



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Integrace vnější synchronizace pro
experimentální převodovku

Integration of external synchronization for
experimental gearbox

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2021

Jakub HLAVATÝ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Marek Bous



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlavatý** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **484029**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Integrace vnější synchronizace pro experimentální převodovku

Název bakalářské práce anglicky:

Integration of external synchronization for experimental gearbox

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete konstrukční řešení pro použití vnější synchronizace pro experimentální převodovku, včetně základních parametrů jednotlivých komponent.
Vypracujte výkres sestavy a výrobní výkresy potřebných součástí.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Marek Bous, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

Ing. Marek Bous
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Víték, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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



Anotační záznam

Jméno autora: Jakub Hlavatý

Název práce: Integrace vnější synchronizace pro experimentální převodovku

Anglický název: Integration of external synchronization for experimental gearbox

Rozsah práce:

63 stran

40 obrázků

1 tabulka

18 příloh

Akademický rok: 2020/2021

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Marek Bous

Klíčová slova: Experimentální převodovka, vnější synchronizace, elektromotor, spojka, snímač otáček, synchronizační spojka

Key words: Experimental gearbox, external synchronization, electric motor, clutch, rotation sensor, synchronization clutch



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zajištění vnější synchronizace, potřebné pro kompletaci zkušebního stanoviště s experimentální převodovkou, určenou pro měření veličin působících na synchronizační spojky převodovky. Práce pojednává o výběru vhodných komponent a návrhu konkrétních dílů, potřebných pro kompletaci a fungování stanoviště. Součástí práce je potřebná technická dokumentace.

Abstract

This bachelor thesis describes the design of external synchronization, required for the completion of the test station with an experimental gearbox, designed to measure the quantities acting on the synchronization clutches of the transmission. The work deals with the selection of suitable components and the design of specific parts needed for the assembly and operation of the station. Part of the work is the necessary technical documentation.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou na téma: “Integrace vnější synchronizace pro experimentální převodovku” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 13.7.2021

.....

(podpis autora)



Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Marku Bousovi za odborný dohled, čas, ochotu a věcné rady, které mi poskytl při práci. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost a podporu v průběhu celého studia.

Obsah

ÚVOD	3
1 PŘIBLÍŽENÍ PROBLEMATIKY	4
1.1 Původní uspořádání stanoviště	4
1.2 Experimentální převodovka.....	5
1.3 Vnější synchronizace.....	8
2 VÝBĚR KOMPONENT	9
2.1 Elektromotor.....	9
2.1.1 Asynchronní motory	10
2.1.2 Synchronní motor	15
2.1.3 Výběr vhodného elektromotoru.....	18
2.2 Spojka.....	19
2.2.1 Mechanické ovládací zařízení	20
2.2.2 Hydraulické ovládací zařízení.....	21
2.2.3 Pneumatické ovládací zařízení.....	21
2.2.4 Elektromagnetické ovládací zařízení.....	21
2.2.5 Výběr vhodné spojky.....	22
2.3 Snímač otáček.....	25
2.3.1 Indukčnostní snímače	26
2.3.2 Induktivní snímače	26
2.3.3 Kapacitní snímače	27
2.3.4 Snímače na principu Hallova jevu	28
2.3.5 Snímače s fotoelektrickým čidlem	29
2.3.6 Výběr vhodného snímače	29
3 VLASTNÍ NÁVRH	31
3.1 Rozměry stanoviště.....	32
3.2 Umístění statorové části spojky a elektromotoru	32
3.3 Umístění kotvy spojky a snímače otáček.....	36
3.4 Základna sestavy	41
3.5 Zajištění souososti	43
3.6 Montáž sestavy	47
4 ZÁVĚR	52



Použitá literatura	53
Seznam obrázků	56
Seznam tabulek	57
Seznam příloh	57



ÚVOD

Tato práce se zabývá rozšířením, nebo spíše úpravou, experimentálního stanoviště pro testování synchronizačních spojek, které se nachází v laboratořích na Julisce v Praze 6. Na stanovišti se původně testovaly automobilové převodové skříně MQ200 vcelku, a stanoviště sloužilo spíše pro ověření životnosti součástek. Z měření však nebylo možné blíže určit parametry jednotlivých součástí, zejména synchronizační spojky. Její parametry mají přitom na průběh řazení značný vliv. Proto byla navržena experimentální převodovka, umožňující aplikaci měřícího zařízení pro monitorování axiální síly, řadící síly a třecího momentu kuželových synchronizačních spojek. Aplikace této převodovky na stanoviště však vyžaduje vyřešení několika nedostatků. Jedním z nich je právě vnější synchronizace, tedy zajištění simulace chodu motoru automobilu během řazení. Právě to bude cílem této práce. Bude tedy potřeba navrhnout řešení, které bude vyhovovat rozměrům stanoviště a které bude kompaktní, aby se v případě manipulace s převodovkou nemuselo rozebírat. V rámci návrhu bude potřeba vybrat nejprve vhodné komponenty a následně vyřešit jejich umístění a propojení v sestavě s experimentální převodovkou.



1 PŘIBLIŽENÍ PROBLEMATIKY

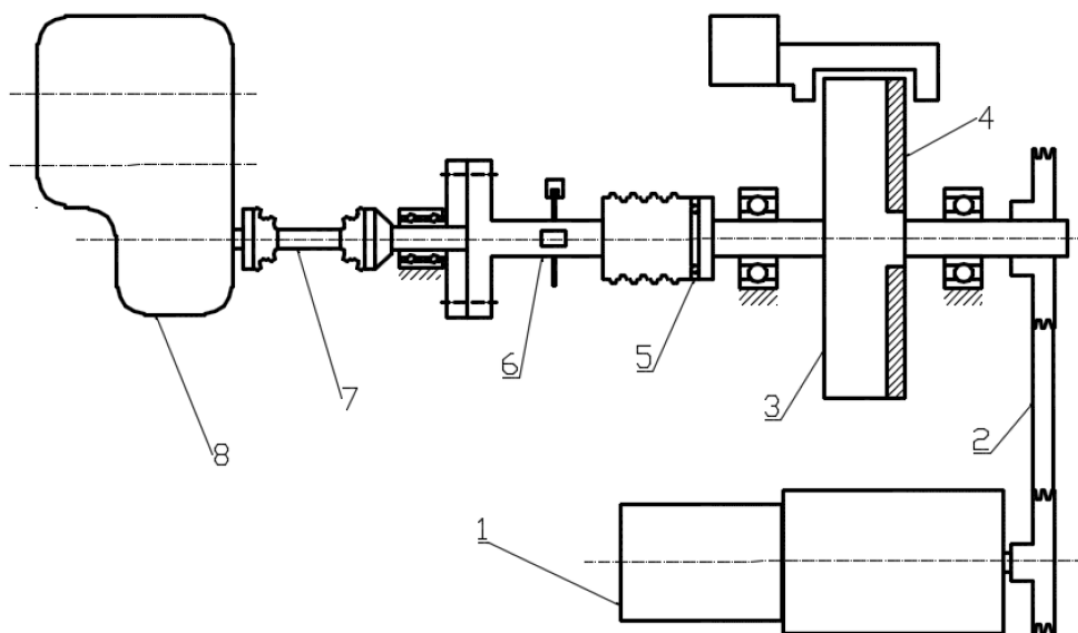
V halových laboratořích ČVUT na Julisce v Praze 6 existuje zkušební stanoviště, které již několik let slouží pro testování převodových skříní automobilů. Stanoviště si za dobu své funkce prošlo četnými změnami. Původní koncept byl uzpůsoben pro simulaci chodu převodovky automobilu s tím, že je zde možné realizovat velké množství cyklů v relativně krátkém čase. Stanoviště tak původně sloužilo převážně pro měření životnosti jednotlivých součástí. V původní konfiguraci byla na stanovišti umístěna převodová skříň z osobních automobilů s označením MQ200. Nedostatky se však objevily při pokusu o bližší zkoumání jednotlivých součástí, konkrétně při vyhodnocování parametrů synchronizační spojky, které jsou nezbytné pro zkoumání průběhu řazení. Do této převodové skříně totiž nebylo možné umístit potřebné snímače pro měření veličin, které mají na samotný průběh řazení vliv. Jedna ze změn provedených na stanovišti se tak zaměřovala přímo na tuto problematiku. Výsledné řešení byl návrh experimentální převodové skříně, ve které je možné tato měření uskutečnit a následně je vyhodnotit. Experimentální převodovka rovněž umožňuje snadnou výměnu jednotlivých synchronizačních spojek. Návrhem převodové skříně však není stanoviště kompletní. Na stanovišti je potřeba vyřešit řadící vidlici pro konkrétní synchronizační spojku a dále zajištění simulace chodu motoru pomocí vnější synchronizace. Právě poslední zmíněný nedostatek je tématem, kterému se budu v této práci dále věnovat.

1.1 Původní uspořádání stanoviště

Zkušební stanoviště v konfiguraci s původní převodovou skříní MQ200 bylo uzpůsobeno tak, že na pracovním stole byla umístěna vcelku převodová skříň společně s řadícím mechanismem, který byl ovládán pomocí pneumatického robota, čímž bylo dosaženo rychlé řazení různých rychlostních stupňů. Samotná převodová skříň pak byla roztáčena pomocí velkého setrvačnicku, který je poháněn přes klínový řemen elektromotorem o výkonu 18,5 kW, umístěným pod pracovním stolem. Setrvačnick rovněž simuluje jedoucí automobil. Hřídele převodovky jsou roztáčeny od výstupu přes zablokovaný diferenciál a díky zachování funkčních komponent převodové skříně není potřeba řešit nahrazení redukovaného setrvačného momentu ani vstup do převodovky předem roztáčet. Vstupní hřídel tedy zůstane v pohybu i v průběhu řazení, čímž je docílena simulace skutečného



chování převodovky během jízdy. Schéma celého zkušebního stanoviště je znázorněno na obrázku (Obr. 1). Vyhodnocení celého měření pak probíhá prostřednictvím programu LabVIEW. Vstup je zařízen prostřednicím doků společnosti National Instruments, do kterých jsou zapojeny jednotlivé komponenty stanoviště. [6]



Obr. 1 – Původní podoba zkušebního stanoviště [6]

1 – elektromotor, 2 – klínový řemen, 3 – setrvačnick, 4 – přidavný kotouč, 5 – pojistná a pružná spojka, 6 – tenzometrický hřídel, 7 – kloubový hřídel, 8 – převodovka

1.2 Experimentální převodovka

Navržená experimentální převodovka byla koncipována jako univerzální, aby jí bylo možné zakomponovat na různá stanoviště dostupná v laboratořích na Julisce. Jak již bylo zmíněno jedná se o alternativu, která má sloužit pro určování veličin, jejichž měření by na sériové převodové skříně bylo téměř nemožné. Experimentální převodová skříň vytvořená Ing. Hoblíkem v rámci diplomové práce tyto požadavky splňuje. Jedná se o obráběnou skříň poměrně malých rozměrů, tvořenou vanou a víkem, které jsou navzájem spojeny pomocí šroubů. Uvnitř jsou uloženy tři hřídele – vstupní, střední a výstupní. Vstupní hřídel je určena pro připojení k vnější synchronizaci. Opačný konec hřídele pak na druhé straně vystupuje z převodové skříně a slouží pro montáž testovaného soukolí se synchronizační spojkou, přenos momentu je zde realizován pomocí jemného drážkování. Střední hřídel je podobná

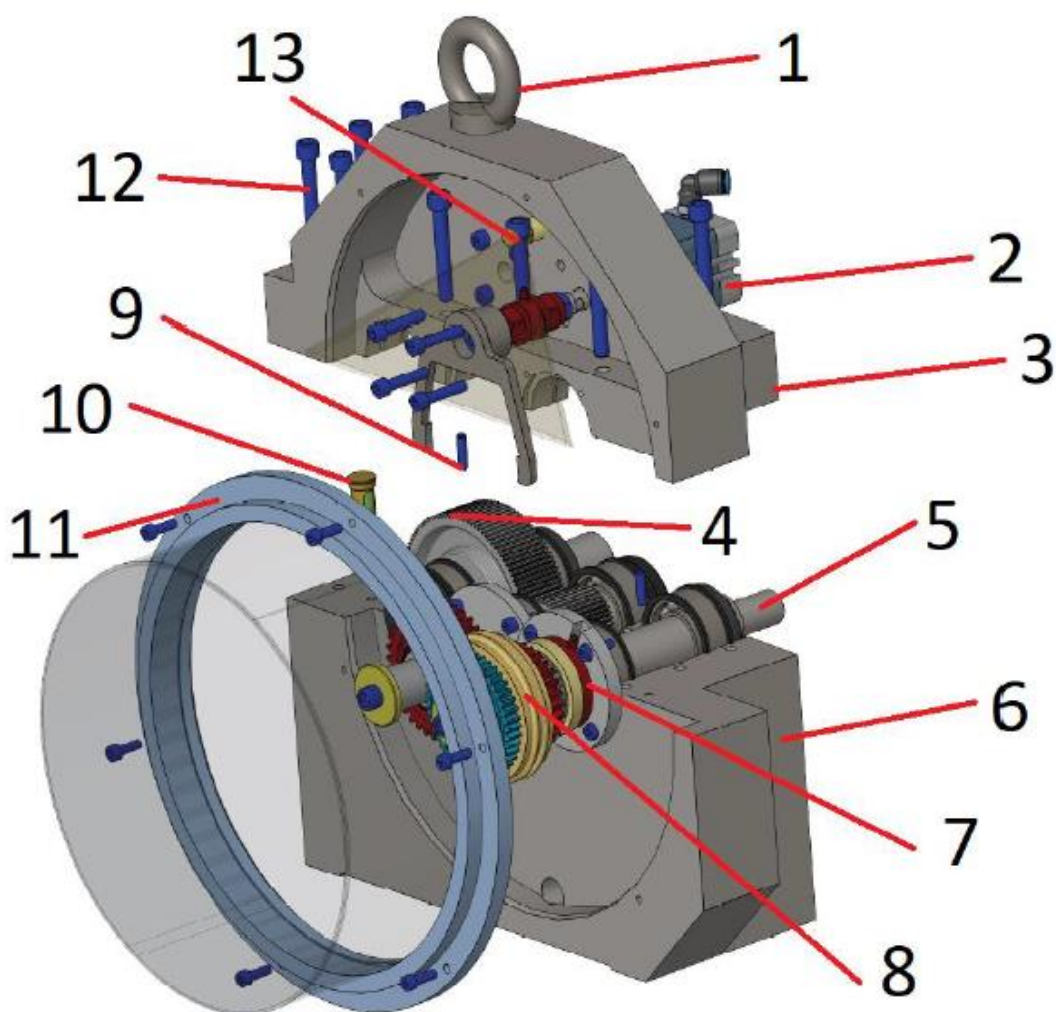


vstupní hřídeli. Na jedné straně je rovněž převislý konec s jemným drážkováním, sloužící pro testované soukolí. Tato hřídel nahrazuje výstupní hřídel skutečné převodovky. Opačný konec pak již z převodovky nevystupuje. Střední hřídel je uvnitř převodové skříně osazena ozubeným kolem stálého převodu, které zabírá s výstupní hřídelí převodovky. Ta slouží k přenosu točivého momentu ven ze skříně. Na výstupu je umístěna tenzometrická příruba sloužící pro měření točivého momentu. Vnější prostor skříně, určený pro aplikaci soukolí se synchronizační spojkou, je zakrytován průhledným krytem z plexiskla, který slouží ke správnému odvodu oleje. Ten v převodovce proudí ve dvou obězích. První oběh je určený pro mazání soukolí uvnitř skříně. Jedná se o trvalou olejovou náplň, kterou se brodí ozubené kolo stálého převodu. Olej je tak rozstříkován uvnitř skříně a tím dochází k mazání všech ložisek a gufer. Dno skříně je nakloněno a v nejhlubším místě se nachází odtokový kanál s otvorem, do kterého je našroubována olejová měrka sloužící zároveň pro doplnění či vypuštění oleje. Druhý oběh slouží pro mazání testovaného soukolí se synchronizační spojkou. Tento oběh je realizován pomocí trysky, která aplikuje olej přímo ke kuželové spojce. Rozstřík má plochý tvar s úhlem rozevření 90° , což usnadňuje seřizování v případě testování různých soukolí. Olej, který projde přes zkoušené soukolí, odtéká otvorem u spodní hrany krytu. Výpustní kanál je dále rozdvojen, aby se v případě potřeby přizpůsobila cesta odtoku oleje možnostem stanoviště. Do nezaslepeného otvoru pak bude našroubována fitinka s hadičkou, která zprostředkuje externí cirkulaci přes olejovou nádrž s čerpadlem. Samotné řazení je vyřešeno pomocí pneumatického válce, umístěného nad vstupní hřídelí, který ovládá řadící vidličku. Tu je nutné přizpůsobit konkrétní testované kuželové spojce. [6]

Pro měření potřebných veličin je tato skříň uzpůsobena integrací vhodných snímačů. Měření axiální síly je zajištěno prostřednictvím snímače prstencového typu od firmy Kistler. Tento snímač využívá principu piezo – elektrického jevu, což ho činí vhodným pro měření dynamických veličin, jako je právě axiální síla při řazení. Snímač je uložen v nosiči, který je připevněn na stěnu převodové skříně. Vnitřkem prstence prochází hřídel, na které je namontované testované soukolí. Senzor pak snímá reakční sílu od volně otočného kola. Pro kompenzaci otáček kola vůči senzoru je mezi částí vloženo ložisko společně s roznášecím kroužkem, který slouží k rovnoměrnému rozložení působící síly. Pro měření točivého momentu je zde již zmíněná tenzometrická příruba, umístěná na výstupní hřídeli. Vzhledem



k její pozici za stálým převodem jsou naměřené hodnoty korigovány o příslušné převodové číslo. Kromě měření točivého momentu slouží příruba také pro měření otáček výstupního hřídele, na který bude dále namontován příslušný kloubový hřídel. Jeho zalomení by mělo být ideálně nulové, aby nebylo příliš ovlivněno měření na tenzometrické přírubě. Tento poznatek bude dále hrát roli ve vlastním návrhu vnější synchronizace. Rozklad celé převodové skříně můžeme vidět na obrázku (Obr. 2). [6]



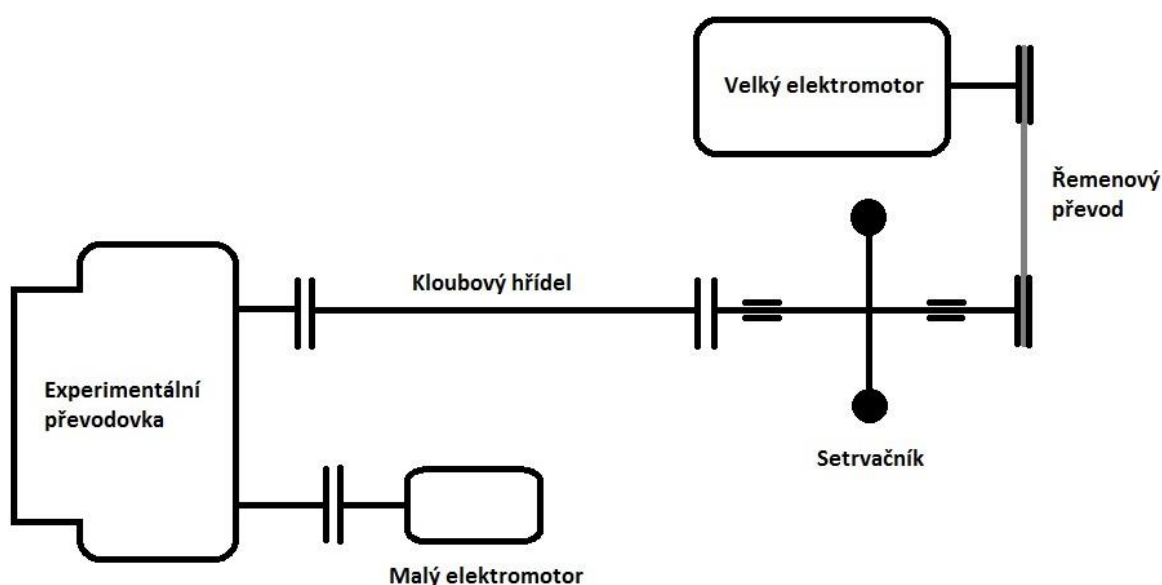
Obr. 2 – Rozklad experimentální převodové skříně [6]

1 – závěsné oko, 2 – pneumatický válec, 3 – víko skříně, 4 – stálý převod, 5 – hřídele, 6 – vana skříně, 7 – snímač axiální síly, 8 – synchronizační spojka s příslušným soukolím, 9 – kolík, 10 – olejová měrka, 11 – kryt, 12 – šrouby skříně, 13 – mazací tryska



1.3 Vnější synchronizace

Pro aplikaci zkušební převodovky na stanoviště pro testování převodových skříní je potřeba několika úprav. Jednou z úprav, která bude hlavním tématem této práce, je vnější synchronizace. Ta má za úkol simulovat setrvačnost motoru a dalších částí automobilu, které jsou během jízdy v pohybu. Celé uspořádání stanoviště je schématicky znázorněno na obrázku (Obr. 3). Z původního stanoviště se tak zachová celá větev, která původně poháněla sériovou skříň MQ200. Jedná se o část s velkým elektromotorem, setrvačником a kloubovým hřídelem, jenž je připojený na výstupní hřídel experimentální převodovky.



Obr. 3 – Schéma nového stanoviště [Vlastní zdroj]

Celý zkušební stav bude fungovat takřka stejně jako v konfiguraci se sériovou skříň. Úkolem mé práce je zajistit opačnou stranu, tedy synchronizaci na vstupní hřídeli. Je tedy potřeba navrhnout potřebný pohon a jeho propojení s převodovou skříň prostřednictvím vhodné spojky. Dále je potřeba vyřešit umístění skříně na stanoviště v požadované pozici vzhledem ke kloubovému hřídeli. Současně by bylo vhodné zajistit jednotnost sestavy skříně s vnější synchronizací, aby jí bylo případně možné použít na jiném stanovišti. Na sestavu je rovněž kladen požadavek kompletní smontovatelnosti a dostatečné tuhosti, aby nebylo vlivem vibrací znehodnoceno měření.



