

Návrh kompaktní dvouosé hlavy

Matěj Holeček

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem kompaktní dvouosé hlavy pro zadavatelskou firmu Beckhoff Automation s.r.o.. Při zpracování průzkumu trhu nebyl nalezen produkt s vlastnostmi vhodnými pro dané zadání a splňující podmínku kompaktních rozměrů. Na základě rozboru kinematických uspořádání, rozboru pohonů jednotlivých os a zpracovaných ideových návrhů bylo vybráno provedení konstrukce hlavy, které bylo dále zpracováno.

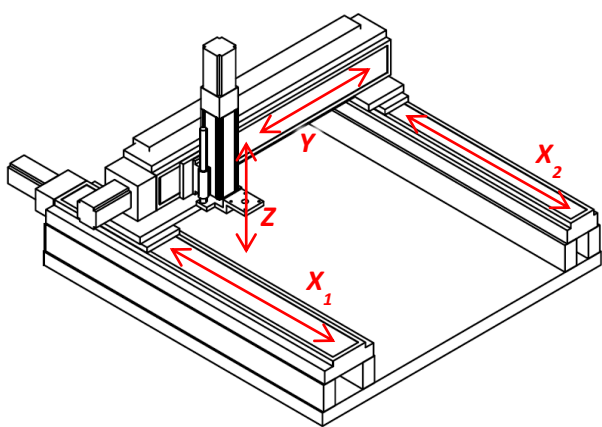
Klíčová slova: kompaktní; dvouosá; hlava; kinematická struktura; servomotor; prstencový motor

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem dvouosé polohovací hlavy pro zadavatelskou firmu Beckhoff Automation s.r.o.. Hlava je určena pro stroj sloužící k zaškolení obsluhy řídicího systému, kterým je ovládán. Stroj se aktuálně skládá ze třech lineárních os v kartézském uspořádání. Po osazení navrhovanou hlavou bude možné spojitě interpolovat celkem pět os, čímž se rozšíří školicí možnosti.

Zadavatel nepožaduje nesení rotačního nástroje. Pro možnost rozšíření schopností hlavy bude na koncovém členu navrženo rozhraní pro případné osazení akčními členy. Hlavním požadavkem zadavatele je možnost spojitě interpolace obou navrhovaných os. Druhým, ne méně důležitým, je požadavek na kompaktnost hlavy plynoucí z rozměrů daného stroje.

Návrh bude probíhat se zřetelem na tyto požadavky. Po provedení návrhu konstrukce hlavy budou určeny omezující podmínky pro případné osazení dalším zařízením pomocí upínacího rozhraní.



Obr. 1. Schéma stroje určeného pro osazení hlavou

V této práci bude nejprve proveden rozbor aktuálního stavu problematiky, zahrnující průzkum světového trhu dvouosých hlav, určení možných uspořádání kinematické struktury a dále rozbor možných způsobů provedení

pohonu os. Ze získaných informací bude vybráno provedení, které bude dále zpracováno do podoby konstrukčního návrhu.

2. Aktuální stav problematiky

Pro vytvoření vhodné konstrukce je v teoretické části této práce proveden rozbor různých koncepčních provedení. Problematika dvouosých hlav je rozdělena do třech částí. První částí je rozbor aktuálního trhu s dvouosými hlavami, v další je provedeno rozdělení podle kinematického uspořádání struktury. Třetí část se zabývá způsoby pohonu os.

2.1. Trh dvouosých hlav

Dvouosé hlavy jako samostatné výrobky jsou na trhu zastoupeny v naprosté většině frézovacími hlavami. Dále je možné najít hlavy pro řezání materiálu vodním nebo laserovým paprskem. Manipulační zařízení či roboty mají v naprosté většině koncové dvě rotační osy integrované do své konstrukce a tvoří tak oddělený celek.

V portfoliu českých i zahraničních firem jsou dvouosé hlavy v širokých rozsazích výkonů a hmotností. Výkony osazených vřeten začínají nejnižší na 15 kW, přičemž hmotnostmi jsou v řádech stovek kilogramů.

Na aktuálním světovém trhu se nepodařilo najít produkt, který by splňoval podmínku spojitěho řízení a zároveň kompaktních rozměrů. Vyráběné hlavy jsou různých kinematických uspořádání, avšak jejich parametry se nepohybují v hodnotách aplikovatelných na zadání této práce.

