

MPO TRIO

Název projektu:

Výzkum a vývoj pokročilé kolaborativní robotické platformy a její aplikace ve výrobě elektronických komponent

(FV 10044)

Prototyp

Prototyp kolaborativního robotu (Technická a uživatelská dokumentace)

Martin Švejda (ZČU), Arnold Jáger (ZČU), Vlastimil Šetka (ZČU), David Tolar (SM), Petr Barták (SM), Jiří Barták (SM), Ondřej Houra (SM)

28. prosince 2019



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU

Identifikátor účastníka projektu:

ZČU: Západočeská univerzita v Plzni, IMI: Integrated Micro-Electronics Czech Republic s.r.o.,

SM: SmartMotion s.r.o.

Popis úkolu z přihlášky projektu

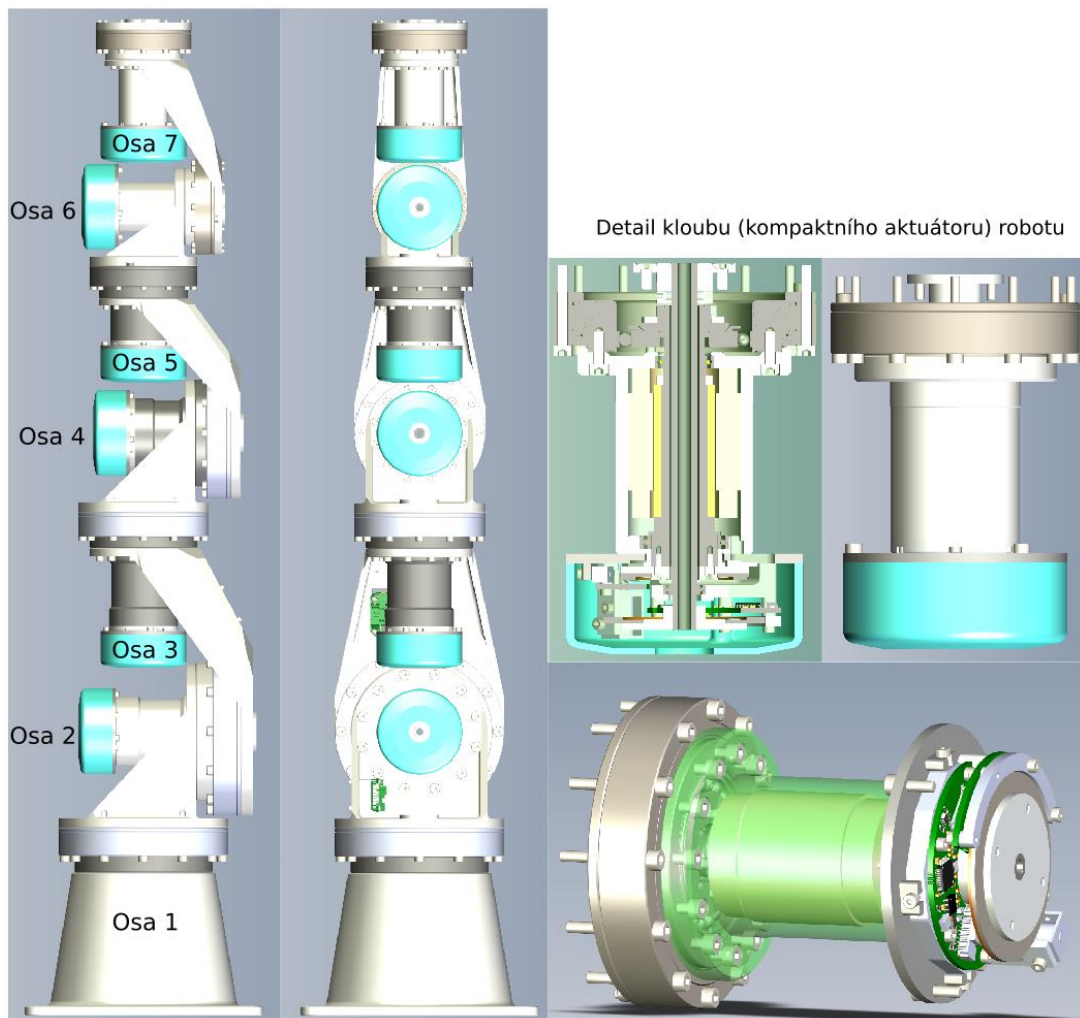
[Gprot] Prototyp architektury kolaborativního robotu vyvinutý s ohledem na specifické požadavky pilotní aplikace. S využitím vyvinutých kompaktních aktuátorů bude realizována plně otevřená robotická architektura s možností pružného a efektivního přizpůsobení (TRL 6).

Popis robotu

Vyvinutý robot, viz Obrázek 1, je určen především k aplikacím pick & place (konkrétně pro polohování desek PCB v pilotní aplikaci partnera IMI). Konstrukce robotu je založena na kompaktních aktuátorech [1], které reprezentují jednotlivé klouby robotu. Robot je navržen jako sériový kinematický řetězec se 7 stupni volnosti.

