

# TAČR THETA

## Název projektu:

Výzkum a vývoj pokročilých technologií na zvýšení efektivnosti provozních kontrol komponent JE s využitím pokročilých robotických technologií s intuitivním programováním polohování

(TK02020142)

Technická zpráva

## **[O] Analýza architektury robotu včetně návrhu řídicího systému výsledné robotické technologie, metodika intuitivního programování**

Martin Švejda (ZČU), Arnold Jáger (ZČU)

datum: 29. 12. 2021



## Identifikátor účastníka projektu:

ZČU: Západočeská univerzita v Plzni, ÚJV: ÚJV Řež, a. s.

# Obsah

<b>Popis z přihlášky projektu</b>	<b>2</b>
<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>Architektura a mechanická konstrukce robotického systému</b>	<b>3</b>
Inovace konstrukce a HW vybavení robotu	6
Inovace servoměniče kompaktních aktuátorů	11
<b>Řídicí systém robotického systému</b>	<b>12</b>
Uživatelské prostředí - HMI (operátorský panel)	13
Speciální funkce řídicího systému pro účely NDT	15
Koordinovaný JOG robotu pro aplikace NDT	15
Datový postprocesor	16
<b>Virtuální simulační model</b>	<b>18</b>
<b>Reference</b>	<b>18</b>

## Popis z přihlášky projektu

Návrh architektury robotického systému polohování sond dle požadavků řešitele ÚJV, analýza možnosti řízení navrženého komplexního robotického systému dle požadavků na provádění provozních zkoušek, návrh topologie řídicího systému, sumarizace všech klíčových požadavků na specifické chování systému (např. řízení dalších veličin jako síly, přítlaku, detekce kolizí, atd.), návrh rozhraní s periferními zařízeními (defektoskopy, atd.), návrh odpovídajícího HW vybavení, návrh uživatelského rozhraní.

# Úvod

Předložená technická zpráva se zabývá uceleným přehledem vývoje architektury robotického systému pro pokročilé zkoušky v oblasti nedestruktivního testování<sup>1</sup>. V následujících kapitolách jsou popsány oblasti vývoje robotu, ve kterých byly realizovány plánované výzkumné aktivity, jedná se především o následující:

1. Aktivita 3.1: Architektura robotického systému (ukončeno 2020)
2. Aktivita 3.2: Řídicí systém robotického systému (ukončeno 2021)
3. Aktivita 3.3: Metody intuitivního programování, zpracování zaznamenaných dat a jejich následná interpretace robotickým systémem (ukončeno 2021)
4. Aktivita 4.1: Mechanická konfigurace robotického systému (ukončeno 2021)
5. Aktivita 4.2: Konfigurace HW a SW řídicího systému (pokračuje do 2022)

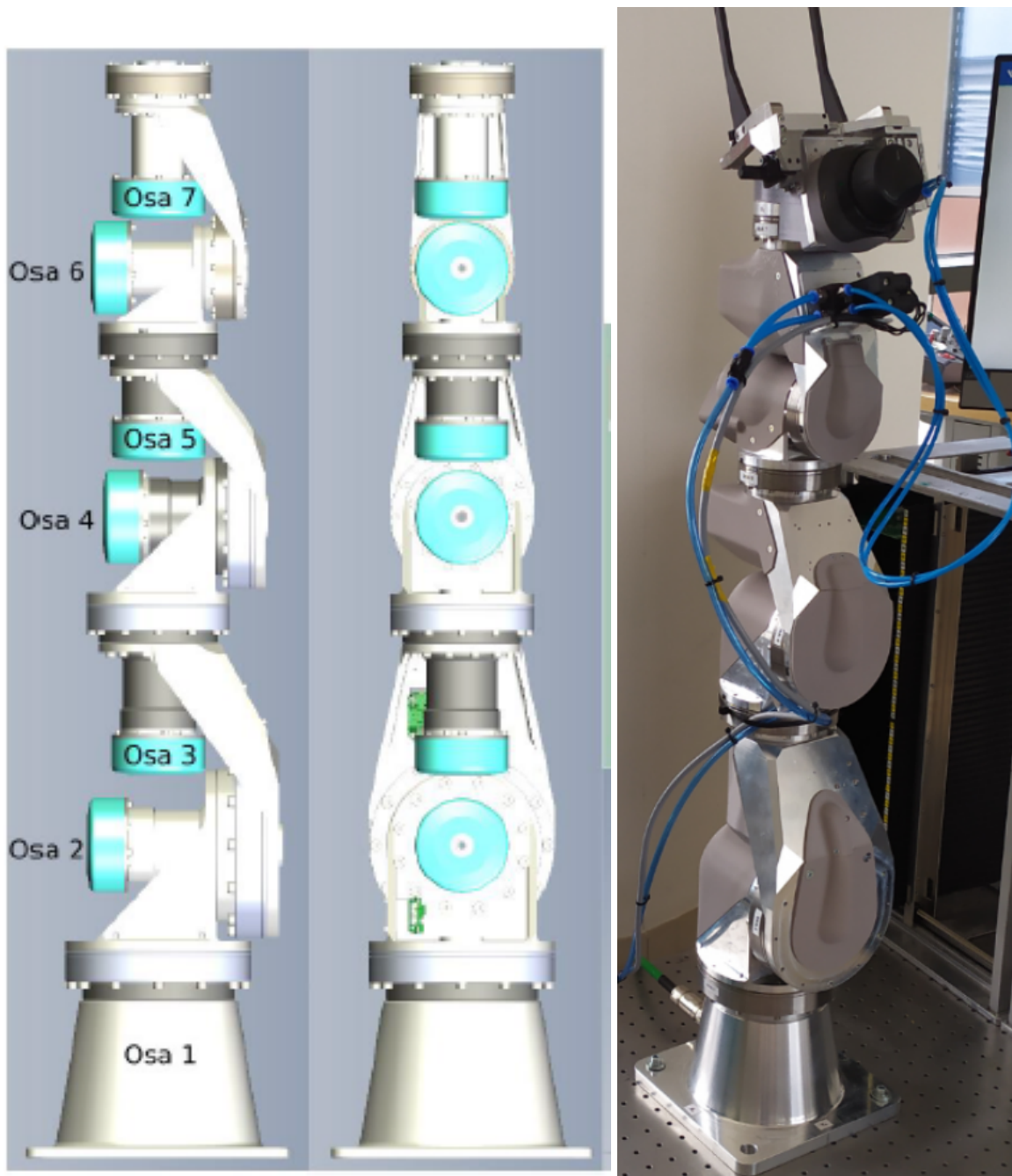
## Architektura a mechanická konstrukce robotického systému

Robotický systém byl inspirován prototypem robotu, který byl včetně řídicího systému (kontroleru) vyvinut na pracovišti ZČU v rámci projektu MPO TRIO č. FV 10044 (Výzkum a vývoj pokročilé kolaborativní robotické platformy a její aplikace ve výrobě elektronických komponent)<sup>2</sup>. Stávající řešení však vykazovalo některé vlastnosti, které přímé využití prototypu robotu pro NDT aplikace limitovalo. Tyto předpoklady byly identifikovány na základě experimentů, které probíhaly v roce 2020/2021 na zkušební hale partnera ÚJV, viz [1]. Stávající řídicí systém robotu byl rozšířen o možnosti pohybu robotu podél kruhového svaru na potrubí, včetně algoritmu lokalizace polohy potrubí prostřednictvím jednoduché dotykové sondy (identifikace potrubí z trojice nasnímaných dotykových bodů), viz Obrázek 2.

