

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výukový model asynchronního motoru

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk FRANK**
Osobní číslo: **E14B0192P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Výukový model asynchronního motoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte návrh konstrukce zjednodušeného modelu asynchronního stroje vhodného pro výukové účely.
2. Vytvořte výkresovou dokumentaci v některém CAD programu.
3. Vyhotoďte model stroje.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

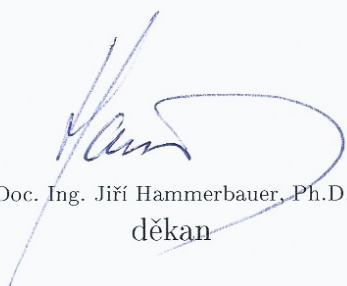
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na konstrukci zjednodušeného modelu asynchronního stroje, vhodného pro výukové účely. Konstrukce je transparentní pro snazší pochopení principu asynchronního motoru. V práci je popsán základní princip asynchronního stroje. Dále jsou přiloženy modely a výkresy se základní geometrickou specifikací.

Klíčová slova

Asynchronní motor, konstrukce, magnetický obvod, elektrický obvod, model, ...

Abstrakt

The bachelor thesis is focused on the construction of a simplified model of induction machine suitable for teaching purposes. The design is transparent to achieve easily understanding of the operational principle. The work describes the basic operational principle supported with number of FE models accompanied by drawings and basic geometric specifications.

Key words

Induction machine, construction, magnetic circuit, electric circuit, model, ...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 31.5.2016

Zdeněk Frank

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 PRINCIP ASYNCHRONNÍHO STROJE	11
1.1 VÝZNAM A POUŽITÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE	11
1.2 OBECNÝ PRINCIP ČINNOSTI	11
1.3 REŽIMY ASYNCHRONNÍHO STROJE	12
2 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO STROJE	14
2.1 STATOR	15
2.2 ROTOR	15
2.2.1 Kotva vinutá	16
2.2.2 Kotva nakrátko	16
2.2.3 Speciální kotvy	17
3 KONSTRUKCE MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU	19
3.1 POŽADAVKY	19
3.2 KONCEPCE	20
3.3 STATOR	20
3.3.1 Konstrukce statoru	20
3.3.2 Izolace	22
3.3.3 Vinutí	23
3.4 ROTOR	24
3.4.1 Typ č. 1	24
3.4.2 Typ č. 2	26
3.5 LOŽISKOVÉ STOJANY	28
3.6 PODSTAVEC	29
4 KRITÉRIA PRO UVEDENÍ DO PROVOZU	30
5 ZÁVĚR	31
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	32
6 PŘÍLOHY	I

Seznam symbolů a zkratk

\bar{U}_2fázor rotorového napětí [V]

\bar{I}_2fázor rotorového proudu [A]

φ_2fázový úhel mezi \bar{U}_2 a \bar{I}_2 [°]

βprostorový úhel mezi Φ a \bar{I}_2 [°]

ppočet pól párů stroje [n]

Φmagnetický indukční tok [Wb]

Sskluz [-]

ωúhlová rychlost statoru [rad/s]

ω_1úhlová rychlost rotoru [rad/s]

notáčky rotoru [ot/min]

n_ssynchronní otáčky magnetického pole [ot/min]

f_1frekvence statorového napájecího vnutí [Hz]

Melektromagnetický točivý moment [Nm]

M_njmenovitý moment [Nm]

M_{max}maximální moment [Nm]

M_kzáběrný moment [Nm]

Úvod

Asynchronní stroj byl sestrojen již v roce 1887 Nikolou Teslou a je momentálně jeden z nejčastěji používaných točivých elektrických strojů. Pro své vlastnosti se převážně používá jako motor. Můžeme se s ním setkat v průmyslu, ale najde své uplatnění i v soukromém sektoru.

Cílem mé práce je vytvořit model asynchronního motoru, který bude sloužit jako výuková pomůcka. Vzhledem k jeho provedení a snadné přepravě jej lze také uplatnit jako pomůcku k prezentaci na různých výstavách a událostech. Model má dopomoci k pochopení základních principů asynchronního stroje. Při vytváření modelu byl kladen důraz na praktickou část, tedy schopnost demonstrovat principiální funkci stroje, jeho konstrukci a použité materiály.

1 Princip asynchronního stroje

1.1 Význam a použití asynchronního stroje

Asynchronní stroj se dnes nejčastěji používán jako motor. Patří mezi nejrozšířenější typy pohonů, a to jak v domácnosti, tak v průmyslu. Díky své jednoduché konstrukci je jedním z nejlevnějších motorů. Mezi jeho další výhody patří i spolehlivost a nenáročnost na údržbu. Asynchronní motor se vyrábí v rozsahu výkonu od několika wattů do desítek MW. Dnes se užívá například k pohonu čerpadel, ventilátorů, kompresorů, výtahů, dopravníků a pro pohony obráběcích strojů. [1]

1.2 Obecný princip činnosti

Ke vzniku točivého magnetického pole se nejčastěji využívá třífázové statorové vinutí. Vinutí jednotlivých fází jsou prostorově natočena vůči sobě o 120° a jsou napájena třífázovým harmonickým proudem, vzájemně časově posunutým o 120° . Statorové magnetické pole prochází vodiči rotoru, kde indukuje napětí, které způsobí průchod elektrického proudu. Rotorový proud vytvoří magnetické pole. Vzájemným působením statorového a rotorového magnetického pole vznikne vnitřní elektromagnetický moment. Tento moment působí na rotor ve směru otáčení statorového magnetického pole. Rotor se tím začíná urychlovat. Se zvyšujícími se otáčkami rotoru klesá vzájemná rychlost mezi točivým polem statoru a rotorem. To má za následek nižší frekvenci rotorového proudu a menší indukované napětí do rotoru. Teoreticky by zvyšování otáček mohlo pokračovat až do n_s . Při dosažení synchronních otáček se přestane indukovat napětí a zaniknou proudy kotvou, a tím i točivý moment. Aby byly pokryty ventilační a třecí ztráty, rotor se musí točit pomaleji než pole statoru.[1]

Vztah pro výpočet synchronní rychlosti:

$$n_s = \frac{60 * f_1}{p} \quad (1)$$

kde:

n_ssynchronní otáčky magnetického pole [ot/min]

f_1frekvence statorového napájecího vnutí [Hz]

ppočet pólů stroje[n]

Vztah pro elektromagnetický moment:

$$M \approx \Phi \bar{I}_2 \cos \varphi_2 \sin \beta \quad (2)$$

kde:

Melektromagnetický točivý moment [Nm]

Φmagnetický indukční tok [Wb]

\bar{I}_2proud kotvy [A]

φ_2fázový úhel mezi \bar{U}_2 a \bar{I}_2 [°]

βprostorový úhel mezi Φ a \bar{I}_2 [°]

1.3 Režimy asynchronního stroje

Veličina, která popisuje pracovní režim stroje, se nazývá skluz. Je to poměr relativní rychlosti rotorového pole vůči synchronní rychlosti statorového pole. Skluz je vyjádřen následujícím vztahem:

$$S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

kde:

Sskluz [-]

ωúhlová rychlost statoru [rad/s]

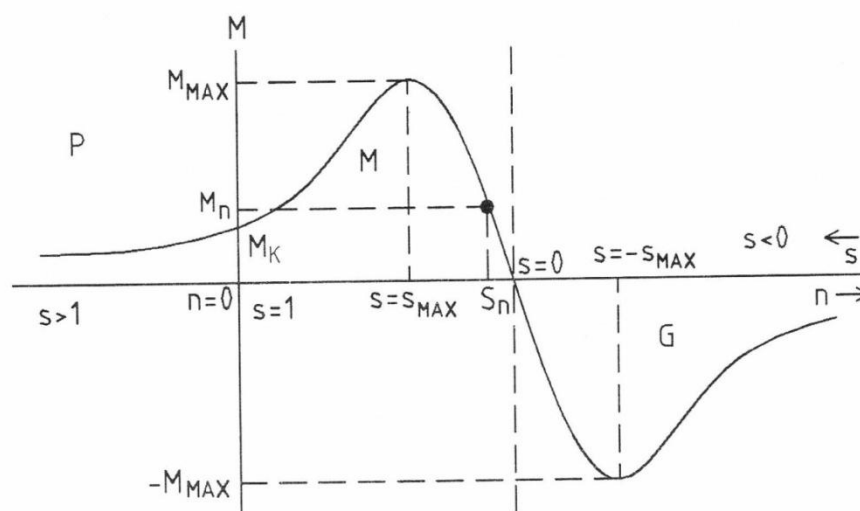
ω_1úhlová rychlost rotoru [rad/s]

n_ssynchronní otáčky magnetického pole [ot/min]

notáčky rotoru [ot/min]

Režimy asynchronního stroje a mezní hodnoty skluzu, které se mohou vyskytovat v běžném provozu, jsou popsány následovně. V oblasti skluzu od nuly do jedné stroj pracuje jako motor. Je-li stroj v klidu a připojíme-li ho na síť, rovná se hodnota skluzu jedné. V chodu bez mechanického zatížení je skluz téměř roven nule. Provozujeme-li stroj jako generátor, je skluz menší než nula. Stroj lze také provozovat jako brzdou, kde skluz je větší než jedna. [1]