Robot se od standardních koncepcí průmyslových robotů vyznačuje především následujícími vlastnostmi:

- Unikátní redundantní 7 DoF (Degrees of Freedom) konstrukce (zvýšené pohybové možnosti, optimalizace pohybu).
- Modularita v uspořádání kloubů (v případě potřeby možnost rekonfigurace kloubů díky kompaktnímu designu).
- Pokročilé možnosti navádění robotu (učení) založené na citlivém taktilním ovládní koncového efektoru robotu pomocí připojeného senzoru (6DoF space mouse).
- Otevřenost systému řízení (kontroleru) pro možnosti integrace vlastních algoritmů řízení.



Obrázek 1: CAD model robotu

Technická specifikace robotu

Technickou specifikaci robotu shrnuje Tabulka 1. Robot sestává ze 4 variant kompaktních aktuátorů (dle užitého zatížení), jejichž parametry jsou podrobně dokumentovány v [1].

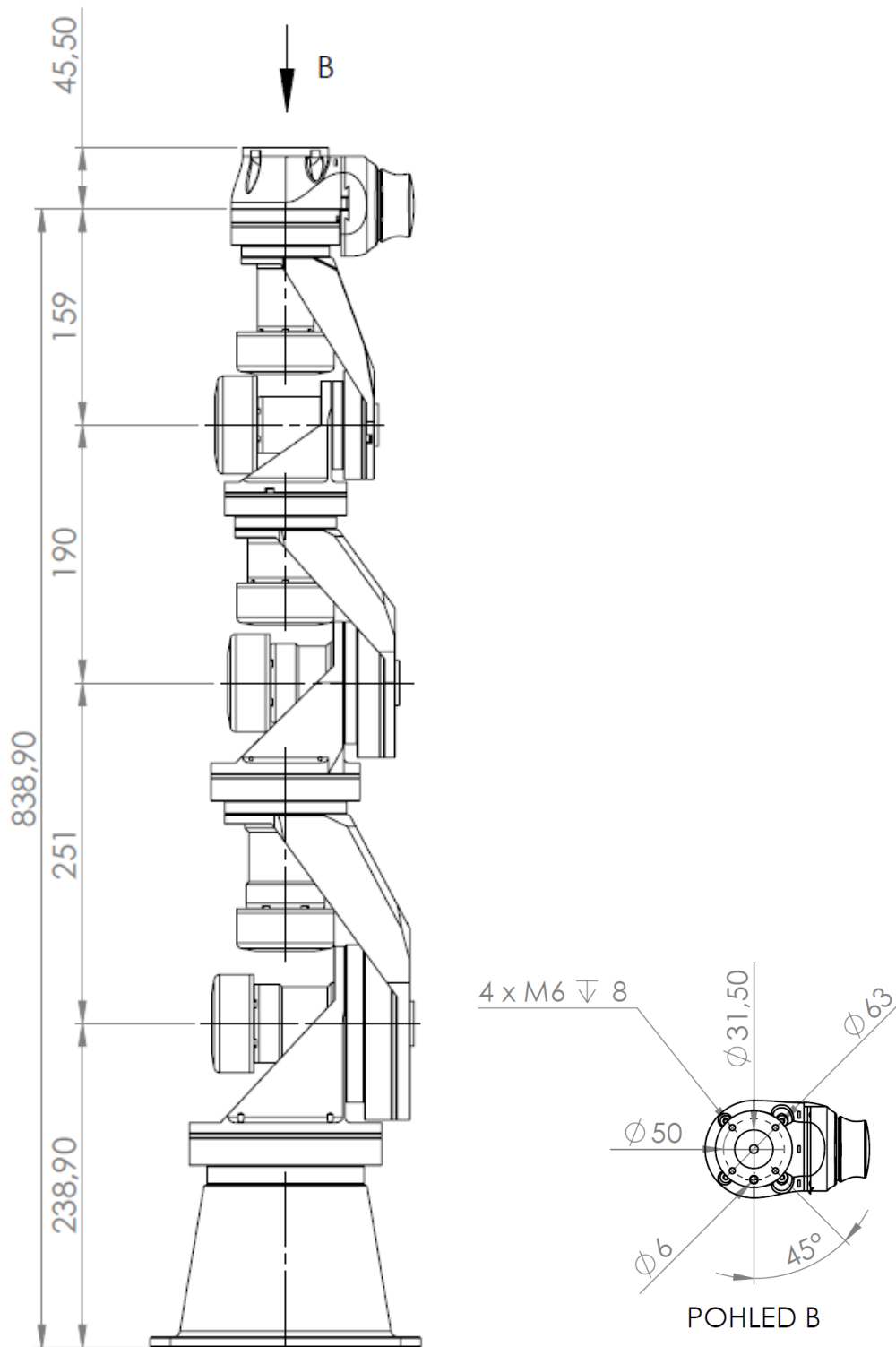
Kinematické parametry	Popis																
Počet stupňů volnosti (počet aktivně řízených kloubů)	7																
Rozsahy pohybu kloubů (Obrázek 1 - robot v nulové poloze kloubů)	<table border="1"> <tr> <td>Osa 1</td> <td>+/- 370 deg</td> <td>Osa 4</td> <td>+/- 107 deg</td> </tr> <tr> <td>Osa 2</td> <td>+/- 102 deg</td> <td>Osa 5</td> <td>+/- 370 deg</td> </tr> <tr> <td>Osa 3</td> <td>+/- 370 deg</td> <td>Osa 6</td> <td>+/- 103 deg</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Osa 7</td> <td>+/- 370 deg</td> </tr> </table>	Osa 1	+/- 370 deg	Osa 4	+/- 107 deg	Osa 2	+/- 102 deg	Osa 5	+/- 370 deg	Osa 3	+/- 370 deg	Osa 6	+/- 103 deg			Osa 7	+/- 370 deg
Osa 1	+/- 370 deg	Osa 4	+/- 107 deg														
Osa 2	+/- 102 deg	Osa 5	+/- 370 deg														
Osa 3	+/- 370 deg	Osa 6	+/- 103 deg														
		Osa 7	+/- 370 deg														
Maximální rychlosti kloubů	<table border="1"> <tr> <td>Osa 1</td> <td>113 deg/s</td> <td>Osa 4</td> <td>225 deg/s</td> </tr> <tr> <td>Osa 2</td> <td>150 deg/s</td> <td>Osa 5</td> <td>225 deg/s</td> </tr> <tr> <td>Osa 3</td> <td>150 deg/s</td> <td>Osa 6</td> <td>360 deg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Osa 7</td> <td>360 deg/s</td> </tr> </table>	Osa 1	113 deg/s	Osa 4	225 deg/s	Osa 2	150 deg/s	Osa 5	225 deg/s	Osa 3	150 deg/s	Osa 6	360 deg/s			Osa 7	360 deg/s
Osa 1	113 deg/s	Osa 4	225 deg/s														
Osa 2	150 deg/s	Osa 5	225 deg/s														
Osa 3	150 deg/s	Osa 6	360 deg/s														
		Osa 7	360 deg/s														
Pracovní prostor ¹ [VxŠxH]	S libovolnou orientací efektoru: cca 50x50x50 cm S fixní orientací efektoru: cca 30x20x20 cm																
Momentové (hmotnostní parametry) parametry	Popis																
Momentové zatížení kloubů	<table border="1"> <tr> <td>Osa 1</td> <td>109 Nm</td> <td>Osa 4</td> <td>50 Nm</td> </tr> <tr> <td>Osa 2</td> <td>80 Nm</td> <td>Osa 5</td> <td>27 Nm</td> </tr> <tr> <td>Osa 3</td> <td>80 Nm</td> <td>Osa 6</td> <td>13 Nm</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Osa 7</td> <td>13 Nm</td> </tr> </table>	Osa 1	109 Nm	Osa 4	50 Nm	Osa 2	80 Nm	Osa 5	27 Nm	Osa 3	80 Nm	Osa 6	13 Nm			Osa 7	13 Nm
Osa 1	109 Nm	Osa 4	50 Nm														
Osa 2	80 Nm	Osa 5	27 Nm														
Osa 3	80 Nm	Osa 6	13 Nm														
		Osa 7	13 Nm														
Nosnost robotu	Statically: 2.2 kg Dynamically (při nominální rychlosti): 1.3 kg																