---

<sup>1</sup> NDT (Non Destructive Testing)

<sup>2</sup> <https://www.isvavai.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=FV10044>

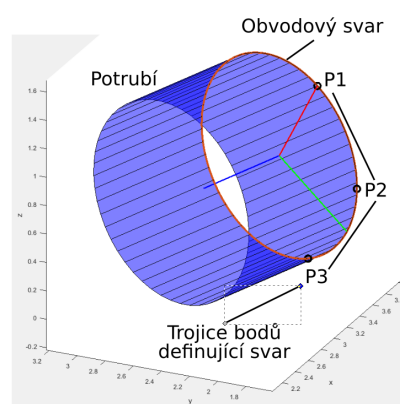
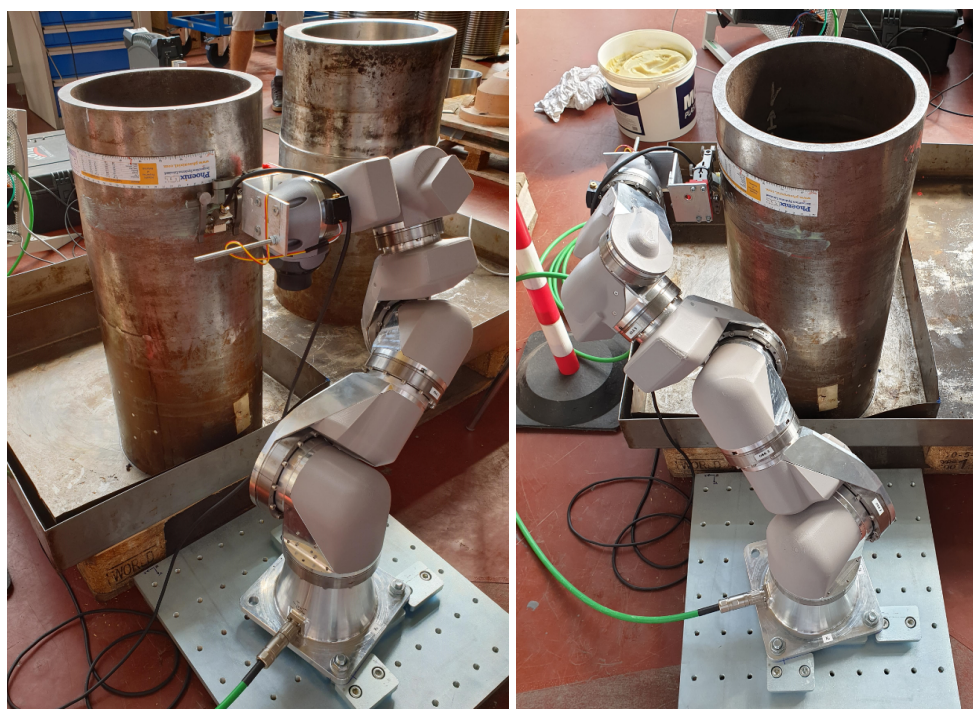


Obrázek 1: Původní prototyp 7 DoF robotu

Problematické oblasti, které byly identifikovány na základě provedených testů, lze sumarizovat následovně:

1. Rozsahy pohybových os robotu jsou nedostatečné - přílišná limitace pracovního prostoru - nutno revidovat konstrukci.
2. Vibrace během pohybu robotu, které ovlivňují kvalitu prováděného testu. Přesto, že se jedná o minoritní problém, bylo by vhodné tyto vibrace v co největší míře eliminovat - revize řídicích algoritmů na nejnižších úrovních (servoměniče).
3. Pro aplikace NDT lze uvažovat o výrazně subtilnější konstrukci robotu - celý robot by měl být odlehčen, lze uvažovat o změně velikostí osazených motorů, převodovek, atd.

4. Bez brzd na všech kloubech robotu je práce s robotem velmi komplikovaná (přesto, že v důsledku velikosti robotu nepředstavuje pro operátora výrazné nebezpečí) - revize konstrukce.
5. Odolnost vůči stékající vodě není zajištěna v dostatečné míře - plastové krytování elektroniky kloubů robotu je z tohoto pohledu nevyhovující, robot nemá osazenou dodatečnou ochranu - nutná revize zapouzdření robotu, případně možnosti dekontaminace.
6. Řídicí systém robotu je nutné revidovat a upravit pro použití v aplikacích NDT (zejména pak s ohledem na obsluhu robotu operátory NDT). Zároveň bude nutné vybavit robot novými funkcemi pro plánování/učení pohybu, ustavení robotu a automatické generování pohybových trajektorií.

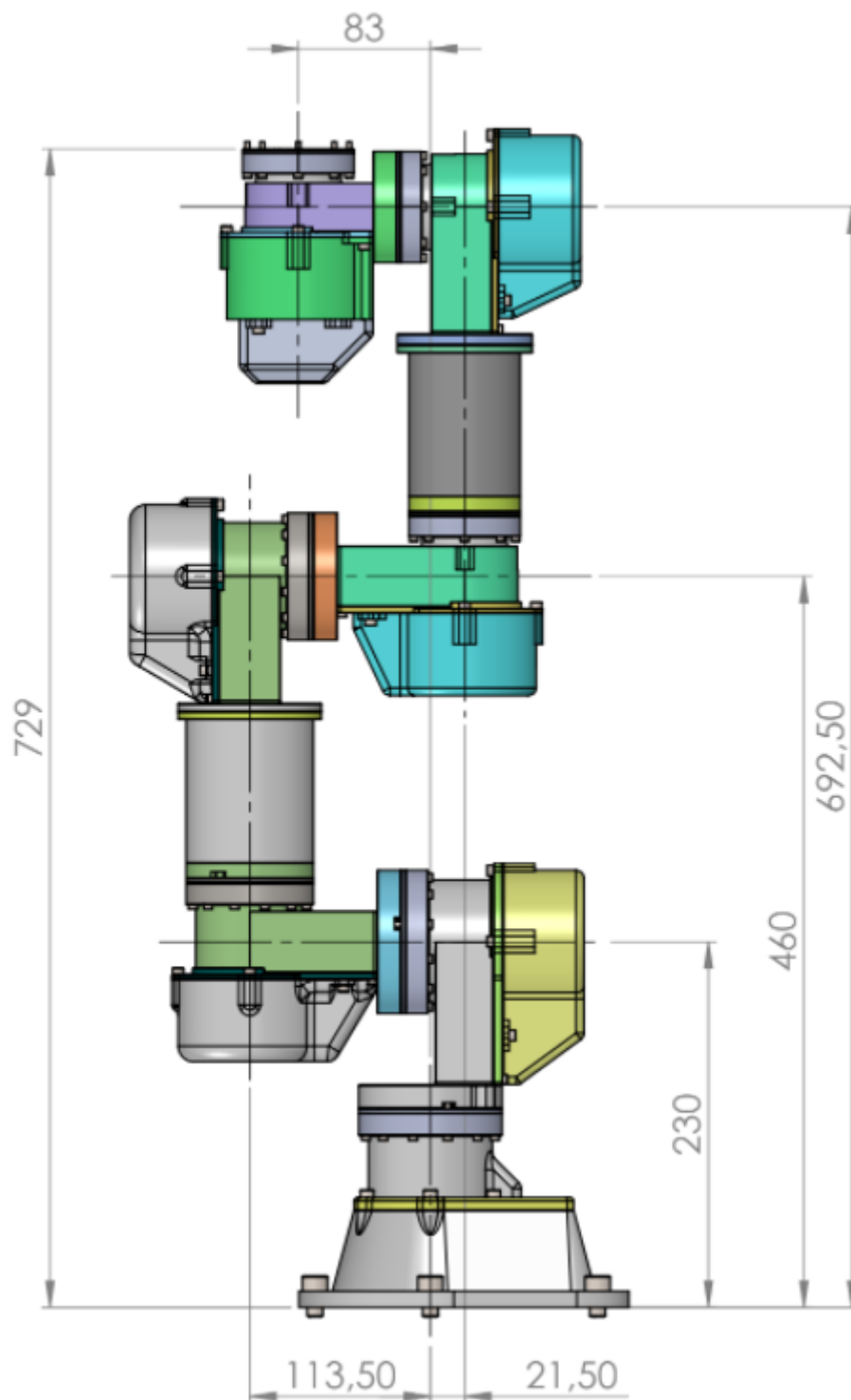


Obrázek 2: Reálné testy s původním robotem na hale ÚJV (princip identifikace kruhového svaru)

