

Konstrukce vertikálního manipulátoru pro ultrazvukovou sondu

Ing. Vladimír Škoda

Vedoucí práce: Doc. Ing. Vladimír Andrlík, CSc.

Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá konstrukcí manipulátoru pro ultrazvukovou sondu. Jedná se o mobilní zařízení pro automatizované nedestruktivní zkoušení pomocí bezkontaktní metody EMAT. Zařízení je primárně navrhováno za účelem testování vertikálních válcových ploch, ovšem skenování horizontálních a rovinných ploch není nijak konstrukčně omezeno. Základ modulárního manipulátoru tvoří univerzální nosič nástrojů, ke kterému je možné bez provádění dodatečných úprav připojit různé pracovní hlavice.

Klíčová slova

konstrukce, manipulátor, nedestruktivní defektoskopie, automatizace, EMAT

1 Úvod

Jeden z nejdůležitějších parametrů velkokapacitních zásobníků (Obr. 1) představuje těsnost. Vzhledem k jejich rozměrům (výška i desítky metrů) by bylo velmi nákladné kvůli odhalení netěsnosti nebo jen preventivnímu testování opatřovat lešení či zdvižnou plošinu. Možné řešení představuje plně či částečně automatizované mobilní zařízení pro ultrazvukovou defektoskopii, jehož návrhu je věnován tento příspěvek.

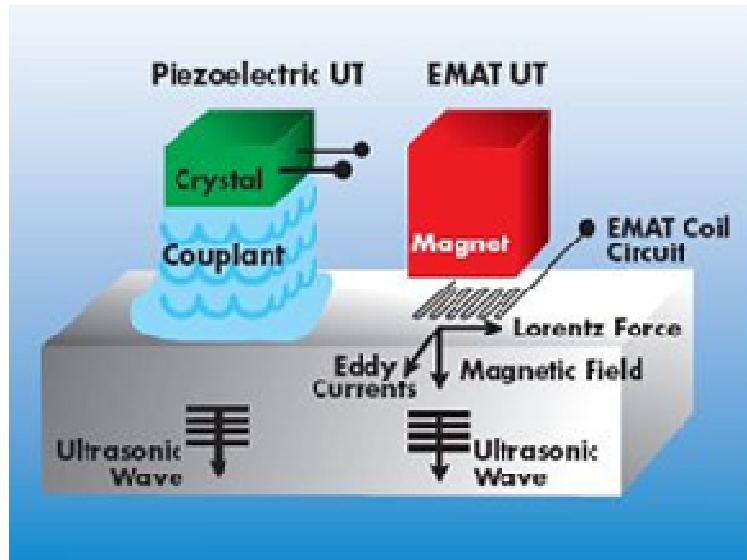


Obr. 1 - Velkokapacitní zásobník (vlevo), mobilní zařízení pro UZ defektoskopii od firmy Silverwing

Povrch zásobníků tvoří válcová plocha o průměru několika metrů až po desítky metrů. Podobných rozměrů dosahuje i jejich výška. Navrhované zařízení by mělo být schopno otestovat válcové plochy od průměru 1 m i rovinné plochy až do výšky (vzdálenosti) 30 m a na rozdíl od existujících produktů osazeno sondou s elektro-magneto-akustickým měničem, tzv. EMAT.

1.1 Porovnání klasické UZ metody a EMAT

Aplikace metody sice nevyžaduje mechanickou vazbu zkoušeného materiálu a sondy. Účinná vzdálenost pro měření však není neomezená. Typická vzdálenost sondy od měřeného materiálu se pohybuje v rozmezí několika desetin milimetru až po jednotky milimetrů. U sondy s piezoelektrickým krystalem dochází při vysokých teplotách k vypařování vazebního média a následně ke snížení či ztrátě vazby. Obdobná situace u EMAT sondy nemůže nastat, sondu lze naopak aktivně chladit vzduchem, aniž by docházelo k ovlivnění vazby. Obě metody využívají zcela odlišného způsobu generování ultrazvukového vlnění v materiálu, porovnání ilustruje Obr. 2.



Obr. 2 - Srovnání principu přenosu vlnění do materiálu

Pro přenos vlnění generovaného piezoelektrickým měničem (crystal) do materiálu je nezbytná přítomnost vazebního média (couplant). EMAT dokáže vybudit vlnění v materiálu přes vzduchovou mezeru i vakuum, odpadá potřeba přítomnosti vazebního média a fyzického kontaktu sondy se zkoušeným vzorkem. Právě vazební medium je příčinou nemožnosti vybudění příčného vlnění přímou (čelní) sondou s piezoelektrickým měničem. Běžně používaná vazební média, tj. voda a olej, nemají modul pružnosti ve smyku, proto jejich prostřednictvím nelze realizovat přenos příčného vlnění. Přenos lze realizovat pomocí přímého styku piezoelektrického měniče se skenovaným povrchem nebo použít tvrzený epoxid. Za těchto podmínek může sonda sloužit pouze jako statické čidlo.

Existence vazebního média odlišuje oba principy, ale není jediným rozdílem. Další odlišnosti vyházejí z vlastních principů, použitých materiálů a vlastností sond jako celku.

Výhody EMAT:

- Možnost měření bez kapalinové nebo kontaktní vazby
- Možnost měření i při vysokých teplotách

2 Konstrukční návrh manipulátoru

Základem celého zařízení je univerzální nosič nástrojů. V rámci této práce byla navržena pouze jedna modulární pracovní hlavice, ovšem konstrukce nosiče příslušenství je přizpůsobena možnosti, v budoucnu rozšířit spektrum příslušenství, viz. Obr. 3. V prvotní fázi se návrh týká pracovní hlavice pro plošné skenování osazené EMAT sondou. Nosič nástrojů

musí být univerzální, použitelný pro maximální počet pracovních hlavice, proto se v průběhu jeho návrhu zohledňují i požadavky pracovního režimu pro přímé skenování.