Pomocí momentové charakteristiky lze znázornit provozní stavy asynchronního stroje. Jednotlivé režimy jsou dobře vidět na Obr. 1.1, kde je zakreslená obecná momentová charakteristika asynchronního motoru. Tato charakteristika nám popisuje závislost momentu stroje na skluzu, případně otáčkách rotoru. Dále lze na momentové charakteristice pozorovat několik důležitých bodů, které jsou podstatné pro správný chod stroje. Pokud chceme asynchronní stroj provozovat jako motor, bude se pracovní bod stroje pohybovat v okolí M_n , ale lze ho zatížit až na maximální moment M_{max} . Pokud tento moment překročíme, stroj se zastaví. Na momentové charakteristice je patrný malý záběrný moment M_k , který nesmíme při spouštění překročit, jinak se motor neroztočí. [4]

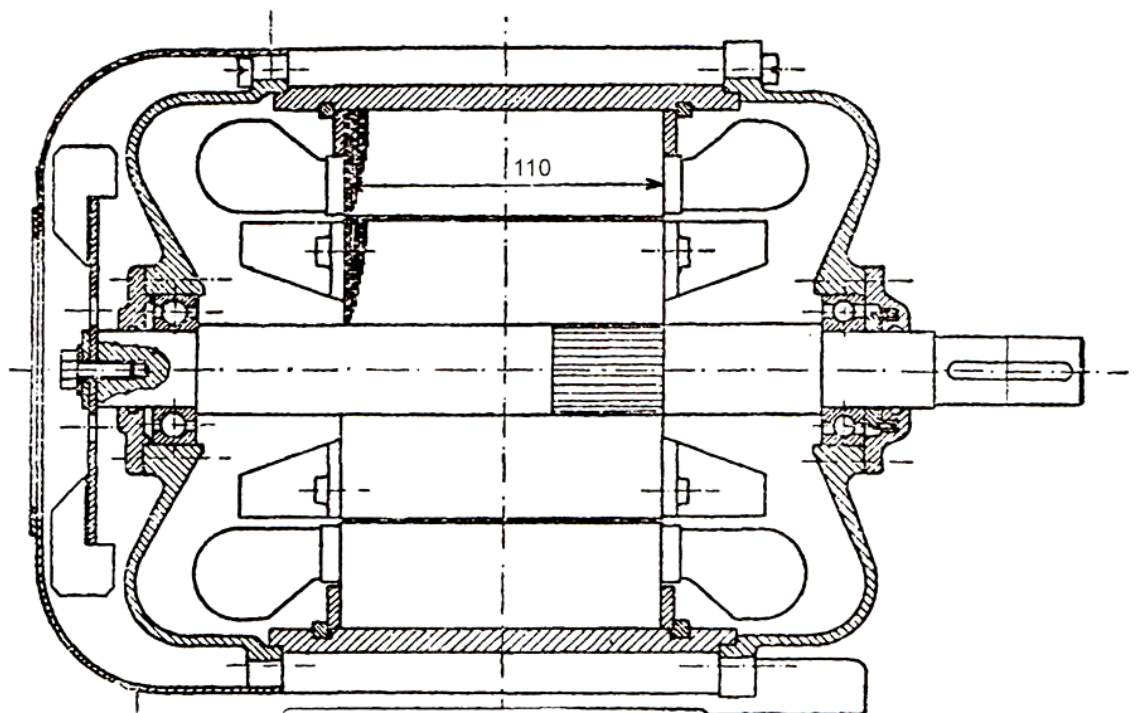


Obr. 1.1 Obecná momentová charakteristika asynchronního stroje [4]

2 Konstrukce asynchronního stroje

Asynchronní stroj se skládá ze dvou základních částí. Statoru, který tvoří pevnou část a je připevněn k podstavě celého soustrojí. A pohyblivé části, rotoru, který může být u asynchronního motoru označen jako kotva.

Při konstrukci stroje je třeba brát ohled na to, k jakému účelu bude stroj sloužit a jakým vnějším vlivům bude vystaven. Pro správný chod stroje je důležité znát jeho pracovní prostředí, abychom mohli správně určit stupeň ochrany proti vniknutí cizích předmětů. Základní stupeň ochrany se popisuje pomocí dvou písmen a dvou číslic, např. IP 44. Také musíme znát způsob zatížení, abychom mohli správně zvolit typ chlazení. Ten označujeme pomocí dvou písmen, znaku a dvou číslic, např. IC A XX. U strojů větších výkonů musíme také zohlednit přepravu a následnou montáž, abychom mohli případně přizpůsobit jeho konstrukci pro snazší manipulaci. Celkový tvar stroje popisujeme označením IM XXX. [2]



Obr. 2.1 Podélný řez asynchronního motoru s klecovou kotvou

2.1 Stator

Stator menších asynchronních strojů se skládá z několika hlavních částí: kostry stroje, magnetického obvodu, vinutí, ložiskových štítů a svorkovnice.

- **Magnetický obvod**

Je tvořen speciálními izolovanými elektromagnetickými plechy, jejichž tloušťka se pohybuje od 0,3 do 0,5 mm. Statorové plechy mají na vnitřním obvodu drážky, do kterých se zakládá vinutí. Tyto plechy jsou vrstvené na sebe a zalisované do kostry stroje, která tvoří nosnou část.

- **Vinutí**

Vinutí je tvořeno jednotlivými cívkami, které jsou navinuty měděným izolovaným vodičem a následně uloženy v drážkách statorových plechů. Při vkládání musíme klást důraz na dostatečnou izolaci mezi vinutím a magnetickým obvodem. K tomuto účelu se používá přídatná izolace. Jednotlivé cívky jsou propojeny v čelech vinutí a vyvedeny na svorkovnici.

- **Ložiskové štíty**

Zabraňují vniknutí cizích těles, které by mohly způsobit poškození stroje. Také tvoří s ložisky otočné uložení rotoru.[2, 5]

2.2 Rotor

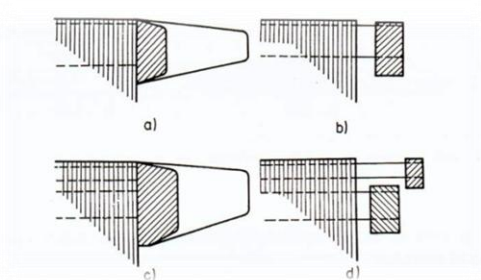
Rotor, který se někdy nazývá kotva, je umístěn v dutině statoru a oddělen vzduchovou mezerou. Velikost mezery závisí na rozměrech a výkonu stroje. Snahou je, aby byla co nejmenší. Důvodem je snížení magnetického odporu mezi státorem a rotorem. Následkem je pokles magnetizačního proudu a zlepšení účinníku. Velikost mezery se pohybuje od 0,2 do 2 mm. Rotor asynchronních strojů nemá vyniklé póly a jeho magnetický obvod je složen z elektromagnetických plechů. Tyto plechy mají na vnějším obvodu rovnoměrně rozmístěny drážky, které slouží k uložení rotorového vinutí. Středem rotoru prochází hřídel, která je u menších rotorů nalisována. U strojů s vlastním chlazením je na hřídeli umístěn ventilátor. Dle provedení vinutí rozlišujeme asynchronní stroje na dva základní typy: kotva vinutá a kotva nakrátko. [5]

2.2.1 Kotva vinutá

Rotorové vinutí má obdobné provedení jako statorové. Nejčastěji je třífázové, má stejný počet pólů jako stator, je uložené v drážkách rotoru a vždy je zapojeno do hvězdy. Konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici přes kluzné kontakty, které jsou realizovány pomocí třech kroužků a uhlíkových kartáčů. Takové provedení rotoru umožňuje připojit přídatnou impedanci, která omezuje záběrný proud a zlepšuje rozběhové charakteristiky motoru. Po rozběhu je možné impedanci odpojit, propojit kroužky nakrátko a odklopit kartáče. Tato koncepce je nákladnější a náročnější na údržbu, proto se v praxi setkáme s tímto řešením pouze ve výjimečných případech.[5]

2.2.2 Kotva nakrátko

Tento typ rotoru je jedním z nejrozšířenějších, a to pro svoji jednoduchost a spolehlivost. Vinutí je nahrazeno neizolovanými tyčemi, které jsou uloženy v rotorovém svazku. Tento svazek, který je tvořen z rotorových plechů, je nalisován na hřídel. Tyče jsou na koncích spojeny nakrátko. Podle různého typu, tvaru a materiálu drážky se volí technologické provedení vinutí a můžeme ho rozdělit na dva základní typy: pájené a odlévané. Kotva je odlévána pomocí formy, do které je zasazen svazek rotorových plechů a vstříknuta slitina hliníku. Při odlévání se vytvoří i kruhy nakrátko, které kromě vodivého spojení tyčí, plní několik dalších funkcí. Kruhy nakrátko přilehají ke statorovým plechům a drží je slisované. Na kruzích nakrátko mohou být odlity lopatky, které zvětšují chladicí plochu rotorového vinutí a zároveň tvoří radiální ventilátor, který chladí statorové vinutí. U pájených klecí se nejdříve tyče zasunou do drážek, a poté se spojí kruhy nakrátko. Spojení je realizováno pájením nebo svářením, a to tak, aby se kruhy nedotýkaly rotoru.[2, 5]



Obr. 2.2 Provedení kruhů nakrátko

a) odlévané vinutí, b) pájené vinutí, c) odlévané dvouklecové vinutí, d) pájené vinutí dvouklecové[2]

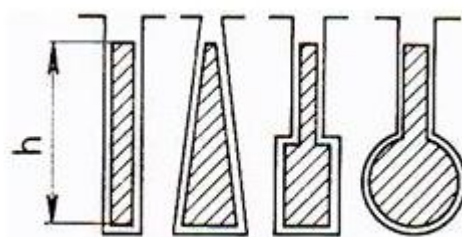
2.2.3 Speciální kotvy

Asynchronní motor má spoustu značných výhod, ale má také dvě nevýhody. Malý záběrný moment a velký záběrný proud v praxi omezují použití asynchronních motorů. Díky speciální konstrukci klece můžeme tyto negativní jevy potlačit. Oba problémy jsou závislé na odporu a reaktanci kotvy.