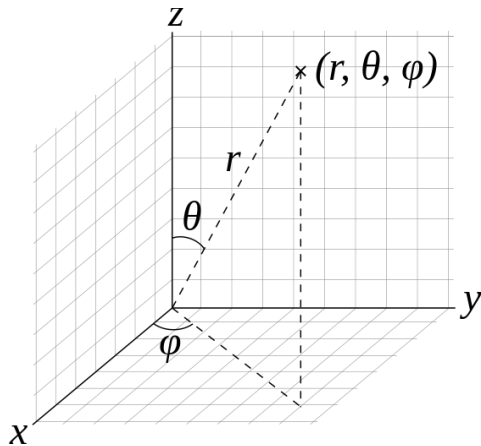
2.2. Uspořádání kinematické struktury

Způsob konstrukčního uspořádání kinematiky určuje některé vlastnosti hlav. Je ovlivněn rozsah dosažitelných pozic referenčního bodu (bod charakterizující akční člen), udává způsob, jakým se struktura pohybuje a předurčuje některé mechanické vlastnosti (jako například tuhost či dynamické vlastnosti).

* Kontakt na autora: matej.holecek@fs.cvut.cz

2.2.1. Pravoúhlé

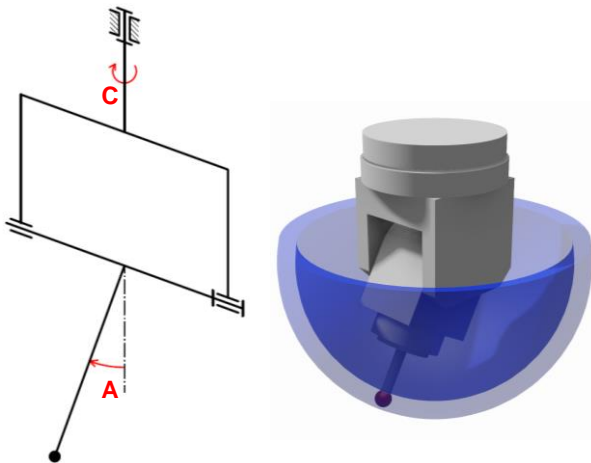
Při pravoúhlém uspořádání svírá osa A a C úhel 90° . Osy se mohou protínat, nebo mohou být mimoběžné. Pokud referenční bod v napřimené poloze leží v ose hlavy, pak při pohybu tohoto systému každá z os přímo odpovídá úhlové souřadnici ve sférickém systému. Natočení osy C pak přímo definuje úhel φ a natočení osy A je definováno úhlem Θ .



Obr. 2. Sférický souřadnicový systém [1]

Vidlicové provedení

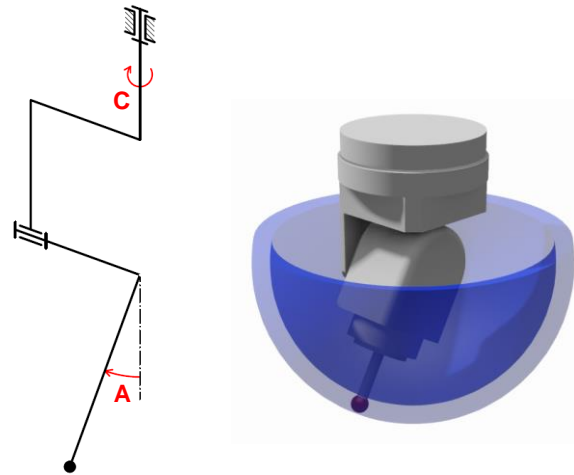
U tohoto provedení, jak už bylo výše napsáno, natočení v obou osách přímo odpovídá úhlům ve sférickém souřadnicovém systému. Obálková plocha opisovaná referenčním bodem je kulový vrchlík, tedy část sférické plochy omezené konstrukčním uspořádáním struktury.