## Inovace konstrukce a HW vybavení robotu

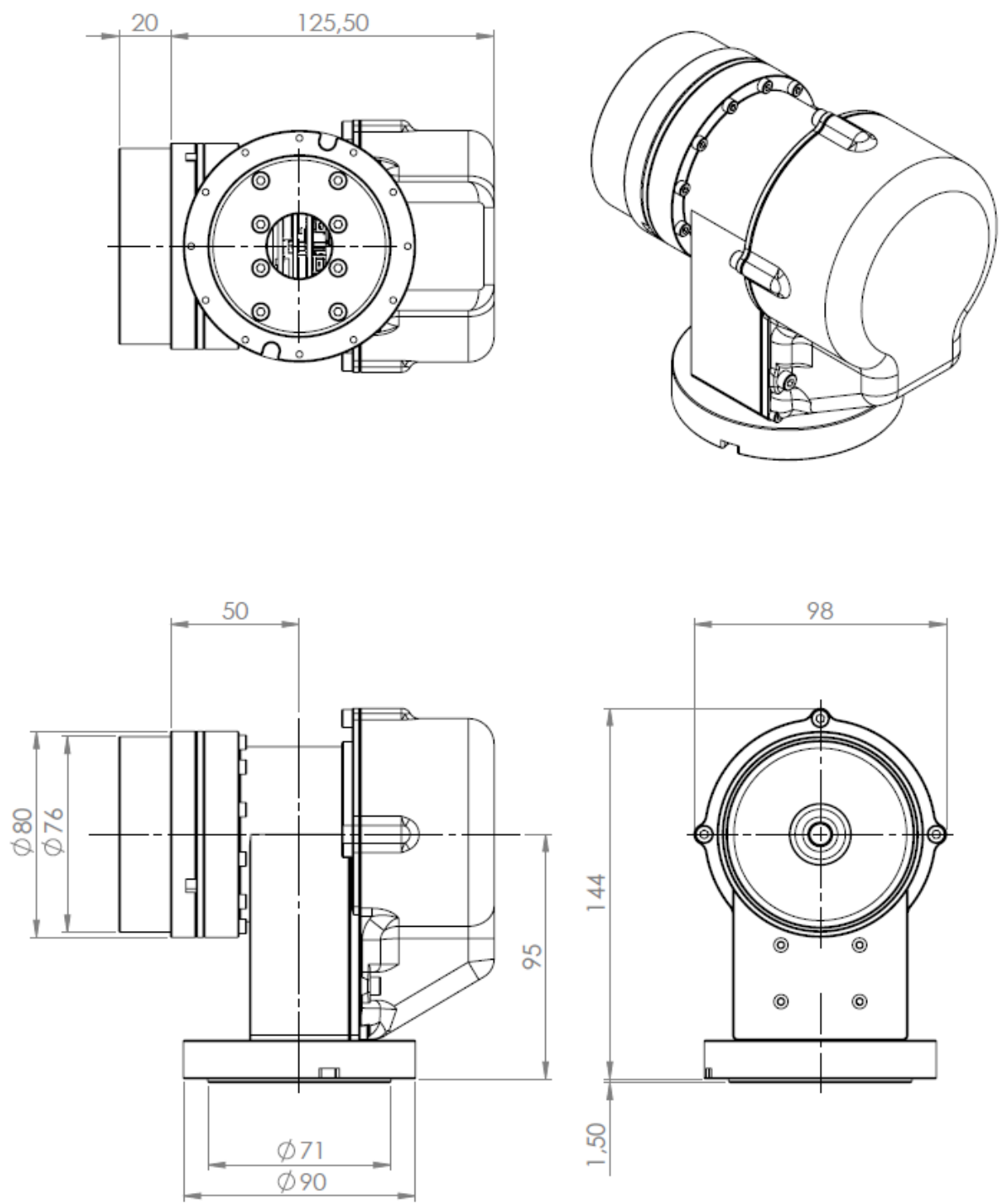
Konstrukce robotu byla zásadně pozměněna a ve spolupráci s firmou Smart Motion s.r.o. byl vytvořen nový koncept robotu. Robot byl zmenšen na velikost odpovídající předpokládanému použití, viz Obrázek 3. Pro ilustraci jsou na Obrázku 4 uvedeny rozměry 3. inovovaného kloubu robotu. Počet stupňů volnosti robotu zůstal zachován a robot opět disponuje 7 rotačními klouby. Zásadní změna byla realizována ve vlastním konstrukčním uspořádání kompaktních rotačních aktuátorů, viz Obrázek 6, kde oproti původní variantě aktuátoru, viz Obrázek 5, byly realizovány následující změny:

- 3-fázový synchronní servomotor od firmy TG Drives (zakázková výroba servomotorů) byl nahrazen kompletem servomotoru od firmy TQ-SYSTEMS GMBH, viz Obrázek 7. Ucelené řešení lépe vyhovuje požadavkům na integraci samotného serva
- Původní systém rotačních enkoderů AksIM-2 (firma RLS), kde byly osazeny dva jednotáčkové absolutní enkodery na motorové straně a na straně za převodovkou, byl nahrazen jedním absolutním víceotáčkovým kapacitním enkoderem POSITAL (IXARC HOLLOW SHAFT KIT ENCODER), viz Obrázek 8. Uvažovaný enkoder s dutou hřídelí byl osazen na motorové straně a vzhledem k možnosti víceotáčkového měření nahrazoval původní dvojici enkoderů
- Inovovaná verze aktuátoru byla vybavena integrovanou elektromagnetickou brzdou (hollow-shaft safety brakes) na motorové straně od firmy TQ-SYSTEMS GMBH, viz Obrázek 9.