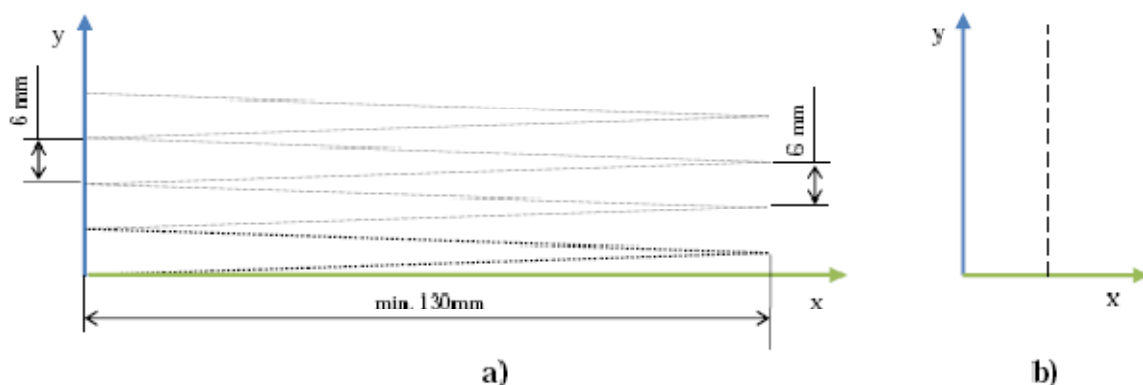


Obr. 3 - Blokové schéma pracovních uzlů

Pracovní režimy a jejich cyklus

Pracovní cyklus a všechny související parametry závisí na pracovním režimu skenování. Návrh manipulátoru je optimalizován pro pracovní režimy: plošné a přímé skenování. Schéma na Obr. 4 zobrazuje směr, rychlost a rozsah pohybů ultrazvukové sondy v závislosti na zvoleném pracovním režimu. Na ose „x“ je použité měřítko 1:2, osa „y“ je zpracována v měřítku 1:1.

v_x = příčný posuv sondy; v_y = pojezdová rychlost



Obr. 4 - Průběh dráhy sondy; a) plošné skenování, b) přímé skenování

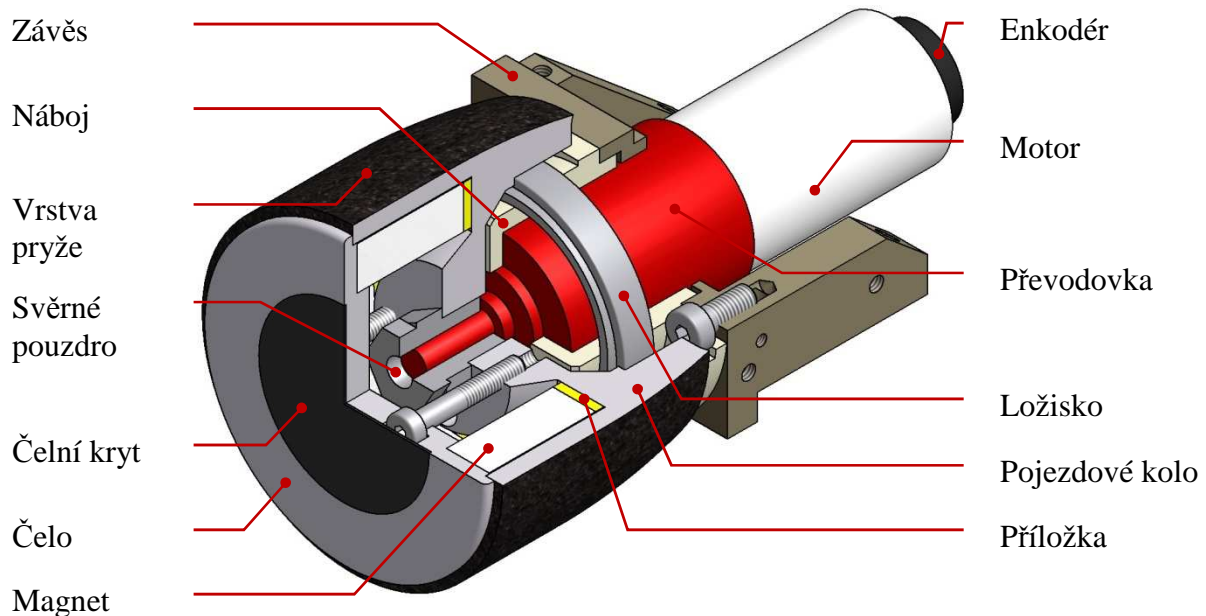
Levá část obrázku zobrazuje průběh pracovního pohybu sondy při plošném skenování. Jedná se pouze o ilustraci charakteru pohybů a jejich součinnosti, pravděpodobně nebude rychlost v průběhu celé dráhy „x“ konstantní, nýbrž bude obsahovat fázi zrychlení a brzdění. Tato skutečnost bude rozebrána po získání informace o velikosti pohybových hmot pracovní hlavice. Přímé skenování probíhá pouze ve směru osy „y“, rychlost není technologicky omezena, při návrhu pohonu bylo dbáno o navýšení této rychlosti na maximální možnou hodnotu.

Souhrn požadavků na instalovaný pohon:

- | | | |
|---|-------------------------------|---------------------|
| ○ | minimální zástavbová délka | rozměrové požadavky |
| ○ | minimální zástavbový průměr | |
| ○ | maximální výkon motoru | výkonové požadavky |
| ○ | velká silová konstanta motoru | |
| ○ | vyšší jmenovité napětí | |

Návrh konstrukce pohonné jednotky

Pohonná jednotka je navržena jako univerzální modul, tzn. všechny čtyři osazené pohonné jednotky jsou naprosto totožné, což umožní snížit počet skladových zásob náhradních dílů. Zobrazení 3D pohledu s ¾ řezem pohonnou jednotkou zachycuje Obr. 5.