Obr. 3. Vidlicové provedení

Jednostranně uložené provedení

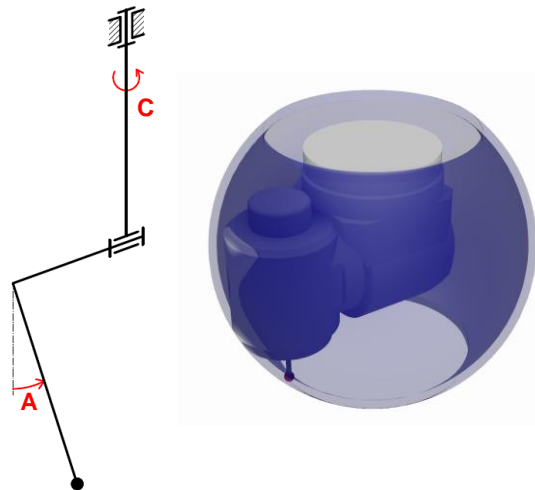
Toto provedení může mít stejně jako předchozí varianta v napřimeném stavu koncový bod ležící na ose hlavy, nebo může být tento koncový bod mimo osu. Hlavní rozdíl oproti vidlicovému provedení je v uložení druhé osy pouze v jednom místě. Síly působící na koncový bod tedy způsobují v místě uložení momentové zatížení. Konstrukčně se tyto momenty musí zachytávat pomocí vhodného druhu uložení.



Obr. 4. Jednostranně uložené provedení

Ortogonální provedení

Obálková plocha varianty s vyoseným referenčním bodem v napřimeném stavu mimo osu hlavy (osu C) již není sférická. K řízení pohybu je tedy nutno využívat jiné kinematické transformace.



Obr. 5. Ortogonální provedení

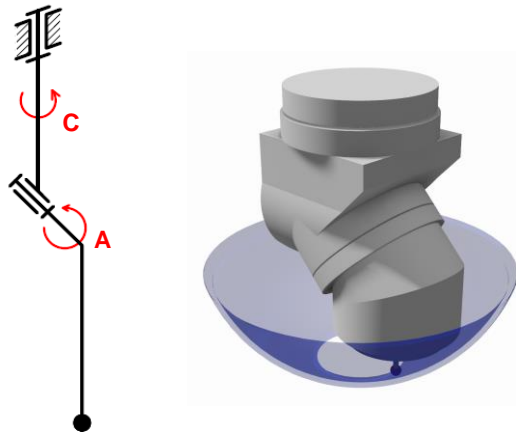
Výhodou tohoto uspořádání je kinematicky neomezený rozsah osy A. Toho lze využít například při obrábění vlečeným kulovým nástrojem. Takto je možné opracovávat plochy, které by jinak touto technologií nebyly dosažitelné bez přeplosování/přeupnutí obrobku.

2.2.2. Angulární

U angulárního provedení svírá osa A a osa C obecně úhel jiný než 90° , nejčastěji však 45° . Stejně jako u jednostranně uloženého provedení je potřeba dimenzovat uložení osy A na momentové účinky od silového působení na referenční bod.

Při natáčení osy A dochází k vychylování referenčního bodu ve všech souřadnicích lineárních os ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$). Pro pohyb referenčního členu v rovině (při uvažo-

vání umístění hlavy na kartézském stroji) s proměnným úhlem natočení je zapotřebí součinnost všech lineárních i rotačních os.



Obr. 6. Angulární provedení

2.2.3. Výběr kinematického uspořádání

Ze zadání přímo nevyplývá konstrukční uspořádání, které má být použito na výsledném návrhu. Z důvodu použití hlavy pro školící účely je po konzultaci se zadávající firmou zvolena pravoúhlá kinematika s koncovým bodem ležícím v ose hlavy. Tato volba již zúžila volbu na dvě varianty a to provedení vidlicové, či jednostranně uložené.

Výše uvedené varianty se liší v provedení osy A. Rozměry stroje určeného pro osazení navrhovanou hlavou kladou požadavek na kompaktní rozměry. Pro vytvoření dostatečně tuhé konstrukce bez výrazného nárůstu rozměrů je pro další zpracování vybráno vidlicové provedení kinematického uspořádání.

2.3. Způsob pohonu

Motory použité pro pohyb v jednotlivých osách musí umožňovat přesné natočení osy do požadované polohy, takové se nazývají servomotory. Servomotor může být v provedení hydraulickém, pneumatickém či elektrickém. Dále se však budeme zabývat pouze použitím elektromotorů, konkrétně motory s elektronickou komutací a permanentními magnety na rotoru (EC servomotor) a prstencovými motory.



Obr. 7. Elektronicky komutovaný servomotor Beckhoff [2]



Obr. 8. Prstencové motory Kollmorgen [3]

Uspořádání pohonu by mělo odpovídat proporcím stroje, jehož konstrukce prakticky neomezuje výšku zástavbového prostoru hlavy. Zvětšování rozměrů půdorysu hlavy však není vhodné.