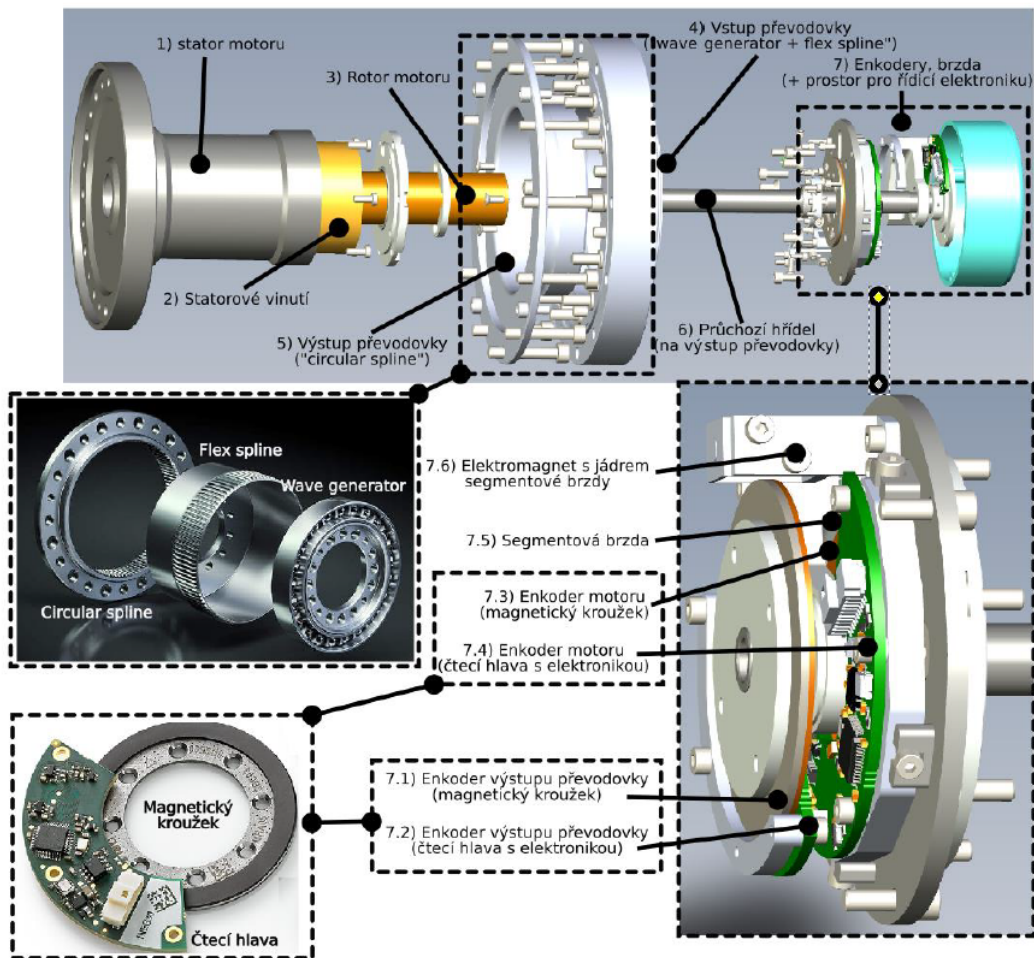


Obrázek 3: Rozměry nové koncepce robotu

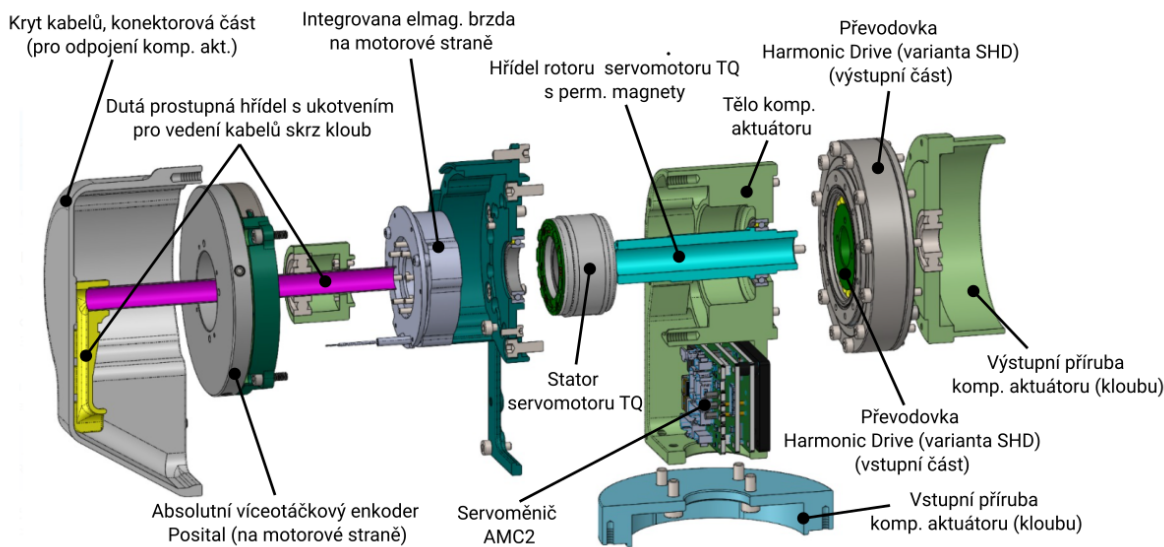




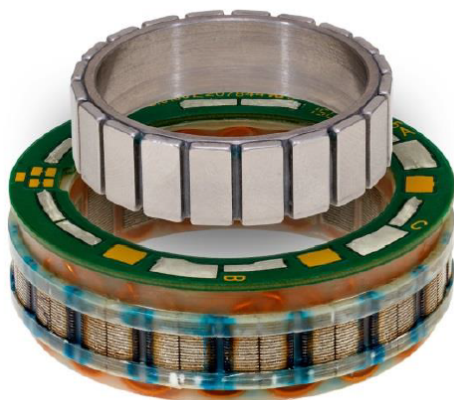
Obrázek 4: Rozměry 3. inovovaného kloubu robotu



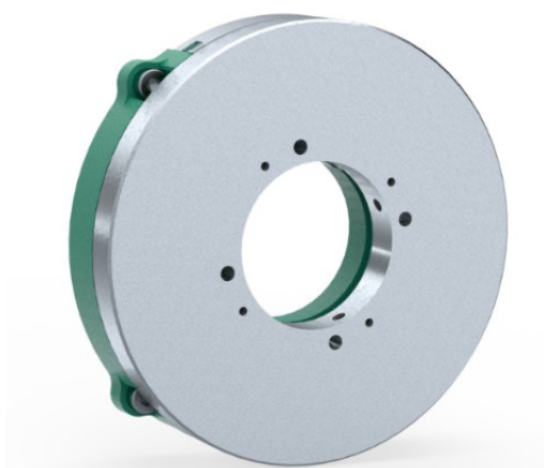
Obrázek 5: Původní podoba kompaktního rotačního aktuátoru



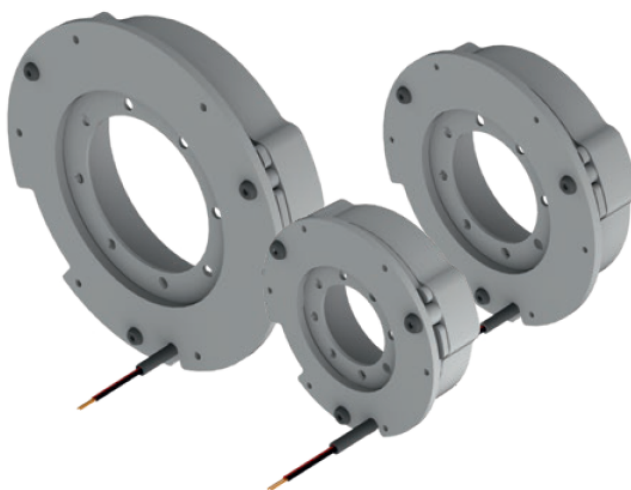
Obrázek 6: Inovovaná varianta kompaktního rotačního aktuátoru



Obrázek 7: Kit servomotoru od firmy TQ-SYSTEMS GMBH



Obrázek 8: Kit absolutního víceotáčkového enkoderu firmy POSITAL

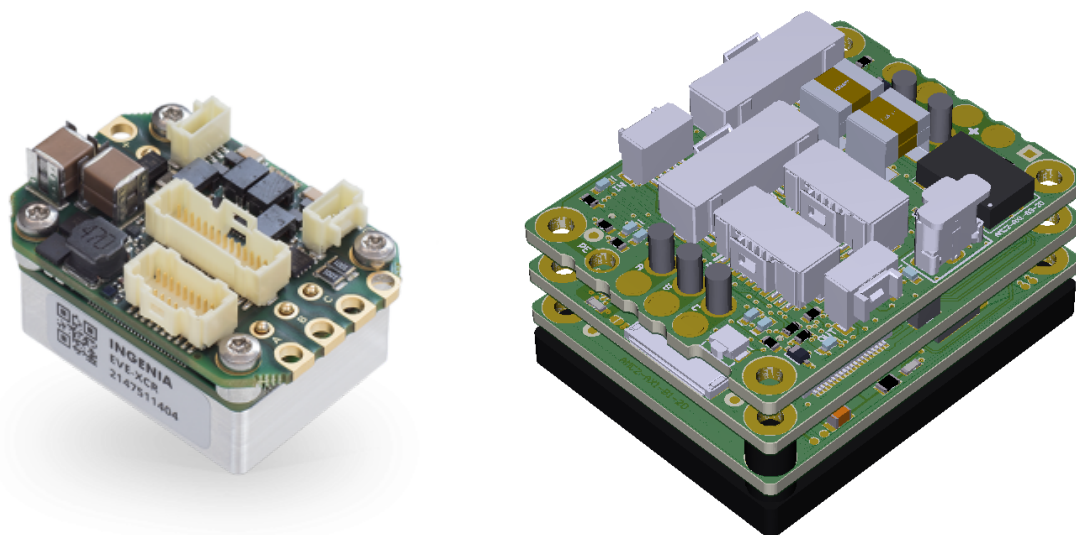


Obrázek 9: Bezpečnostní brzda od firmy TQ-SYSTEMS GMBH

## Inovace servoměniče kompaktních aktuátorů

Původně osazený servoměnič do aktuátorů robotu byl komerční produkt firmy Ingenia EVEREST XCR-E, který byl nahrazen na ZČU nově vyvíjeným servoměničem AMC2, viz Obrázek 10.