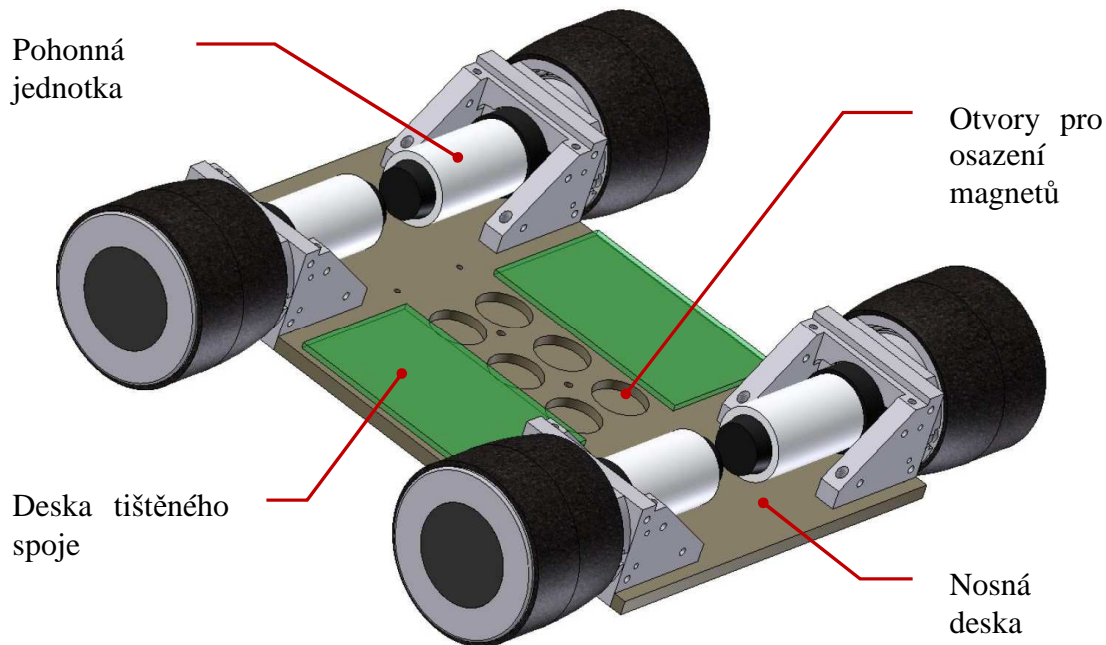


Obr. 5 - Pohonná jednotka

K nosnému rámu se pohonná jednotka připojuje čtyřmi šrouby prostřednictvím duralového závěsu. Na němž je nalisován a šrouby zajištěn dutý náboj, k jehož čelu je přišroubována sestava pohonu, tj. motor a převodovka. Ložisko nalisované na náboj tvoří mechanickou podpěru pojezdového kola, které je potaženo vrstvou technické pryže o tloušťce 2 mm, a vymezuje jeho polohu ve směru osy pohonu. Mechanické spojení kolečka a výstupního hřídele převodovky pro přenos kroticího momentu je realizováno svěrným pouzdem s pojistnou maticí. Do vysoustružené dutiny v přední části kola je vsazen neodýmový magnet. Mezi magnetem a pojezdovým kolem se nachází příložka z magneticky měkkého materiálu, která slouží k usměrnění magnetického toku. Magnet ve tvaru toroidu (prstence) chrání z vnější strany duralové čelo. Otvory a šrouby překrývá tenká vrstva vláknového kompozitu (čelní kryt).

Nosný rám a umístění pohonů

Hlavní nosný element celého vozíku tvoří základní deska z vláknového kompozitu (Obr. 6). Volba materiálu všech dílů byla zcela zásadně ovlivněna rozhodnutím o umístění permanentních magnetů. Ve většině případů by docházelo k ovlivnění magnetického toku a následnému snížení přitažlivé síly. Vláknový kompozit s pryskyřicovým pojivem a skelnou tkaninou vykazuje dobré mechanické vlastnosti, zejména velmi nízkou měrnou hmotnost - 1850 kg/m^3 . Rozměr desky ve směru osy pohonu určila rozměrová rozvaha vycházející z rozměrů navrhované pohonné jednotky a požadavku na minimální průměr skenované plochy. Rozvor a délkový rozměr od něho odvozený vychází z velikosti standardního modulárního polotovaru pro tištěný spoj. Tištěný spoj nese veškeré elektronické součástky řídicího obvodu. Ve středu vozíku se nacházejí zahloubení pro válcové permanentní magnety.

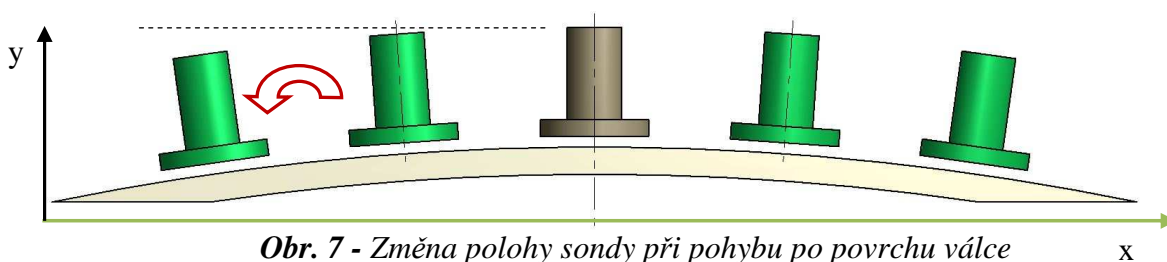


Obr. 6 - Umístění pohonných jednotek na základní desce

Základní nosná deska je opatřena množstvím otvorů (se závity, i bez nich), které slouží k připojení dalších dílců a konektorů. Způsob ukotvení desek s řídicí elektronikou bude dořešen po obdržení podkladů o rozložení montážních otvorů nebo součástek a tištěných spojů na desce. Předpokládá se využití závitových otvorů v desce a plastových distančních sloupků.

2.3 Návrh pracovní hlavičky pro plošné skenování

Ultrazvuková sonda, kterou má být zařízení osazeno, musí neustále setrvávat v konstantní vzdálenosti kolmo ke skenovanému povrchu. Průběh změny polohy hlavičky na povrchu válce zachycuje *Obr. 7*. Hlavičky musí být snadno, bez konstrukčních úprav, vyměnitelná za jiný typ.