2.3.1. Pohon osy C

Pohyb osy C může být realizován různými způsoby. Z důvodu požadavku na kompaktní provedení však není možné realizovat některá provedení používaná výrobcí víceosých hlav.

První možnou variantou je pohon motorem přes ozubený věnec. Věnec může být s vnitřním nebo s vnějším ozubením. Při použití vnějšího ozubení je možné vytvořit v ose kola otvor, umožňující přivést energii či média do hlavy. Varianta s věncem s vnitřním ozubením umožňuje umístit samotný motor blíže k ose hlavy.

Druhou variantou je pohon motorem přes ozubený řemen. Vlastnosti a provedení v podstatě odpovídají variantě s pohonem pomocí ozubeného věnce s vnějším ozubením. Výhodou tohoto provedení je však nižší cena, rovnoměrnější záběr řemenu a menší vůle negativně se projevující například při reverzaci otáček.

Třetí variantou je pohon motorem přes šnekovou převodovku. Použití šnekového převodu umožňuje vytvoření většího převodového stupně. Rozdíl oproti předešlým variantám je především v orientaci motoru, jehož osa je v tomto případě kolmá na osu C. Tato orientace, z hlediska daného stroje, však není vhodná. Dochází k nežádoucímu rozšiřování zástavbového prostoru hlavy.

Čtvrtou variantou je pohon prstencovým motorem. Hlavní vlastností prstencových motorů je vytváření mechanické energie přímo v ose otáčení. U této varianty tedy není žádný člen mezi hnacím a hnaným členem, což může vést k menším zástavbovým rozměrům a jednodušší konstrukci. Absence vložených členů mezi hnací a hnaný člen však má za následek nemožnost redukce otáček a zvýšení kroutičního momentu motoru.

2.3.2. Pohon osy A

Pro zajištění co nejnižších zástavbových rozměrů nepřipadá v úvahu vnitřní pohon EC servomotorem, kdy je motor umístěn na pohyblivé části hlavy.

První variantou je vnější pohon motorem. Motor je v tomto případě umístěn na statické části, která je připevněna ke stroji. Mechanická energie je k ose přivedena pomocí převodů. Vlastností a zároveň nevýhodou tohoto provedení je pohyb této osy při samotném polohování osy C. Při rotaci kolem osy C dochází k unášení převodového ústrojí vedoucího k ose A, čímž dochází k jeho relativnímu pohybu vůči statickému motoru a tím i k pohybu osy.

Druhou variantou je přímý pohon prstencovým motorem. V tomto případě vychází rozměry související konstrukce z velikosti použitého motoru, který musí odpovídat nabídce dostupných firem.

2.4. Shrnutí problematiky

V rámci aktuálního světového trhu se nepodařilo nalézt produkt, jehož vlastnosti by splňovali požadavky kladené v zadání práce.

Z důvodu určení hlavy pro zaučování obsluhy k ovládání pětiosé kinematiky a po konzultaci se zadávající firmou byla vybrána pravoúhlá kinematika s referenčním bodem v ose hlavy. Referenční bod se v tomto případě pohybuje po sférické ploše a osy hlavy přímo odpovídají úhlovým souřadnicím sférického systému. Programovaný pohyb je tedy názornější pro nezaučenou obsluhu. Tímto rozhodnutím zůstávají dvě možnosti a to: jednostranně uložené a vidlicové provedení. Použití druhé jmenované varianty umožní vytvoření tužší konstrukce s nižšími nároky na konstrukci.

Pro pohon osy C byly navrženy čtyři varianty pohonu. Pohon s použitím šnekové převodovky není vhodný z důvodu nežádoucího rozšiřování zástavbového prostoru hlavy. Pohon přes věnec s vnějším ozubením je vlastnostmi blízký pohonu pomocí ozubeného řemene. Rozdílem je vysoká variabilita osových vzdáleností, nižší cena a rovnoměrnější chod u řemenových převodů.

Zbývají tedy poslední dvě varianty, pro které budou vytvořeny ideové návrhy, a bude vybrána vhodnější varianta.

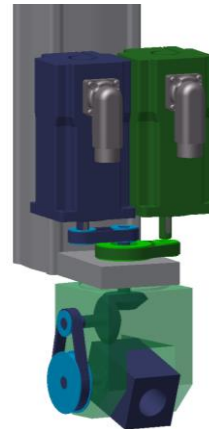
Stejně jako pro pohony osy C budou zpracovány ideové návrhy i pohony osy A.