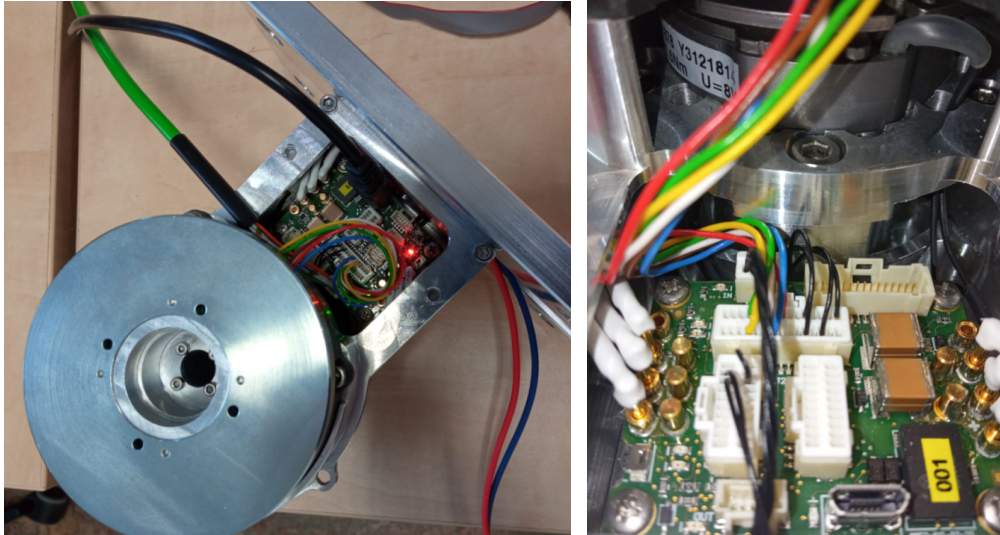
V roce 2021 byly provedeny první zkoušky s integrací vyvíjeného servoměniče AMC2 do kloubu (kompaktního aktuátoru) robotu, viz Obrázek 11.



Obrázek 10: Původně osazený komerční servoměnič firmy Ingenia (vlevo) a nově vyvíjený servoměnič AMC2

Klíčové vlastnosti vyvíjeného servoměniče s ohledem na jeho osazení do robotu lze shrnout následovně:

- přesné řízení pohybu pomocí metody vektorového řízení (FOC)
- podpora inkrementálních a absolutních enkodérů (BiSS-C, SSI,...)
- bezpečné vypnutí výkonového stupně měniče přes vyhrazený signál (STO)
- komunikace řídicího počítače s měniči v robotu přes sběrnici EtherCAT
- IO konektivita měniče optimalizovaná pro použití v robotu, možnost připojení dalších senzorů a aktuátorů přímo k měniči (CAN, RS485/422, SPI, I2C, digitální a analogové vstupy a výstupy, výstup pro motorovou brzdu)
- vlastní HW design a firmware měniče umožňující implementovat funkčnost a optimalizace, které s komerčně dostupným měničem nemusí být proveditelné
- pokročilá možnost rychlého sledování proměnných ve firmware a regulačních smyčkách měniče umožňující optimální nastavení regulačních smyček a celého systému
- možnost dalšího výzkumu, inovací hardware i firmware měniče a implementace vlastních inovativních řešení a postupů
- miniaturizované provedení oproti předchozí verzi měniče, vhodné pro zástavbu přímo do vyvíjeného kloubu robotu
- široký rozsah napájecích napětí 7~50V



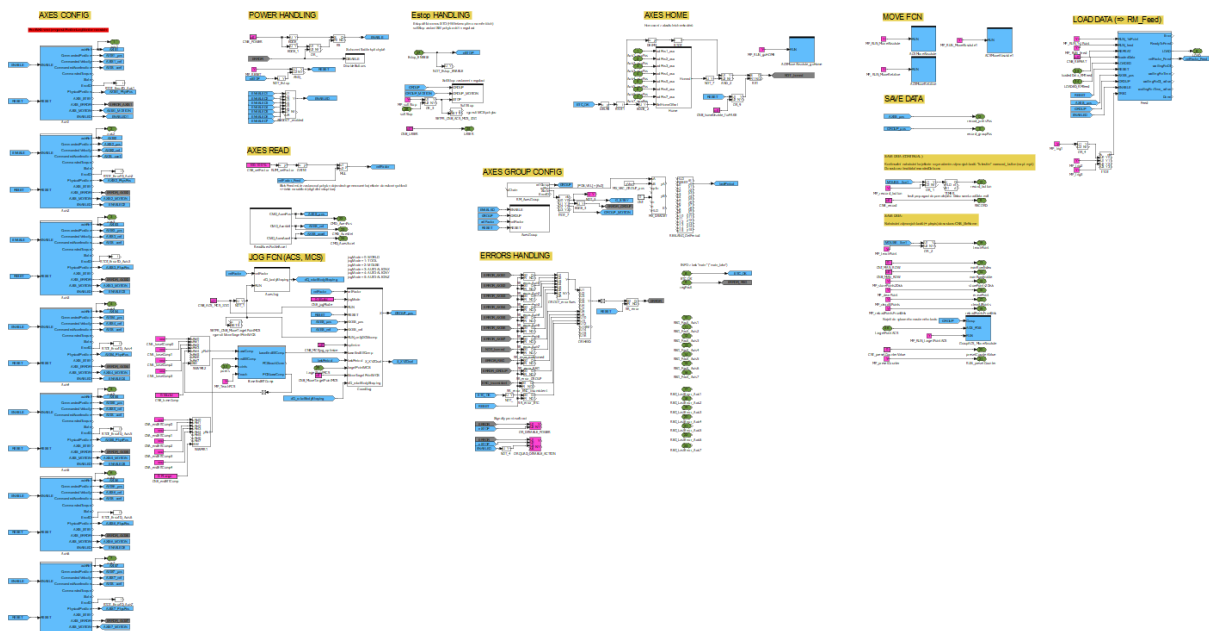
Obrázek 11: Integrace servoměniče AMC2 do kloubu robotu - základní testování

## Řídicí systém robotického systému

Řídicí systém robotu byl implementován v systému REXYGEN s využitím funkčních bloků knihoven<sup>3</sup> *MC\_SINGLE* – *Motion control - single axis blocks* a *MC\_COORD* (dle standardu PLC Open Motion Control).

Řídicí systém byl navržen k experimentálním účelům a jeho podoba se bude ještě dále měnit dle finálních požadavků pilotní NDT aplikace.

Ukázka implementace řídicího systému v systému REXYGEN je znázorněna na Obrázku 12.

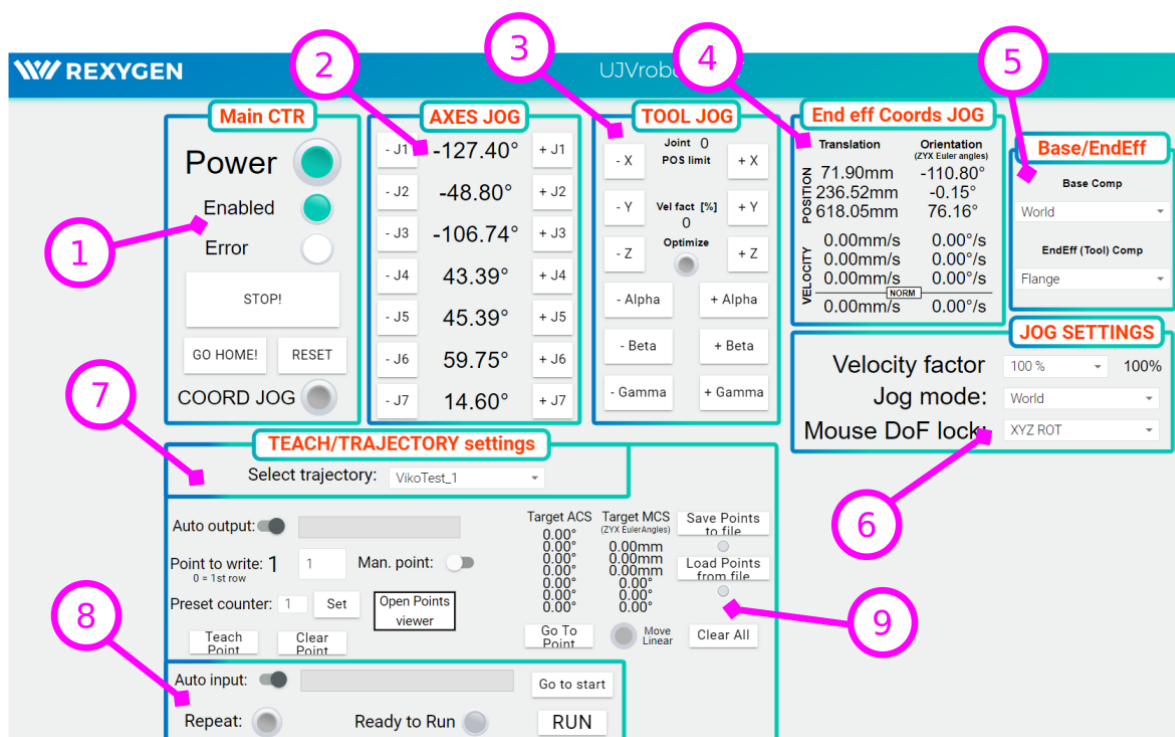


Obrázek 12: Implementace řídicího systému robotu v prostředí REXYGEN (příklad hlavního řídicího TASKU).