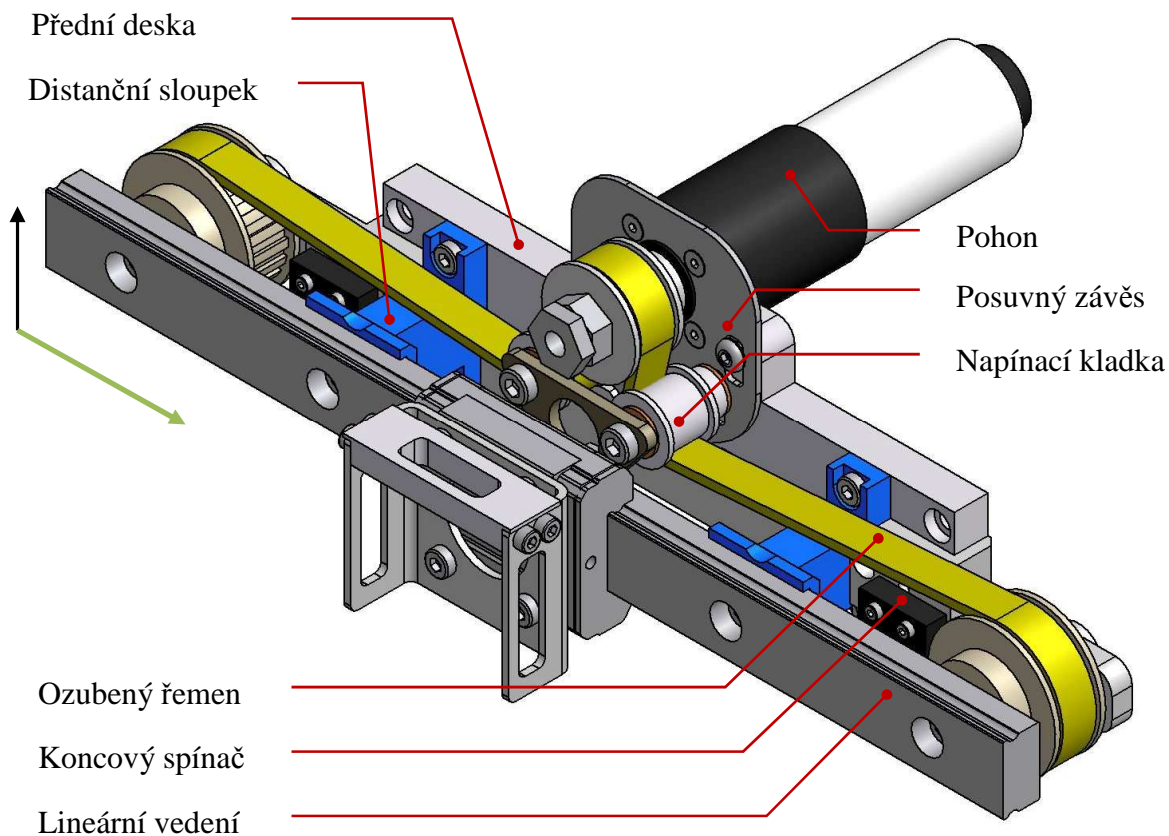


Obr. 7 - Změna polohy sondy při pohybu po povrchu válce

Při pohybu sondy ve směru osy „x“ musí být umožněn její pohyb ve směru osy „y“ a natočení v rovině „xy“ v takovém rozsahu, aby sonda neustále kopírovala povrch ve vzdálenosti 0,1 mm a setrvala kolmo ke skenovanému povrchu v celém rozsahu příčného pohybu, tj. v ose „x“.

Realizace příčného pohybu

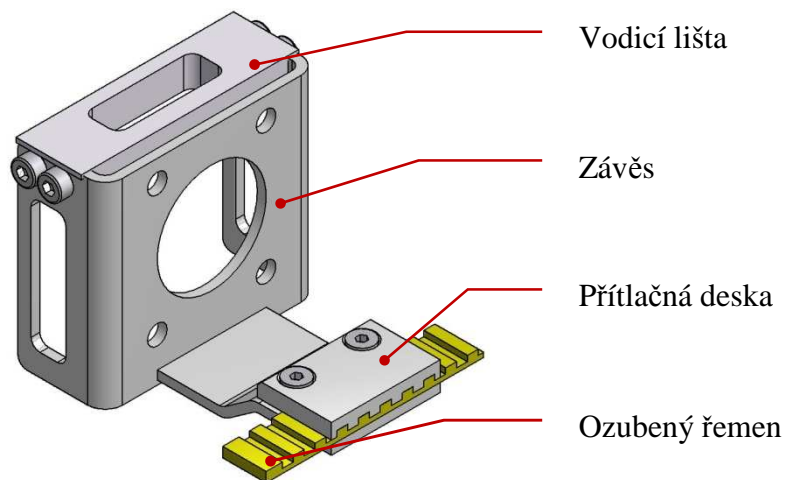
Základem pracovní hlavičky pro plošné skenování je duralová přední deska, která umožňuje snadné připojení hlavičky k nosiči nástrojů a zároveň tvoří hlavní nosný díl celé pracovní hlavičky. Linearitu příčného pohybu sondy zajišťuje miniaturní lineární vedení, které je prostřednictvím distančních sloupků připojeno k přední desce, viz. *Obr. 8*.



Obr. 8 - Realizace příčného pohybu

V prostoru vymezeném distančními sloupky je uložen ozubený řemen se systémem řemenic a kladek. Napínání a předeptnutí řemenu se realizuje prostřednictvím posuvného závěsu hnacího elektromotoru a řemenice. V koncových polohách jsou instalovány bezpečnostní a současně referenční koncové spínače.

Rotační pohyb stejnosměrného motoru se pomocí systému řemenic a kladek transformuje na pohyb lineární, který je následně spojením závěsu a ozubeného řemenu (Obr. 9) přenášen na vozík lineárního vedení.

