m^2

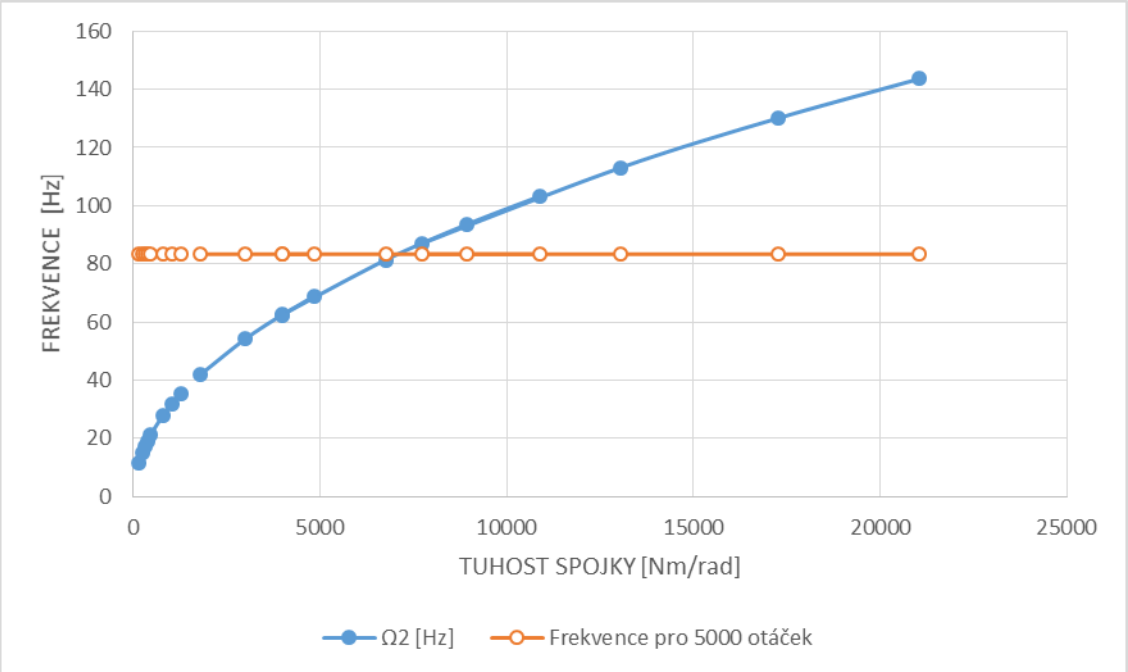
I_p= 0,000132 kg.m^2

I_{elm}=0,016 kg.m^2

Tabulka 15-Frekvence závislé na tuhosti spojek

Tuhost spojky [Nm/rad]	Vlastní frekvence		
	Ω1 [Hz]	Ω2 [Hz]	Ω3 [Hz]
140	0,00E+00	11,7109	232,0955
240	1,38E-06	15,3332	303,8844
310	0,00E+00	17,4264	345,3692
380	2,34E-06	19,2938	382,3795
470	1,73E-06	21,4573	425,2572
800	3,74E-06	27,994	554,8145
1050	0,00E+00	32,0716	635,6198
1280	2,01E-06	35,4105	7,02E+02
1790	2,34E-06	41,8748	8,30E+02
3010	0,00E+00	54,3012	1,08E+03

Tuhost spojky [Nm/rad]	Vlastní frekvence		
	Ω1 [Hz]	Ω2 [Hz]	Ω3 [Hz]
3980	2,04E-06	62,4407	1,24E+03
4860	0,00E+00	68,9993	1,37E+03
4010	0,00E+00	62,6756	1,24E+03
6760	0,00E+00	81,3767	1,61E+03
8940	0,00E+00	93,5826	1,85E+03
10900	1,08E-05	103,3332	2,05E+03
7740	5,28E+06	87,0757	1,73E+03
13050	0,00E+00	113,0659	2,24E+03
17260	0,00E+00	130,031	2,58E+03
21050	1,41E-05	143,5994	2,85E+03



Obrázek 1-Graf závislosti frekvence na tuhosti spojek

V prvním sloupci tabulky vidíme první vlastní frekvenci, která je hrozně malá. Proto jí můžeme zanedbat. Ve třetím sloupci je vidět třetí vlastní frekvence. Ty to frekvence jsou tak velké, že se do nich náš testovaný motor nemůže dostat a dále nás nebudou zajímat.
V prostředním sloupci vidíme, jak nám závisí vlastní frekvence na tuhosti spojky. Máme dvě možnosti jak tento problém vyřešit. První z možností je, že zvolíme tuhou spojku a dostaneme se s vlastní frekvencí mimo možné otáčky. Nebo druhá možnost. Vezmeme spojku s nižší tuhostí a jí danou frekvenci při měření rychle přejedeme.

5. Závěr

V této práci jsme udělali předběžný návrh na stanoviště pro malé spalovací motory se svislou osou. Stanoviště se skládá ze dvou částí. První část je neměnná v této části se nachází spojka, elektromotor, setrvačník a další díly. A druhá část je nastavitelný přípravek na upevňování motoru. Přípravek byl navržen tak, aby se dal nastavit na různě velké moto.