<sup>3</sup> [https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/BRef/BRef\\_ENG.html](https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/BRef/BRef_ENG.html)

## Uživatelské prostředí - HMI (operátorský panel)

Uživatelské rozhraní bylo navrženo v podobě operátorského panelu běžícího jako webová stránka v běžném www prohlížeči. Obrázek 13 znázorňuje hlavní řídicí obrazovku.



Obrázek 13: Operátorský panel k základnímu ovládání robotu

Představená architektura robotu je oproti standardním řešením kinematically redundantní (obsahuje 7 rotačních kloubů ve specifickém uspořádání oproti běžným 6-ti osým průmyslovým robotům). Taková změna přináší následující výhody:

- Zvýšení obratnosti robotu (navýšení pracovního prostoru)
- Možnost vyhnout se singulárním polohám robotu (standardní problém při řízení a plánování pohybu průmyslových robotů)
- Zmenšení zástavbového prostoru robotu (redukce kolizí rame robotu s okolím)
- Optimalizace pohybu robotu za účelem "tvarování" těla robotu při zachování řízených stupňů volnosti koncového efektoru

Kinematická redundance s sebou přináší na druhou stranu také vyšší algoritmickou složitost při výpočtu kinematických úloh (zpětná a dopředná kinematika), a to jak v režimu ručního koordinovaného JOG<sup>4</sup>u tak v režimu generování pohybových trajektorií, kdy se zpravidla jedná o optimalizační úlohy, které se řeší numerickými algoritmy.

V řídicím systému robotu je přímo implementován blok pro koordinovaný JOG (ruční translace a rotace v osách X, Y, Z) včetně možnosti řízení redukovaného počtu stupňů

<sup>4</sup> JOG je označení pro ruční pohyb s robotem z jeho ovládacího panelu (teachpendantu), obecně lze rozlišovat mezi nekoordinovaným (osovým) JOGem, kdy je pohybováno s dílčími klouby robotu a koordinovaným JOGem, kdy je pohybováno s koncovým efektořem (nástrojem) robotu ve směrech definovaného souřadného systému.

volnosti (např. jen rotace, translace, atd.) a možnosti tvarovat tělo robotu za podmínky udržení požadované polohy řízených stupňů volnosti koncového efektoru, více viz Kapitola [Speciální funkce řídicího systému pro účely NDT](#).

Popis dílčích ovládacích prvků řídicího systému je uveden v následujícím výčtu:

- 1. Sekce silového ovládnání robotu, management pohybu:** Hlavní vypínač robotu (POWER); Indikátor běhu (Enabled) a poruchy (Error); SOFT zastavení (STOP!) - robot není odpojen od napájení, ale pouze je zastaven pohyb s aktivní regulací; Resetování chyb (RESET); Pohyb robotu do domovské (vzpřímené) polohy (GO HOME!); Přepínání mezi osovým a koordinovaným pohybem robotu (COORD JOG).
- 2. Osový JOG:** Ruční pohyb robotu pomocí tlačítek ( $\pm J1-7$ ); Indikace polohy dílčích os.
- 3. Koordinovaný JOG:** Ruční pohyb koncového efektoru robotu v osách X, Y, Z a příslušné rotace ( $\pm X, Y, Z, \text{Alpha}, \text{Beta}, \text{Gamma}$ ); Indikace polohového omezení kloubu robotu (POS limit); Aktuální omezení rychlosti koncového efektoru v důsledku přiblížení k polohovému limitu kloubu a/nebo singularitě (Vel fact); Aktivace optimalizace pohybu ve smyslu redukce rychlostí kloubů a přiblížení se k polohovým limitům (Optimize).
- 4. Aktuální polohy/rychlosti koncového efektoru robotu:** Indikace aktuální polohy (Translation) a orientace (Orientation - ZYX Eulerovy úhly) koncového efektoru robotu (souřadného systému vybraného nástroje (sondy) ve vybraném souřadném systému základy); Indikace aktuálních rychlostí v dílčích souřadnicových složkách a jejich absolutní hodnoty.
- 5. Výběr souřadného systému základny robotu (posun robotu) a koncového efektoru (nástroje - sondy):** Kompenzace, které jsou přednastaveny dle aktuální aplikace.
- 6. Řízení pohybu během koordinovaného JOGu:** Možnosti ručního koordinovaného řízení pohybu robotu. Faktor snížené rychlosti (Velocity factor); Mód pohybu (Jog mode); Blokování stupňů volnosti pro mód pohybu robotu prostřednictvím 3D myši (Mouse DoF lock).
- 7. Výběr pohybové trajektorie:** Výběr trajektorie (názvu souboru) pro učení a automatický pohyb robotu dle generované trajektorie z datového postprocesoru.
- 8. Spuštění a ovládnání pohybové trajektorie:** Výběr předplánované trajektorie pohybu generované v datovém postprocesoru (Auto input = ON => dle vybrané volby v Selected trajectory, jinak dle vlastního zadání); Najetí na první bod pohybu (Go to start); Indikátor připravenosti robotu na zahájení pohybu (Ready to Run); Aktivace možnosti automatického opakování pohybu (Repeat); Spuštění pohybu (RUN).
- 9. Ovládnání systému učení zájmových bodů robotu:** (Auto output = ON => ukládání bodů do souboru dle vybrané volby v Selected trajectory, jinak dle vlastního zadání). Sekvenční záznam/vymazání bodů (Teach Point, Clear Point); Možnost přepsání libovolného bodu v záznamu (Point to write, Man. point, Preset counter); Prohlížeč naučených bodů (Open Points viewer); Aktuální bod v ACS, MCS<sup>5</sup> (Target); Uložení a načtení všech bodů ze souboru (Save Points to file, Load Points from file); Smazání všech bodů (Clear All).

---

<sup>5</sup> Axes Coordinate System (ACS) = polohy kloubových souřadnic, Machine Coordinate System (MCS) = poloha koncového efektoru (po kompenzacích).

## Speciální funkce řídicího systému pro účely NDT

Pro účely aplikací NDT byly doplněny speciální funkcionality do výše popsaného řídicího systému robotu. Jedná se především o možnosti intuitivního učení a plánování pohybu robotu při testování (NDT) nestandardních technologických komponent, kdy pohybové trajektorie sondy jsou komplikované a nelze je plánovat standardními algoritmy v podobě jednoduchých geometrických entit (typicky přímka, kružnice, atd.). Zvláštní důraz byl kladen především na následující aspekty:

- Možnost pohybu manipulátoru v procesu učení operátorem NDT nejen prostřednictvím tlačítek koordinovaného JOGu v operátorském rozhraní, ale i možnost navádět koncový efektor robotu (sondu) prostřednictvím taktilního senzoru (3D myši) na něm umístěným.
- Optimalizovat pohyb robotu ve smyslu “tvarování těla robotu” za účelem zamezení kolizních stavů s okolními technologiemi během procesu učení pohybu NDT sondy v prostorově omezených provozech.
- Realizace datového postprocesoru, který zpracovává naučená data za účelem automatické replikace (aproximace) pohybu NDT sondy při maximálním dodržení tvaru těla robotu.