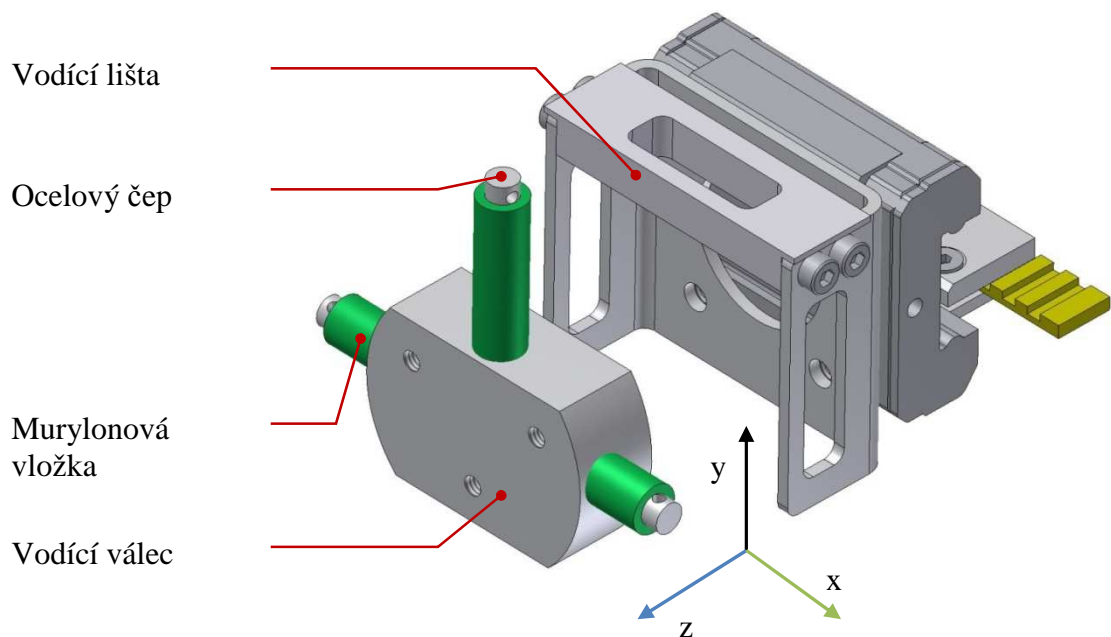


Obr. 9 - Spojení závěsu a ozubeného řemenu

Polyuretanový řemen vyztužují podélná ocelová vlákna (lanka), provrtáním řemenu by došlo ke značnému snížení jeho únosnosti a zvýšení rizika jeho poškození, což plně koresponduje s pokyny výrobce. Spojení tvoří přítlačná deska opatřená drážkami odpovídajícími profilu zubu. Přítlačnou sílu vyvozují dva šroubové spoje.

Systém kopírování povrchu

Kopírování povrchu zajišťuje prizmatické vedení v závěsu a vodící liště (Obr. 10), umožňuje vodícímu válci měnit svou polohu v závislosti na pozici sondy (souřadnici „x“, viz. Obr. 7).



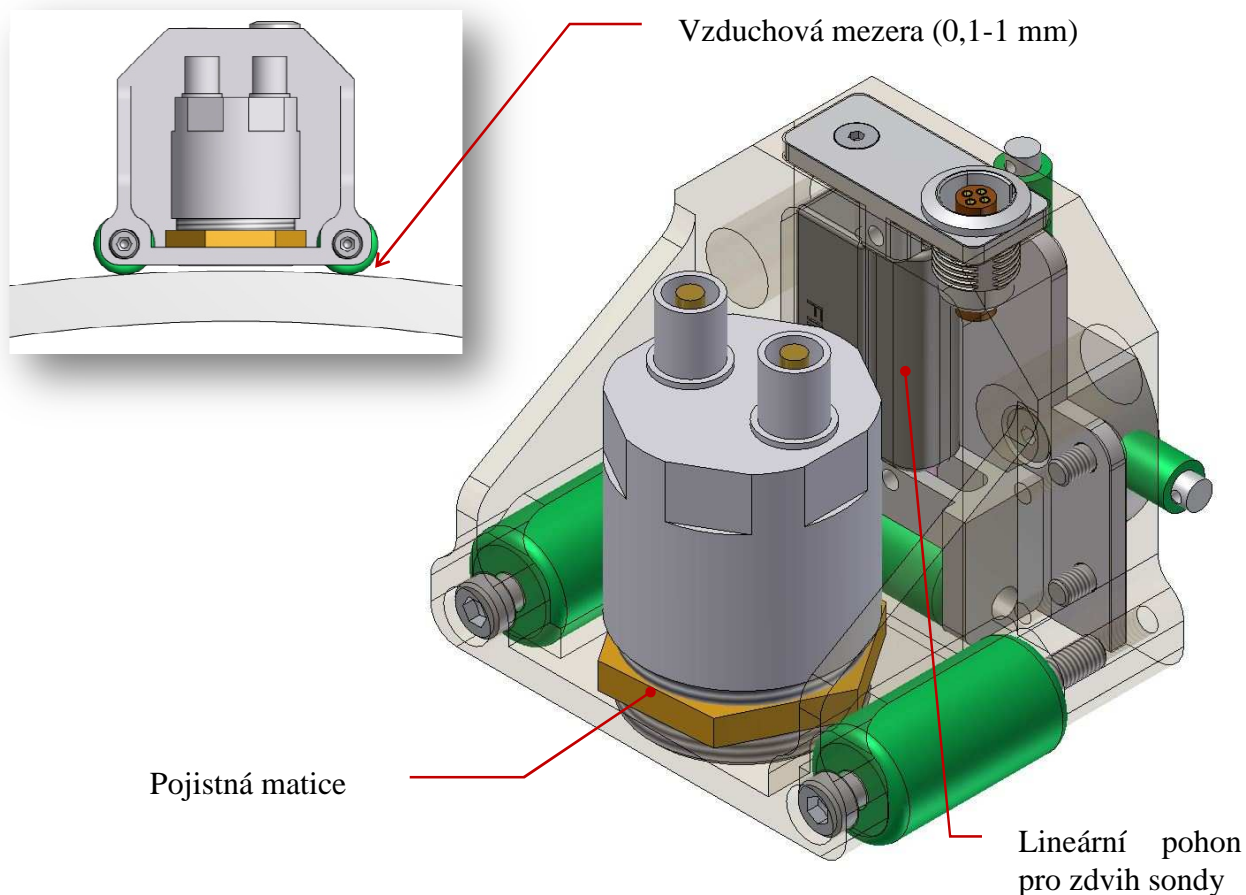
Obr. 10 - Systém kopírování povrchu

Vnitřní stěny závěsu jsou opatřeny teflonovou folií, pro dosažení lepších kluzných vlastností. Ocelové čepy omezují pohyb pouze na rovinu „xy“, poloha sondy potažmo celého zařízení se v ose „z“ mění pouze vlivem rychlosti pojezdu nosiče nástrojů. Murylonové vložky snižují tření.

Systém vymezení konstantní vzdálenosti sondy od povrchu

Vezmeme-li v potaz velikost přitažlivé síly sondy, respektive jejího permanentního magnetu, a požadovanou rychlost příčného pohybu (řádově stovky mm/s) nelze zajistit konstantní vzdálenost sondy od povrchu jinak než mechanicky. Rozměrově vhodné pohony nedisponují potřebným výkonem (zejména rychlostí a silou), aby byly schopny kopírovat povrch s požadovanou přesností, ať se jedná o pohony lineární nebo rotační. Pokud některý pohon nabízel dostatek výkonu, nebylo možné uvažovat o jeho instalaci z důvodu absolutně nevhodné velikosti, případně hmotnosti.