2 VÝBĚR KOMPONENT

Pro návrh kompletní sestavy je nejprve potřeba objasnit funkce všech propojovaných komponent, kterými se tato práce bude zabývat. Dále je potřeba zohlednit parametry experimentálního stanoviště a potřebné parametry komponent. Na základě těchto poznatků a následné konzultaci pak budou vybrány vhodné konkrétní součásti.

2.1 Elektromotor

Elektrickými stroji se rozumí stroje, které slouží k přeměně elektrické energie. Tato přeměna elektrické energie se může realizovat buď v rámci parametrů elektrické energie (transformátory), nebo v rámci formy energie. Ve druhém zmíněném případě se konkrétně jedná o přeměnu elektrické energie na mechanickou (elektrické motory) či naopak (elektrické generátory). Ke změně elektrické energie ve stroji dochází díky elektromagnetické indukci. Tu zajišťuje konstrukční řešení stroje, který se skládá z magnetického obvodu a elektrického vinutí. U transformátorů jsou tato vinutí nepohyblivá, u motorů a generátorů vůči sobě konají nejčastěji rotační pohyb, v některých případech se může jednat i o pohyb lineární.[20]

Pro účely testovacího stanoviště je potřeba zajistit přeměnu elektrické energie na rotační pohyb, tedy na energii mechanickou. Tato část práce se tedy bude dále zabývat pouze točivými elektrickými stroji. Konstrukčně jsou točivé elektrické stroje řešeny nejčastěji tak, že magnetický obvod je tvořen dutým feromagnetickým válcem s vloženým rotorem, odděleným vzduchovou mezerou. Elektrický obvod je pak tvořen jedním nebo několika vinutími, které jsou umístěny ve statoru a na rotoru podél vzduchové mezery. Pro vzájemný pohyb je upevněn magnetický obvod a vinutí do kostry, zatímco rotační pohyb rotoru zajišťuje hřídel vložená do ložiska. Při přeměně energie pochopitelně dochází ke ztrátám ve formě tepla, to je odváděno pomocí ventilátoru a ventilačních kanálků ve statoru a na rotoru. [20]

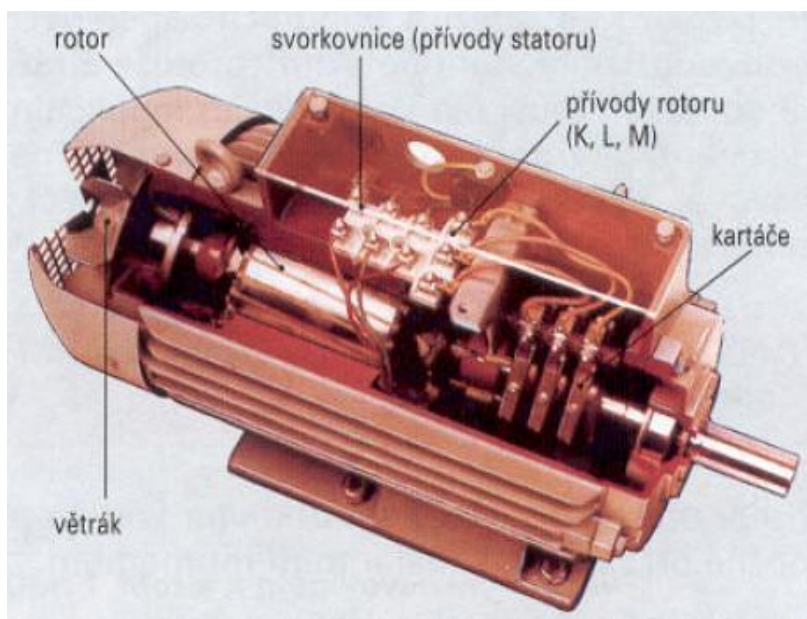
Točivé elektrické stroje lze dále dělit. Podle směru toku energie je můžeme rozdělit na generátory a motory. Podle druhu napájení je lze také dělit na stejnosměrné a střídavé, v případě motorů sem můžeme zařadit i komutátorové stroje. Pro účely mé práce je



potřeba obstarat elektrický motor, tudíž se nadále elektrickými generátory nebudeme příliš zabývat. Vzhledem k dostupné technice v laboratořích na Julisce je rovněž vhodné nezabývat motory stejnosměrnými, a zaměřit se spíše na skupinu motoru střídavých. Střídavé motory lze dále rozdělit do dvou skupin – motory synchronní a asynchronní.

2.1.1 Asynchronní motory

Jak vychází z textu výše, asynchronní stroje se skládají ze dvou základních částí. Těmi jsou stator a rotor. Ve statoru je uloženo vinutí v drážkách a připojeno ke svorkovnici, přičemž může být spojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku. Rotor (nebo také kotva) obsahuje vinutí, které může být provedeno dvěma způsoby – kotva na krátko a kotva kroužková. V případě kotvy nakrátko je vinutí provedeno tyčemi uloženými v drážkách a na koncích spojenými na krátko. Vzhledem ke konstrukčnímu provedení se tento způsob vinutí také někdy nazývá klecové vinutí. V případě kroužkové kotvy je vinutí realizováno podobně jako vinutí statoru. Je uloženo v drážkách a jeho vývody jsou napojeny na kroužky na hřídeli, po kterých kloužou kartáče (Obr. 4). Ty mohou být na kroužcích trvale nebo pouze při rozběhu motoru, a slouží k připojení zařízení pro úpravu rozběhových či provozních vlastností stroje, těmi jsou například otáčky či velikost rozběhového proudu. Magnetický obvod asynchronního stroje je tvořen plechy z elektrotechnické oceli, obvyklá tloušťka plechu je 0,5mm. [7]



Obr. 4 – Řez kroužkovým asynchronním motorem [13]



Princip fungování stroje spočívá ve vzájemném působení točivého magnetického pole statoru a proudů, které toto pole vyvolává ve vinutí rotoru. Jinými slovy princip spočívá v elektromagnetické indukci. Točivé magnetické pole statoru lze znázornit jako pole permanentního magnetu, které se otáčí v prostoru. Pole je vytvořeno proudy pevného třífázového statorového vinutí, které jsou navzájem časově posunuty o 120° , přičemž statorová vinutí jsou posunuta v prostoru o 120° . Tyto fázově posunuté proudy způsobí, že se bude poloha výsledného vektoru magnetické indukce měnit v čase, a to sice tak, že bude vektor rovnoměrně rotovat. Rychlost točivého pole pak závisí na frekvenci napájecího statorového proudu (resp. napětí) a na počtu pólů statorového vinutí jedné fáze. Minimální počet pólů jsou dva, přičemž běžně se používají až dvanáctipólové stroje. Rychlost točivého pole se nazývá synchronní rychlost a s rostoucím počtem pólů klesá. Pro synchronní rychlost platí vztah:

$$\omega_s = \frac{\omega}{p_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_p} \quad (1)$$

Symbol ω značí úhlovou rychlost napájecího napětí a p_p počet pólpárů.

V asynchronním motoru pak dochází k průniku siločar točivého magnetického pole statoru s vodiči rotorového vinutí. To způsobí indukci elektrického napětí v rotoru a rotorem začne procházet proud. Interakce mezi točivým magnetickým polem a rotorovými proudy způsobí vyvození momentu. Rotor tak začne zrychlovat, přičemž klesá jeho relativní rychlost vůči točivému magnetickému poli a s tím i frekvence rotorového proudu. Pokud není na hřídeli odebírán mechanický výkon, dojde k urychlení rotoru až téměř na synchronní rychlost. K tomu však nemůže samovolně dojít z důvodu ztrát. Je-li však motor zatěžován mechanickým momentem ve stavu, kdy se otáčí rychlostí blízkou synchronní rychlosti, dojde k poklesu otáček a zvýšení velikosti a kmitočtu rotorového proudu. V této chvíli tedy dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou. Pro popis závislosti mezi úhlovou frekvencí napájecího napětí ω a mechanickou úhlovou rychlostí ω_m se používá veličina zvaná skluz a platí pro ni vztah (2). [20]



$$s = \frac{\omega - p_p \cdot \omega_m}{\omega} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Samotné spouštění motoru se liší v závislosti na konstrukčním řešení. Jak bylo uvedeno výše, asynchronní motory mohou mít rotorové vinutí řešeno buď kotvou nakrátko nebo kotvou kroužkovou. V případě kroužkového vinutí je způsob spouštění poměrně jednoduchý. Do obvodu rotoru je zařazen spouštěcí rezistor nebo tlumivka a při rozběhu se buď plynule nebo stupňovitě vyřazuje, dokud se vinutí rotoru nespojí nakrátko. U velkých či dlouhodobě pracujících elektromotorů, se po rozběhu a zkratování nadzvednou kartáče, aby se zamezilo zbytečnému opotřebení. Velikost spouštěcího odporu se volí v závislosti na známých parametrech motoru a na požadavcích poháněného zařízení.

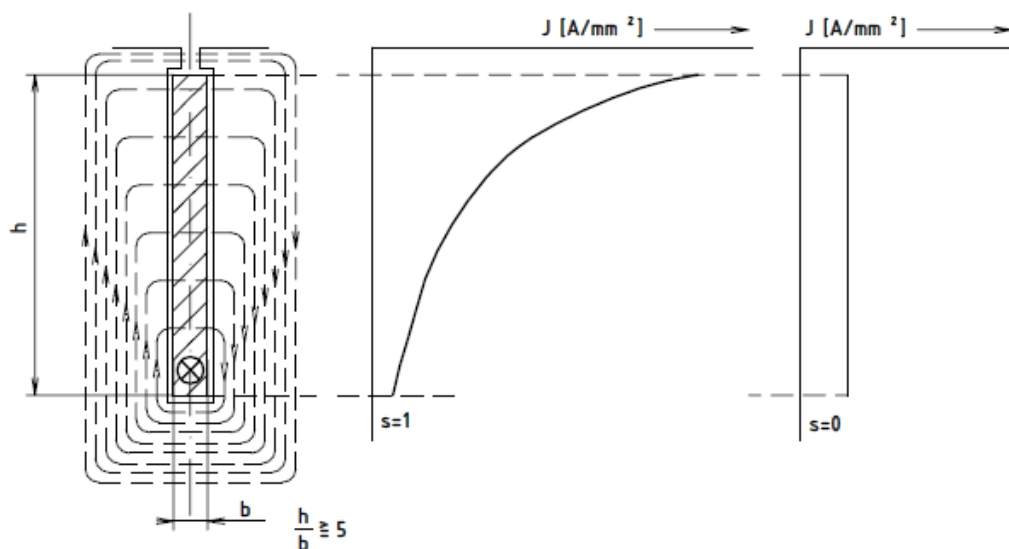
V případě spouštění motorů s kotvou nakrátko je značnou nevýhodou velký proudový a momentový ráz. Je tedy potřeba zařadit k motoru zařízení, která zmenší vliv spouštění na napájecí síť, na samotný motor a na zařízení, která pohání. Tato regulační zařízení mohou být zakomponována mimo elektromotor jako spouštěcí prvky, nebo řešena přímo konstrukcí motoru, jako v případě motoru se speciálním vinutím. Přímé připojení na napájecí síť je možné pouze u motorů se jmenovitým výkonem do 3 kW, tzn. u motorů, které nemají při spuštění větší ráz než 22 kVA. Přímé připojení na síť motorů s vyšším výkonem je pak možné pouze v určitých případech, kdy je zajištěna dobrá přenosová schopnost sítě a úbytek napětí nepřekročí určitou hodnotu.

Motory s kotvou nakrátko, u nichž se nepožaduje při spuštění plný záběrný moment, lze spouštět se sníženým napětím. Toho je možné docílit předřazením rezistoru nebo tlumivky statorovému vinutí, spouštěcím autotransfornátorem nebo přepojením statorového vinutí do hvězdy a následně do trojúhelníku. Nevýhodou tohoto řešení je značný pokles záběrného momentu, jelikož celá momentová charakteristika je funkcí kvadrátu napětí. Při předřazení tlumivky či při spouštění autotransfornátorem je napětí obvykle sníženo zhruba na 0,6 až 0,75 jmenovitého napětí. Při spouštění přepínačem hvězda trojúhelník se fázové



napětí při spuštění zmenší $\sqrt{3}$ krát. To způsobí, že se záběrný proud, stejně jako záběrný moment, sníží na třetinu. [20][7]

Při výše zmíněném řešení pomocí speciálních konstrukcí rotorových vinutí jsou klecová vinutí konstruována tak, aby během rozběhu měnila svůj odpor a reaktanci. Existuje tedy několik speciálních konstrukcí rotorových vinutí. Může se jednat o odporové klece, kde se odpor zvětšuje pomocí provedením tyčí z odporového materiálu či mosazi, nebo například o kotvu vírovou. Ta má úzké a hluboké drážky a rotorové tyče mohou mít různé tvary od obdélníku, přes lichoběžník až po složitější tvary. Význam hluboké úzké drážky spočívá ve vzniku vířivých proudů, vyvolaných rozptylovým polem, které prochází drážkami rotoru. Tyč je spodní částí spojena s největším rozptylovým tokem, a naopak horní částí s nejmenším rozptylovým tokem. To způsobí, že je v dolní části indukované větší napětí působící proti průchodu proudu a v horní části naopak. Proud je pak rozložen nerovnoměrně, čímž se zvětší odpor tyče (Obr. 5). Ve fázi rozběhu se kmitočet v rotoru postupně zmenšuje, což zapříčiní snížení nerovnoměrnosti proudu v tyči a tím i pokles odporu. [7]



Obr. 5 – Vírová klec s rozložením rozptylových toků [7]

Mimo klasické metody je možné spouštět asynchronní motory za použití střídavých měničů napětí (tzv. softstartérů), které disponují nastavitelnou rampou napětí, dobou rozběhu a proudovým omezením. Zajistí tak plynulý rozběh a sníží energetické ztráty. [7]



Možnost regulace otáček je v našem případě jedním z předních kritérií, ke kterým budeme při volbě elektromotoru přihlížet. Pro případ asynchronního motoru vychází možnost jeho regulace přímo z výše zmíněných vztahů pro skluz a synchronní úhlovou rychlost. Ze vztahů (1) a (2) můžeme vyjádřit vztah pro mechanickou úhlovou rychlost:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_p} \cdot (1 - s) \quad (3)$$

Po převedení úhlové rychlosti na otáčky také platí:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f}{p_p} \cdot (1 - s) \quad (4)$$

Z tohoto vztahu přímo vyplývá, že rychlost asynchronního motoru lze měnit pomocí změny frekvence napájecího napětí, změny skluzu či změny počtu pólů. Regulace rychlosti prostřednictvím změny počtu pólů je poměrně jednoduchý způsob, vyžaduje však speciální konstrukci motoru a rychlost lze nastavovat pouze v určitých stupních, vzhledem k omezenému počtu pólů. Regulace rychlosti změnou skluzu je také poměrně omezený způsob, jelikož vzhledem k zachování stabilního chodu a z důvodu účinnosti je možné měnit skluz pouze v rozmezí od $-s_{\max}$ do $+s_{\max}$. Nejpoužívanějším způsobem regulace rychlosti asynchronních motoru je změna napájecí frekvence. Jako zdroj třífázového napětí s proměnnou frekvencí slouží polovodičový měnič kmitočtu. Při tomto způsobu regulace rychlosti elektromotoru se mění napětí přibližně lineárně tak, aby magnetický tok ve větvi magnetizační indukčnosti zůstal konstantní. Tím je pak zachován i maximální moment a tvrdost mechanických charakteristik motoru. Po dosažení jmenovité frekvence, které odpovídá jmenovitému napětí, jenž se obvykle rovná hodnotě napětí sítě, je možné otáčky motoru zvyšovat pouze zvyšováním frekvence při jmenovitém napětí. To však vede ke snížení magnetického toku a tím i poklesu maximálního momentu a tvrdosti mechanických charakteristik. Nevýhodami tohoto způsobu je potřeba vyšších proudů a napětí a poměrná finanční náročnost.[20]



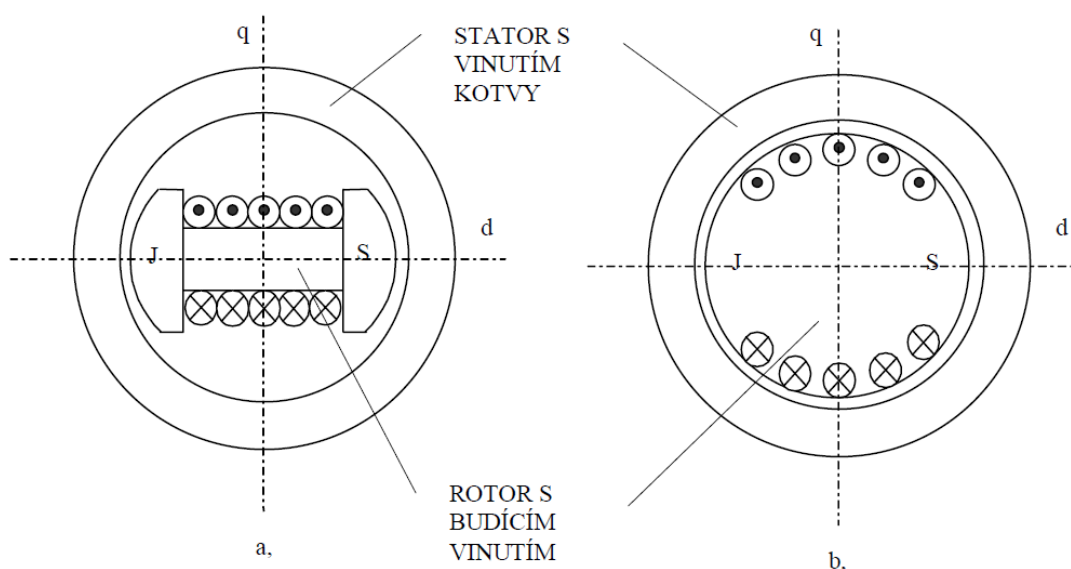
2.1.2 Synchronní motor

Synchronní stroj je rovněž elektrický točivý stroj, stejně jako asynchronní motor. Jeho rotor se však na rozdíl od asynchronního motoru otáčí synchronně s točivým magnetickým polem vzniklým ve stroji. Synchronní stroje byly zprvu používány převážně jako generátory (alternátory) pro výrobu střídavého elektrického napětí, a i dnes představují hlavní zdroje napájení energetické sítě. Teprve později se začali synchronní stroje využívat jako motory, a to buď jako synchronní kompenzátory, využívané pro zlepšení účinnosti v elektrické síti, nebo jako pohody různých průmyslových zařízení. Vhodné jsou zejména pro zařízení, u kterých není vyžadováno časté spouštění a pracují s konstantní rychlostí. Jsou tedy vhodné pro pohon velkých čerpadel, kompresorů či ventilátorů. Své využití však s rozvojem výkonové elektroniky našly i v oblasti pohonů s regulací rychlosti či v oblasti průmyslové automatizace a robotiky. [20][10]

Konstrukčně je synchronní stroj obvykle uspořádán z části podobně jako asynchronní stroj. Podobnost nalezneme především ve statoru, rovněž tvořeného z plechů, v jehož drážkách je uloženo vinutí. Rozdíl je v provedení rotoru, které rozděluje synchronní stroje na dva základní druhy – synchronní stroje s vyniklými póly (Obr. 6a) a s hladkým rotorem (Obr. 6b). V případě strojů s vyniklými póly jsou cívky budícího vinutí nasazeny na pólech. Póly v tomto případě mohou být z dynamových plechů nebo z ocelolitin s nástavci z dynamových plechů. Tohoto konstrukčního řešení se využívá především u pomaloběžných hydroalternátorů, u kterých musí být vytvořeno několik pólových párů na obvodu rotoru pro dosažení síťové frekvence. Z důvodu umístění většího množství pólů bývají tyto stroje kratší a mají oproti strojům s hladkým rotorem značně větší průměr. Stroje s hladkým rotorem jsou naopak delší s menším průměrem. Rotor samotný je obvykle vykován z vhodné oceli a vinutí je uloženo v drážkách a je zajištěno klíny. Důvodem tohoto konstrukčního řešení je omezení vlivu odstředivých sil. Synchronní stroje s hladkým rotorem se totiž často používají jako rychloběžné turboalternátory poháněné parními či plynovými turbínami a jejich rychlost otáčení dosahuje 3000 ot/min. Na rotoru je v obou případech umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem, vyvedené na dva kroužky. Zdrojem tohoto proudu může být dynamo (tzv. budič), přičemž přenos napájení je realizován pomocí kluzných kartáčů. Kartáče se však časem ukázaly jako nepříliš spolehlivé a dynamo bývá poslední dobou nahrazováno tyristorovými měniči, které se umístí přímo na



rotor. Součástí rotoru bývá ještě tlumící vinutí nazývané amortizér. Jeho podoba opět závisí na konstrukci rotoru. V případě hladkého rotoru je tlumič tvořen kovovými klíny, umístěnými v drážkách. V případě rotoru s vyniklými póly je tlumič umístěn v drážkách pólových nástavců a spojen na krátko. Účelem tlumícího vinutí je tlumit kývání asynchronních strojů a tím přispět k vyšší dynamické stabilitě stroje. U synchronních motoru může být využito pro rozběh. Podle výkonu stroje a tím pádem i velikosti ztrát se u synchronních strojů volí druh chlazení. Stroje mohou být chlazené vzduchem, vodíkem a vodou či jejich kombinacemi. [20][7][10]



Obr. 6 – Konstrukční typy synchronních strojů [10]

Samotný princip fungování synchronních strojů je velice podobný. Statorové vinutí je tvořeno cívkami, které jsou vzájemně natočené o 120° . V případě synchronního alternátoru je na rotoru budící vinutí napájeno stejnosměrným proudem ze sítě nebo z vlastního budiče. Nebuzený rotor se roztočí na konstantní otáčky a začne v cívkách statoru indukovat střídavá napětí. Frekvence těchto napětí je přímo úměrná počtu pólů p_p a otáčkám rotoru n_1 podle vztahu (5).



$$f_1 = \frac{p_p \cdot n_1}{60} \quad (5)$$

Pokud bude prostorový průběh magnetického toku procházejícího statorovým vinutím sinusový, pak budou sinusová i indukovaná napětí ve statorových cívkách, a budou v jednotlivých cívkách časově posunutá o 120°. Při souměrném zatížení se pak vytváří kruhové točivé pole se stejnou rychlostí rotace jako má rotor a jeho magnetické pole. Z toho důvodu se tyto stroje nazývají synchronní. V případě fungování stroje v motorickém režimu je statorové vinutí napájeno trojfázovým proudem. To vytváří točivé magnetické pole podobně jako u asynchronního motoru. Po roztočení rotoru na synchronní rychlost se nesouhlasné polarity pólů elektromagnetu rotoru a točivého pole statoru přitahují a tím vůči sobě udržují stejnou prostorovou polohu. Rotor se tak nadále otáčí stejnou synchronní rychlostí jako točivé pole statoru, což umožní odebírat mechanický výkon. [20][7][10]

Jak již bylo naznačeno výše, mezi hlavní nevýhody synchronního motoru patří způsob jeho spouštění. To je nejčastěji řešeno pomocí klecového vinutí, uloženého v drážkách rotoru. Motor se spouští jako asynchronní bez zatížení, a to přímým připojením na síť, přes reaktor či pomocí autotransformátoru. Po nabuzení na otáčky blízké synchronním dojde k přechodu na synchronní chod. Další velice rozšířenou možností je již výše zmíněný rozběh pomocí změny frekvence napájecího napětí. Toho je docíleno napájením z polovodičového frekvenčního měniče. V každém případě při spouštění synchronních motorů musí platit stejné podmínky jako pro asynchronní motory. Obzvláště u velkých motorů je kladen důraz na dovolený proudový náraz na napájecí síť a na vhodný záběrný moment. Kromě složitosti rozběhu patří mezi další nevýhody oproti asynchronním motorům například menší momentová přetížitelnost nebo vyšší pořizovací cena při stejném výkonu. Synchronní motor má však oproti asynchronnímu spoustu výhod. Mezi hlavní výhody patří absence nutnosti odebírat pro svou činnost jalový výkon ze sítě. Synchronní stroje totiž mohou být naopak zdrojem tohoto výkonu, a celkově přispívají ke stabilitě napájecí sítě. Další výhodou je nepochybně konstantní rychlost rotace, která není závislá na zatížení a napětí. Z důvodu synchronního otáčení rotoru vzhledem k magnetickému poli statoru je absence skluzu příčinou nepřítomnosti skluzových ztrát. Dále v důsledku toho, že vzduchová mezera bývá



pro správný chod stroje v rozmezí 0,5 – 5 cm, což je více než u asynchronních strojů, dochází ke snížení přídatných ztrát. Celkově je tak synchronní motor výhodnější i z hlediska své vyšší účinnosti. Dřívější komplikovanost plynulé regulace otáček již také není nevýhodou, jelikož jak je patrné ze vztahu (5), rychlost otáčení je přímo úměrná frekvenci statorového napětí. [20][7]

2.1.3 Výběr vhodného elektromotoru

Nyní když jsem shrnul základní principy fungování a výhody či nevýhody synchronních a asynchronních strojů, přejdu na výběr konkrétního motoru pro aplikaci na zkušebním stanovišti.