## Koordinovaný JOG robotu pro aplikace NDT

Koordinovaný JOG robotu byl realizován v několika variantách, viz dále. V každé variantě pohybu byl navíc umožněn nezávislý pohyb kloubů (1, 2, 3, 5, 6, 7)<sup>6</sup>, který umožňoval tvarovat tělo robotu. Při každé změně kloubů zůstává řízená poloha koncového efektoru v konstantní poloze. Operátor NDT tak může ukládat dílčí zájmové body podél učené pohybové trajektorie a zároveň korigovat ramena robotu takovým způsobem, aby nepřekážela vzhledem k dané aplikaci.

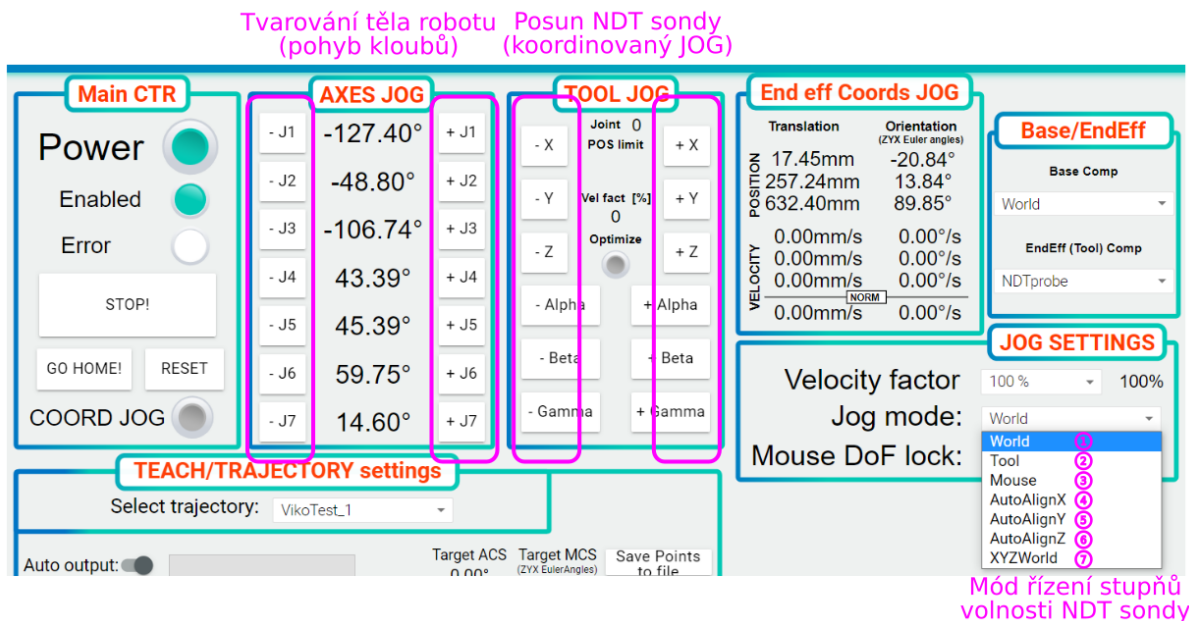
Možnosti pohybu NDT sondy, viz Obrázek 14:

1. Pohyb NDT sondy ve všech 6 DoF<sup>7</sup> vzhledem k souřadnému systému základny robotu.
2. Pohyb NDT sondy ve všech 6 DoF vzhledem k aktuálnímu souřadnému systému efektoru (sondy).
3. Navádění efektoru 3D myší (tlačítka X, Y, Z, Alpha, Beta, Gamma jsou neaktivní).
4. Automatické zarovnání osy X efektoru kolmo do nejbližší roviny XY, YZ, ZX definované výběrem referenčního souřadného systému (Base Comp).
5. Automatické zarovnání osy Y efektoru kolmo do nejbližší roviny XY, YZ, ZX definované výběrem referenčního souřadného systému (Base Comp).
6. Automatické zarovnání osy Z efektoru kolmo do nejbližší roviny XY, YZ, ZX definované výběrem referenčního souřadného systému (Base Comp).
7. Tlačítka X, Y, Z ovládají pouze translaci efektoru (sondy) v souřadném systému základny (Base Comp), orientace sondy není řízena a mění se dle kritéria optimalizace pohybu (vyhnutí se singulárním polohám robotu, eliminace dojetí ramen ke svým polohovým limitům, tvarování těla robotu).

<sup>6</sup> Polohu 4. kloubu robotu nelze měnit - důsledek kinematického uspořádání robotu.

<sup>7</sup> 6 DoF = translace ve směrech X, Y, Z a rotace okolo os X, Y, Z.





Obrázek 14: Možnosti koordinovaného JOGu

## Datový postprocesor

Datový postprocesor, respektive jeho první testovací podoba, byla implementována v Matlabu v podobě samostatné aplikace. Cílem datového postprocesoru byla aproximace naučené pohybové trajektorie sondy operátorem NDT za současného udržení pohybu ramen robotu v operátorem definované konfiguraci (natvarování ramen).

### Vstupy datového postprocesoru:

- Koincidenční body - poloha koncového efektoru (NDT sondy), tedy polohové body (translace a orientace), ve kterých během ručního koordinovaného JOGu s robotem operátor stiskl tlačítko pro uložení datového bodu.
- Polohy kloubových souřadnic v koincidenčních bodech, které definují aktuální konfiguraci ramen robotu (natvarování ramen robotu).

### Výstupy datového postprocesoru:

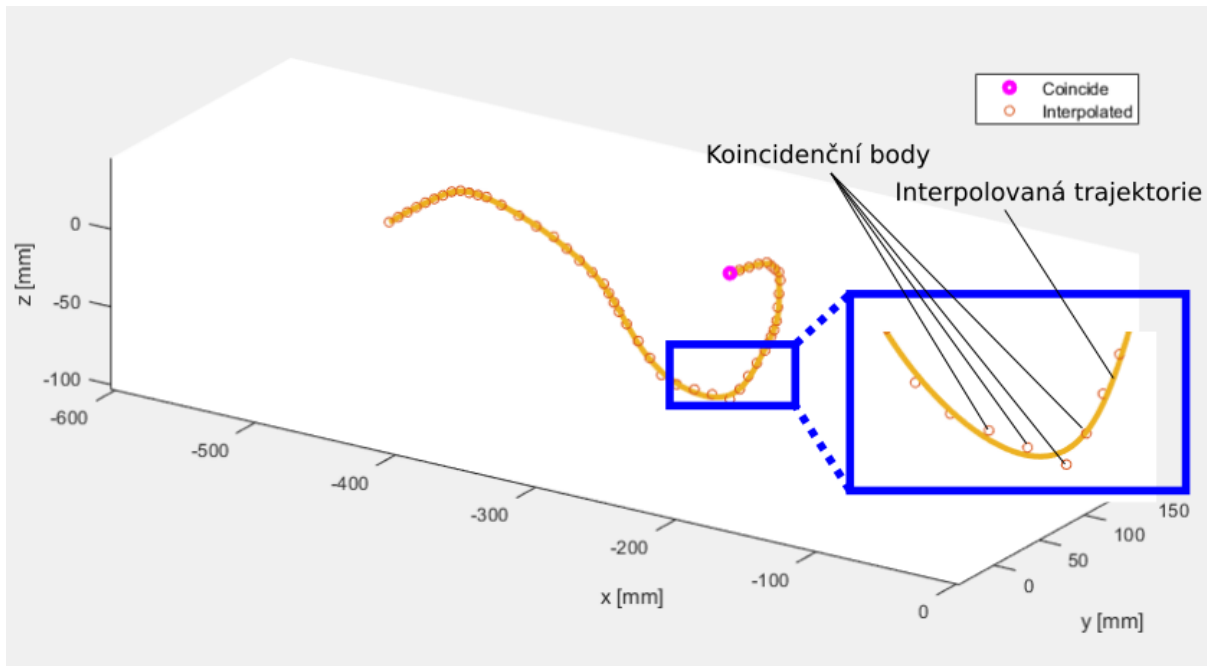
- Aproximovaná pohybová trajektorie jako datový soubor do řídicího systému robotu (funkční blok *RM\_Feed*).