Konstantní vzdálenost sondy od skenovaného povrchu zajišťují plastové válečky (Obr. 11) z Murylonu. Jedná se o polymer se zvýšenou otěruvzdorností a velmi dobrými kluznými vlastnostmi. Zvýšená otěruvzdornost se projevuje ve sníženém opotřebení, neboť při pohybu sondy nebude docházet pouze k odvalování, ale také částečně ke smyku. Jemné doladění vzdálenosti sondy od povrchu lze provést jejím prostým otáčením po povolení pojistné matice, neboť sonda je opatřena závitem, za který je také upevněna. Kontrolu vzdálenosti je nutné provést před zahájením každého měření a zvláště při změně skenovaného povrchu.



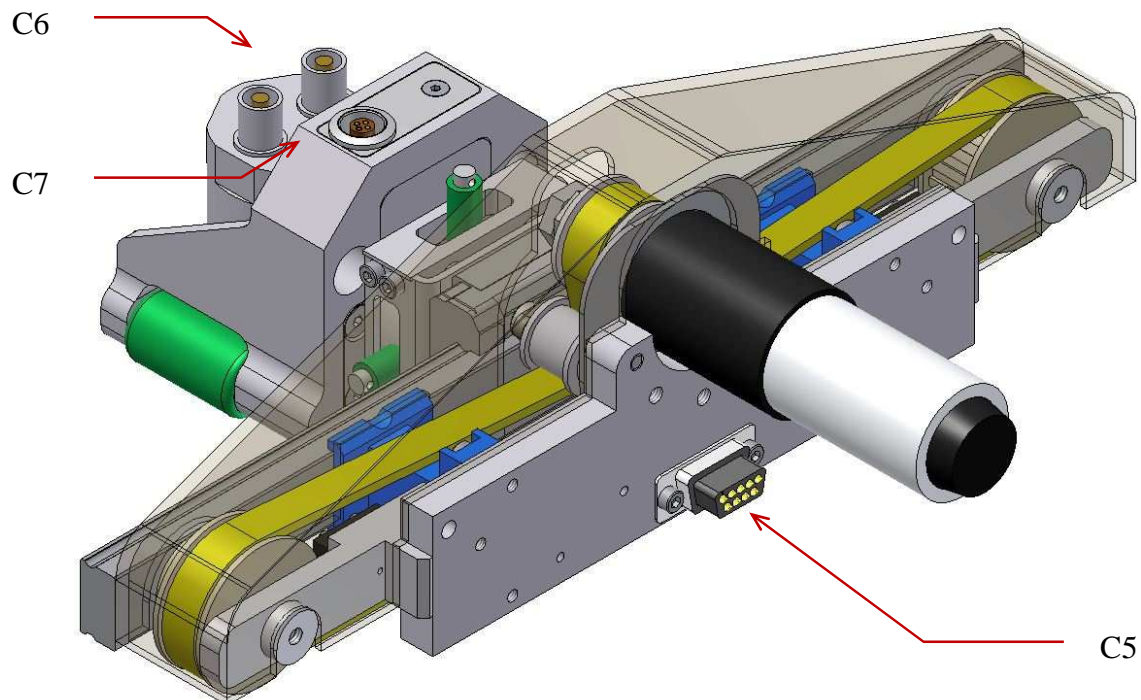
Obr. 11 - Konstrukce vozíku sondy (vpravo), kopírování povrchu (vlevo nahoře)

Nosným elementem vozíku sondy je frézované duralové těleso, které je osazeno EMAT sondou, distančními válečky a také lineárním pohonem. Ten vykonává zdvih celého vozíku sondy po dokončení skenování požadované vzdálenosti, tj. před návratem celého manipulátoru do výchozí polohy. Pokud by nedošlo k nadzvednutí vozíku sondy před zahájením reverzace vertikálního pojezdu, byl by vozík smýkán po distančních válečkách a došlo by k jejich zničení. Rozbor a důvody vedoucí k rozhodnutí o instalaci distančních válečků rozebírá kapitola.

Sestava pracovní hlavičky pro plošné skenování

Pracovní hlavičky pro plošné skenování rovinných i válcových ploch zachycuje virtuální 3D model na Obr. 12.

V modelu není zahrnuto vedení kabelů a řemenový převod není opatřen ochranným krytem. Vyobrazeny nejsou ani mechanické zarážky na lineárním vedení, které by měly v případě defektu ozubeného řemenu nebo řídicího systému zabránit separaci vozíku lineárního vedení od kolejničky.



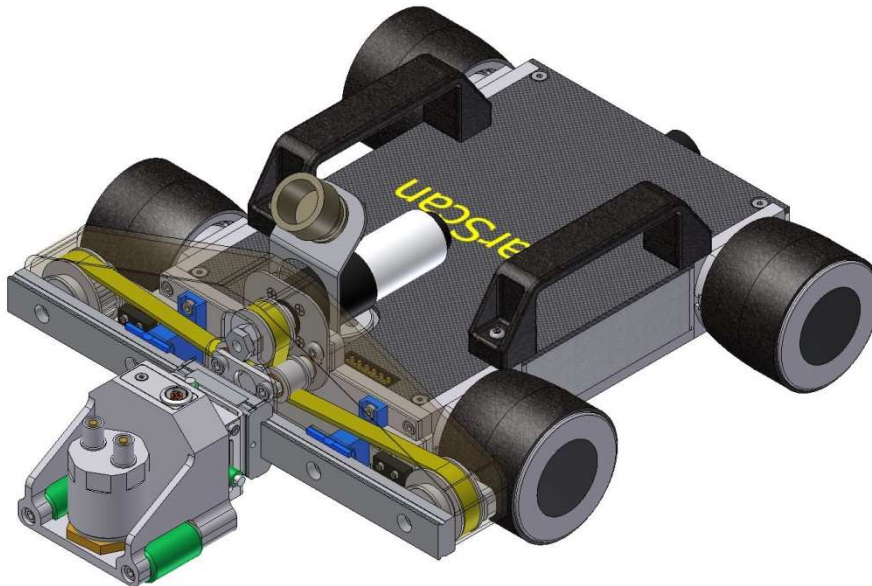
Obr. 12 - Rozmístění konektorů na pracovní hlavičce

Pracovní hlavička disponuje referenčními koncovými spínači, které musí být propojeny s řídicí jednotkou. Propojení zajišťuje průmyslový konektor umístěný v duralové přední desce. Během ukotvení pracovní hlavičky k nosiči nástrojů dojde také k propojení kontaktů koncových spínačů prostřednictvím konektoru (C5) s řídicí jednotkou. Propojovací vodiče mezi koncovými spínači a konektorem vedou drážkou v přední desce, která je zakryta kompozitovou ochrannou deskou. Lze snadno provést výměnu spínačů i vodičů. Propojovací vodiče mezi sondou a nosičem nástrojů jsou pevně propojeny s řídicí jednotkou na jedné straně, na straně druhé jsou opatřeny konektory dle použité sondy (C6), případně je použita odpovídající redukce. Vyvedení konektoru pro připojení pohonu zdvihu sondy na přední desku by bylo velmi obtížné, proto je opatřen konektorem pouze vozík sondy (C7). Přívodní vodič je pevně spojen s nosičem nástrojů a bude přiveden kabelovou chráničkou společně s vodičem pro propojení se sondou.