Asynchronní motory bývají často levnější a jejich rozběh je méně komplikovaný. Při absenci frekvenčního měniče je rovněž jednodušší způsob regulace jejich otáček. Avšak v laboratořích na Julisce se nachází frekvenční měnič, vhodný pro synchronní stroje. Z toho důvodu bude můj výběr směřovat do skupiny synchronních motorů, jelikož díky frekvenčnímu měniči je možné dosáhnout snadné a rychlé regulace otáček, a zároveň získání vyšší účinnosti, kterou tyto stroje disponují. Po konzultaci jsem tedy vybral synchronní motor s permanentními magnety značky SIEMENS, konkrétně typ **SIMOTICS S-1FT7-5AK70** (Obr. 7 – vybrán z katalogu pouze jako ilustrační, konkrétní provedení se mírně liší).



Obr. 7 – Elektromotor SIEMENS SIMOTICS S-1FT7 [16]



Parametry motoru jsou shrnuty v následující tabulce:

Nominální otáčky	6 000 ot./min
Počet pólů	10
Nominální moment	3,3 Nm
Účinnost	90 %
Nominální proud	5,4 A
Optimální otáčky	5 500 ot./min
Optimální výkon	2,1 kW
Maximální otáčky	9 000 ot./min
Maximální moment	24 Nm

Tabulka 1 – Vlastnosti elektromotru

Vybraný elektromotor by měl svými parametry plnit funkci vnější synchronizace. Výstupní hřídel motoru má průměr 20 mm a je vybavena drážkou pro příslušné pero, které zajistí přenos momentu na spojku propojující motor s převodovkou.

2.2 Spojka

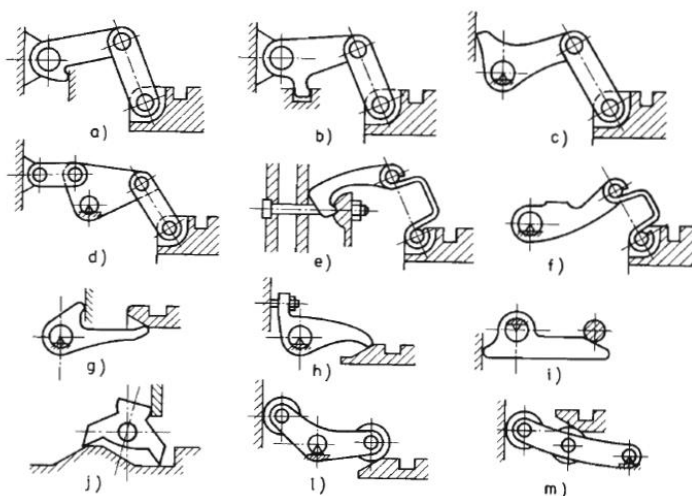
Spojka obecně slouží k přenosu kroutícího momentu mezi hnacím a hnaným strojem. Spojek existuje mnoho druhů a lze je rozdělit podle různých kritérií. V rámci této práce se budu zabývat pouze hřídelovými spojkami spojujícími dva koaxiální hřídele. Ty se rozdělují například podle způsobu přenosu točivého momentu na mechanické ovládané či neovládané, hydraulické, elektrické či magnetické. Pro výběr vhodné spojky pro aplikaci na stanovišti se budu soustředit na spojky, které umožní rozpojení a spojení hřídelí za provozu i za klidu. Budu se tedy zaměřovat na ovládané spojky, konkrétně na výsuvné spojky, které přesně toto umožňují. Výsuvné spojky se dále mohou dělit na spojky zubové a třecí. Toto rozdělení je na základě způsobu přenosu kroutícího momentu. Jak z názvu vyplývá, v případě zubových spojek se jedná o způsob přenosu pomocí ozubení na čelní nebo válcové ploše. V případě třecích spojek je přenos zajištěn třecími silami, které vznikají mezi činnými plochami spojky. Tyto plochy mohou být čelní, válcové či kuželové. Oba druhy



spojek, zubové i třecí, mají své výhody a nevýhody. Zásadní nevýhoda zubových spojek, která je pro účely této práce činí téměř nepoužitelné, je, že se mohou zasunout pouze za klidu nebo při malých rychlostech otáčení. Oproti spojkám třecím však mohou přenášet mnohem větší moment, jelikož u třecích spojek může při přetížení dojít k prokluzu třecích ploch. Třecí spojky naopak disponují výhodou spojení i rozpojení za chodu stroje. Zasouvání a vysouvání je v obou případech ovládáno silou prostřednictvím ovládacího zařízení. Druh ovládacího zařízení může být různý a jeho volba závisí na konstrukčních požadavcích, které vycházejí z konkrétního využití spojky. Druhy ovládacího zařízení bývají nejčastěji mechanické (ruční či nožní), ale mohou být i hydraulické, pneumatické či elektrické (resp. elektromagnetické). Pro lepší představu využitelnosti jednotlivých způsobů ovládání spojky na zkušebním stanovišti je stručně přiblížím. [3][24][11]

2.2.1 Mechanické ovládací zařízení

V tomto případě je ovládací zařízení připojeno k posuvné části spojky pákou či pákovým ústrojím. Samotné pákové ústrojí může být konstrukčně řešeno mnoha způsoby (Obr. 8, a–m). Rozdíly jednotlivých řešení závisí na konkrétních požadavcích na spojku. Spojení s posuvnou částí spojky je realizováno děleným přesouvacím kroužkem či kluznými kameny, kterými zapadá do vybrání nebo nákrůžku na posuvné části spojky. Z důvodu snížení opotřebení a ztrát se tato posuvná část obvykle umísťuje na stranu, která se po rozpojení spojky netočí. Pro snížení ztrát by rovněž měl být třecí kroužek kvalitně mazán. [3][24]



Obr. 8 – Konstrukční řešení pákového ovládání spojky [3]



2.2.2 Hydraulické ovládací zařízení

Hydraulicky ovládané spojky jsou schopny přenášet největší točivý moment. Díky tomu mají takto ovládané spojky široké spektrum využití od ovládání ventilátorů po těžební stroje. Jejich princip spočívá v přívodu kapaliny (nejčastěji olej) do tlakového válce s pístem, který je spojen s ovládací pákou a nákrůžkem, jenž přesouvá objímky spojky. Tlak oleje může dosahovat hodnot až 3,4 MPa, a jeho regulace pomocí ventilu umožňuje plynulý záběr spojky a rychlou odezvu. Značnou nevýhodou takto ovládaných spojek je právě samotné konstrukční řešení, které vyžaduje instalaci a údržbu zařízení, zajišťujících fungování spojky. [3][4]

2.2.3 Pneumatické ovládací zařízení

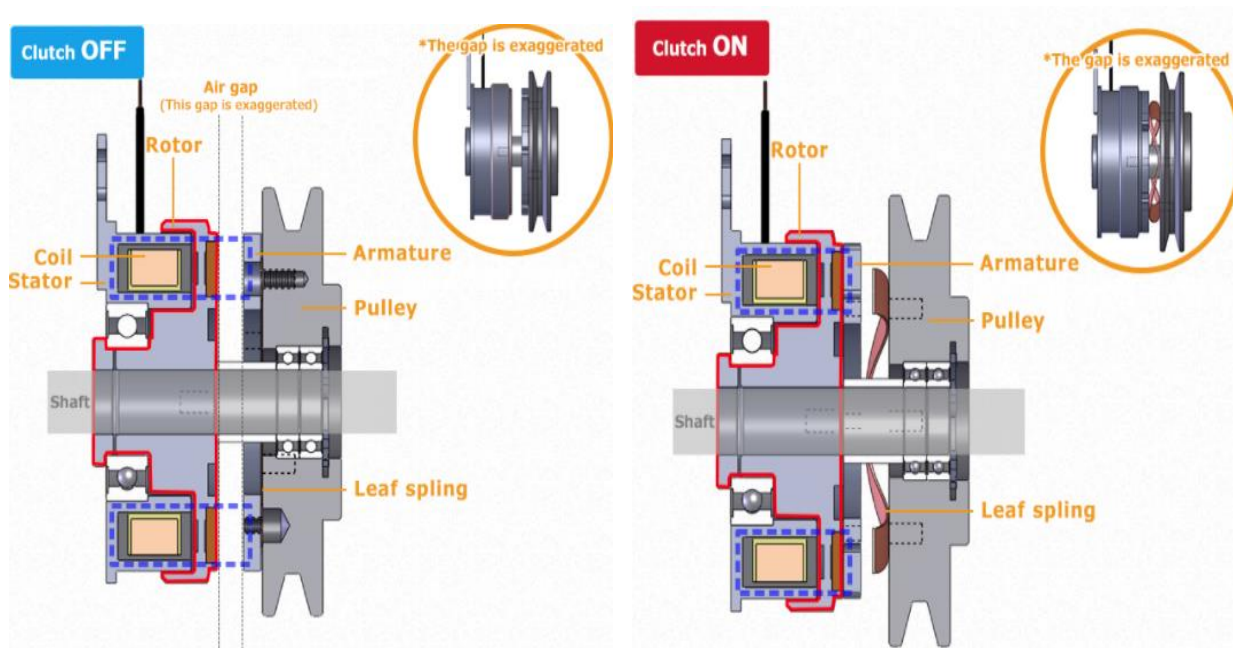
Princip pneumaticky ovládaných spojek je podobný jako u hydraulického ovládání. Zasunutí a vysunutí posuvné části spojky je řízeno obvykle pístem, který je ovládán prostřednictvím stlačeného vzduchu. Tlak stlačeného vzduchu se obvykle pohybuje okolo 0,5 MPa, což je méně než u hydrostaticky ovládaných spojek. I přesto dokážou vzduchem ovládané spojky přenést vyšší točivý moment než spojky ovládané mechanicky či elektricky. K regulaci tlaku vzduchu je třeba použít ventil, který může být ovládaný ručně či elektricky (tzv. solenoidový ventil). Obdobně jako u hydraulického ovládání, je i zde značnou nevýhodou potřeba instalace podpůrného vybavení ve formě kompresoru, trubek a ventilu. Tato zařízení jsou často prostorově náročná a projeví se i na výsledné ceně. Další drobnější nevýhodou je, že vzduch využívaný na pracovištích k ovládání spojky nebývá obvykle suchý, což může způsobit korozi uvnitř válce a tlak značně kolísá. [3][4]

2.2.4 Elektromagnetické ovládací zařízení

U toho typu ovládání spojek dochází k sepnutí spojky v důsledku průchodu proudu elektrického proudu cívkou, která je umístěna v ocelovém jádře. To je obvykle součástí statorové části umístěné na hnacím hřídeli. Na hnacím hřídeli je rovněž umístěný rotor spojky, spojený obvykle pomocí pera, a zajištěný proti kontaktu se statorovou částí. Při průchodu proudu cívkou dojde ke zmagnetizování rotorové části a přitažení náboje (kotvy) na hnaném hřídeli. Moment je přenášen prostřednictvím styku čelních ploch rotoru s kotvou. Po rozpojení spojky se magnetické pole rozpadne a pomocí listové pružiny dojde



k přitažení kotvy zpět na původní pozici. Z důvodu minimalizace opotřebení spojky, a celkově pro správnou funkci, je nutné, aby byla v nesenutém stavu mezi rotorovou částí a kotvou zachována vzduchová mezera. Velikost této mezery bývá předepsána výrobcem a pohybuje se obvykle v řádech desetin milimetru. Obr. 9 znázorňuje princip fungování elektromagnetické spojky. Vlevo můžeme vidět spojku v rozpojeném stavu a vpravo ve spojeném. V případě znázorněném na obrázku je točivý moment přenášeny na řemenici, která sdílí s hnacím zařízením společnou hřídel. V případě dvou koaxiálních hřídelů je však další nutnou podmínkou pro minimalizaci závad dodržení sousostnosti hnacího a hnaného hřídele. V důsledku vychýlení hřídelů by rovněž došlo k vychýlení styčných kotoučů a tím k nesouměrnosti přenášení točivého momentu, což by mohlo způsobit poškození spojky. Elektromagnetické spojky by rovněž mely být používány výhradně za sucha, jelikož mazání by způsobilo snížení tření, což by mělo nežádoucí vliv na přenos točivého momentu. Velkou výhodou tohoto způsobu ovládání je absence jakýchkoliv mechanických, hydraulických či pneumatických vazeb a s tím spojených zařízení. [3][4][22]



Obr. 9 – Princip rozpojení a spojení elektromagnetické spojky [17]

2.2.5 Výběr vhodné spojky

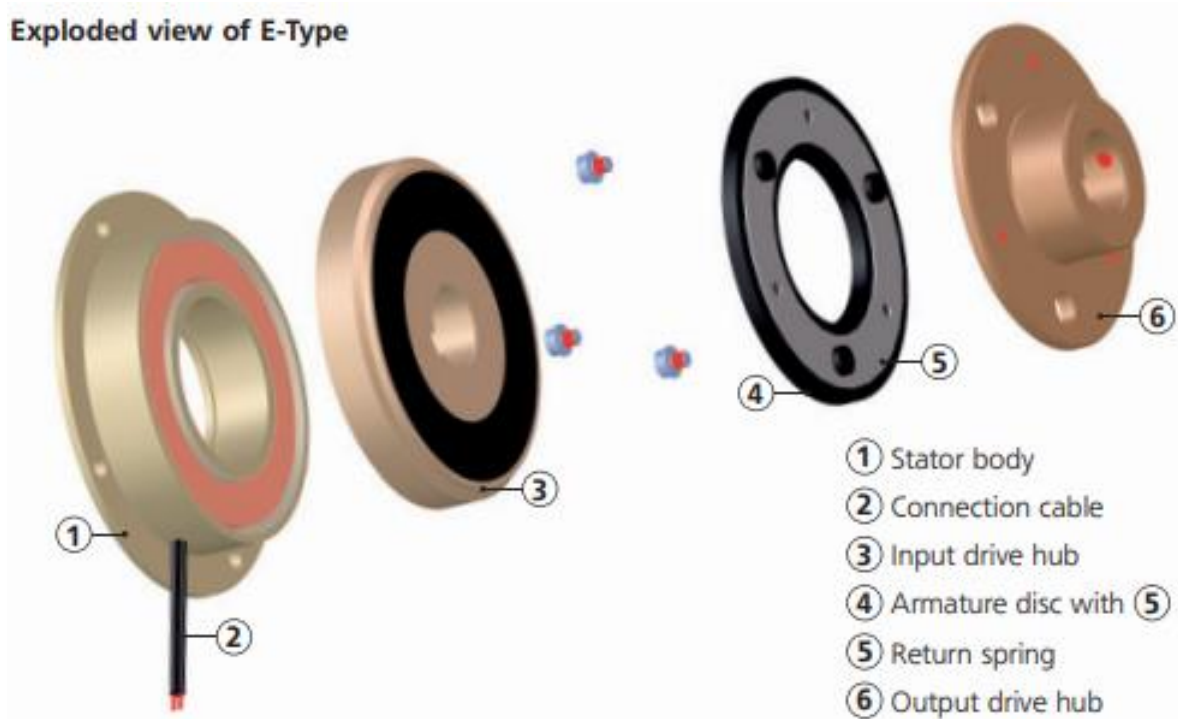
Výše přibližné způsoby ovládání výsuvných spojek budou hrát klíčovou roli ve výběru spojky vhodné pro zkušební stanoviště. Pro účely této práce tedy bude vhodná výsuvná



třecí spojka, vzhledem k rychlosti otáčení hnané hřídele. Dále je potřeba vybrat takovou spojku, která bude kompaktní a nebude svými rozměry omezovat kompletaci stanoviště. Z toho důvodu budu hledat pravděpodobně vhodnou elektromagnetickou spojku, vzhledem k jednoduchosti jejího ovládání, rychlosti sepnutí a malým rozměrům.

Elektromagnetické spojky se vyrábí v mnoha provedeních z hlediska konstrukčního řešení. Pro propojení dvou koaxiálních hřídelů se vyrábí přímo spojky s nástavcem na hnanou hřídel. Takovou je například spojka E-type značky SUCO, model C (Obr. 10). V tomto případě je přenos točivého momentu na hnaném hřídeli zajištěný prostřednictvím pera. Hřídel experimentální převodovky však perem nedisponuje, a tudíž se bude muset přenos momentu zajistit jinak, nejspíše pomocí svěrného pouzdra. Hřídel také není příliš dlouhá a bude na ní pravděpodobně nutné zakomponovat snímač otáček (viz část 2.3 Snímač otáček), což by mohlo být vzhledem k rozměrům části 6 (Obr. 10) obtížné.

Exploded view of E-Type

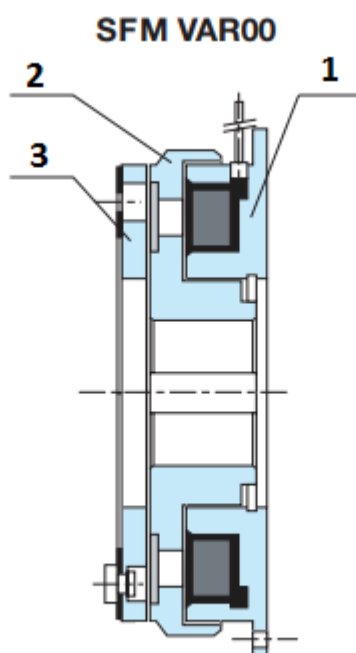


Obr. 10 – Spojka E-type značky SUCO [18]

Další možností je elektromagnetická třecí spojka vyrobená firmou Warner Electric, model SFM VAR00 (Obr. 11). Tato spojka je velice jednoduchým řešením. Skládá se ze statoru (Obr. 11 – 1), rotoru (Obr. 11 – 2) a armatury s listovou pružinou (Obr. 11 – 3). Toto řešení sice



přímo neumožňuje uchycení spojky na hřídel převodovky, to by však mohl vyřešit vhodný vyrobený díl s prostorem pro svěrné pouzdro a snímač otáček. Rovněž by tato část mohla řešit nastavení vzduchové mezery spojky, jejíž velikost předepsaná výrobcem je 0,2 mm. Velikost vnitřního otvoru rotorové části může být v rozmezí 14 mm – 30 mm, s tolerancí H8. To by bylo pro náš případ vyhovující, jelikož hřídel zvoleného elektromotoru má průměr 24 mm. Přenos točivého momentu elektromotoru by byl realizován pomocí pera, kterým elektromotor disponuje.



Obr. 11 – Elektromagnetická spojka SFM VAR00 [15]

Po konzultaci byla vybrána elektromagnetická třecí spojka značky BIBUS model **SFM VAR00 Size 40**. S vnitřním průměrem 24 mm a příslušnou drážkou pro pero pro přenos kroutícího momentu elektromotoru. Maximální rychlost otáčení spojky je **5000 ot./min** a nominální moment **30 Nm**.



2.3 Snímač otáček

Pro správné fungování spojky je potřeba zajistit, aby rozdíl otáček na hnací a hnané hřídele nebyl příliš velký. Aktivace spojky při velkém rozdílu otáček by mohla drasticky snížit její životnost. Regulací otáček elektromotoru na otáčky blízké otáčkám hnané hřídele se docílí jejich minimálního rozdílu. Otáčky elektromotoru budou známé, avšak pro měření otáček hnané hřídele je třeba na stanoviště zakomponovat snímač otáček.