Zvětšením odporu kotvy při rozběhu, docílíme zmenšení záběrného proudu a zvýšení rozběhového momentu. Ale při jmenovitých otáčkách potřebujeme odpor kotvy co nejmenší, abychom omezili Joulovy ztráty v rotoru. Proto musí být kotva konstruována tak, aby v závislosti na skluzu měnila svůj odpor a rozptylovou reaktanci. Této změny se docílí pomocí skinefektu. [3]

- **Kotva vírová**

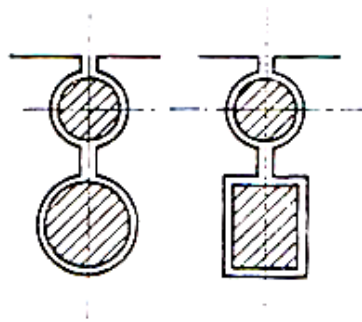
Tyče kotvy vírové jsou odlévané, mají převážně obdélníkový, lichoběžníkový nebo složitější tvar, většinou s úzkými a vysokými vodiči. Při připojení motoru na síť je rotorová frekvence přibližně stejná jako statorová. Drážkami rotoru prochází rozptylové pole, které vyvolá v tyčích velké vířivé proudy. Ty zapříčiní změnu rozložení proudové hustoty v tyči, kde je proud vytlačován směrem ke vzduchové mezeře. Díky změně hustoty proudu vzroste odpor kotvy a sníží se reaktance. Při rozběhu kmitočet klesá a zmenšují se i vířivé proudy, čímž se proud rovnoměrněji rozkládá po celé tyči. V pracovním bodě motoru je kmitočet malý a proudová hustota rozložena téměř rovnoměrně, čímž se přídatné ztráty neuplatňují. [3]



Obr. 2.3 Tyče nekrátko vírových klecí [3]

- **Kotva Dvojitá**

Jedná se o soustavu dvou klecí, které jsou tvořeny tyčemi. Vnější klec je rozběhová a je tvořena z materiálu, který má zvýšený měrný odpor oproti vnitřní kleci. Vnitřní klec slouží k provozu při jmenovitém zatížení. Při rozběhu je proud vytlačován do horní klece, která má větší impedanci. Při jmenovitém zatížení je reaktance velice malá a proud se nepřímo úměrně rozloží v poměru odporů klecí. Klece mohou být skládány z různých materiálů nebo odlévány. Pro svoji náročnost na výrobu nejsou tolik rozšířené, jako kotvy vírové.[3]



Obr. 2.4 Tyče nekrátko dvojitých klecí[3]

3 Konstrukce modelu asynchronního motoru

Při konstrukci modelu jsou kladeny jiné požadavky a nároky na vlastnosti motoru, proto je konstrukční řešení a postup výroby odlišný od standardních způsobů výroby. Také byl brán ohled na rozpočet, technologické možnosti a zázemí. Cílem práce je zhotovit jednoduchý funkční model asynchronního motoru, který bude provozován v laboratořích a napájen pomocí auto-transformátoru.

3.1 Požadavky

Požadavky, které jsou kladeny na zjednodušený model asynchronního motoru a vlastnosti z nich vyplívající.

- **transparentnost (názornost)**

Od modelu požadujeme názornost jednotlivých částí, k čemu slouží, jaké jsou na ni kladeny nároky a z jakého materiálu jsou vyrobeny.

- **jednoduchost**

Snadná konstrukce modelu, stavebnicový systém.

- **modifikovatelnost**

Snadná výměna jednotlivých komponentů, možné osazení více typy rotorů. Možná přestavba na synchronní stroj.

- **proveditelnost**

Model je tvořen z běžně dostupných materiálů a dostupnou technologií.

- **bezpečnost**

Pro prezentaci musí být model napájen bezpečným malým napětím kvůli případným poruchám základní izolace. Dále musí být zajištěny nízké otáčky a malý moment motoru, aby nedošlo k případnému úrazu.

- **účinnost**

Nejsou kladeny vysoké nároky na účinnost, model bude provozován krátkodobě a nebude zatěžován.

- **nízký rozpočet**

Tato práce nebyla podpořena žádným grantem.

- **simulace poruch**

Díky jednoduchosti a stavebnicovému systému je možno simulovat poruchy na stroji.

3.2 Koncepce

Nosný rám modelu bude tvořit podstavec, na kterém bude umístěn stator s ostatními nosnými prvky. Dále se na podstavci bude nacházet svorkovnice a zbývající ovládací prvky. Vše bude esteticky uspořádáno a dostatečně ošetřeno proti degradaci materiálu.

3.3 Stator

Stator je tvořen několika částmi, které vznikaly postupně v návaznosti na sebe. Nejdříve byly vyrobeny dva prototypy rotorů, které byly otestovány na sériově vyrobeném statoru. Tento stator byl k dispozici z třífázového asynchronního motoru o výkonu 750W, patkového provedení s ložiskovými štíty. Až v dalším kroku byl sériově vyráběný stator nahrazen. Jedním z důvodů náhrady bylo nedodržení základních požadavků, a to jednoduchost a transparentnost modelu. Na sériově vyrobeném statoru nejsou také vyvedeny všechny konce vinutí, což omezuje modifikovatelnost a možnou simulaci poruch.

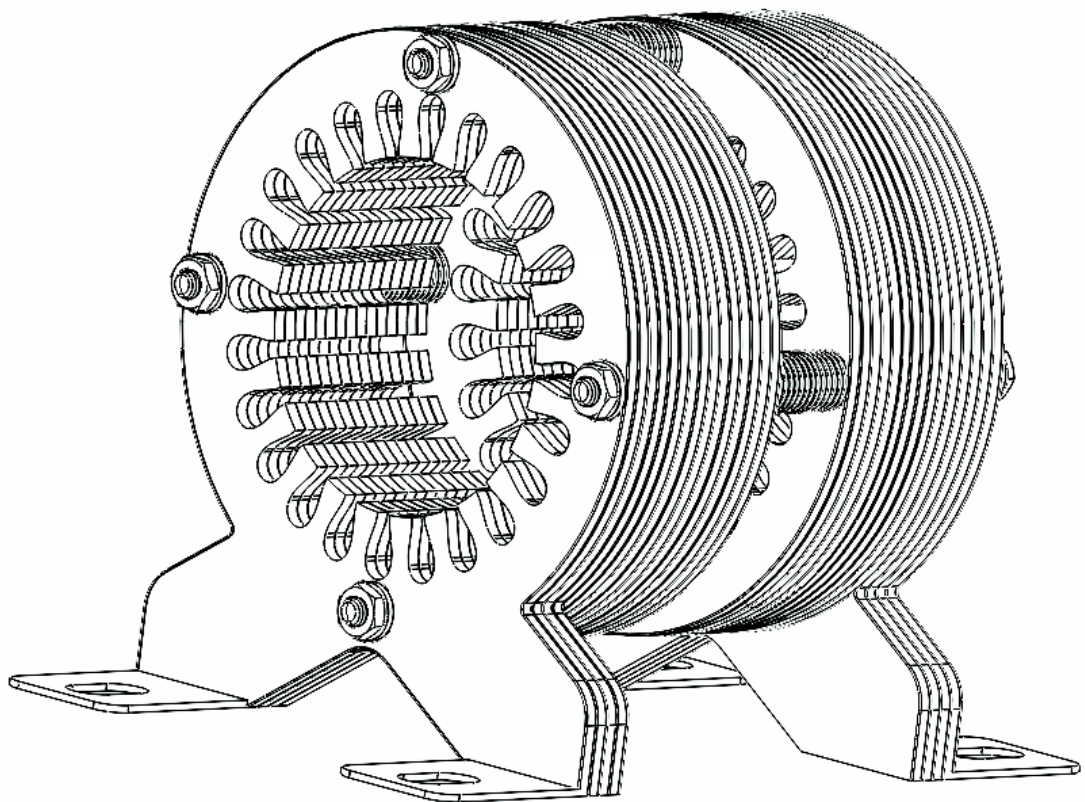
3.3.1 Konstrukce statoru

Při výrobě nového statoru bylo možno použít plechy ze stávajícího motoru, vylišovat plechy z litinové kostry a stáhnout do nosných stojanů. Při lisování by mohlo dojít k poškození izolace vinutí a i samotných plechů. Vinutí by se muselo znovu navinout a plechy přizpůsobit stojanům. Po dodržení tohoto postupu by byl znehodnocen celý stator. Celý postup by byl náročný na provedení a výsledek by neodpovídal požadavkům. Proto bylo rozhodnuto vytvořit celý nový stator. Ten musí odpovídat co nejvíce originálnímu provedení a zároveň splňovat nároky na model.