Pro zajištění bezpečnosti obsluhy i ochrany vodičů vedoucích k vozíku sondy, bude řemenový převod opatřen plastovým krytem, který příznivě ovlivní i celkový vzhled zařízení. Materiál nesmí být magnetický, aby nedocházelo k ovlivňování magnetického toku permanentních magnetů uložených v pojezdových kolech. Navržen byl kryt z kouřového akrylátového plexi, jeho profil zajišťuje dostatečnou pevnost a zvolený odstín umožňuje alespoň částečnou vizuální kontrolu stavu ozubeného řemenu.

Virtuální 3D model navrhovaného zařízení

V předchozích podkapitolách byl podrobně popsán návrh pracovních modulů, tj. nosiče nástrojů a pracovní hlavice pro plošné skenování. Jejich propojením vznikne kompletní manipulátor, jehož návrh je hlavním cílem této práce. Virtuální 3D model navrhovaného zařízení vytvořený v programu Autodesk Inventor zachycují *Obr. 13* a *Obr. 14*.



Obr. 13 - Navrhovaný manipulátor – přední 3D ISO pohled

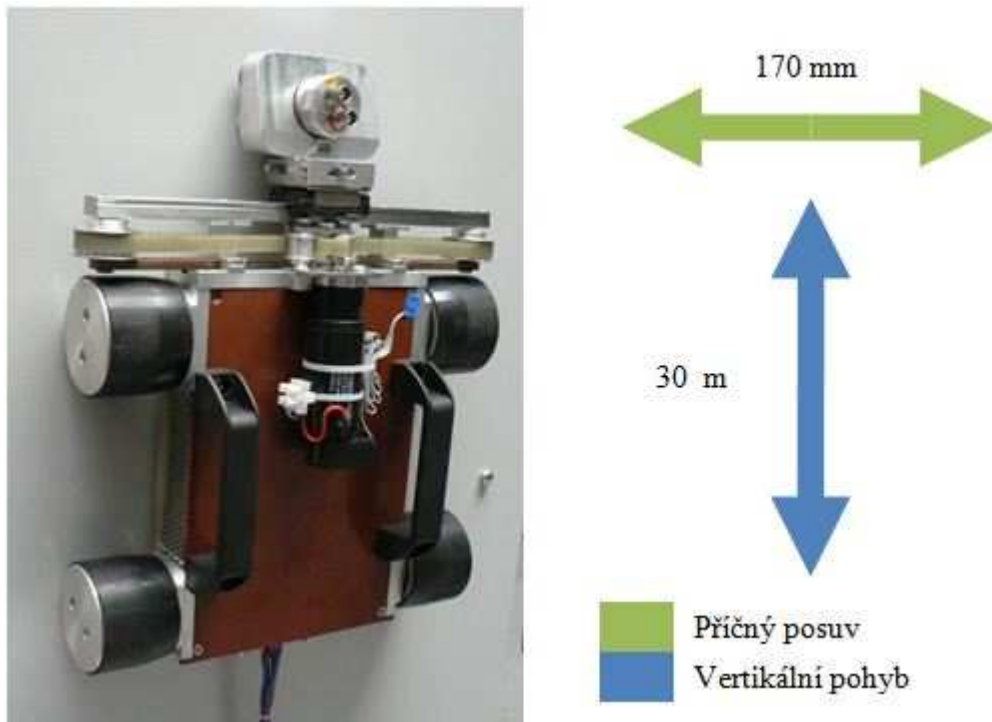
Model obsahuje všechny mechanické části manipulátoru, kromě kabelové chráničky vedoucí od kabelové průchodky k vozíku sondy. Její přesná délka a tvar závisí na tuhosti použité chráničky a elektrických vodičů. Potřebná délka a materiál chráničky budou zvoleny na základě experimentálního testování.



Obr. 14 - Navrhovaný manipulátor – zadní 3D ISO pohled

3 Rozbor provozu navrženého manipulátoru

V průběhu vývoje zařízení StarScan byl vyroben také jeden skutečný (ne virtuální) prototyp (viz. Obr. 15), na kterém probíhalo ověřování předpokladů a kontrolních výpočtů. Testování chování zařízení bylo značně omezeno absencí systému řízení, proto nemohl být proveden rozbor chování během celého pracovního cyklu. Vyhodnocovalo se tedy pouze chování zařízení v průběhu autonomních pohybů. Samostatně se provádělo vyhodnocení chování při vertikálním pojíždění (pohyb přímočarý i po trajektorii) a příčném pohybu sondy (sonda nebyla aktivní). Další oblast testování se týkala ověření bezpečného setrvání na svislé ploše.



Obr. 15 - StarScan na svislém povrchu– prototyp A

3.1 Setrvání na svislé ploše, dynamika pohybů

Prototyp zařízení byl umístěn na svislou rovinnou plochu, připojen k napájecímu zdroji a celková hmotnost byla pomocí závaží zvýšena na výslednou hodnotu 14 kg (s tolerancí 0,1 kg). Závaží bylo upevněno za plastová madla a uvedeno do klidové polohy. Zapojení motorů nosiče nástrojů vycházelo z navrženého blokového schématu, tj. motory na stejné straně zařízení byly spojeny paralelně. Následně se připojily k napájecímu zdroji tak, aby se všechna pojezdová kola otáčela stejným směrem, tzn. jeden pár vodičů se se zdrojem propojil inverzně. Velikost napájecího napětí bylo možné regulovat v rozmezí 0–24 V, čehož se využívalo při testování dynamických vlastností pohonu a přilnavosti pojezdových kol k testovanému povrchu.