Pro měření otáček se používá rozsáhlé spektrum různých snímačů, které je možné dělit podle měřené veličiny, fyzikálního principu, styku s měřeným prostředím, transformace signálu, výrobní technologie atd. Snímače tedy lze nejprve rozdělit podle druhu výstupního signálu na tři kategorie:

- Snímače s neelektrickým výstupním signálem
- Snímače s elektrickým analogovým výstupním signálem
- Snímače s elektrickým výstupním signálem ve tvaru pulzů

Z konstrukčních důvodů zkušebního stanoviště je vhodné vybrat bezdotkový snímač otáček s elektrickým výstupním signálem. Snímače s analogovým elektrickým výstupem měří obvykle kontaktně a patří například stejnosměrné tachodynamo či asynchronní tachogenerátor. Jejich aplikace na experimentální stanoviště by byla komplikovaná, ne-li nemožná, tudíž se touto skupinou nebudu dále zabývat. Skupinu snímačů s neelektrickým výstupem reprezentují snímače mechanické, převážně odstředivé otáčkoměry. Mechanické snímače jsou opět téměř bez výjimky kontaktní. Výjimku tvoří stroboskopický snímač, který využívá stroboskopického jevu. Jeho princip spočívá v osvětlení označené měřené části stroje krátkými světelnými záblesky. Při shodných otáčkách s frekvencí záblesků pak vzniká dojem, že se značka nachází ve stálé pozici. Ačkoliv se jedná o bezkontaktní způsob měření, existuje stále větší množství vhodnějších metod, tudíž se tímto způsobem také nadále nebudeme zabývat. Z původního rozdělení podle druhu výstupního signálu nám tedy zbývá poslední skupina. Tou jsou snímače s elektrickým výstupem ve formě pulzů. Obvykle se jedná o snímače polohy či zrychlení, jejichž výstupní signál je derivován či integrován. Jedná se zpravidla o snímače bezkontaktní a můžeme je dále rozdělit na několika druhů podle fyzikálního principu. Jak bylo zmíněno výše, jedná se zpravidla o snímače polohy, jejichž spektrum využití je velice široké. Pokusím se tedy



přiblížit principy pouze těch snímačů, které mohou být využitelné pro naši problematiku. [9][2]

2.3.1 Indukčnostní snímače

Tato skupina dále obsahuje několik druhů snímačů. Jedná se o snímače parametrické, transformátorové (LVDT), selsyny a resolvery. Obecně lze však říct, že tyto snímače fungují na principu změny vlastní indukčnosti L , nebo změny vzájemné indukčnosti M dvou cívek (případ transformátorových snímačů). Provedení magnetického obvodu se může v různých provedeních lišit. Může se jednat o magnetický obvod otevřený či uzavřený, s feromagnetickým jádrem či bez něj. Nejjednodušším řešením je parametrický snímač s malou vzduchovou mezerou. Pro vlastní indukčnost snímače platí vzorec (6):

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (6)$$

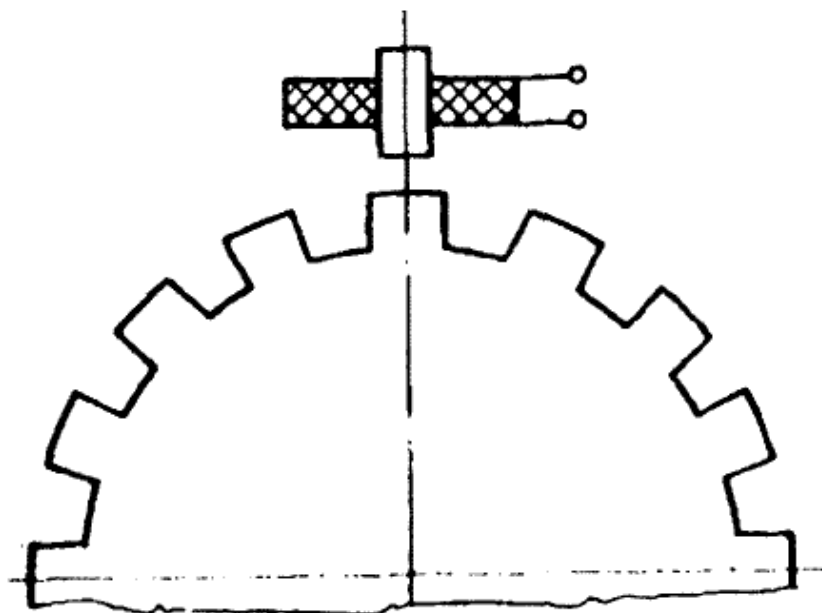
kde N je počet závitů cívky a R_m je magnetický odpor magnetického obvodu. Magnetický odpor se skládá ze součtu feromagnetického odporu snímače R_{Fe} a odporu vzduchové mezery R_v . Obvykle lze předpokládat, že odpor feromagnetické části je značně menší než odpor vzduchové mezery, a tudíž je možné tento odpor zanedbat. Po úpravě vztahu (6) tedy dostaneme nepřímou úměru mezi velikostí vzduchové mezery a vlastní indukčností cívky. Provedení těchto snímačů pro aktivní měření otáček má obvykle podobu feromagnetického výstupku na měřené hřídeli, jehož rotací dochází ke změně vzdálenosti mezi hřídelí a snímačem. Ten je tvořen cívkou s feromagnetickým jádrem, propojenou s měřidlem indukčnosti. Při relativním pohybu mezi výstupkem a cívkou dojde ke změně indukčnosti, což způsobí změnu střídavého napětí vystupujícího z měřidla. Výstupní signál je ve formě pulzů je dále vyhodnocován čítačem. [9] [2]

2.3.2 Induktivní snímače

Snímače otáček s indukčním čidlem fungují na principu indukce střídavého napětí v cívkách. Indukce je způsobena změnou magnetického toku, ke které dojde v důsledku rotace ozubeného kola z feromagnetického materiálu (Obr. 12). Frekvence indukovaného



napětí je pak úměrná rychlosti otáčení, přičemž maximální počet snímatelných otáček je omezen mezní frekvencí snímacího prvku při konkrétním počtu zubů kola. Jelikož se jedná opět o bezkontaktní snímač, je zde nutno zachovat vzduchovou mezeru mezi kolem a snímačem v rozmezí předepsaném výrobcem. Ta se pohybuje v řádech desetin až jednotek milimetru. [9][20]



Obr. 12 – Schéma ozubeného kola s indukčním snímačem [9]

2.3.3 Kapacitní snímače

Kapacitní snímače pracují se změnou některé z veličin, určujících kapacitu kondenzátoru. Ten může být konstruován jako deskový, popřípadě jako válcový, tvoření dvěma sousými válci. Kapacita deskového kondenzátoru se vypočítá podle vzorce (7):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{l} \quad (7)$$

kde ε je permitivita dielektrika, S je obsah překrytí desek a l je vzdálenost mezi deskami. Ze vzorce tedy vyplývá, že ke změně kapacity může dojít prostřednictvím změny velikosti mezery, změny plochy překrytí či změny permitivity. Tyto snímače se primárně nevyužívají pro měření otáček ale spíše pro měření tlaku, průhybu či hladiny. Existuje však jednoduché konstrukční řešení pro měření otáček, podobné indukčnímu snímači otáček. Jedná se



vlastně o kotouč s připevněnou kovovou destičkou, která při rotaci prochází mezi deskami kondenzátoru. Při průchodu dojde ke změně permitivity dielektrika a tím ke změně kapacity. K vyhodnocení změny kapacity se používají diferenciální můstky nebo rezonanční obvody. Jejich výhodou je velká přesnost, malá váha a zanedbatelné ovlivnění měřeného objektu. Drobnou nevýhodou je však velká citlivost na parazitní kapacity přívodů, jelikož kapacita snímačů se pohybuje okolo desítek až stovek pikofaradů. Tyto parazitní kapacity se obvykle eliminují pomocí vhodného měřícího obvodu. [9][2]

2.3.4 Snímače na principu Hallova jevu

Jedná se o adaptaci inkrementálních snímačů polohy, využívajících Hallova jevu. Ten spočívá ve vzniku Hallova napětí při průchodu proudu a magnetického pole tenkými polovodičovými deskami. Pokud je magnetické pole vůči proudu kolmé, je možné toto napětí naměřit příčně ke směru proudu. Napětí je pak úměrné velikosti magnetického pole podle vzorce (8):

$$U_H = K_H \cdot \frac{I_P \cdot B \cdot \sin \theta}{d} \quad (8)$$

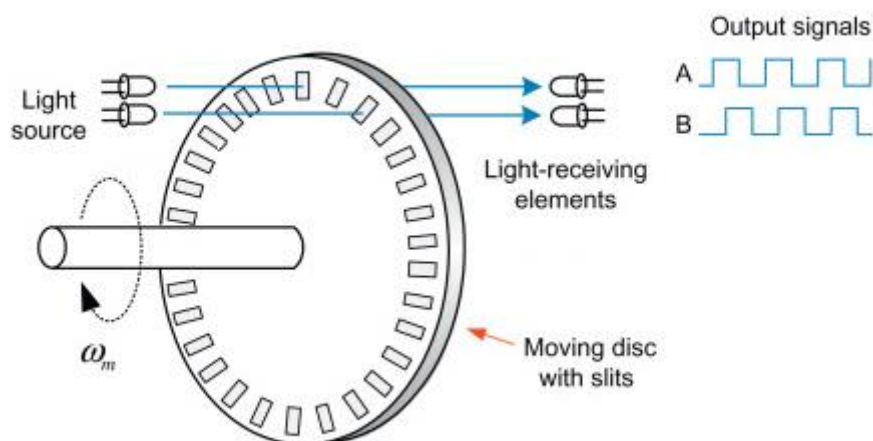
kde K_H je Hallova konstanta, I_P je proud procházející polovodičem, $B \cdot \sin \theta$ je složka magnetické indukce a d je tloušťka polovodičové vrstvy.

Pokud jsou Hallova konstanta, proud i tloušťka polovodiče neměnné, závisí Hallovo napětí pouze na magnetické indukci a její poloze vůči polovodiči. V praxi se tohoto efektu využívá v Halloových sondách, určených pro měření otáček. Samotné měření otáček se opět podobá způsobům využívaných snímači uvedenými výše. Rozdíl je v tom, že místo feromagnetických výstupků na snímacím kole jsou zde permanentní magnety, které v interakci s Hallovou sondou indukují pulsující napětí. Za jejich výhodu lze považovat to, že výstupní napětí není závislé na rychlosti otáček a dá se tak snadno vyhodnotit. Tyto snímače se často využívají v automobilovém průmyslu například pro měření otáček u spalovacích motorů či jako čidla rychlosti jízdy. [9][2][23][5]



2.3.5 Snímače s fotoelektrickým čidlem

Obdobně jako u snímačů fungujících na principu Hallova jevu, se jedná i zde o verzi inkrementálních snímačů polohy. V tomto případě je však pro snímání využíván fotoelektrický prvek (fotodioda či fototranzistor). Princip těchto snímačů spočívá v osvětlování měřicího kotouče obsahujícího otvory, které periodicky propouštějí světlo (Obr. 13). Zdrojem světla bývá obvykle LED dioda či žárovka. Počet otvorů může být různý, ale obvykle se volí počet vhodný pro jednoduché vyhodnocení otáček za minutu, například 60. Výstupní signál má obvykle tvar obdélníkových pulzů, které se dále zpracovávají pomocí čítače. Nevýhodou těchto snímačů je to, že ke správné funkci vyžadují rovnoběžnost či přímo totožnost osy snímače a osy měřeného kola či hřídele. Aplikace těchto snímačů tak může být v určitých případech komplikovaná. [9][2][21]



Obr. 13 – Princip fotoelektrického snímače a jeho výstupní signál [14]

2.3.6 Výběr vhodného snímače

Nyní, když jsem objasnil vybrané principy fungování snímačů otáček, mohu přejít ke konkrétnímu výběru. Výběr snímače bude mít vliv na výsledný návrh mezikusu spojujícího hřídel převodovky se spojkou. Vzhledem k možnostem a rozměrům stanoviště je vhodné, aby byl měřený disk přímo umístěn na tento mezikus, popřípadě byl jeho součástí. Nabízí se tedy několik možných řešení. První je navrhnout mezikus s ozubením a využít některý ze snímačů fungujících na principu změny indukčnosti či magnetického toku v důsledku průchodu feromagnetického materiálu. Rovněž by bylo možné navrhnout mezikus s otvory pro možnou aplikaci snímače s fotoelektrickým čidlem. Výroba mezikusu jakožto součásti



s ozubením či dokonce s otvory pro průchod světla by byla zbytečně komplikovaná, a je tedy vhodné zvolit způsob snímání otáček, který by nevyžadoval takto razantní požadavky na vyráběnou součást.

Jakožto vyhovující se tedy jeví použití snímacího kroužku **PMIR7** od společnosti ASM. Jedná se o ocelový pásek, na němž je nanesena magnetická vrstva, zmagetizována severními a jižními póly v pravidelných odstupech. Tento kroužek může být na příslušnou hřídel (v tomto případě na vyráběný mezikus) upevněn prostřednictvím nalisování, lepení či pojistnou maticí. Magnetické kroužky se vyrábí ve třech velikostech s vnitřními průměry 27 mm, 35 mm a 50 mm (Obr. 14), což je rovněž přijatelné pro aplikaci na stanoviště. Snímání otáček zabezpečuje snímací hlava **PMIS4**, která bezkontaktně snímá sinusové magnetické pole nad povrchem zmagetizovaného kroužku. Ve snímací hlavě dojde ke změně sinusových signálů na signály impulsní, které je možné snadno vyhodnocovat prostřednictvím většiny řídicích přístrojů.

Pro účely stanoviště tedy byla vybrána snímací hlava **PMIS4-20-50** s frekvencí pulsů 480 kHz a krytím IP 67. Magnetický kroužek byl vybrán **PMIR7-20-64-M-35** se šedesáti čtyřmi póly a vnitřním průměrem 35H7.



Obr. 14 – Snímací hlava PMIS4 s magnetickými kroužky PMIR7 [8]



3 VLASTNÍ NÁVRH

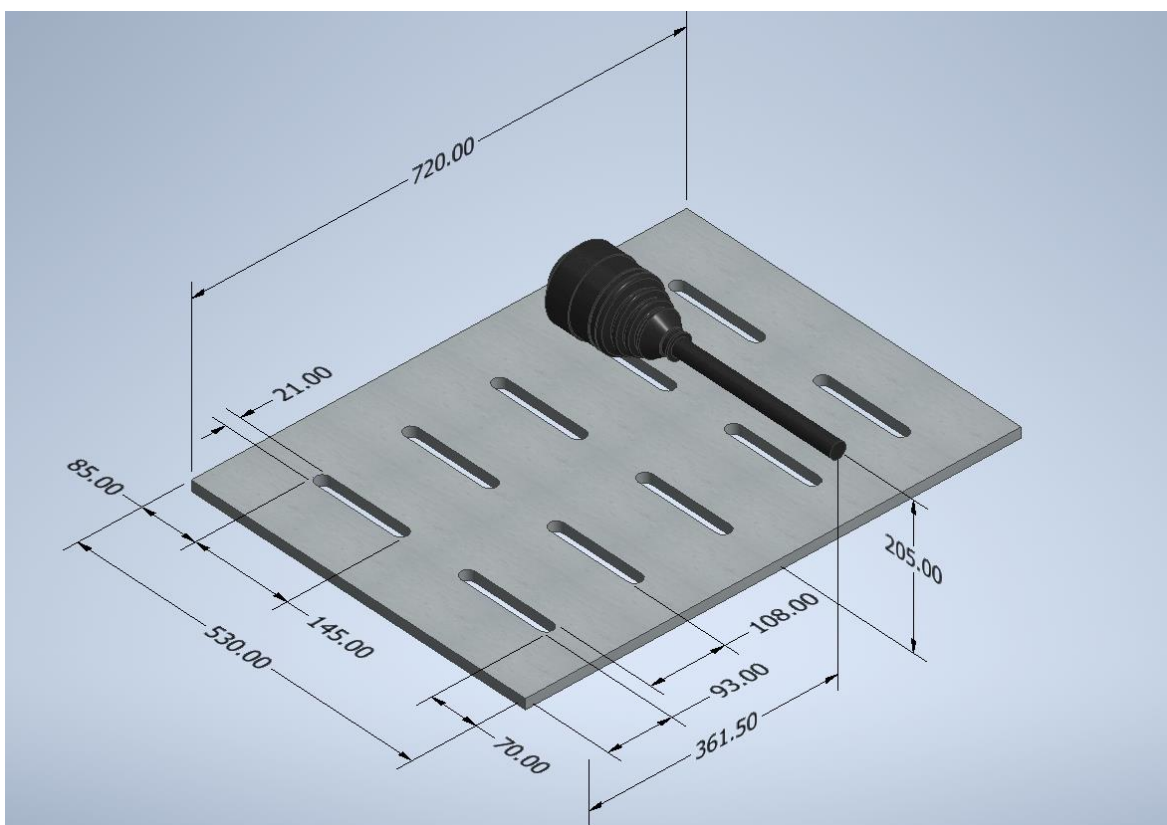
Nyní, když jsou vybrány vhodné komponenty, se budu zabývat konkrétním návrhem uspořádání stanoviště. Jak již bylo zmíněno, bude potřeba navrhnout součásti pro propojení vybraných komponent. Bude tedy potřeba realizovat uchycení statorové části spojky společně s elektromotorem, dále propojení rotorové části spojky s hřídelí převodovky a umístění snímače otáček. Celá sestava musí být smontovatelná a nejlépe kompaktní, tzn. bylo by vhodné sestavu navrhnout tak, aby nebyla nutná kompletní demontáž při případné manipulaci. Bylo by tedy rovněž vhodné navrhnout základní konstrukci či desku, na které bude samotná převodovka stát. Při návrhu se bude potřeba přizpůsobit rozměrům stanoviště a umístění poloosy propojující velký elektromotor s převodovkou. Vzhledem ke zvolené elektromagnetické spojce bude také potřeba vyřešit sousost hřídele elektromotoru a hřídele převodovky. Současně je potřeba vyřešit zachování předepsané vzduchové mezery spojky. S tím je dále spojena volba vhodných tolerancí, aby sestavu bylo možné zkompletovat. Při návrhu je také nutné myslet na celkovou tuhost soustavy, aby se předešlo nežádoucímu kmitání vlivem vibrací. To by totiž mohlo mít za následek znehodnocení celého měření.

Kompletní návrh jsem vypracoval v aplikaci Autodesk Inventor.



3.1 Rozměry stanoviště

Vstupními rozměry, kterých jsem se při návrhu držel, jsou rozměry stolu, zejména pak poloha a rozměry drážek pro šrouby. Dále je potřeba respektovat pozici poloosy vůči stolu, kterou nelze měnit, zejména její výšku nad stolem při nulovém zalomení kloubu hřídele. Délka poloosy již tak významná není, jelikož v laboratořích na Julisce je k dispozici více různých poloos a díky přítomnosti drážek ve stolu je možné s celou konstrukcí manipulovat v axiálním směru poloosy. Základní rozměry stanoviště včetně pozice poloosy jsou znázorněny na Obr. 15. Kótované rozměry jsou v milimetrech. Rozměry stolu a pozice drážek poslouží především pro návrh spodní základny stanoviště. Pozice poloosy bude důležitá pro umístění samotné převodovky a součástí, které s ní budou spojeny.



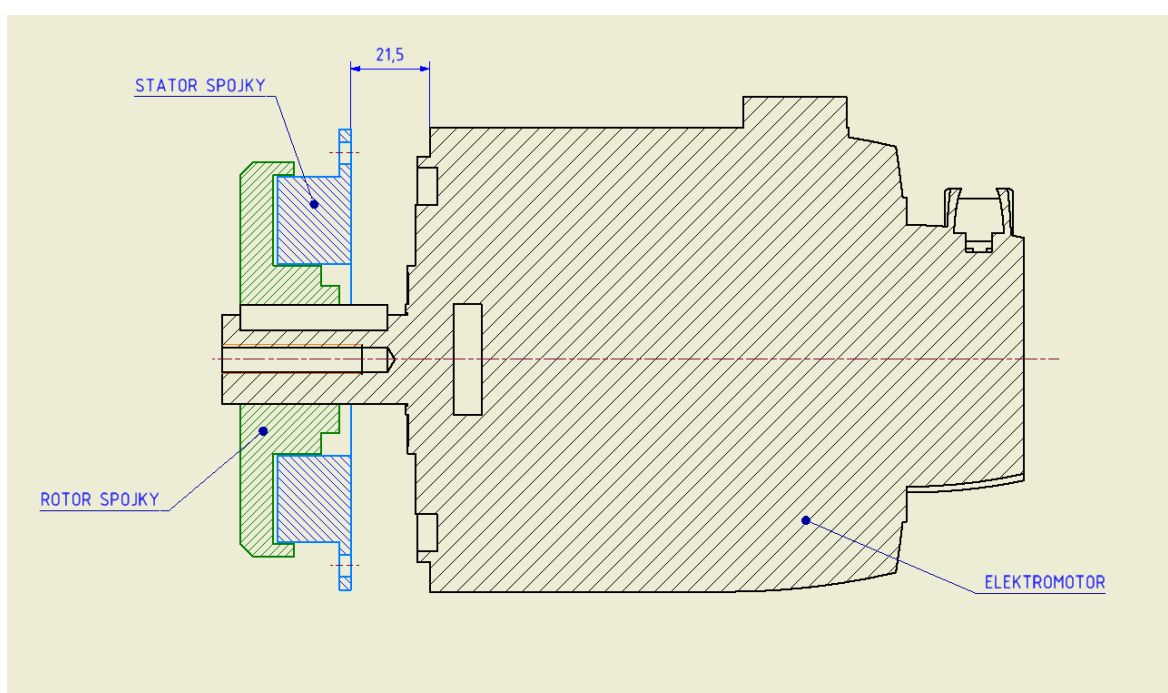
Obr. 15 – Rozměry stanoviště [Vlastní zdroj]

3.2 Umístění statorové části spojky a elektromotoru

Jak již bylo zmíněno v rešeršní části, zvolená spojka se skládá ze tří částí: ze statoru, rotoru a kotvy s listovou pružinou. Statorová část obsahující elektromagnet musí být pevně uchycena. Jejím středem bude procházet hřídel elektromotoru, která bude přes pero



přenášet točivý moment na rotorovou část spojky. Rovněž je tedy na hřídeli motoru nutné zamezit pohybu rotoru v axiálním směru, aby nedošlo ke kontaktu se statorem. Vzhledem ke konstrukčnímu řešení upevňování zvoleného elektromotoru se nabízí možnost návrhu jednoho dílu, na který budou obě součásti připevněny. Výchozím rozměrem je vzdálenost spojky od elektromotoru při současném využití co největší plochy pera, viz Obr. 16. Jinými slovy, jedná se o největší rozměr, se kterým můžu počítat při návrhu mezikusu. Vzhledem k potřebné tuhosti soustavy a pevnosti uchycení motoru je třeba aby byla tloušťka mezikusu co největší.