Nový stator má stejný tvar a počet drážek jako stávající plechy. Jedná se tedy o čtyřpólový stroj s polo-uzavřenými drážkami. Statorová část magnetického obvodu je navržena jako samonosná a skládá se ze tří typů plechů. Tvar jednotlivého typu je dán jeho funkcí. Plechy byly řezány pomocí laseru a mají tloušťku 3mm, což je desetkrát více než standardní plechy. Tento rozměr byl zvolen s ohledem na časové vytížení laseru a pro snadnější skládání rotorového svazku. Při zvětšení síly plechu se zvětšují ztráty vířivými proudy.

Tyto ztráty obecně snižujeme zvýšením odporu materiálu za pomoci příměsí a snížením tloušťky plechu. Jelikož se jedná o výukový model, zvýšení těchto ztrát nemusíme brát v potaz. Jednotlivé plechy jsou od sebe izolovány lakem. Lakování bylo provedeno ze všech stran, abychom předešli korozi.

Stator tvoří třicet plechů, které jsou staženy pomocí závitových tyčí. Krajiní lamely jsou nosné a pomocí nich je stator připevněn k podstavci. Veprostřed statoru jsou lamely vynechány a místo nich je vzduchová mezera, díky níž bude vidět přídatná izolace a i statorové vinutí.



Obr. 3.1 složené statorové plechy

3.3.2 Izolace

Než budeme moci osadit vinutí do statoru, musíme nejdříve vložit do drážek statoru drážkovou izolaci. Ta zvětšuje elektrickou pevnost motoru a je vyrobena spojením polyesterové fólie a netkané polyesterové textilie. Z jedné strany je hladká, a to pro snazší vkládání vinutí do drážek. Po vložení vinutí jsou standardně drážky touto izolací uzavřeny a staženy drážkovým klínem. Drážkové klíny jsem nepoužil, protože na vinutí nebudou působit velké elektrodynamické síly.



Obr. 3.2 stator s doplňkovou izolací

3.3.3 Vinutí

Úkolem této práce nebyl elektromagnetický návrh, proto jsem pouze modifikoval stávající stroj. Topologie vinutí byla zachována, změny byly provedeny pouze v počtu závitů a průřezu vodiče.

Vinutí tvoří dvanáct cívek, které byly ručně navinuty a tvarovány. Cívky mají dvě velikosti. Konce cívek jsou opatřeny dodatečnou izolací a nejsou propojeny uvnitř vinutí jako při standardní výrobě, ale až na statorové svorkovnici. Pouze jedno čelo vinutí je bandážováno a druhé je ponecháno pro názornost bez bandáže. U sériově vyráběného motoru jsou obě čela zabandážována až po kontrole správnosti zapojení. Impregnace je provedena jako jedna z posledních operací. Stator je máčen do vany s lakem, což vyžaduje velké množství laku. Po máčení je lak vytvrzen v peci. U modelu jsem tuto úpravu neprovedl z důvodu finanční náročnosti a technologické dostupnosti.



Obr. 3.3 použité cívky na vinutí statoru

3.4 Rotor

Všechny rotory jsou konstruovány specifickým způsobem. Postup výroby je zcela odlišný od standardního postupu výroby malých rotorů s klecí nakrátko. Rotory byly vyrobeny z běžně dostupných materiálů a pokud možno co nejjednodušší technologií.

Během celé práce vznikly dva odlišné typy rotorů. Rotory se liší použitými materiály a rozměry. Celkem vznikly tři rotory s klecí nakrátko o různých průměrech.

3.4.1 Typ č. 1

Základní požadavky na tento rotor jsou jednoduchost a bezpečnost. Abychom mohli zajistit bezpečný provoz, musíme zajistit nízké otáčky a malý setrvačný moment, který je závislý na váze. Proto je převážně celá konstrukce tvořena z lehkého polypropylénu. Vznikly dva rotory této konstrukce.

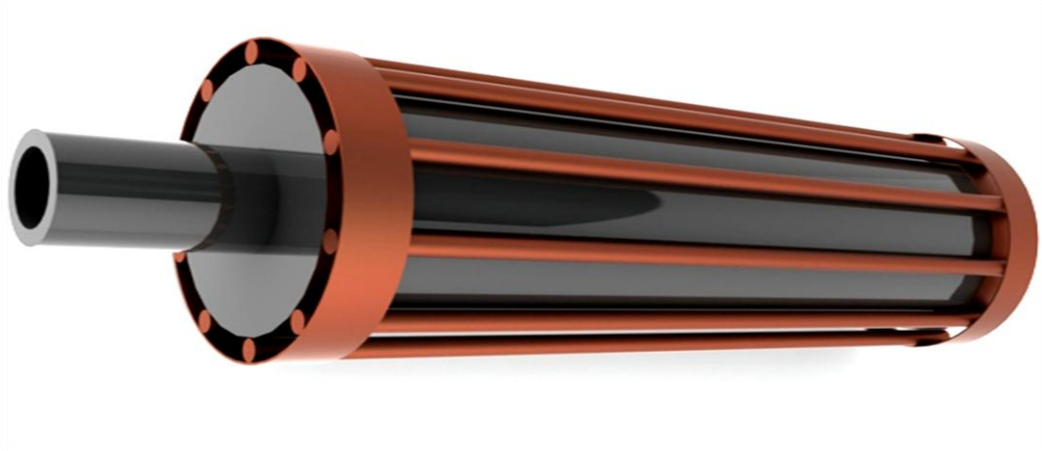
Nejdříve byl vyroben rotor s průměrem 50 mm. Jeho základ tvoří vodovodní trubka o průměru 41 mm z polypropylénu. Do ní jsou zalisovány vodovodní spojky, které tvoří distanční mezi-kusy mezi kovovou hřídelí a trubkou. Na každém kraji celého kompletu je namotán měděný pásek o rozměru 15x0,4 mm, který je zajištěn proletováním. Na tyto pásy je naletováno osm měděných tyčí o průměru 4,5 mm. Tyto spoje jsou překryty měděným páskem. Pásek je opět zajištěn proletováním. Měděný pásek s tyčemi tvoří klec na krátko. Tento rotor sloužil jako prototyp k ověření správnosti postupu konstrukce.



Obr. 3.4 rotor č. 1

Druhý rotor má podobný postup konstrukce jako první. Jeho průměr činí 65 mm a disponuje deseti tyčemi. Osa rotoru je tvořena z polypropylénu a je vytvořena na soustruhu. Distanční mezi-kusy jsou vyrobeny ze silonu. Nosná polypropylénová část je slisována s mezi-kusy a osou. Vše je důkladně nalakováno a zajištěno proti uvolnění. Nakonec je rotor osazen klecí na krátko, stejným postupem jako u prvního rotoru.

Při osazení druhého rotoru se znatelně zmenší vzduchová mezera. Díky tomuto zmenšení selepší vlastnosti celého stroje. Rotor odebírá menší magnetizační proud. Tento rotor splňuje základní požadavky kladené na výukový model.



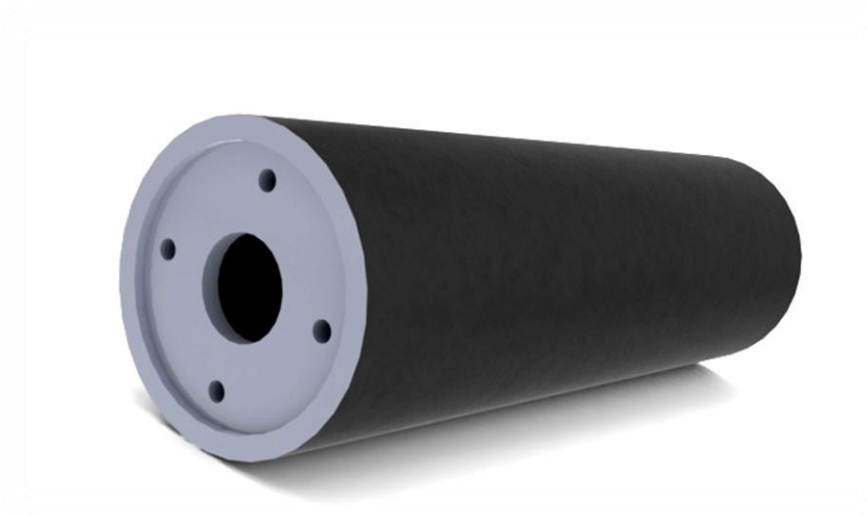
Obr. 3.5 rotor č. 2

3.4.2 Typ č. 2

Tento rotor je zcela odlišný svoji konstrukcí od předchozího typu. Má dvanáct tyčí, které tvoří kotvu nakrátko. Počet tyčí lze měnit a upravovat jejich vzájemnou polohu. Celý rotor je složen z několika částí:

- **Tělo rotoru**

Tělo je tvořeno ze tří částí, které jsou k sobě bodově svařeny. Vnější část tvoří ocelová trubka o průměru 60 mm, která je zarovnána na soustruhu. Do ní je nalisováno a bodově zajištěno z každé strany jedno mezikruží. V tomto mezikruží jsou čtyři vnitřní závity, které slouží pro stažení bočních kruhů. V mezikruží je také otvor na hřídel.



Obr. 3.6 tělo rotoru typu č. 2

- **Stahovací kruhy**

Kruhy jsou laserem vypáleny z hliníku. Pomocí laseru na nich byla vytvořena mřížka sloužící pro vrtání. Na této mřížce je znázorněno dvacet čtyři možných pozic, vyvrtáno je pouze dvanáct.