S častým zastavováním a rozjížděním se pojíždělo ve vertikálním směru. Zařízení ulpívalo bezpečně na svislé ploše a bez výjimek reagovalo na změnu velikosti napájecího napětí změnou rychlosti. Nedochovalo k žádnému prokluzování pojezdových kol, ani k viditelné změně směru jízdy. Po změně konfigurace zapojení pohonů probíhalo testování změny směru, k čemuž se využívá difference otáček motorů. Zařízení bez viditelného zvýšení proudového odběru měnilo směr dráhy dle poměru velikostí napájecího napětí přivedeného k paralelně spojeným párům motorů.

Největší omezení přinesla absence systému řízení v průběhu testování příčného pohybu sondy. Vzhledem v této skutečnosti nebylo možné otestovat dynamické vlastnosti skenovací

hlavice. Testování realizace příčného pohybu sondy probíhalo pouze při malé rychlosti s velkým časovým odstupem mezi změnou směru pohybu sondy.

K úspěšnému sejmutí zařízení z kovové podložky bylo nutné vyvinout sílu v řádu desítek newtonů. Jinak zařízení na svislé ploše setrvalo naprosto bezpečně i v průběhu přejíždění drobných překážek, jejich výška se pohybovala v rozmezí 0,5-2 mm. Základní nosná deska z kompozitního materiálu umožnila při přejíždění nerovností svou částečnou deformací kontinuální kopírování povrchu. Kontakt s podložkou si tak zachovávala všechna pojezdová kola. V průběhu jízdy však nedocházelo k výraznému prohýbání nosné desky a jejímu následnému kontaktu ani s povrchem válce o průměru 1 metr.

3.2 Porovnání technických parametrů

Snadné srovnání navrženého zařízení s konkurencí a prototypem Microb umožní výpis technických parametrů navrženého zařízení. Hodnocení produktu z hlediska designu, intuitivnosti ovládání, snadné manipulace lze provést pouze na základě odborného výzkumu, jelikož hodnocení obdobných parametrů vykazuje značně subjektivní základ. Komerční úspěch navrženého manipulátoru lze vykázt pouze dle počtu prodaných kusů. Srovnání parametrů navrženého zařízení - StarScan s konkurenčním produktem britské společnosti Silvewing UK - ScanmapVS, prototypem firmy Starmans – Microb a požadovanými parametry, které byly stanoveny na počátku vývoje manipulátoru, shrnuje následující Tab. 1.

Parametr	ScanmapVS	Microb	StarScan	Požadavek
Délka	405 mm	350 mm	401 mm	-
Šířka	250 mm	250 mm	290 mm	-
Výška	110 mm	120 mm	148 mm	-
Hmotnost bez kabelů	8 kg	5,5 kg	8 kg	-
Celková hmotnost	13,6 kg	11 kg	14 kg	-
Pojezdová rychlost-plošné sken.	900 mm/min	-	750 mm/min	-
Pojezdová rychlost-přímé sken.	1,5 m/min	-	4,4 m/min	-
Rychlost příčného posuvu	600 mm/s	-	425 mm/s	-
Výkonnost plošného skenování	7 m ² /hod	-	7,65 m²/hod	-
Výkonnost přímého skenování	1,5 m/min	-	4,4 m/min	-
Šířka záběru	130 mm	120 mm	170 mm	<i>min. 130 mm</i>
Délka kabelů	30 m	4,5 m	30 m	<i>30 m</i>
Minimální průměr válce	1 m	1 m	1 m	<i>1 m</i>
Sonda	piezo.	piezo.	EMAT	<i>EMAT</i>
Napájení	12 V DC	12 V DC	48 V DC	-

Tab. 1 - Porovnání technických parametrů

Výsledkem vývoje se stává zařízení s rozměry velmi blízkými podobným zařízením, pouze celková výška StarScan se trochu vymyká, což je způsobeno umístěním závěsu průchodky

kabelové chráničky. Pokud bychom závěs a průchodku nezahrnuli do hodnocení, výška zařízení by dosahovala necelých 100 mm. Hmotnost se také téměř neliší.

4 Závěr

Jedná se o jedinečné zařízení pro automatizované zkoušení vertikálních rovinných i válcových ploch pomocí bezkontaktní metody EMAT.

Manipulátor byl konstruován jako modulární systém. Základ navrhovaného zařízení tvoří univerzální nosič nástrojů, ke kterému je možné snadno připojit specializované pracovní hlavice. V rámci práce byla vytvořena pracovní hlavice pro plošné skenování osazená ultrazvukovou sondou využívající principu EMAT. Jednoduchý systém upínání pracovních hlavic a jejich propojení s nosičem nástrojů a jeho řídicí jednotkou umožňuje v budoucnu značně rozšířit sortiment příslušenství. Navrhované zařízení je schopné vyvinout vysokou pojezdovou rychlost (jednotky metrů/minutu) při přímé jízdě ve vertikálním směru, což by ve spojení s pracovní hlavicí pro přímé skenování umožnilo velmi produktivně provádět přímé skenování nebo měření tloušťky materiálu.

Instalace EMAT sondy si vyžádala vytvoření vozíku sondy robustnější konstrukce, což negativně ovlivnilo rychlost příčného pohybu. Toto omezení ovšem zcela vyváží zvýšení šířky záběru příčného skeneru a snížení počtu reverzací pohybu v koncových polohách při otestování povrchu o stejné ploše. Výsledná produktivita navrhovaného zařízení převyšuje konkurenci o 0,65 m²/hod. Vertikální dosah zařízení odpovídá zadání a od ScanmapVS se nijak neliší. Při použití pracovní hlavic pro přímé skenování dokáže nosič nástrojů vyvinout rychlost 4,4 m/min, což téměř třikrát převyšuje hodnotu rychlosti přímého skenování zařízení B-Scan firmy Silverwing UK.

Seznam použité literatury

- [1] FUKA, Josef; HAVELKA, Bedřich. *Elektřina a magnetismus: Fyzikální kompendium pro vys. školy. Díl 3.* 2. uprav. vyd. Praha: SPN, 1965. 674 s.
- [2] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí.* 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4
- [3] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. 460 s. ISBN 80-03-00097-1
- [4] UZIMEX PRAHA, s.r.o. *Malé stejnosměrné motory.* [on-line]. [cit 2009-09-30]. Dostupný z WWW: http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf
- [5] UZIMEX PRAHA, s.r.o. *Řízení malých stejnosměrných motorů maxon.* [on-line]. [cit 2009-09-30]. Dostupný z WWW: http://www.uzimex.cz/soubory/20040315_tat_2004-03.pdf