Obr. 16 – Poloha elektromotoru vůči spojce [Vlastní zdroj]

Při zvolené pozici spojky je z důvodu zaoblení pera zkrácena jeho činná délka, a tudíž jsem provedl kontrolní výpočty na otláčení boku pera a střih. Pro přenos momentu je zvoleno pero **8e7 x 7 x 40 ČSN 02 2562**, příslušné průměru hřídele $d_h = 24 \text{ mm}$. Při plném nasazení spojky na pero by byla činná délka pera 27 mm , pro maximalizaci prostoru mezi spojkou a motorem však byla zredukována na délku $l_a = 23 \text{ mm}$. Maximální moment elektromotoru je **24 Nm**. Dovolené napětí pro tlak a střih jsem vybral ze strojnických tabulek [12] podle materiálu pera 11 600.



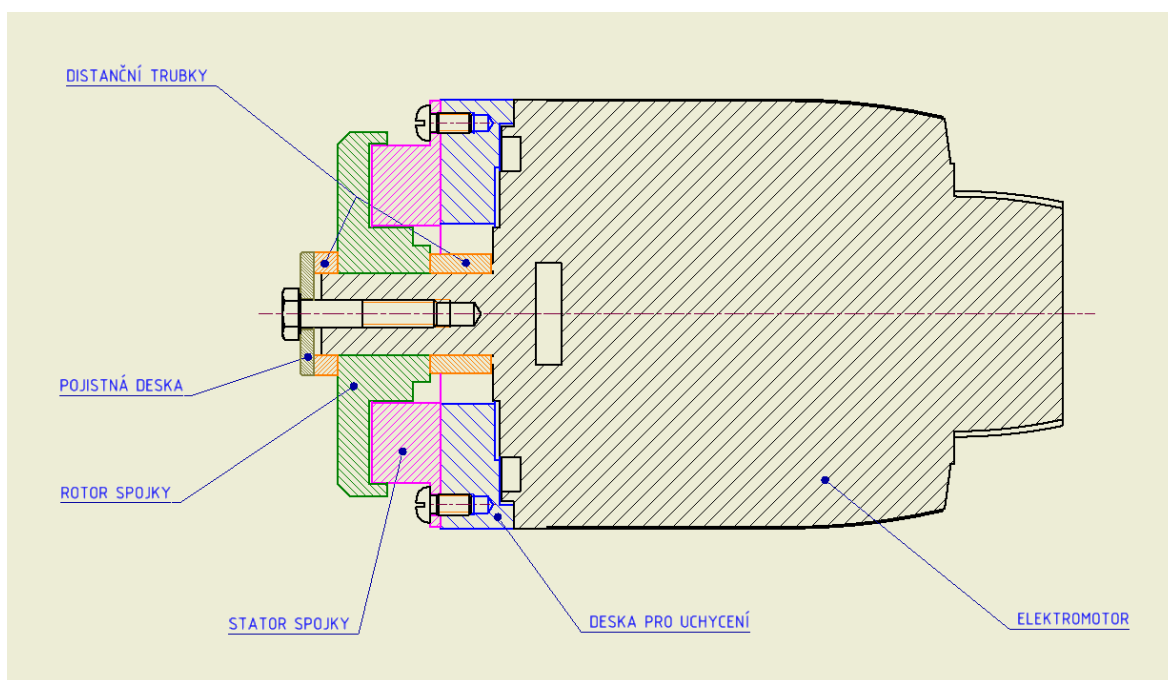
Kontrola otláčení boku zubů:

$$p = \frac{4 \cdot M_k}{d_h \cdot h \cdot l_a} = \frac{4 \cdot 24\,000}{24 \cdot 7 \cdot 23} = 24,85 \text{ MPa} \leq p_D = 110 \text{ MPa} \quad (9)$$

Kontrola na stříh:

$$\tau = \frac{2 \cdot M_k}{d_h \cdot b \cdot l_a} = \frac{2 \cdot 24\,000}{24 \cdot 8 \cdot 23} = 10,87 \text{ MPa} \leq \tau_D = 65 \text{ MPa} \quad (10)$$

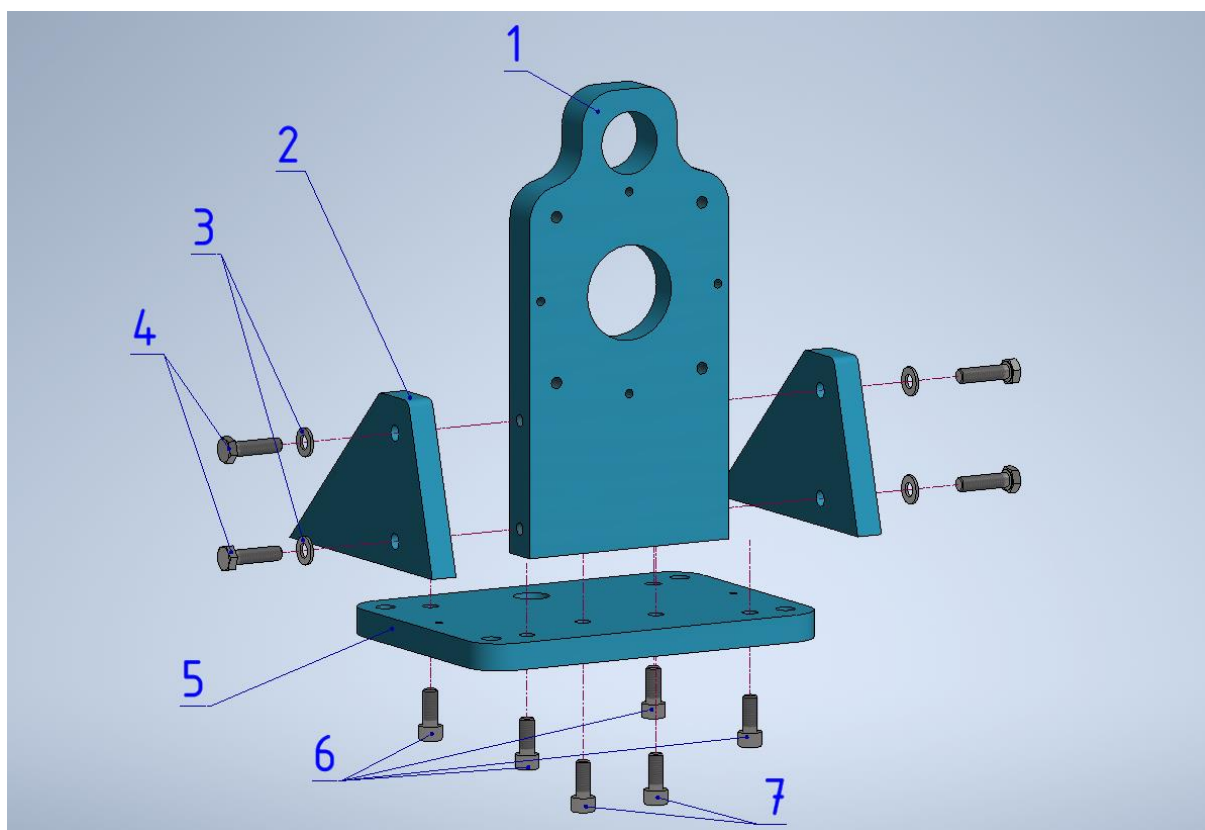
Uchytení motoru je řešeno pomocí čtyř šroubů M8 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Pro uchycení statorové části spojky jsou v katalogu předepsány čtyři šrouby M6. Nejprve jsem tedy navrhl frézovanou desku s příslušnými otvory pro šrouby a vybráním pro vystředění elektromotoru. V pozdější fázi návrhu sestavy jsem desku upravil a přidal otvor pro uchycení v případě manipulace, jelikož hmotnost je na sestavě rozložena nerovnoměrně. Zajištění axiálního posuvu statorové části spojky jsem vyřešil pomocí navržené distančních trubek, zajištěných pojistnou deskou a šroubem se šestihrannou hlavou, pro který je v motoru již zhotovený otvor (Obr. 17).



Obr. 17 – Axiální zajištění spojky [Vlastní zdroj]



Následně bylo potřeba vyřešit uchycení navržené desky ke stolu a vytvořit tak kompletní podstavec držící elektromotor. Zde se nabízely dvě varianty. První byla vytvořit podstavec spojený pomocí šroubů. Druhá varianta byla celý podstavec navrhnut jako jednotný svařovaný kus. Z důvodu jednodušší a levnější výroby a možné demontáže byla nakonec zvolena varianta podstavce spojeného šroubovými spoji. Desku propojující motor se spojkou jsem tedy upravil přidáním děr pro šrouby držící žebra podstavce, která se přichytí ke spodní desce podstavce. Spodní deska pak obsahuje průchozí díry pro uchycení k základně sestavy, jednu průchozí díry pro uchycení celé sestavy ke stolu a ze spodní strany také díry pro kolíky, které zajišťují pozici elektromotoru. Význam kolíků bude více přiblížen v pozdější části práce. Kompletace celého podstavce je znázorněna na obrázku (Obr. 18). K desce držící elektromotor (1) se pomocí šroubů s podložkami (3,4) přichytí z každé strany žebro (2). Žebra společně s deskou (1) se následně přišroubují pomocí šroubů (6,7) ke spodní desce (5).

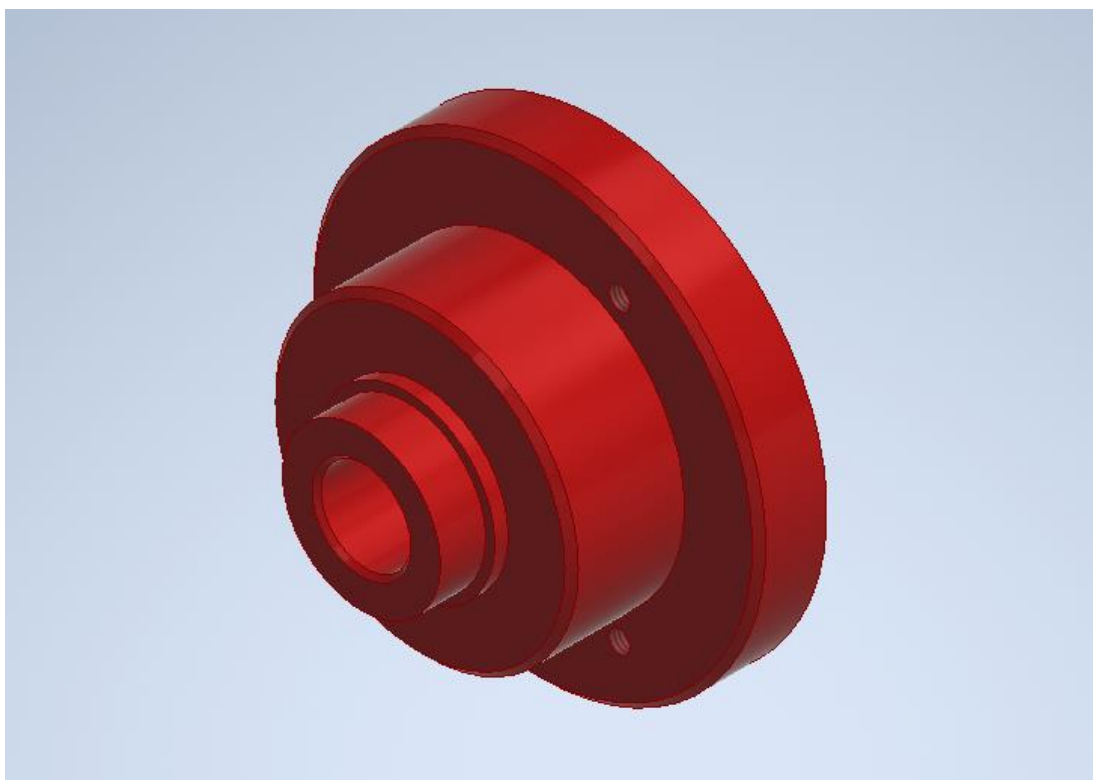


Obr. 18 – Kompletace podstavce [Vlastní zdroj]



3.3 Umístění kotvy spojky a snímače otáček

V předchozí části jsem objasnil návrh umístění statoru a rotoru spojky, zbývá tedy vyřešit uchycení kotvy a její propojení s převodovou skříní. Rovněž je na mezikus nutné zakomponovat magnetický kroužek snímače otáček. Pro uchycení kotvy spojky je výrobcem předepsané použití tří šroubů M5, dále je potřeba respektovat prostor pro nýty držící listovou pružinu kotvy, která zajišťuje návrat do původní pozice při rozpojení. Dle těchto kritérií jsem navrhl vhodný náboj (Obr. 19).

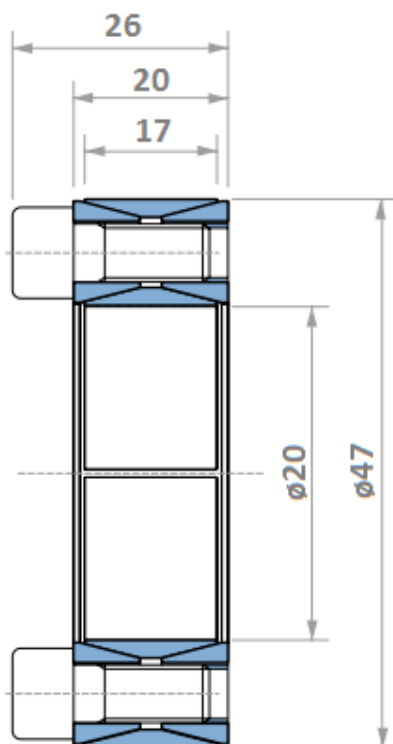


Obr. 19 – Náboj [Vlastní zdroj]

Vstupní hřídel převodovky, na níž bude díl nasazen, nedisponuje žádným drážkováním ani perem pro přenos točivého momentu. Uchycení bude tedy řešeno pomocí vhodného svěrného pouzdra. Vzhledem k délce převislého konce hřídele, a zároveň zachování dostatečného prostoru pro magnetický kroužek snímače otáček, bylo potřeba zvolit svěrné pouzdro menších rozměrů. Vybral jsem tedy pouzdro **Tollok TLK 200 – 20x47**, které přes své malé rozměry disponuje schopností přenést více než dostatečný točivý moment. Pro utažení pouzdra je výrobcem předepsáno použít osm šroubů M6 dle normy DIN 912. Utahovací moment je předepsán $17 Nm$. Přenesený točivý moment závisí na volbě tolerancí

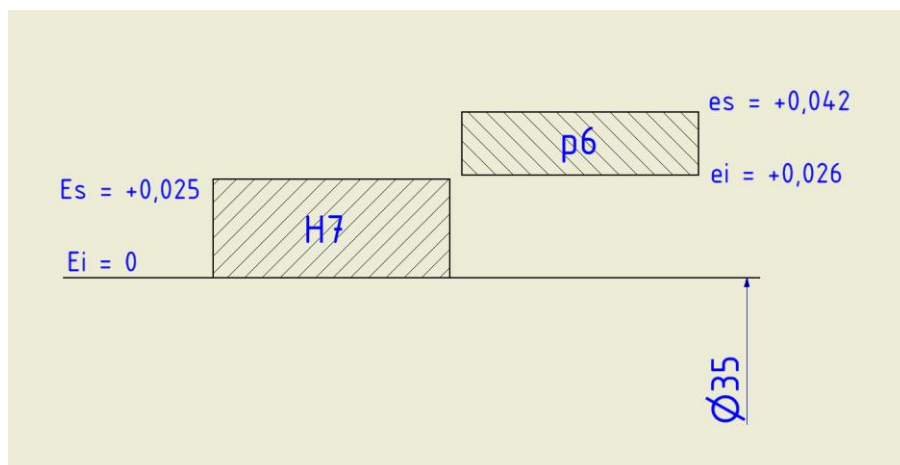


hřídele a náboje. Pro zvolené tolerance h7 pro hřídel a H7 pro náboj je pouzdro schopné přenést moment **370 Nm**. Rozměry svěrného pouzdra jsou znázorněny na Obr. 20.



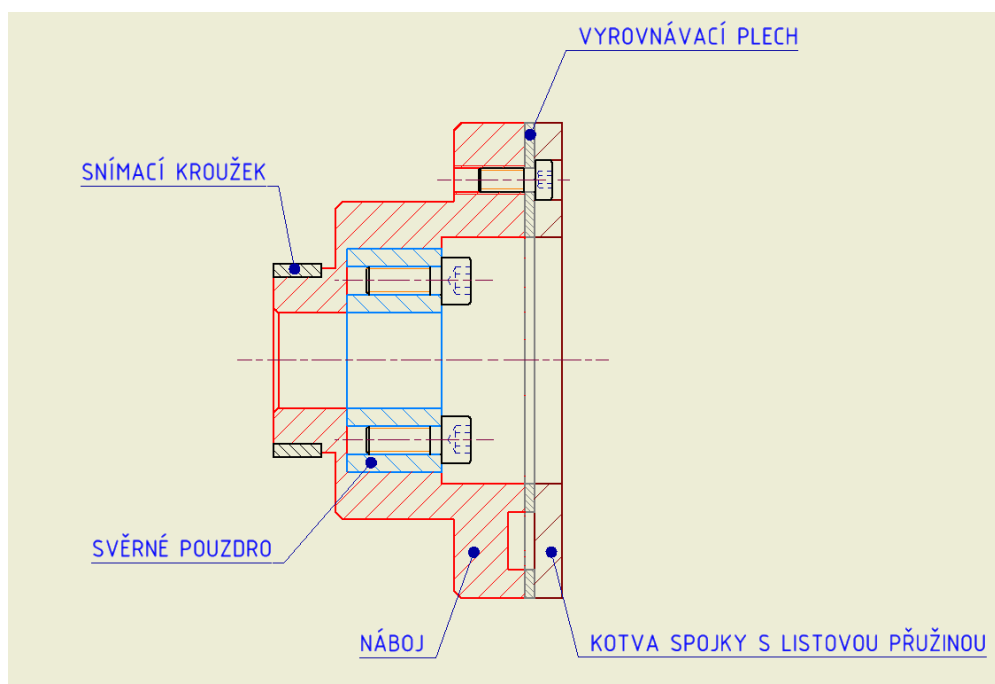
Obr. 20 – Svěrné pouzdro Tollok TLK200 [18]

Další funkcí, kterou musí navržený náboj splňovat je umístění magnetického kroužku snímače otáček. Pro uchycení kroužku je výrobcem předepsáno několik možností. Jedná se o možnost nalepení kroužku, zajištění pomocí matice či nalisování. V případě lepení kroužku je značná nevýhoda v nerovnoměrnosti rozložení lepidla a tím způsobené nesoustřednosti měřícího kroužku vůči náboji, což může mít za následek horší přesnost měření. V případě použití pojistné matice je značnou nevýhodou potřeba prostoru pro vytvoření závitu na náboji. To se tedy vzhledem k délce převislého konce vstupní hřídele jeví rovněž jako méně vyhovující. Poslední a nejjednodušší možností zbývá navržení náboje s dostatečným přesahem pro nalisování magnetického kroužku. Vybraný měřící kroužek PMIR7 má vnitřní průměr **35 mm** s tolerancí **H7**. Výrobcem je předepsáno nalisování za studena a z toho vychází volba výsledného uložení kroužku na náboji **$\varnothing 35$ H7/p6**. Toleranční pole uložení je znázorněno na Obr. 21.



Obr. 21 – Toleranční pole mezi nábojem a snímačem [Vlastní zdroj]

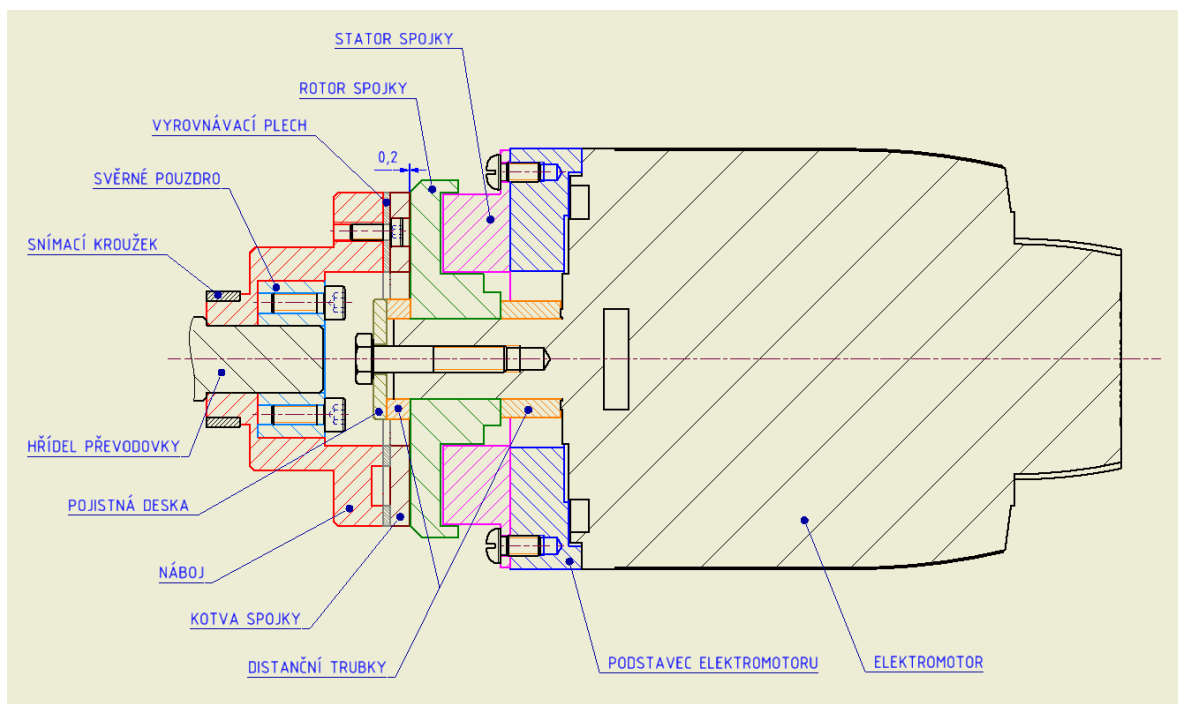
Na opačnou stranu navrženého náboje pak bude umístěna kotva spojky s listovou pružinou pomocí předepsaných šroubů. Mezi kotvou a rotorem spojky je výrobcem předepsána vzduchová mezera 0,2 mm. Zajištění takto přesné výroby celé sestavy je takřka nemožné, a tudíž je potřeba zajistit nastavení potřebné mezery po zjištění skutečných rozměrů během montáže celé sestavy. Mezi kotvou spojky a náboj tak bude umístěný vyrovnávací plech jehož základní tloušťka je 2,2 mm. Během montáže (popsané v kapitole 3.6) bude potřeba změřit skutečnou vzdálenost mezi rotorem a kotvou a zbrúšením přizpůsobit tloušťku plechu pro zachování požadované vzduchové mezery. Výsledná kompletace všech potřebných částí na náboji je zobrazena na Obr. 22.