- **Tyče**

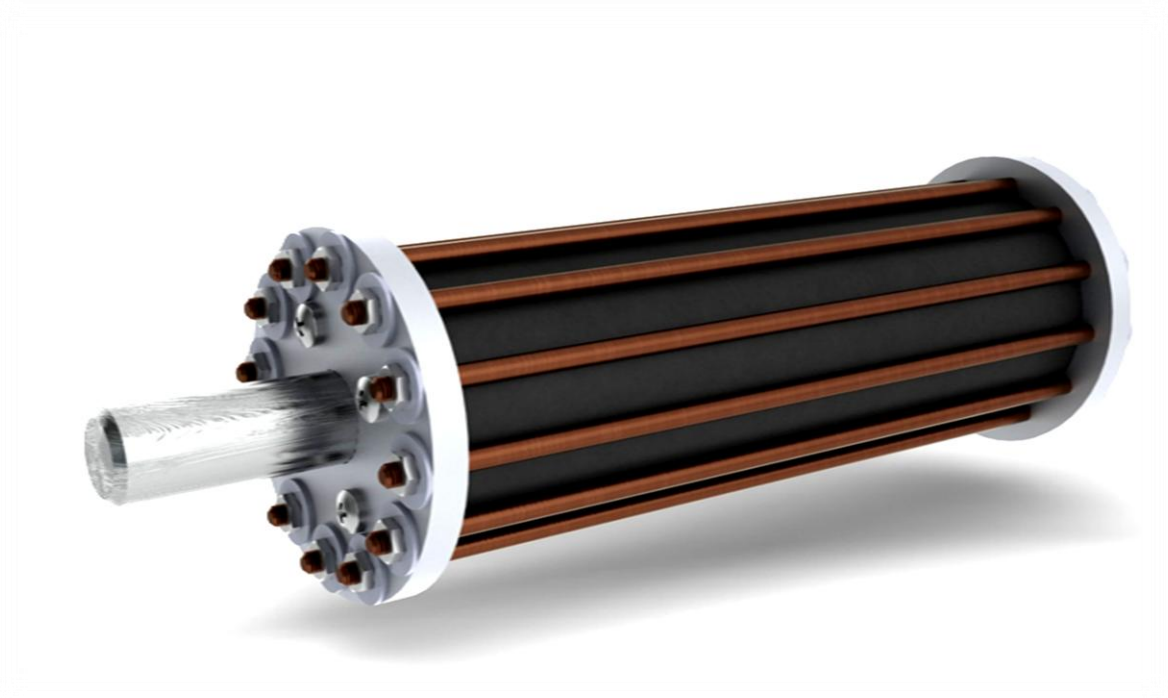
Tyče o průměru 5 mm jsou vyrobeny z mědi a na konci jsou vyřezané závity.

- **Hřídel**

Je vyrobena z ocelové tyčoviny bez zvláštního opracování.

Chceme-li osadit model tímto rotorem, musí být skládání provedeno přímo na motoru. Nejdříve je zasunuto tělo rotoru do statoru. K tělu jsou přichyceny stahovací kruhy pomocí šroubů, pak je zasunuta osa s vymežovacími podložkami. Dotáhneme šrouby a až pak můžeme rotor osazovat jednotlivými tyčemi. Tyče jsou zajištěné pomocí matic na každé straně.

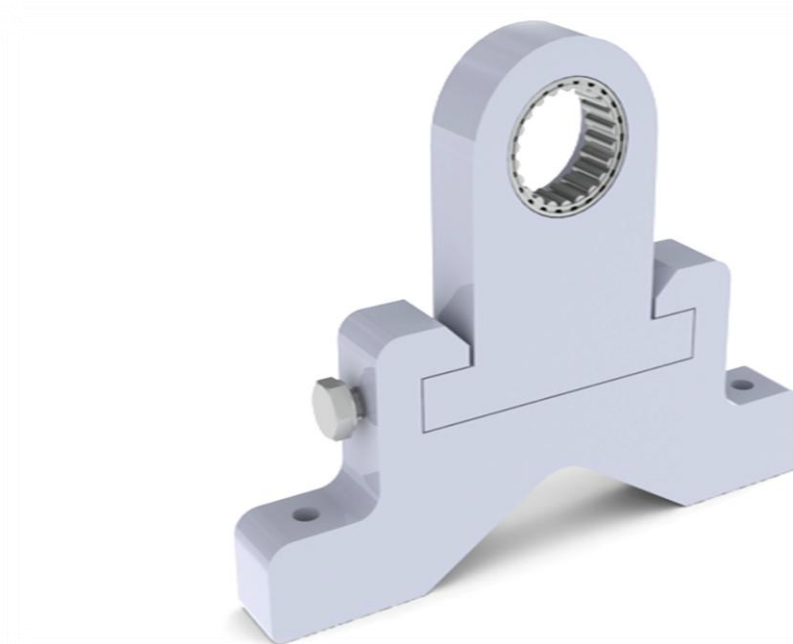
Tento rotor má nejmenší vzduchovou mezeru a dosahuje nejvyšších otáček. Jelikož je celý vyroben z kovu, má i větší hmotnost a při zvýšení otáček se začne projevovat nevyváženost rotoru. Lze na něm simulovat poruchy jednotlivých tyčí.



Obr. 3.7 rotor č. 3

3.5 Ložiskové stojany

Nejdříve byly použity objímky se závitovými tyčemi, do nichž byla uložena kuličková ložiska. Toto řešení nesplňovalo veškeré požadavky, neumožňovalo snadnou výměnu rotorů a bylo esteticky nevhodné. Proto bylo nutno vyrobít nové ložiskové stojany. Kvůli svým rozměrům a menší hlučnosti byla použita jehličková ložiska, která byla nalepena do těla stojanu. Oba stojany jsou vyřezány laserem s dvěma kotvicími otvory. Jedna strana je pevně přišroubována k podstavci přes gumové podložky. Druhou stranu tvoří dva vzájemně do sebe zapadající kusy. Spodní část je přišroubována k podstavci, zatímco horní část s ložiskem je zajištěna šroubem. Takové provedení umožňuje rychlou a snadnou výměnu rotoru.



Obr. 3.8levý ložiskový stojan

3.6 Podstavec

Podstavec tvoří nosnou část modelu. Převážná část je vyrobena z laminové desky. Na horní straně je umístěn stator a ložiskové stojany. Vše je staženo přes gumové podložky, které pohlcují vibrace motoru a snižují hlučnost celého modelu. Vývody jednotlivých vinutí jsou provedeny skrz laminovou desku a připojeny na svorkovnici, která se nachází na zadní straně modelu. Je vytvořena ze šroubů, podložek a matek typu M5. Přední strana podstavce obsahuje nerezový panel, ve kterém je vložen displej a čtyři tlačítka. Tyto prvky budou sloužit k obsluze frekvenčního měniče.



Obr. 3.9 ovládací panel

Podstavec je konstruován tak, aby se mohla uskutečnit dodatečná montáž měniče. Na svorkovnici je připraven konektor s vypínačem a pojistkami, který bude sloužit pro jeho napájení. Na bočních stranách mohou být realizovány průduchy, které budou sloužit pro chlazení měniče.

4 Kritéria pro uvedení do provozu

Model je určen k provozu v suchém bezprašném prostředí. Není určen pro jakékoliv zatížení. Rotační části jsou odkryty, a proto je nutné brát zvýšený ohled na bezpečnost.

Čtyřpólový asynchronní motor je napájen třífázovým napětím o maximální hodnotě 30 V. Při této hodnotě napětí protéká vinutím proud dvě ampéry. Jelikož motor není zatížen, můžeme otáčky řídit napětím. Pro předváděcí účely je vhodná rychlost otáčení sto otáček za minutu. Ta to hodnota je dosažena při napětí 20 V. Nízké otáčky je třeba dodržovat z důvodu zachování bezpečnosti! Při dodržení doporučeného napětí 20 V, lze motor provozovat dlouhodobě. Motor je chlazen pouze přirozenou ventilací, proto je třeba při zvyšování napětí brát ohled na oteplení motoru. Bylo by vhodné model doplnit o frekvenční měnič s tepelnou pojistkou, konstruovaný přímo pro tento účel.



Obr. 4.1 model asynchronního motoru

5 Závěr

V průběhu jednoho roku jsem zhotovil model asynchronního stroje, jenž obsahoval tři různé rotory. Před samotnou konstrukcí stroje jsem vytvořil 3D model v systému Solidworks. Tento model mi pomohl k představě složitosti motoru a je vhodný jako snadno editovatelný prvek pro případné modifikace konstrukce. V tomto programu jsem následně vytvořil i technické nákresy, které rozměrově odpovídají skutečnému modelu a jsou součástí bakalářské práce.

Obsahem skutečného modelu je podstavec s ovládacím panelem, ložiskové stojany, stator a tři druhy rotorů (dva pevné a jeden konfigurovatelný). Konstrukce rotoru č. 3 není původní. Kvůli složitosti konstrukce s výměnnými tyčemi bylo toto provedení několikrát modifikováno. Změnou konstrukčního řešení upevnění tyčí jsem dosáhl požadované pevnosti rotoru a tuhosti konstrukce.