3. Vlastní řešení

Návrh bude probíhat se zřetelem na požadavek spojitěho interpolování obou os, kompaktní rozměry a cenu celé konstrukce. Prvky konstrukce získaného návrhu budou následně výpočtově ověřeny, zda vyhovují a případně budou optimalizovány.

3.1. Ideové návrhy způsobu pohonu

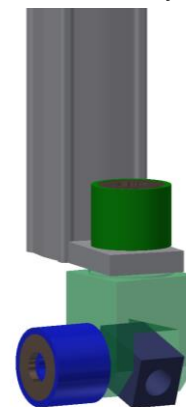
Na základě zpracovaného aktuálního stavu problematiky připadají v úvahu dva možné způsoby pohonu pro každou z os. Celkově získáváme čtyři různé varianty pro různé kombinace pohonů.



Obr. 9. Varianta 1 (2x EC servomotor)

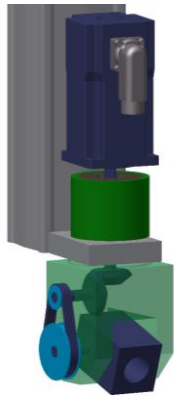
První variantou je pohon obou os pomocí EC servomotorů. Osa C je v tomto případě hnaná pouze přes ozubený řemen.

Pro pohony osy A je potřeba přivést moment ze statické části hlavy až ke koncovému členu. Samotný motor je umístěn mimo svislou osu hlavy z důvodu vyšší symetrie a minimalizace šířky zástavbového prostoru. Pro přenos krouticího momentu je třeba v průběhu jeho přenosu změnit osu rotace o 90°. K tomuto účelu je voleno použití kuželového soukolí. Pro následné spojení přímo s osou A je opět volen převod ozubeným řemenem.



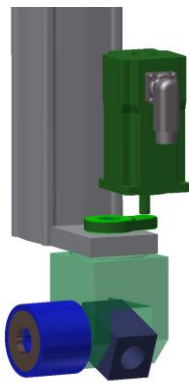
Obr. 10. Varianta 2 (2x prstencový motor)

Druhou variantou je použití dvou prstencových motorů. Hlavním rozdílem mezi použitím prstencového motoru a EC servomotoru je absence jakýchkoliv vložených částí mezi hnaným a hnacím členem. Z toho důvodu je celková velikost této varianty nižší.



Obr. 11. Varianta 3 (prstencový motor a EC servomotor)

Varianty 3 a 4 jsou tvořeny kombinací dvou předěšlých, včetně jejich vlastností.



Obr. 12. Varianta 4 (EC servomotor a prstencový motor)

3.2. Výběr varianty pro rozpracování

Dispozice stroje umožňuje osazení hlavou s vysokým zástavbovým rozměrem statické části, který v podstatě není omezený. Naopak je vhodné vytvoření pohyblivé části s co nejnižšími rozměry z důvodu malého průchodu pod osou Z stroje.

Důležitou skutečností při výběru vhodné varianty je také značný cenový rozdíl mezi EC servomotorem a prstencovým motorem, který je značně dražší. Další výhodou tohoto druhu motoru je fakt, že se nachází v portfoliu zadavatelské firmy této práce.

Použití EC servomotoru k pohonu osy C se tedy jeví jako vhodnější volba. Obdobně se jeví i problematika osy A, kdy prstencový motor také způsobuje vyšší hmotnost a rozměry pohyblivé části hlavy.

Pro rozpracování je tedy zvolena varianta číslo 1, která umožňuje tvorbu kompaktnější části samotné hlavy. Vyšší celková zástavba z hlediska daného stroje netvoří problém.