Obr. 22 – Řez nábojem [Vlastní zdroj]

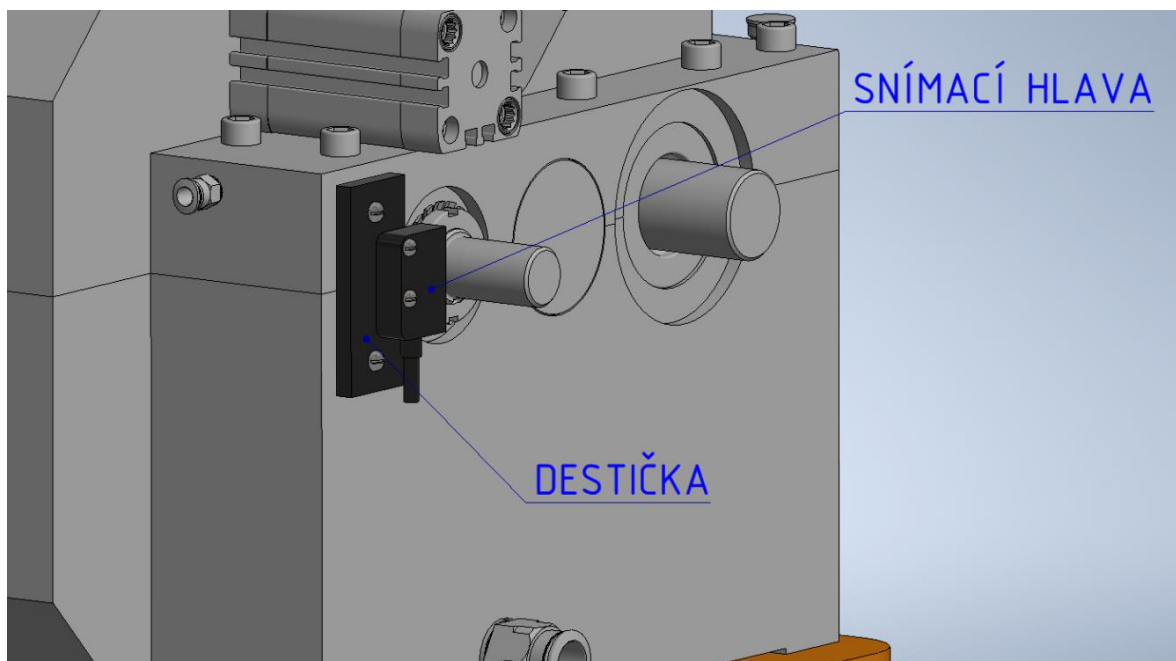


Celkové uspořádání jednotlivých částí je zobrazeno v řezu vedeném rovinou propojovaných hřídelí (Obr. 23).



Obr. 23 – Celkové uspořádání vnější synchronizace [Vlastní zdroj]

Pro kompletní vyřešení umístění snímače otáček je třeba zajistit umístění snímací hlavy. Snímací hlava PMIS4 má předepsané uchycení pomocí dvou šroubů M3,5, přičemž je potřeba zachovat vzdálenost hlavy od magnetického kroužku v rozmezí 0,1 až 0,8 mm. Původní myšlenka způsobu uchycení hlavy snímače byla vytvořit podstavec, který by byl připevněn k podstavci elektromotoru či k samotné základní konstrukci. Jako ideálnější řešení se však ukázala možnost montáže snímací hlavy přímo na převodovou skříň. V místě, kde je potřeba snímač na převodovku uchytit, se nenachází žádné kanálky pro olejový oběh ani šrouby spojující víko s vanou skříně. Do převodovky tudíž budou na požadované pozici vyvrtány dvě díry se závity, na které se uchytil destička s připevněnou snímací hlavou. V průchozích otvorech pro šrouby je navržena větší vůle, která zajistí možnost seřízení požadované vzdálenosti hlavy od magnetického kroužku. (Obr. 24)

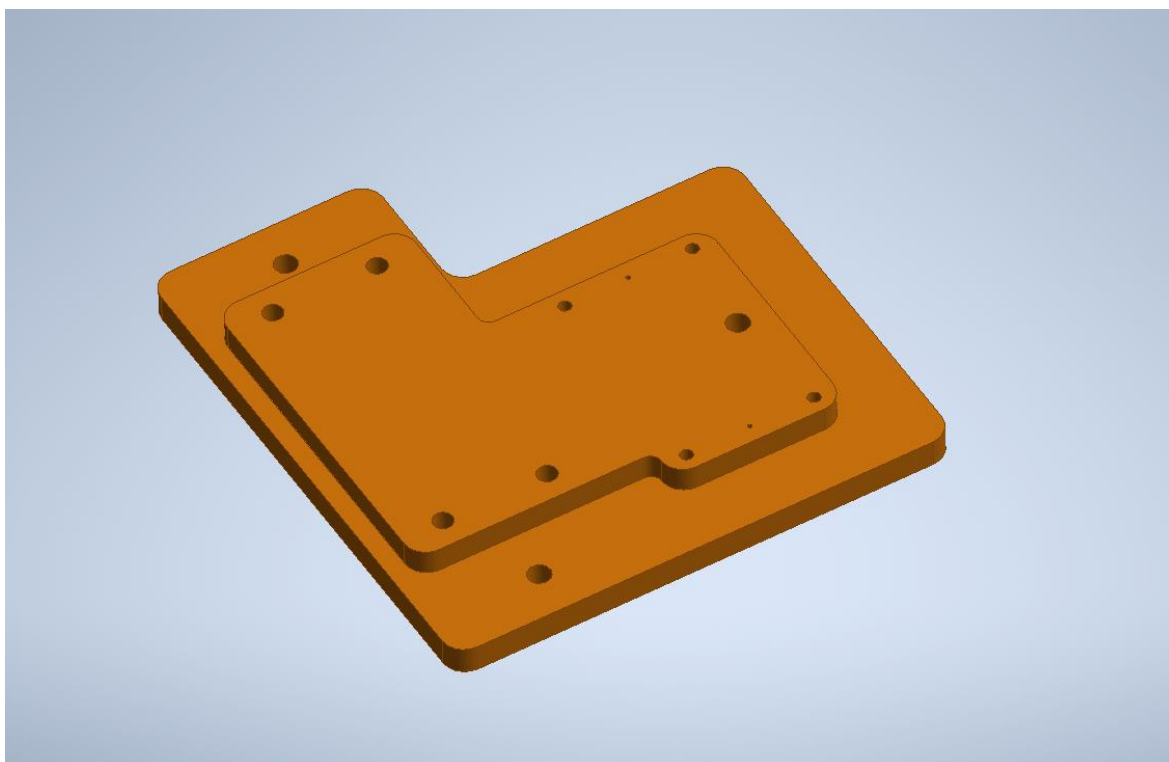


Obr. 24 – Uchycení snímací hlavy [Vlastní zdroj]



3.4 Základna sestavy

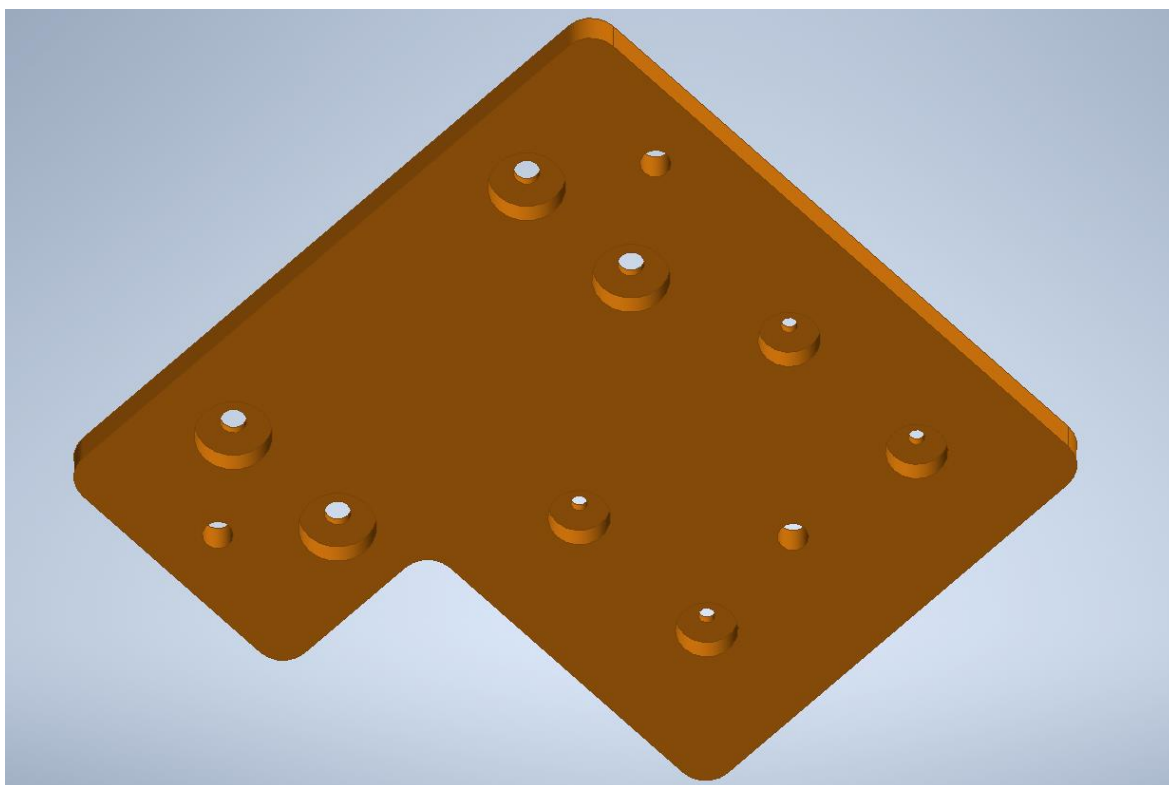
Téměř poslední součástí, kterou bylo třeba navrhnout, je samotná základna držící převodovku společně s vnější synchronizací pohromadě. Při návrh jsem nejprve zvažoval dvě možnosti. První byla vytvoření základny ze svařených ocelových profilů, popřípadě tyčí. Druhá možnost pak byla základnu navrhnout jako ocelovou desku. Vzhledem k nutnosti dodržení minimálního zalomení kloubového hřídele, vedoucího k velkému setrvačníku, je ideální výška základny 48 mm . Výroba základny z normalizovaných profilů je vzhledem k počtu výrobních operací poněkud komplikovanější možností. Jako jednodušší se tedy jeví výroba základny z ocelové desky. Při požadované tloušťce 48 mm by však měla základna vyrobená z jednoho kusu oceli vysokou hmotnost a bylo by obtížnější jí obrobit. Navrhl jsem ji tedy jakožto svařenec dvou tenčích desek o tloušťkách 25 mm (Obr. 25), jejichž čelní plochy se po svaření zarovnají na celkový požadovaný rozměr 48 mm . Všechny díry pro šrouby v základně jsou rovněž navrženy jakožto průchozí díry bez závitů. Základnu je tak možné vytvořit vypálením na laseru a minimalizuje se tak počet potřebných výrobních operací.



Obr. 25 – Základna sestavy [Vlastní zdroj]



Spodní deska má navržené čtyři díry pro upevnění převodovky pomocí šroubů M16, dále čtyři díry pro upevnění podstavce elektromotoru pomocí šroubů M10 a tři díry na uchycení ke stolu pomocí šroubů M18. Šrouby pro uchycení převodové skříně a pro uchycení elektromotoru budou do základny zapuštěny, je zde tedy vytvořen dostatečný prostor pro příslušné nástrčné klíče (Obr. 26).



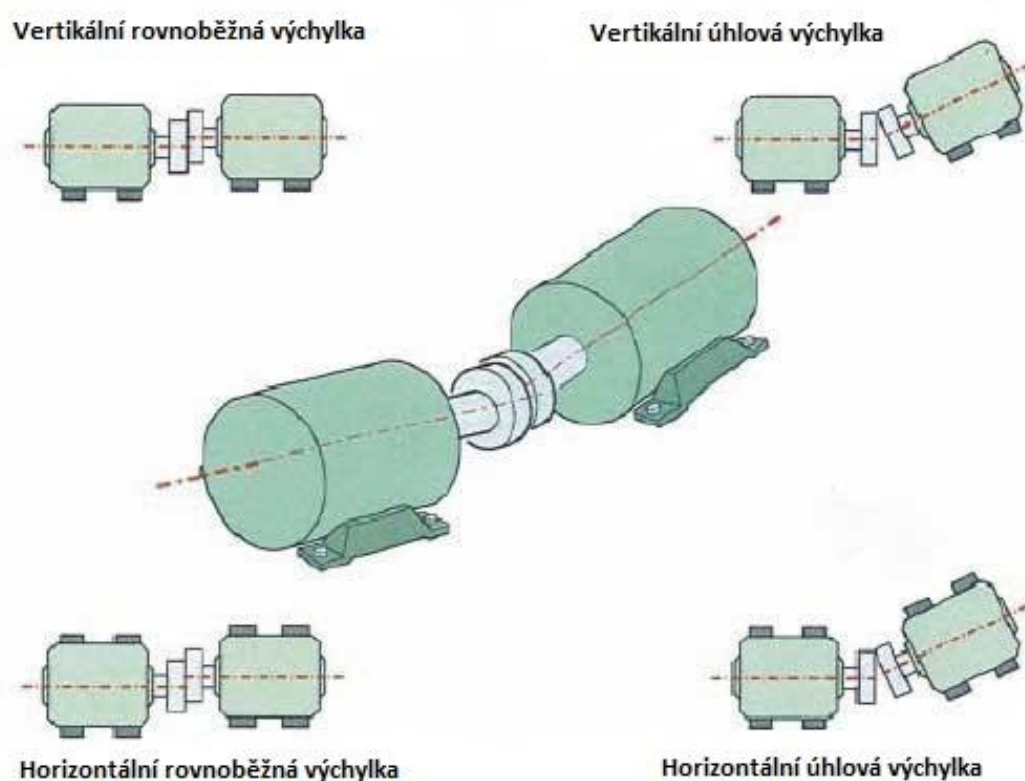
Obr. 26 – Spodní část základny [Vlastní zdroj]

Vrchní část základny má rovněž otvory pro šrouby na uchycení skříně a elektromotoru. Na rozdíl od spodní části je zde pouze jeden otvor na šroub pro uchycení ke stolu a dva otvory pro poziční kolíky podstavce elektromotoru.



3.5 Zajištění sousosti

Pro správné fungování elektromagnetické spojky, respektive pro prevenci jejího poškození, je nutné dodržet co nejpřesnější sousost hřídele elektromotoru a hřídele převodovky. K vyosení hřídelí může dojít jak v horizontální, tak vertikální rovině, přičemž se může jednat o vychýlení rovnoběžné či úhlové (Obr. 27). Obecně se většinou jedná o kombinaci těchto možností vyosení. [1]

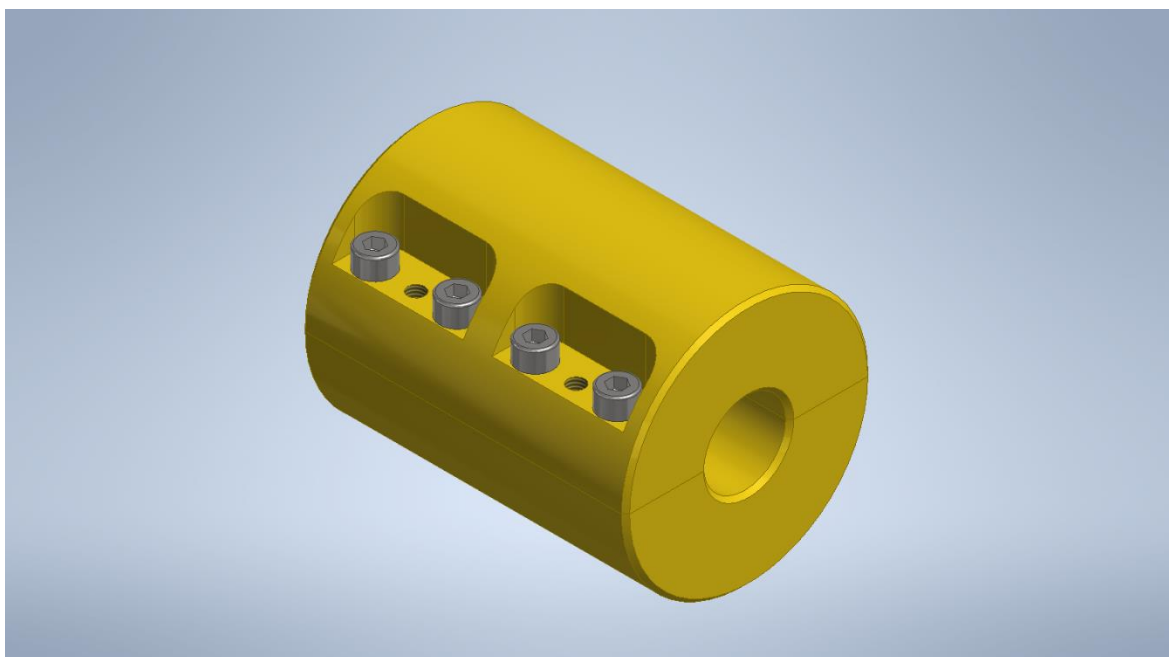


Obr. 27 – Možnosti vychýlení os [1]

Vzhledem k malé vzduchové mezeře mezi rotujícími částmi spojky je potřeba zamezit zejména úhlové výchylky, které by mohly vést k nežádoucímu dotyku rotujících ploch a poškodit tak spojku. Aplikace měřících prostředků jako je laser či mechanické měřky se vzhledem k rozměrům stanoviště nedá příliš dobře realizovat. Na dostatečnou preciznost výroby všech dílů se také nelze spoléhat. Je tedy potřeba navrhnout způsob, kterým se při montáži sestavy docílí seřízení sousosti.

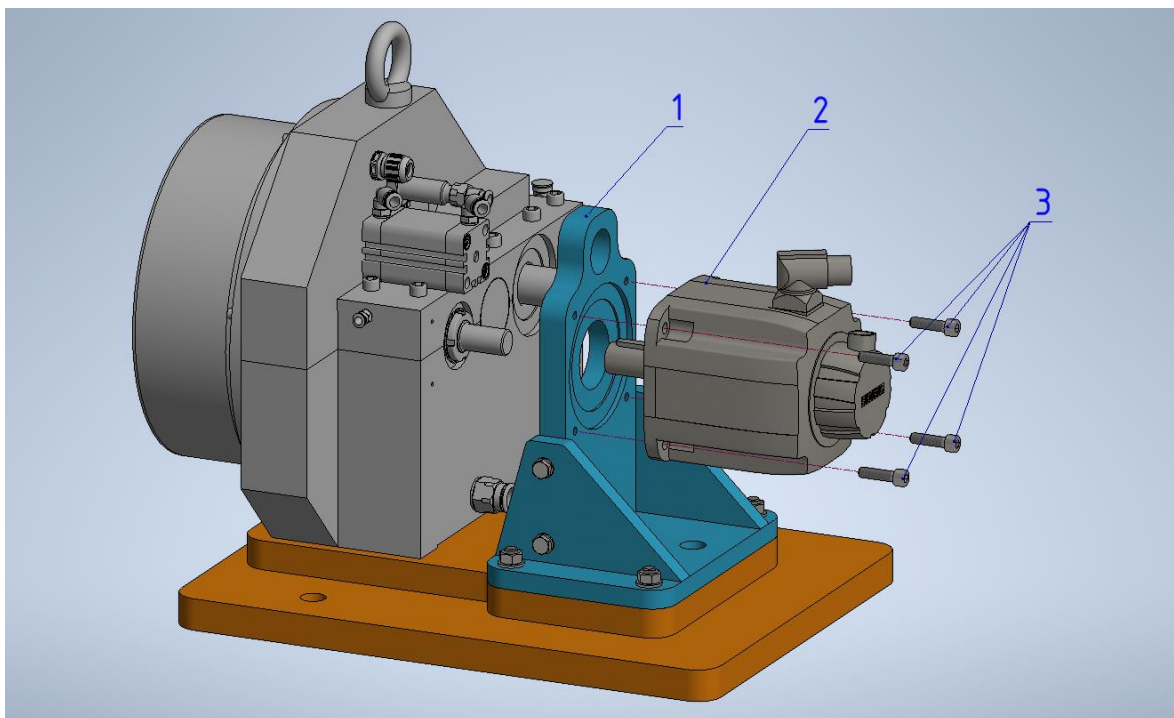


Pro zajištění souososti během montáže jsem navrhl montážní přípravek (Obr. 28) podobný korýtkové spojce. Tento přípravek se skládá ze dvou částí navzájem spojených z každé strany čtyřmi šrouby M5. Na každé části z obou polovin jsou rovněž umístěny dva slepé závity, které neprochází do druhé poloviny. Ty závity slouží pro případné usnadnění oddělení jednotlivých částí.