Dále jsme provedli návrhy jednotlivých komponentů na stanoviště, u některých komponentů máme více variant. To z důvodu možnosti zkoušení různě velkých a výkonných motoru, pro které by se některé komponenty museli zvolit větší nebo menší.

V poslední části jsme zkoumali problém vlastních frekvencí stanoviště. Zjistili jsme závislost tuhosti spojek na vlastních frekvencích. Abychom se vyhnuli ve stanovišti vlastním frekvencím, volili bychom spojku, která svou tuhostí je mimo měřenou oblast. Jednalo by se o spojku o tuhosti 8910 [Nm/rad].

Další výzkum rozšiřující tuto práci by směřoval k vytvoření výkresové dokumentace stanoviště a následné řešení odvodu spalin z motoru do měřících přístrojů.

Seznam použitých veličin

P	[kW]	Výkon
M_k	[Nm]	Krouticí moment
T_{KN}	[Nm]	Jmenovitý moment spojky
T_{AS}	[Nm]	Hnací moment
T_S	[Nm]	Maximální točivý moment stroje
T_{AN}	[Nm]	Jmenovitý moment hnací strany
$T_{K\,max}$	[Nm]	Maximální krouticí moment
M_A	[-]	Rotační inerciální koeficient řízené strany
I	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti
I_L	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti spojky
I_{sm}	[kg.m^2]	Celkový moment setrvačnosti motoru
I_{kl}	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti klikového hřídele
I_{cmot}	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti motoru
I_{STR}	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti setrvačníku
I_{elm}	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti elektromotoru
I_l	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti nože sekačky
I_p	[kg.m^2]	Moment setrvačnosti převodovky
d	[mm]	Vnitřní průměr
D	[mm]	Vnější průměr
r	[mm]	Poloměr
t	[mm]	Tloušťka
H	[mm]	Výška
m	[kg]	Hmotnost
C	[kN]	Dynamické zatíženi ložiska
C_0	[kN]	Statické zatíženi ložiska
L_{10h}	[h]	Životnost ložiska v hodinách
F_{AM}	[kN]	Minimální zatíženi ložiska
A	[-]	Koeficient minimálního zatíženi ložiska
m_p	[kg]	Hmotnost pístu

m_o	[kg]	Hmotnost ojnice
m_{kl}	[kg]	Hmotnost klikové hřídele
m_{ro}	[kg]	Hmotnost rotačních ploch
m_{po}	[kg]	Hmotnost posuvných hmot
l	[mm]	Délka ojnice
a	[mm]	Vzdálenost od středu pístní hlavy do těžiště
k_i	[Nm/rad]	Tuhost
Ω_j	[Hz]	Frekvence

Použité informační zdroje

[1] MARTYR, A. J., PLIT, M. A. Engine testing, Third edition, United Kingdom, 2007

[2] BOLEK, A., KREJČÍ, V. a kolektiv. Hřídelové spojky. Státní nakladatelství technické literatury, 1. vyd., Praha, 1967.

[3] Pružné spojky ROTEX [online], [cit. 2015-03-10] Dostupné z: https://www.ktr.com/de/produkte/antriebstechnik/kupplungen/elastische-klauen-und-bolzenkupplungen/rotex/

[4] Elektromotory SIEMENS [online], [cit. 2015-06-10] Dostupné z: http://www.elektromotory.net/siemens/1la7-3000-otacek/1le1001-6-1-3.html

[5] UHLÍŘ, I., Elektrické stroje a pohony. Nakladatelství ČVUT, 2. vyd., Praha, 2007.

[6] Frekvenční měnič ZEFIN [online], [cit. 2015-06-10] Dostupné z: http://www.zefin.cz/files/frecon%20ig5a.pdf

[7] Snímač krouticího momentu HBM měřicí technika [online], [cit. 2015-05-20] Dostupné z: http://www.hbm.cz/mereni-krouticiho-momentu.htm

[8] Válečkové ložisko SKF [online], [cit. 2015-05-25] Dostupné z: http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/cylindrical-roller-thrust-bearings/complete-bearings-roller-and-cage-thrust-assemblies/index.html?prodid=173001106&imperial=false

[9] KOVAŘÍK, L., FERENCEY, V., SKALSKÝ, R., ČÁSTEK, L. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů. Naše vojsko, 1. vyd., Praha, 1992.

[10] KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ VÚNM A ČKD, N.P. Naftové motory čtyřdobé 1.díl. Státní nakladatelství technické literatury, 1. vyd., Praha, 1955.

[11] Hypoidní převodovka ATEK [online], [cit. 2015-04-15] Dostupné z: http://www.raveo.cz/sites/default/files/atek/pdf/atek_hypoidni-prevodovky.pdf

[12] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, CH. R., BUDYNAS, G., Konstruování strojních součástí, VUTIUM, Brno, 2010

[13] POSPÍCHAL, J., Technické kreslení, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005

[14] RICHTER, A., Konstrukce spalovacích motorů, Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1961