### Algoritmus generování pohybové trajektorie:

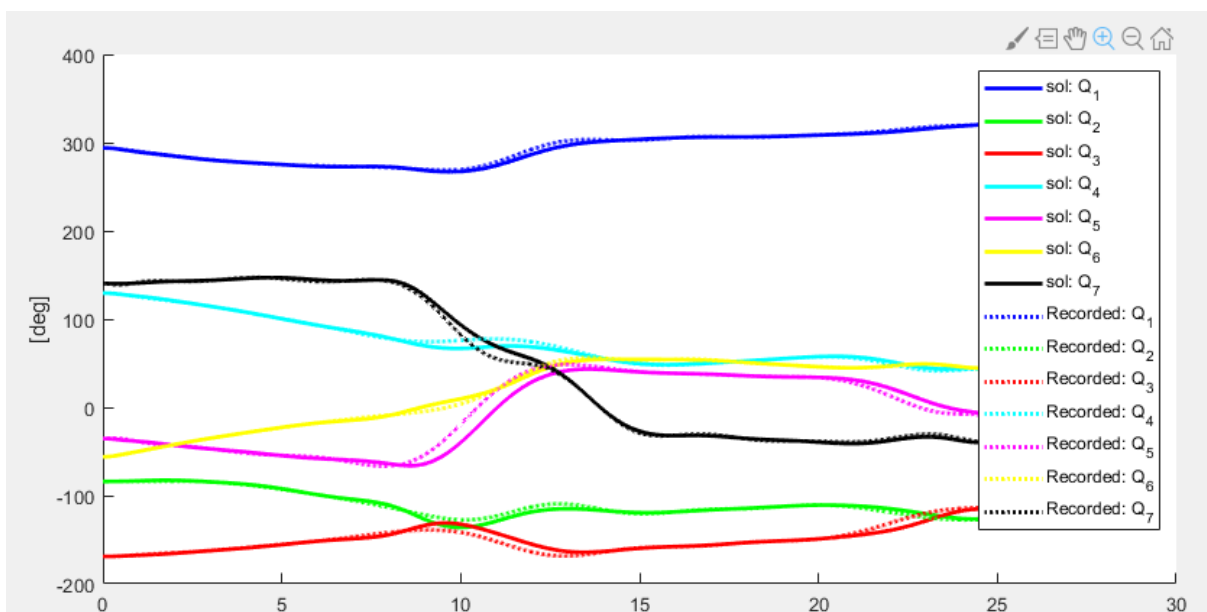
- B-Spline aproximace s libovolně zvoleným řádem polynomu, míra aproximace koincidenčních bodů lze nastavit flexibilně, viz Obrázek 15.
- Využití kinematické redundance, viz Obrázek 16, => Optimální natvarování těla robotu dle zadaných požadavků (v důsledku záznamu tvaru těla robotu jen v diskretních koincidenčních bodech a vazebních podmínek vycházející z inverzní kinematické úlohy<sup>8</sup>, lze tento požadavek zaručit jen v dané míře - zde ve smyslu

<sup>8</sup> Inverzní kinematická úloha robotu: Výpočet poloh kloubových souřadnic pro zadanou polohu koncového efektoru, u kinematicky redundantních robotů má tato úloha nekonečně mnoho řešení.

minimální euklidovské vzdálenosti požadovaného a skutečně generovaného natvarování ramen robotu dané přímo polohami kloubů).



Obrázek 15: Aproximace koincidenčních bodů translace XYZ (orientace je realizována jako aproximace prvků jednotkového kvaternionu analogicky)



Obrázek 16: Zaznamenaná (a mezi koincidenčními body interpolovaná) poloha kloubových souřadnic (čárkovaná čára), které definují požadované (naučené) natvarování ramen robotu a skutečně vypočtené hodnoty po aproximaci (plná čára).

# Virtuální simulační model

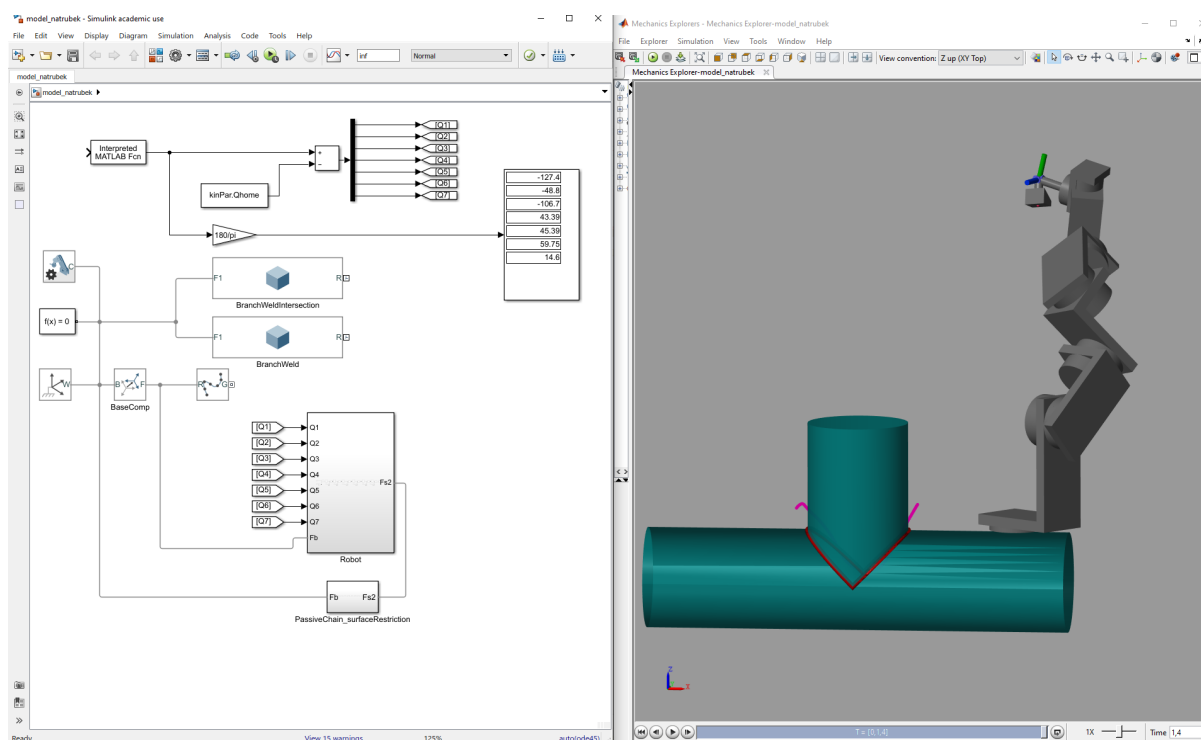
Za účelem testování byl vytvořen virtuální simulační model robotu v prostředí Matlab/Simulink/Simscape, viz Obrázek 17, který byl prostřednictvím rozhraní RESTful API<sup>9</sup> propojen s reálným řídicím systémem robotu implementovaným v systému REXYGEN, viz kapitola [Řídicí systém robotického systému](#).

Virtuální model umožnil následující:

- Testy základní funkcionality řídicího systému
- Testy generátoru pohybu - datového postprocesoru
- Možnost virtuálního učení pohybové trajektorie a její replikace (potenciálně možno využít např. pro školení obsluhy)

Využití virtuálního modelu robotu pro testování řídicího systému robotu a datového postprocesoru je demonstrováno v níže odkazovaném videu:

<https://drive.google.com/file/d/1Fqwq52DMgkQLLkR57OriOkvAIVYHxG0/view?usp=sharing>



Obrázek 17: Virtuální simulační model robotu

## Reference

- [1] L. Horáček, M. Švejda: *ODBORNÁ ZPRÁVA O POSTUPU PRACÍ A DOSAŽENÝCH VÝSLEDKÍCH ZA ROK 2020, Příloha k průběžné zprávě za rok 2020.*

<sup>9</sup> [https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/RexRestApi/RexRestApi\\_ENG.html](https://www.rexygen.com/doc/ENGLISH/MANUALS/RexRestApi/RexRestApi_ENG.html)