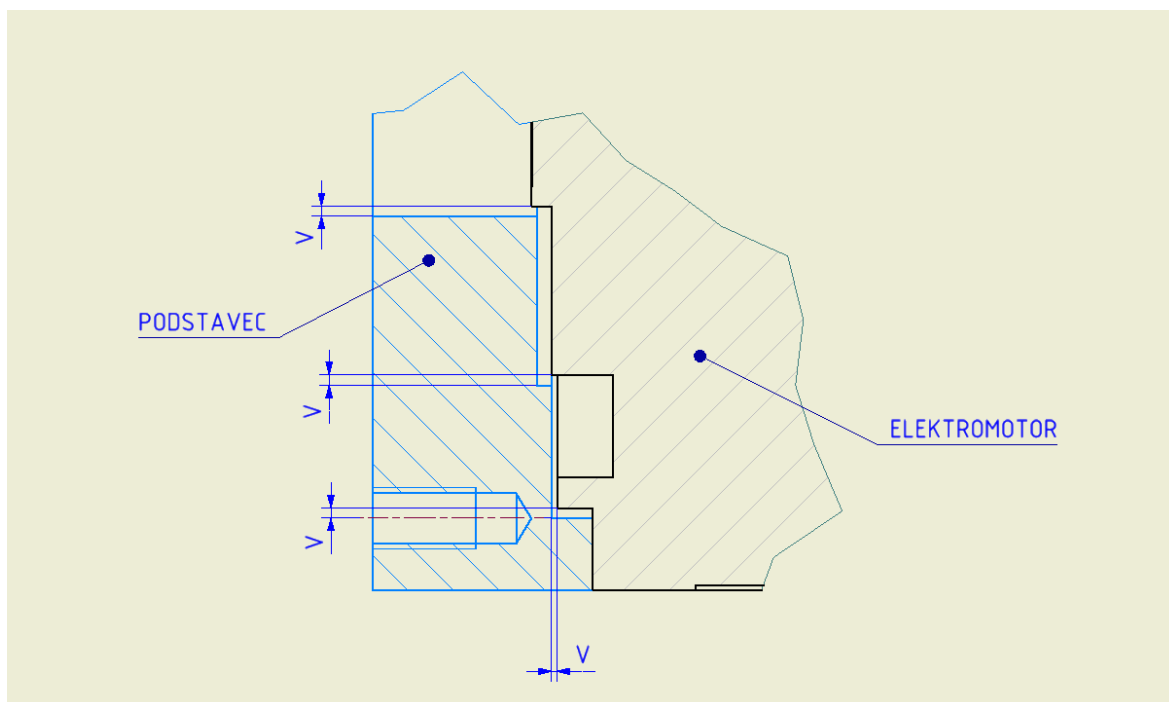


Obr. 28 – Montážní spojka [Vlastní zdroj]

Zajištění souososti pomocí této spojky probíhá během procesu montáže. Proces montáže sestavy je podrobněji popsán v následující kapitole. Nyní se však zaměřím na stav, kdy je na základní desce připevněna převodová skříň a podstavec elektromotoru. Na podstavec (Obr. 29 – 1) je po montáži k základní desce nasezen elektromotor (Obr. 29 – 2). Šrouby držící elektromotor (Obr. 29 – 3) se však neutáhnou, jelikož deska pro uchycení elektromotoru je navržena s vůlí v dosedacích plochách, které středí pozici elektromotoru (Obr. 30 – vůle vyznačena písmenem V). Podobná vůle je rovněž v otvorech pro šrouby držící elektromotor. Ten tak má určitou volnost, díky které ho můžeme pomocí montážní spojky vyrovnat do jedné osy s hřídelí převodovky.



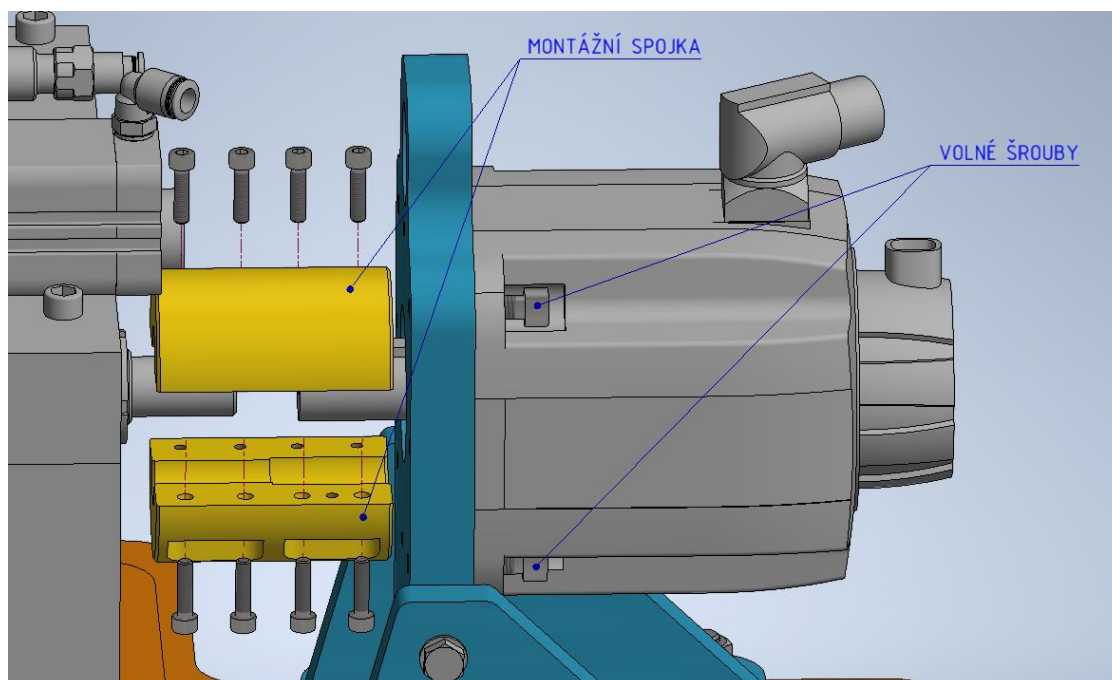
Obr. 29 – Montáž elektromotoru na podstavec [Vlastní zdroj]



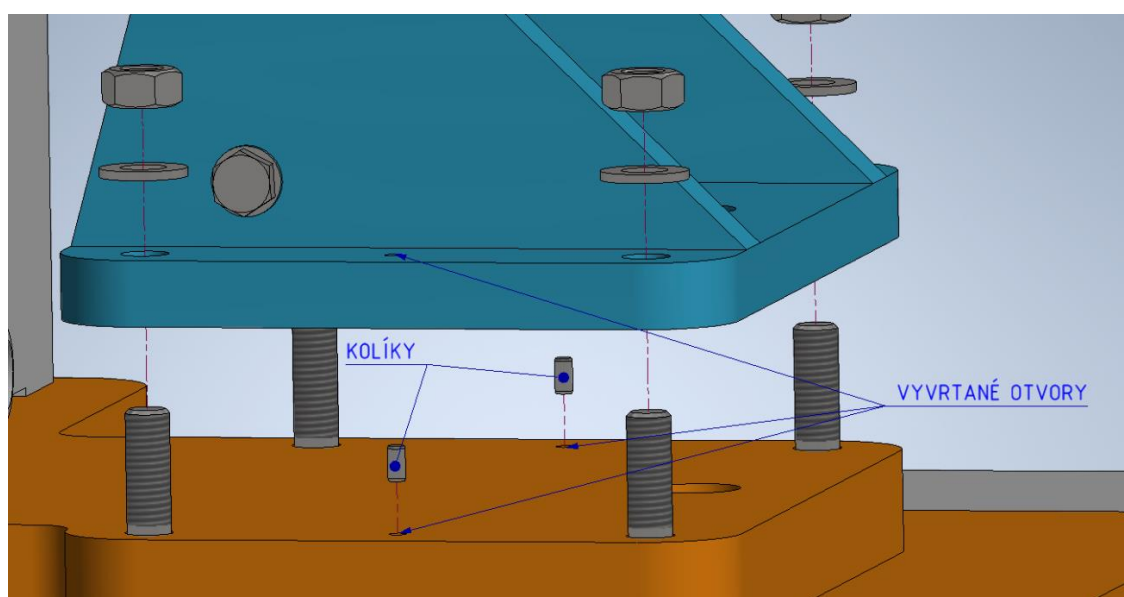
Obr. 30 – Detail vůle ve středících plochách podstavce [Vlastní zdroj]



Po aplikaci montážní spojky (Obr. 31), která uchytlí oba hřídele a srovná je do jedné osy, se utáhnou šrouby elektromotoru. Následně bude potřeba vyvrtat dva otvory skrze desku podstavce do základny sestavy. Otvory poslouží pro umístění kolíků **4h8 x 8 dle ISO 2338** (Obr. 32). Poté se odebere montážní spojka. Celý podstavec s elektromotorem se následně odšroubuje od základny a připevní se na něj stator s rotorem spojky. Na hřídel převodové skříně se současně připevní ostatní potřebné součásti. Díky kolíkům zůstane pozice podstavce i po opětovné montáži stejná.



Obr. 31 – Aplikace montážní spojky [Vlastní zdroj]



Obr. 32 – Kolíky pro určení pozice podstavce [Vlastní zdroj]

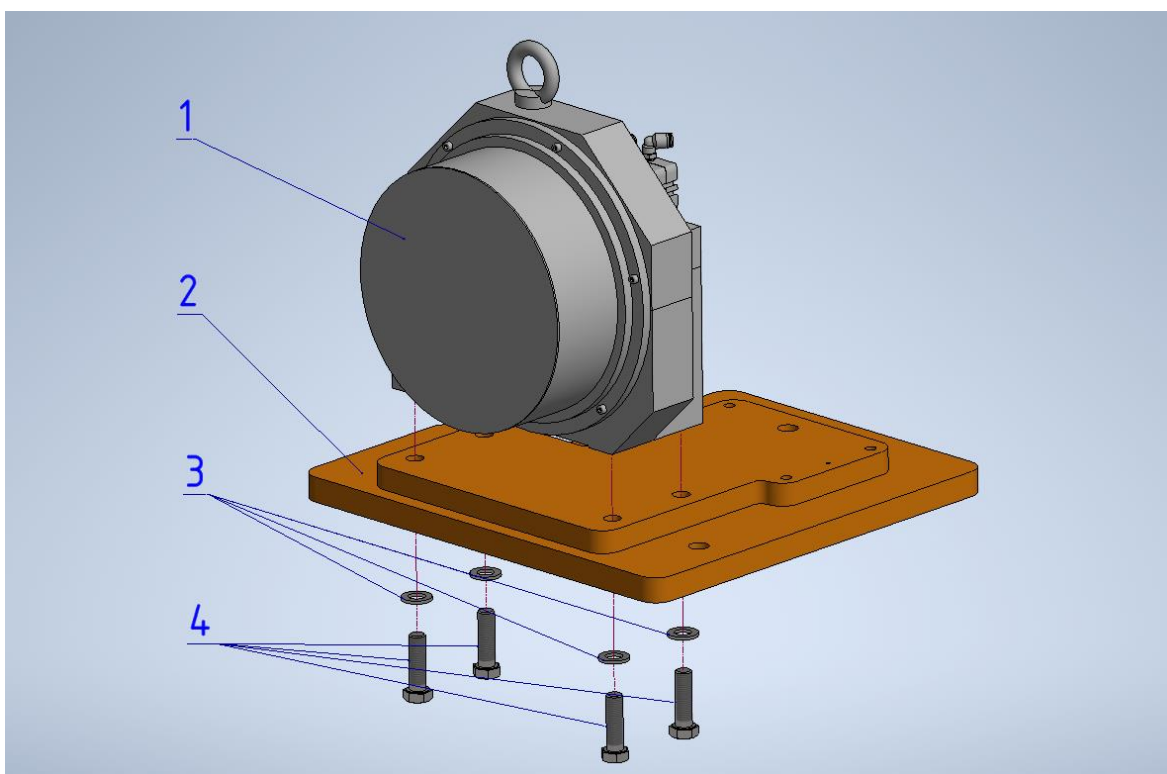


3.6 Montáž sestavy

Pro demonstraci splnění požadavku kompletní smontovatelnosti sestavy uvedu v této části podrobný postup montáže.

V první řadě je potřeba zkompletovat podstavec elektromotoru (kapitola 3.2), jelikož s ním se v rámci sestavy bude dále manipulovat pouze jako s celkem. Průběh celé montáže je tedy sepsán v následujících několika krocích:

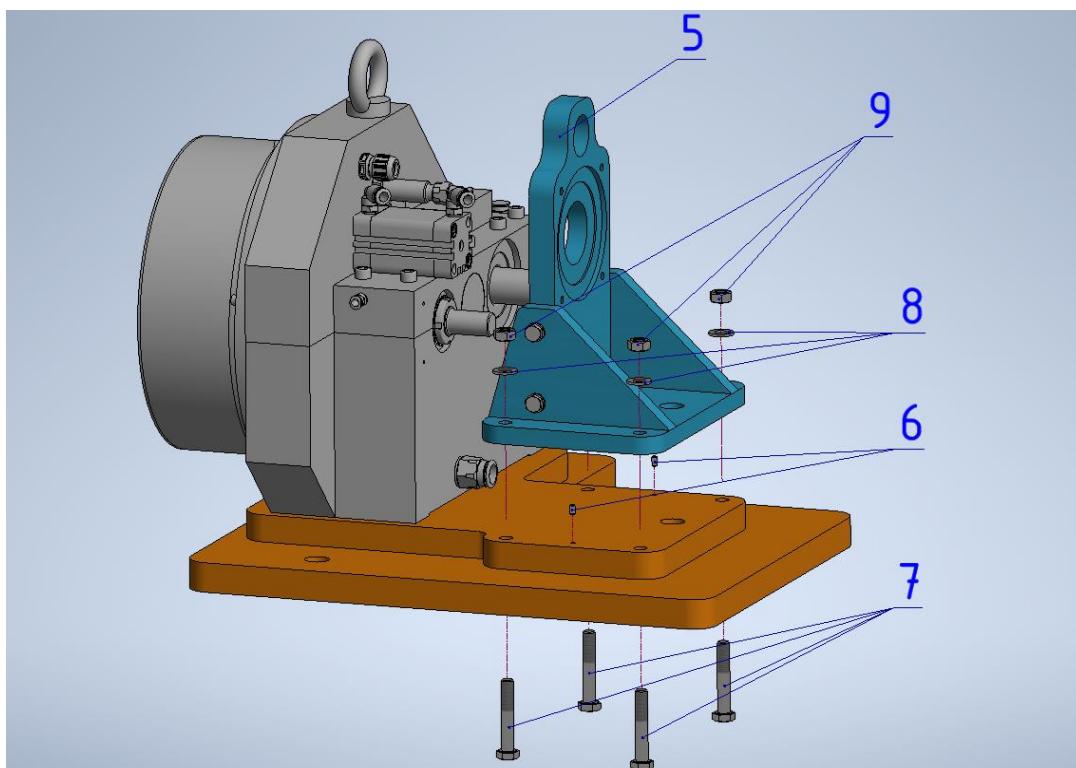
1. Na základní desku (2) se mimo stanoviště umístí převodová skříň (1), která se upevní pomocí čtyř šroubů M16 (4), podložených příslušnými podložkami (3). (Obr. 33)



Obr. 33 – Montáž – Uchycení převodové skříně [Vlastní zdroj]

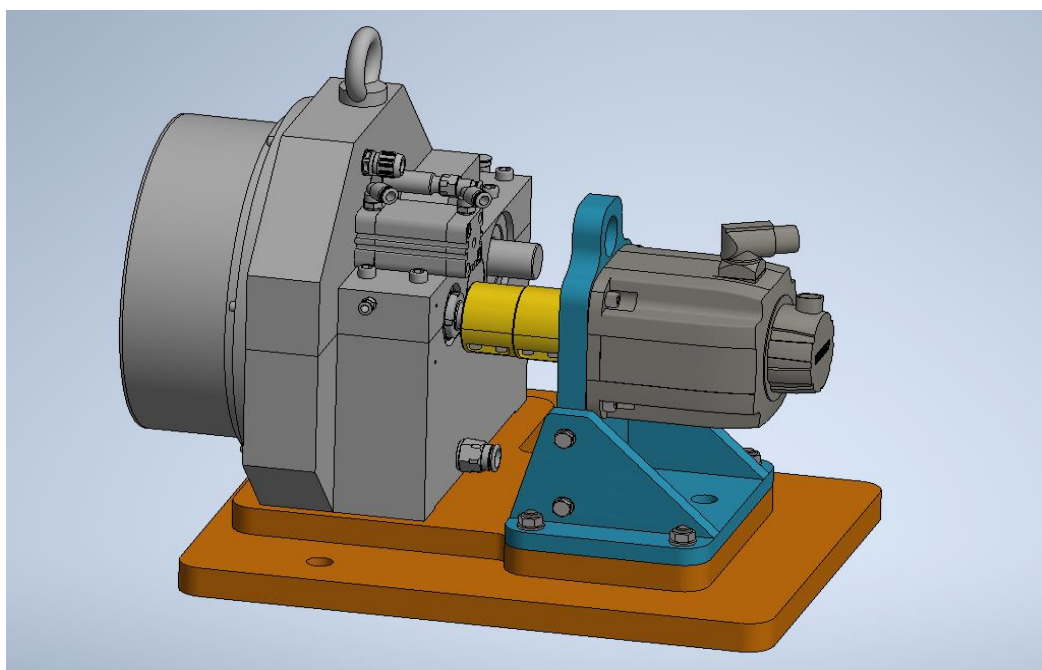


2. Na základní desku se umístí kolíky (6), které udají pozici podstavce elektromotoru (5), uchyceného čtyřmi šrouby M10 (7), zajištěného příslušnými maticemi s podložkami (8, 9). (Obr. 34)



Obr. 34 – Montáž – Uchycení podstavce elektromotoru [Vlastní zdroj]

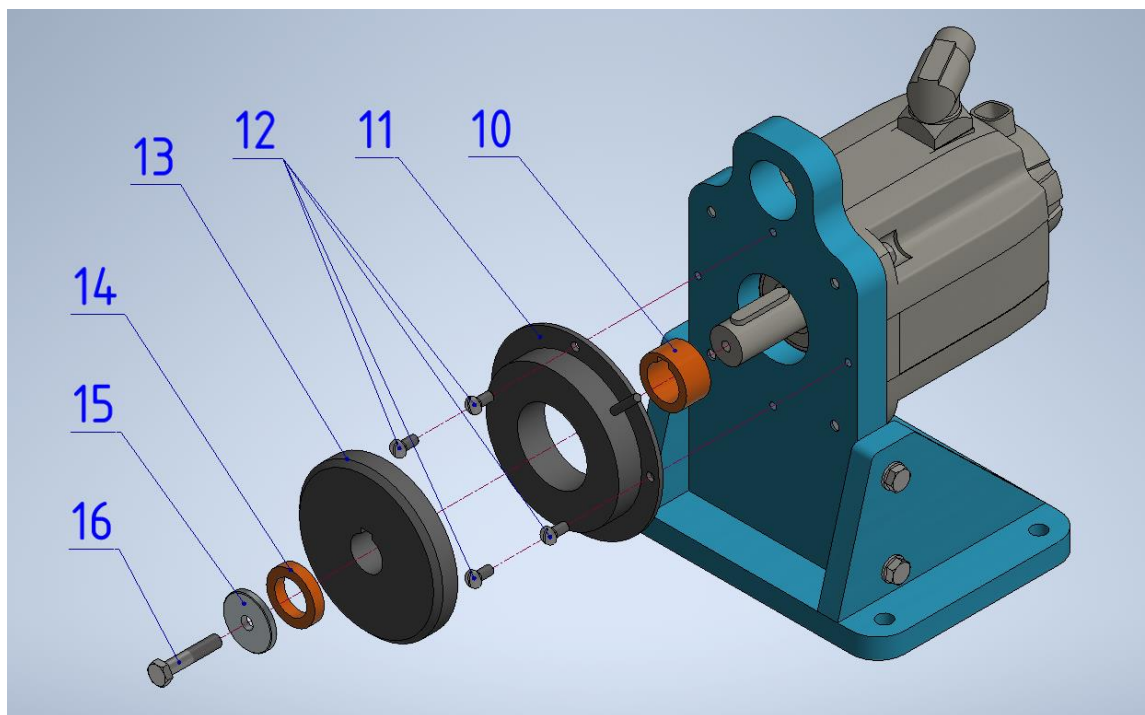
3. Na podstavec se přichytí elektromotor a provede se seřízení souososti (Obr. 35), popsané v kapitole 3.5, včetně vyvrtání otvorů pro kolíky.