Parametry modelu asynchronního stroje nejsou srovnatelné s parametry průmyslově vyráběných motorů o stejné velikosti. Cílem práce nebylo vytvořit efektivní zařízení s použitelnými parametry v praxi, ale pouze demonstrovat princip asynchronního motoru. Zkonstruovaný model toto zadání splnil.

Model je konstruován tak, aby ho bylo možno doplnit frekvenčním měničem. Toto ovšem nebylo předmětem mé bakalářské práce. Navržení a doplnění modelu o frekvenční měnič by bylo vhodným tématem diplomové práce.

Seznam literatury a informačních zdrojů

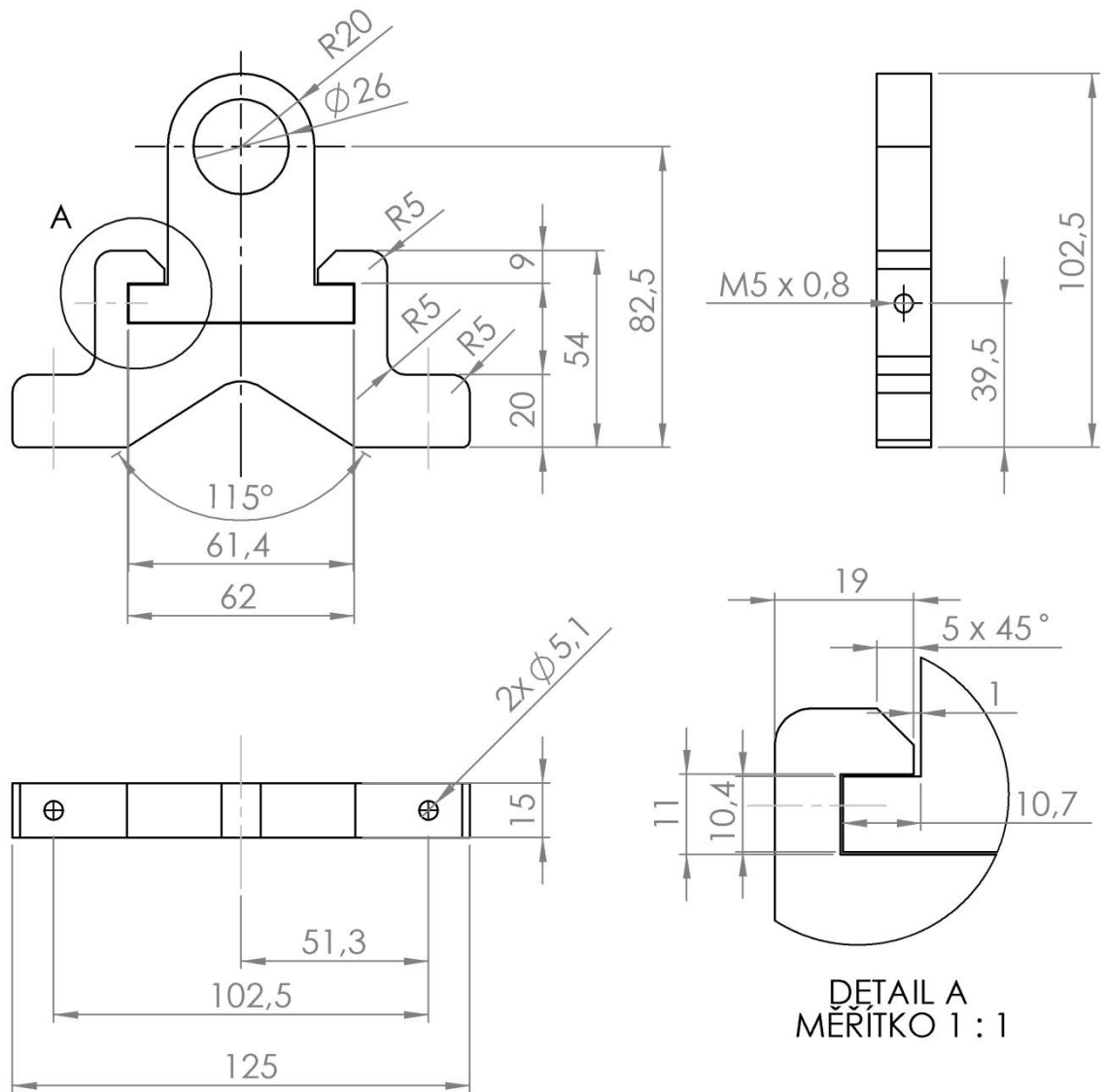
- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič aj. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [4] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [5] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav a MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 582 s.
- [6] VOŽENÍLEK, Ladislav. *Kurs elektrotechniky*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1988. 367 s.
- [7] LOMBARD, Matt. *SolidWorks 2013 bible*. Indianapolis, Ind.: Wiley, 2013.
- [8] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. 2., opr. vyd. Brno: Computer Press, 2007. Učebnice (Computer Press). ISBN 978-80-251-1887-0.
- [9] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-312-6.

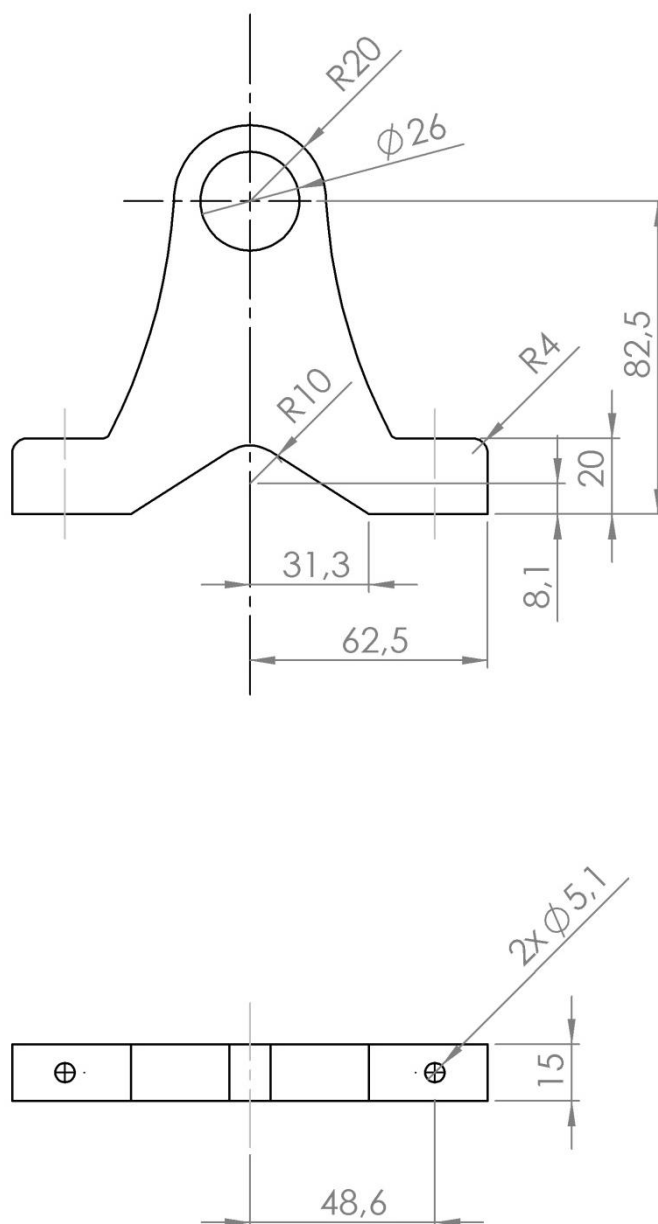
6 Přílohy

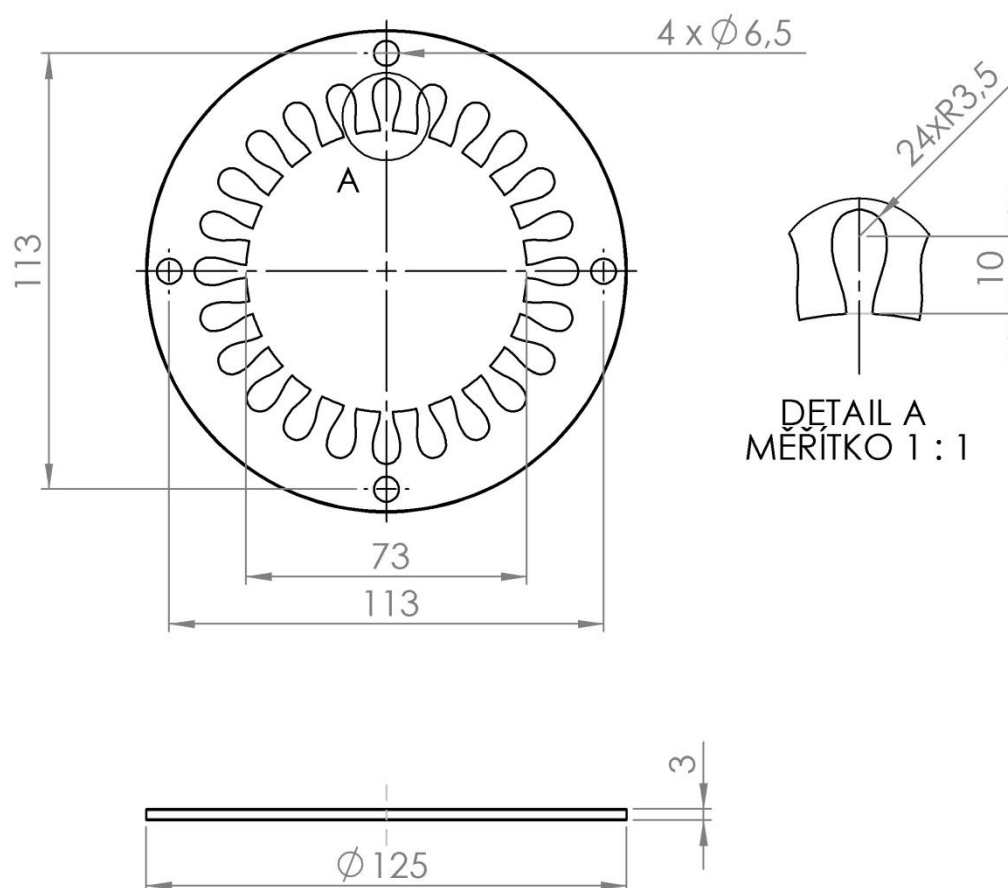
Seznam použitých příloh:

1. Nákres levého ložiskového stojanu.....	I
2. Nákres pravého ložiskového stojanu.....	II
3. Nákres plechu č.1.....	III
4. Nákres plechu č.2.....	IV
5. Nákres plechu č.3.....	V
6. Nákres rotoru č.2.....	VI
7. Nákres dílů rotoru č.3.....	VII
8. Nákres dílů rotoru č.3.....	VIII
9. Nákres sestavy rotoru č.3.....	IX

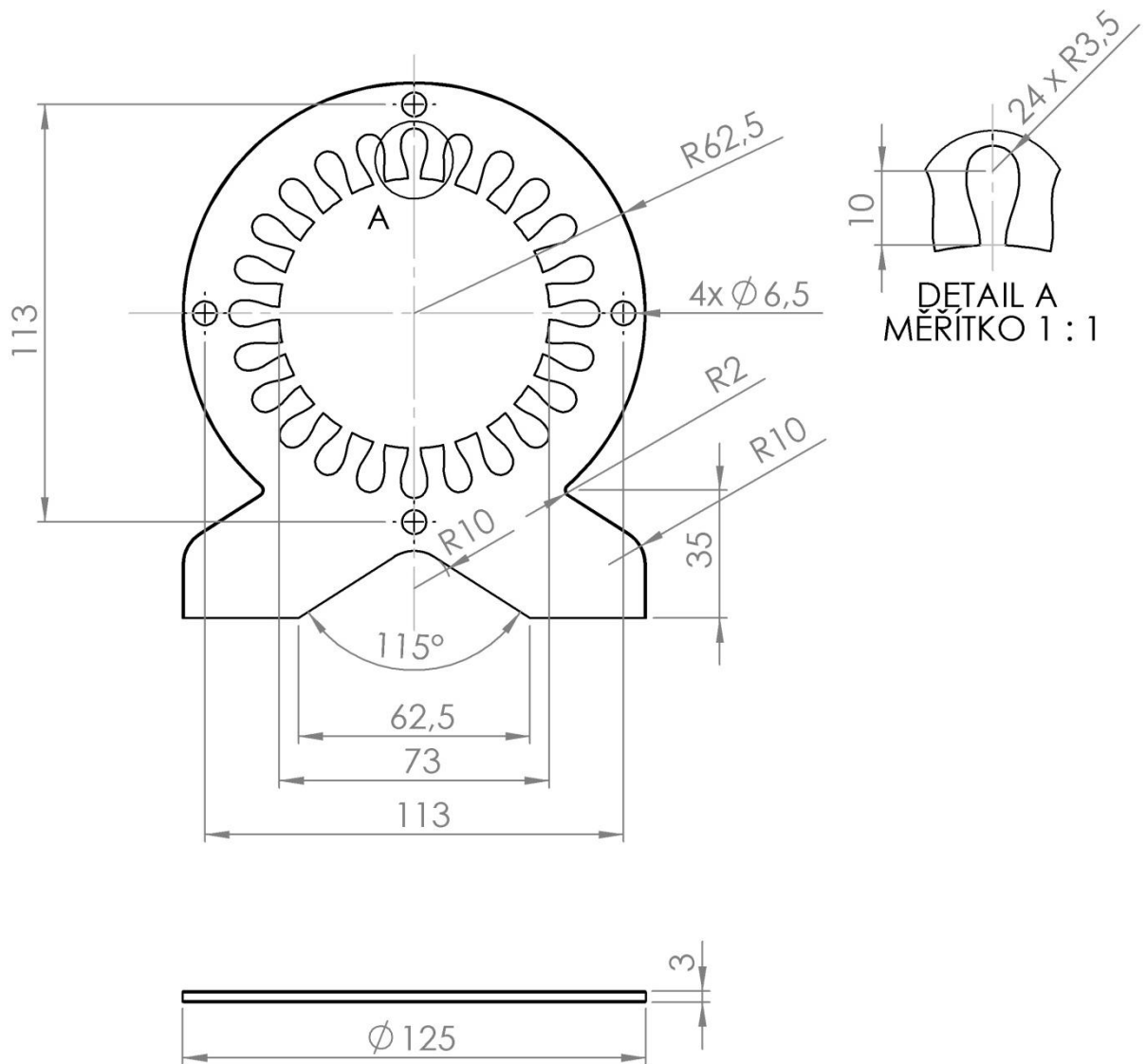
Příloha č. 1: Nákres levého ložiskového stojanu



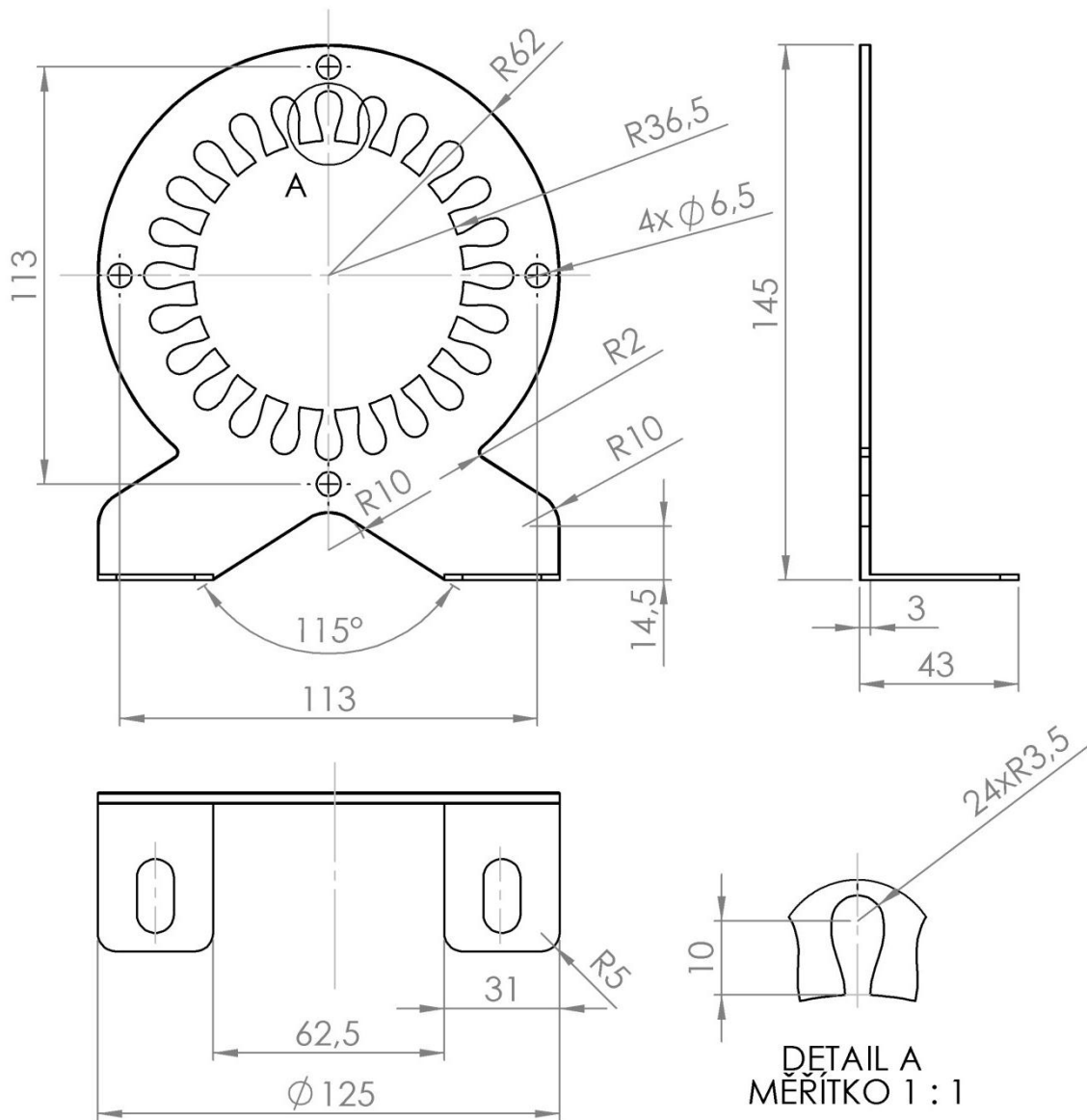
Příloha č. 2: Nákres pravého ložiskového stojanu