3.3. Návrh funkčních částí konstrukce

Motory použité pro pohon os jsou zvoleny z nabídky firmy Beckhoff. Konkrétně je zvolen nejmenší dostupný model s označením AM8111. Parametry motoru jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Parametry motoru AM8111 [4]

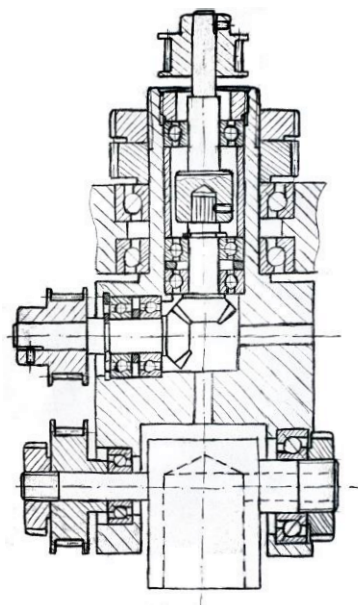
Data for 50 V DC	AM8111
Standstill torque	0.20 Nm
Rated speed	4000 min ⁻¹
Rated power	0.08 kW
Number of poles	6
Rotor moment of inertia	0.029 kgcm ²
Weight	0.6 kg

Dalším prvkem voleným pro použití v konstrukci je kuželové soukolí. Zakázková výroba by byla v tomto případě cenově příliš náročná. V nabídce zadavatelské firmy se však nachází převodové stupně, obsahující kuželové soukolí. Vybrána byla konkrétně varianta AG2250–WPLE40.



Obr. 13. Převodová jednotka AG2250–WPLE40 [5]

Celý převodový stupeň se skládá kromě kuželového soukolí také z planetové převodovky. Pro účely této práce bude tento výrobek rozebrán a kuželové soukolí včetně ložisek bude implementováno do konstrukce hlavy.



Obr. 14. Skica funkčních částí konstrukce

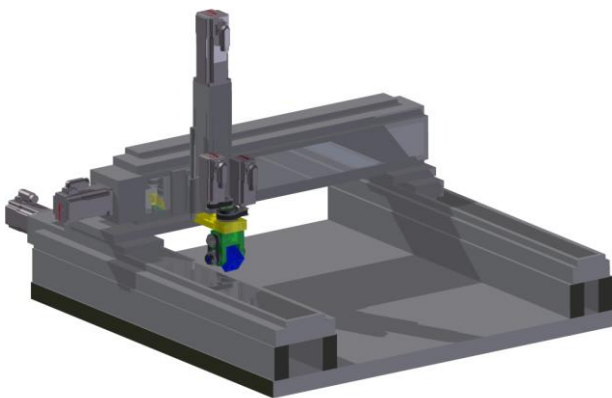
Na obrázku (obr. 14) je již možné vidět návrh provedení konstrukce a provedení pohonu.

Koncepční návrhy jednotlivých uzlů byly modelovány pomocí CAD softwaru Autodesk Inventor Professional 2012. Vytvořením 3D modelů byla verifikována proveditelnost a byly určeny rozměrové požadavky jednotlivých komponent.



Obr. 15. 3D model hlavy

Pro ověření proporcí navržené hlavy a daného stroje byl vytvořen koncepční model, na který byla následně virtuálně umístěna hlava.



Obr. 16. 3D model stroje s hlavou

Přibližné rozměry vytvořeného návrhu hlavy jsou:

celková výška:	250 mm
maximální šířka:	120 mm
šířka pohyblivé části:	90 mm
výška pohyblivé části:	85 mm

Jak je patrné z obrázku (obr. 16), tak zástavbové rozměry jsou ve srovnání se strojem ve vhodném proporčním poměru.

4. Závěr

Na základě zadání byl v této práci nejprve zpracován rozbor aktuálního stavu problematiky zahrnující průzkum trhu dvouosých hlav, rozbor uspořádání kinematické struktury a následně určení možných provedení pohonu jednotlivých os. Z takto získaných teoretických informací byly sestaveny ideové návrhy, z kterých byla vybrána varianta pro celkové zpracování. Hlavní omezující podmínkou při návrhu se stal požadavek na kompaktní rozměry. V rámci výše uvedených informací bylo navrženo konstrukční řešení hlavy.

Poděkování

Děkuji firmě Beckhoff Automation s.r.o. za možnost spolupráce na tomto zajímavém tématu.

Literatura

- [1] Spherical coordinate system. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_coordinate_system
- [2] BECKHOFF. *Documentation: Synchronous servo-motor AM8100*. 26.7.2017. (1.9).
- [3] KOLLMORGEN. *Selection Guide: KBM™ Series Brushless Motors*. KM_SG_00073_RevH_EN.
- [4] BECKHOFF [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: https://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/am8111.htm
- [5] BECKHOFF. : *Gear units AG2250* [online]. 2017-07-26 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/ag2250_ba_en.pdf