Obr. 35 – Montáž – Seřízení souososti [Vlastní zdroj]

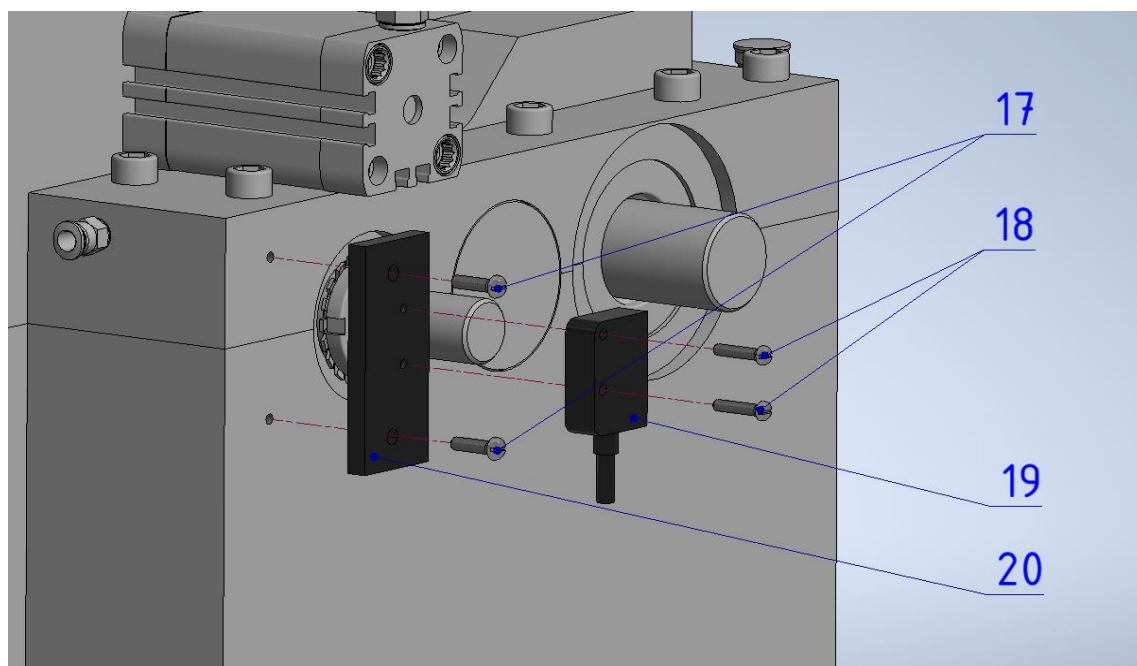


4. Po seřízení sousosti bude podstavec s elektromotorem opět odmontován od základní desky, a bude na něj pomocí čtyř šroubů M6 připevněn stator spojky (11). Na hřídel elektromotoru se umístí rotor spojky (13), axiálně zajištěný distančními trubkami (10, 14), pojistnou deskou (15) a šroubem M8 (16). (Obr. 36)



Obr. 36 – Montáž – Uchycení spojky na elektromotor [Vlastní zdroj]

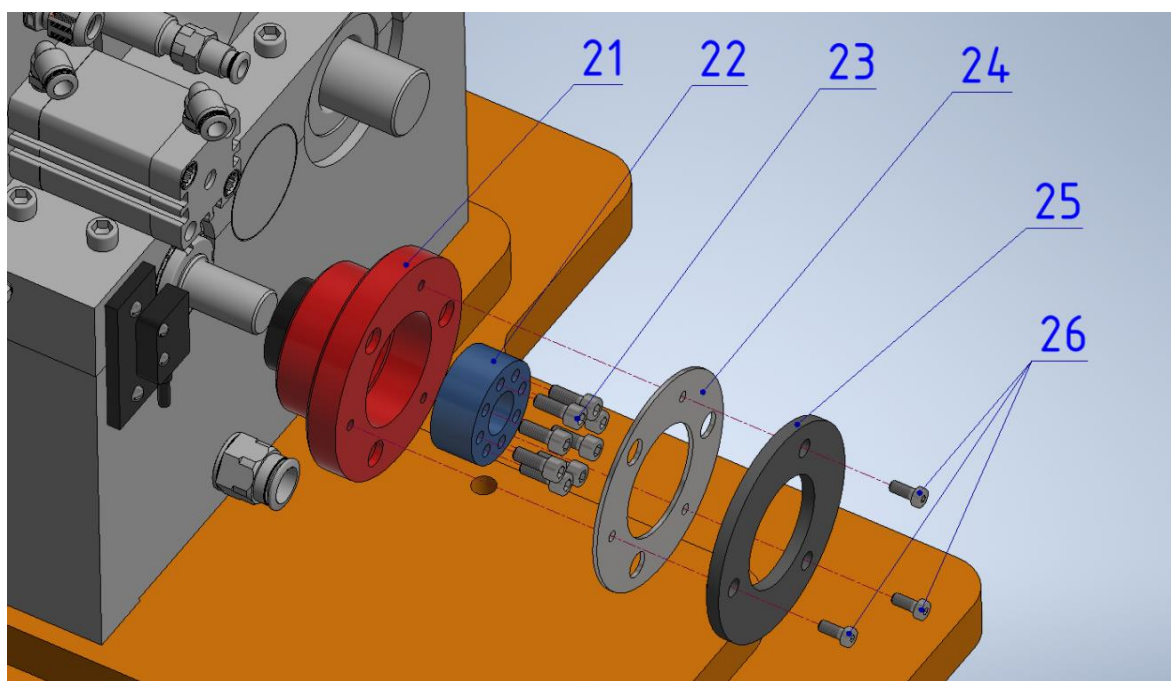
5. Na převodovou skříň se umístí destička (20), připevněná dvěma šrouby M4 (17), společně se snímací hlavou (19), připevněnou dvěma šrouby M3,5 (18). (Obr. 37)



Obr. 37 – Montáž – Uchycení snímací hlavy [Vlastní zdroj]

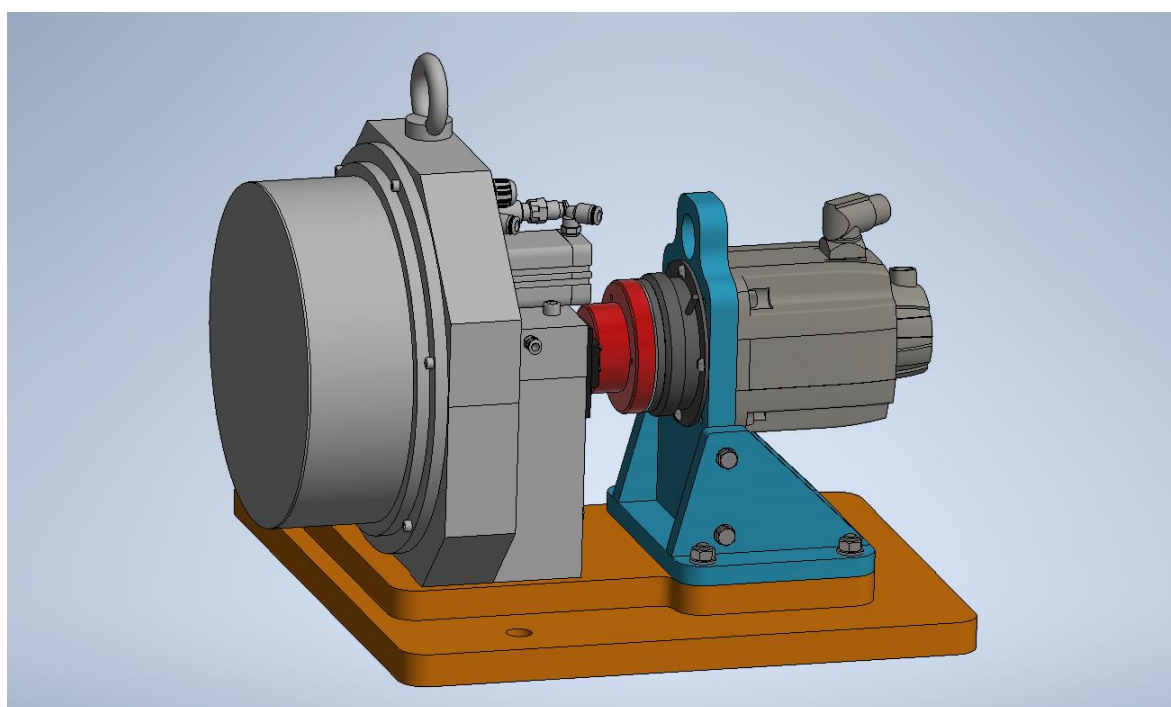


6. Na vstupní hřídel převodové skříně se pomocí svěrného pouzdra (22) umístí náboj s nalisovaným magnetickým kroužkem (21), pouzdro se zajistí osmi šrouby M6 (23). Na náboj se pomocí tří šroubů M5 (26) připevní kotva spojky s listovou pružinou (25) společně s vyrovnávacím plechem (24). (Obr. 38)



Obr. 38 – Montáž – Uchycení náboje s kotvou spojky [Vlastní zdroj]

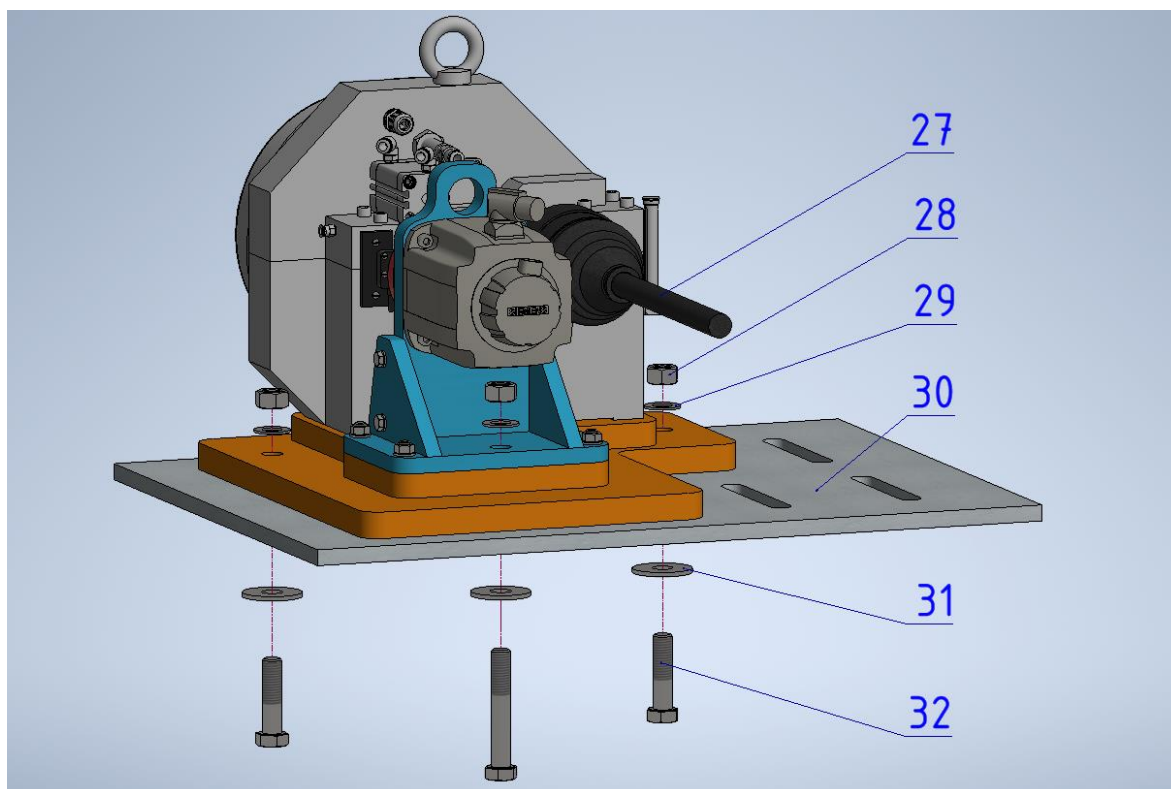
7. K základně se opět do pozice určené kolíky přichytí podstavec s elektromotorem, statorem a rotorem spojky. (Obr. 39)



Obr. 39 – Montáž – Sestava vnější synchronizace [Vlastní zdroj]



8. Kompletní sestava se pomocí závěsných ok přemístí na stůl zkušebního stanoviště (30), kde se na výstupní hřídel převodovky připevní tenzometrická příruba společně s kloubovým hřídelem (27) vedoucím k velkému elektromotoru. Celá sestava je na stole zajištěna pomocí tří šroubů M18 (32) s podložkami (29,31), utažených maticemi (28). (Obr. 40)



Obr. 40 – Montáž – Upevnění sestavy na stanoviště [Vlastní zdroj]

Při prvotní montáži bude potřeba kroky 6 a 7 provést dvakrát. Krok 6 nejprve bez vyrovnávacího plechu, aby se během kroku 7 změřila skutečná vzduchová mezera mezi rotorem a kotvou spojky. Vyrovnávací plech navržený s větší tloušťkou se následně zbrousí na požadovaný rozměr. Poté se kroky 6 a 7 provedou znovu, tentokrát již s návazností na finální krok 8.



4 ZÁVĚR

Navrhl jsem kompletní sestavu vnější synchronizace pro experimentální převodovku, sloužící pro testování synchronizačních spojek. Pro zajištění vnější synchronizace jsem v první části práce na základě sumarizace potřebných informací vybral vhodné komponenty, jejichž výběr jsem řádně odůvodnil a uvedl jsem rovněž jejich základní parametry. Pro jejich umístění na stanoviště jsem navrhl potřebné součásti, které splňují požadované vlastnosti jako je dostatečná tuhost či možnost kompletní montáže a demontáže. Celé mnou navržené řešení rovněž splňuje požadavek jednotnosti sestavy. Po montáži je tedy možné s převodovkou manipulovat společně s vnější synchronizací, což může být užitečné například při nutnosti využití stolu stanoviště pro jiné účely. Pro výrobu jednotlivých částí jsem vypracoval kompletní technickou dokumentaci, včetně výkresu celé sestavy, doplněné kusovníkem. Dokumentace je společně s katalogy kupovaných komponent dodaná v příloze.



Použité značení

Značka	Význam	Jednotka
ω_s	Úhlová synchronní rychlost	[rad/s]
ω	Úhlová rychlost napájecího napětí	[rad/s]
p_p	Počet pólpárů	[-]
f	Frekvence napájecího napětí	[Hz]
s	Skluz	[-]
ω_m	Mechanická úhlová rychlost	[rad/s]
n_s	Synchronní otáčky	[ot./min]
n	Otáčky	[ot./min]
L	Vlastní indukčnost	[H]
N	Počet závitů cívky	[-]
R_m	Magnetický odpor	[Ω]
R_{Fe}	Feromagnetický odpor	[Ω]
R_V	Odpor vzduchové mezery	[Ω]
C	Kapacita deskového kondenzátoru	[F]
ε	Permitivita dielektrika	[F · m ⁻¹]
S	Obsah překrytí desek	[m ²]
l	Vzdálenost mezi deskami	[m]
U_H	Hallovo napětí	[V]
K_H	Hallova konstanta	[m ³ ·C ⁻¹]
I_P	Proud procházející polovodičem	[A]
B	Magnetická indukce	[T]
θ	Poloha vektoru magnetické indukce	[rad]
d	Tloušťka polovodičové vrstvy	[m]
p	Tlak	[MPa]
p_D	Dovolený tlak	[MPa]
M_k	Točivý moment	[N·mm]
d_h	Průměr hřídele	[mm]
h	Výška pera	[mm]
l_a	Činná délka pera	[mm]
τ	Smykové napětí	[MPa]
τ_d	Dovolené smykové napětí	[MPa]
b	Šířka pera	[mm]



Použitá literatura

- [1] *Alignment, alignment values, alignment methods, alignment in relation to thermal growth, alignment in relation to journal bearings, alignment tool* [online]. [cit. 2021-7-5]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/34128511/alignment-alignment-values-alignment-methods-alignment-in-relation-to-thermal-growth-alignment-in-relation-to-journal-bearings-alignment-tool?dti=0&pnid=13358&lc=en-US>
- [2] BENDA, Tomáš. *Návrh a realizace bezkontaktního otáčkoměru*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. 5. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00046-7.
- [4] Clutches. *Machine Design* [online]. 2002, 15.11.2002 [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21812660/clutches>
- [5] Hallův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>
- [6] HOBLÍK, Jan. *Zkušební stanoviště pro testování synchronizačních spojek*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT Praha. Vedoucí práce Ing. Jiří Pakosta.
- [7] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 2. vydání. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0025-X.
- [8] *Inkrementální magnetický enkodér PMIS4/PMIR7* [online]. [cit. 2021-6-20]. Dostupné z: <https://www.rem-technik.cz/senzorika/senzory-pro-mereni-uhlu/inkrementalni-magneticky-enkoder-pmis4-pmir7-314.html>
- [9] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ*. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02138-6.
- [10] KOČMAN, Stanislav. *Synchronní stroje*. FEI VŠB - TU Ostrava, 2000.
- [11] KUMAR, Amrit. Clutch: Definition, Working Principle, Function, Types, Advantages, Disadvantages & Applications. *Learn Mechanical* [online]. India, 2019 [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: <https://learnmechanical.com/clutch/>
- [12] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [13] *Motor s kroužkovou kotvou* [online]. [cit. 2021-6-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13185905-Motor-s-krouzkovou-kotvou-motor-s-krouzkovou-kotvou-indukcni-motor-princip-jeho-cinnosti-je-stejny-jako-u-motoru-s-kotvou-nakratko.html>
- [14] Photoelectric encoder. *ElectroPeak* [online]. [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://electropeak.com/learn/wp-content/uploads/2021/02/Photoelectric-Encoder-Speed-Sensor-Working-Principle.jpg>



- [15] *SFM VAR00* [online]. [cit. 2021-7-7]. Dostupné z:
<https://www.warnerelectric.com/-/media/Files/Literature/Brand/warner-electric/service-manuals/p-2086-we.ashx>
- [16] *Siemens SIMOTICS S-1FT7* [online]. [cit. 2021-6-20]. Dostupné z:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FT7062-5AK70-1DG0>
- [17] Structure and Operating Principles of Electromagnetic Actuated Type Clutches. *Miki Pulley* [online]. Japan [cit. 2021-3-20]. Dostupné z:
https://www.mikipulley.co.jp/en/products/img/cons_cl01.jpg?180119_
- [18] SUCO Transmission Technology Catalogue. *BIBUS* [online]. [cit. 2021-4-12]. Dostupné z:
https://www.bibus.cz/fileadmin/product_data/suco/documents/suco_transmission_technology_catalogue_en.pdf
- [19] *TLK 200* [online]. [cit. 2021-7-3]. Dostupné z:
https://www.rexnord.com/contentitems/techlibrary/documents/pt2-001m_a4_catalog
- [20] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [21] VAMBERSKÝ, Ladislav. *Návrh způsobu měření otáček vstupní hřídele převodovky*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT Praha.
- [22] VELIČKOVÁ, Eva. *Stroje a zařízení - Části strojů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002.
- [23] VLČEK, Jiří. *Snímače v motorových vozidlech: Doplnkový text k publikaci Jednoduchá elektronika*.
- [24] ZACHARIÁŠ, Ladislav. *Části strojů I. a II. díl. 2*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2002.



Seznam obrázků

Obr. 1 – Původní podoba zkušebního stanoviště [6]	5
Obr. 2 – Rozklad experimentální převodové skříně [6]	7
Obr. 3 – Schéma nového stanoviště [Vlastní zdroj]	8
Obr. 4 – Řez kroužkovým asynchronním motorem [13].....	10
Obr. 5 – Vírová klec s rozložením rozptylových toků [7]	13
Obr. 6 – Konstrukční typy synchronních strojů [10]	16
Obr. 7 – Elektromotor SIEMENS SIMOTICS S-1FT7 [16].....	18
Obr. 8 – Konstrukční řešení pákového ovládání spojky [3]	20
Obr. 9 – Princip rozpojení a spojení elektromagnetické spojky [17]	22
Obr. 10 – Spojka E-type značky SUCO [18]	23
Obr. 11 – Elektromagnetická spojka SFM VAR00 [15].....	24
Obr. 12 – Schéma ozubeného kola s indukčním snímačem [9].....	27
Obr. 13 – Princip fotoelektrického snímače a jeho výstupní signál [14]	29
Obr. 14 – Snímací hlava PMIS4 s magnetickými kroužky PMIR7 [8].....	30
Obr. 15 – Rozměry stanoviště [Vlastní zdroj]	32
Obr. 16 – Poloha elektromotoru vůči spojce [Vlastní zdroj].....	33
Obr. 17 – Axiální zajištění spojky [Vlastní zdroj]	34
Obr. 18 – Kompletace podstavce [Vlastní zdroj]	35
Obr. 19 – Náboj [Vlastní zdroj].....	36
Obr. 20 – Svěrné pouzdro Tollok TLK200 [18]	37
Obr. 21 – Toleranční pole mezi nábojem a snímačem [Vlastní zdroj]	38
Obr. 22 – Řez nábojem [Vlastní zdroj]	38
Obr. 23 – Celkové uspořádání vnější synchronizace [Vlastní zdroj]	39
Obr. 24 – Uchycení snímací hlavy [Vlastní zdroj].....	40
Obr. 25 – Základna sestavy [Vlastní zdroj].....	41
Obr. 26 – Spodní část základny [Vlastní zdroj].....	42
Obr. 27 – Možnosti vychýlení os [1]	43
Obr. 28 – Montážní spojka [Vlastní zdroj]	44
Obr. 29 – Montáž elektromotoru na podstavec [Vlastní zdroj].....	45
Obr. 30 – Detail vůle ve středících plochách podstavce [Vlastní zdroj].....	45
Obr. 31 – Aplikace montážní spojky [Vlastní zdroj]	46
Obr. 32 – Kolíky pro určení pozice podstavce [Vlastní zdroj]	46
Obr. 33 – Montáž – Uchycení převodové skříně [Vlastní zdroj]	47
Obr. 34 – Montáž – Uchycení podstavce elektromotoru [Vlastní zdroj].....	48
Obr. 35 – Montáž – Seřízení sousososti [Vlastní zdroj]	48
Obr. 36 – Montáž – Uchycení spojky na elektromotor [Vlastní zdroj]	49
Obr. 37 – Montáž – Uchycení snímací hlavy [Vlastní zdroj]	49
Obr. 38 – Montáž – Uchycení náboje s kotvou spojky [Vlastní zdroj]	50
Obr. 39 – Montáž – Sestava vnější synchronizace [Vlastní zdroj]	50
Obr. 40 – Montáž – Upevnění sestavy na stanoviště [Vlastní zdroj]	51



Seznam tabulek

Tabulka 1 – Vlastnosti elektromotru	19
---	----

Seznam příloh

Příloha 1	Výkres montážního přípravku – D0001
Příloha 2	Výkres podstavce 1 – D1001
Příloha 3	Výkres podstavce 2 – D1002
Příloha 4	Výkres podstavce 3 – D1003
Příloha 5	Výkres náboje – D1004
Příloha 6	Výkres destičky – D1005
Příloha 7	Výkres rozpěrného kroužku 1 – D1006
Příloha 8	Výkres rozpěrného kroužku 2 – D1007
Příloha 9	Výkres vyrovnávacího plechu – D1008
Příloha 10	Výkres sestavy vnější synchronizace – S1000
Příloha 11	Kusovník – K1000
Příloha 12	Výkres základní desky 1 – D2001
Příloha 13	Výkres základní desky 2 – D2002
Příloha 14	Výkres svařence základny – S2000
Příloha 15	Datasheet – 1FT062-5AK70 – 1BA0
Příloha 16	Datasheet – SFM VAR00
Příloha 17	Datasheet – ASM-PMIS4-PMIR7
Příloha 18	Datasheet – Tollok TLK200