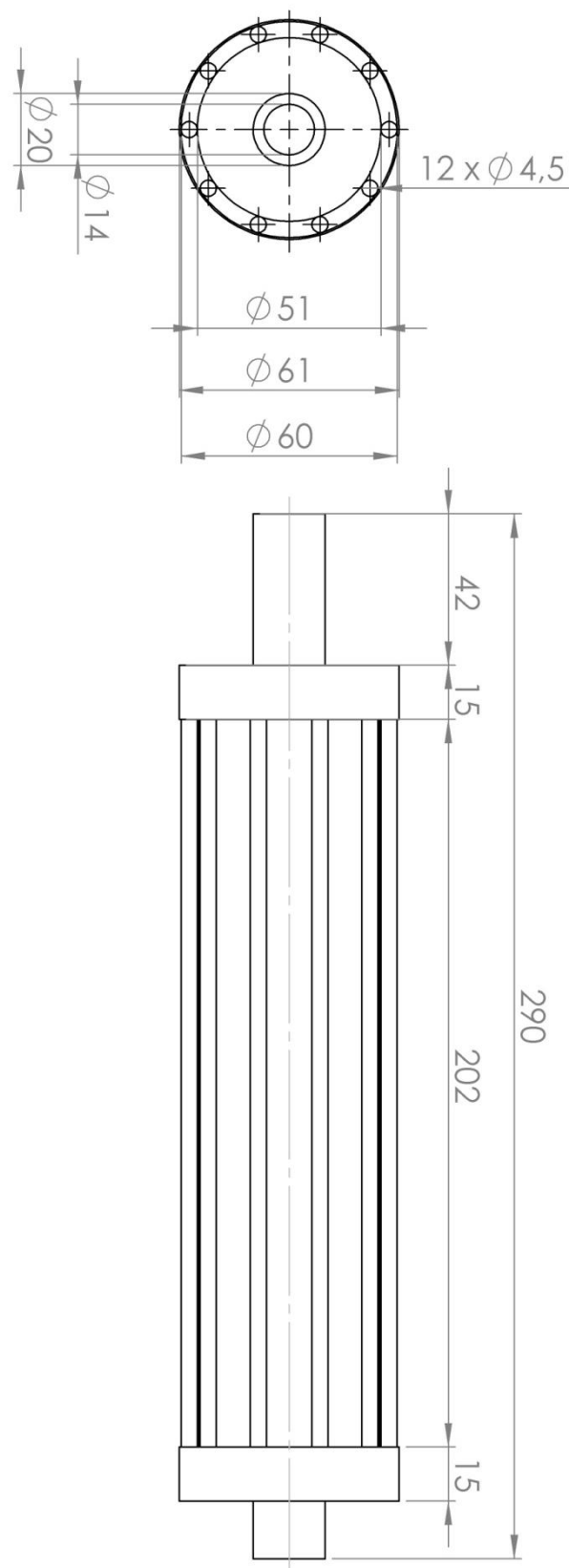
Příloha č. 3: Nákres plechu č. 1

Příloha č. 4: Nákres plechu č. 2

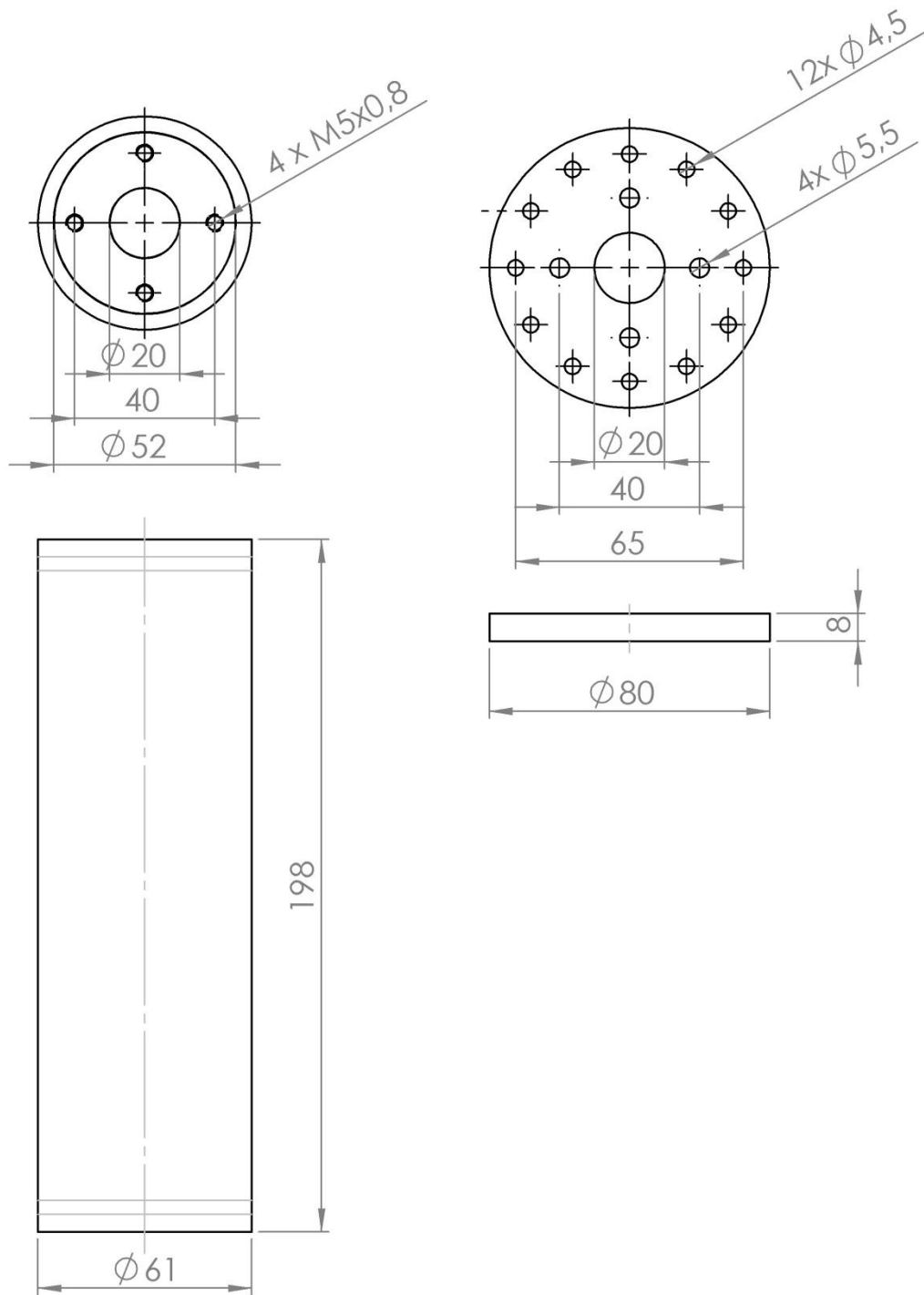


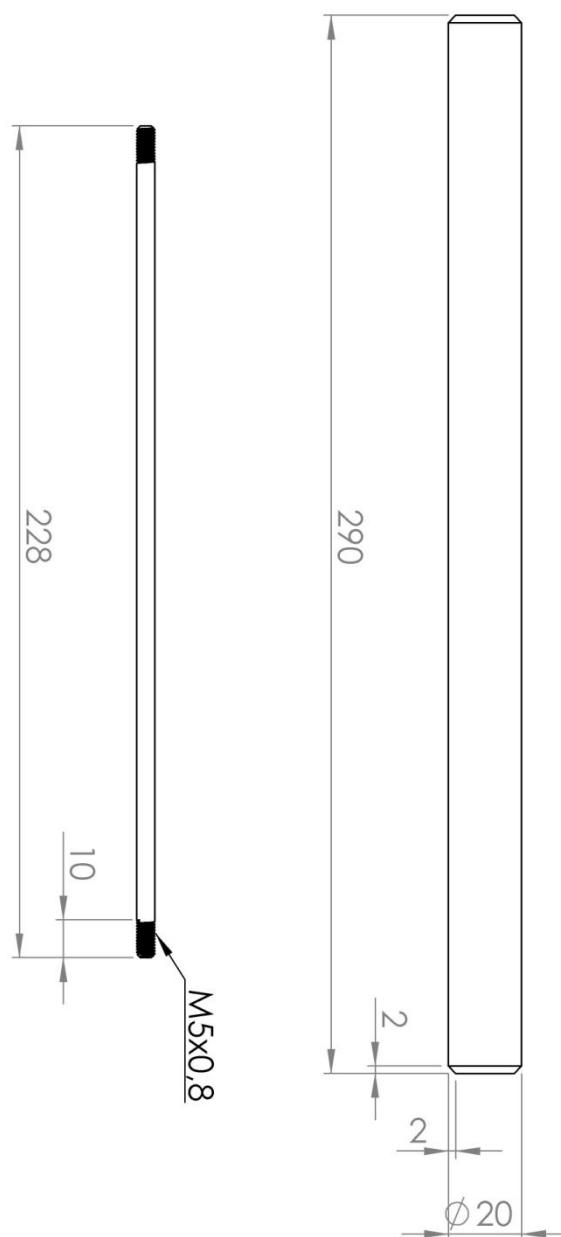
Příloha č. 5: Nákres plechu č. 3



Příloha č. 6: *Nákres rotoru č. 2*

Příloha č. 7: Nákres dílů rotoru č. 3



Příloha č. 8: *Nákres dílů rotoru č. 3*

Příloha č. 9: *Nákres sestavy rotoru č. 3*