¹Pracovní prostor s libovolnou orientací efektoru znamená, že robot dosáhne do daného bodu ve vymezeném pracovním prostoru s nějakou orientací koncového efektoru. Pracovní prostor s fixní orientací efektoru znamená, že robot dosáhne do daného bodu ve vymezeném pracovním prostoru ve všech orientacích koncového efektoru.

Napájení, konektivita, ovládání	Popis
Napájení	Vstupní síťové: 230 V AC, jištění 6A (B) Napájení robotu: +48 V DC, jištění 6.3 A Max. příkon: 300 W
Konektivita koncového efektoru (příruby)	Elektrická: 2x digitální V/V +48 V DC, +5 V DC, EtherCAT 100Mb Možnost vlastní kabeláže (duté hřídel ϕ 4mm) Mechanická: Kompatibilní s roboty řady Universal Robots UR 5, 10 (reduktor příruby, viz Obrázek 2) Viz výkresy.
Ovládání	Uživatelská/servisní vizualizace (přes standardní webový prohlížeč) Plánovač trajektorie - SW aplikace na standardním PC, NTB. Externí eSTOP (tlačítko na kabelu)
Mechanické parametry	Popis
Hmotnost:	18kg (variantně dle základny, příruby)
Rozměry (max. obálka):	Max. výška: 90 cm Max průměr: 20 cm Detailní popis, viz Výkresová dokumentace, Obrázek 2

Tabulka 1: Parametry robotu

Výkresová dokumentace robotu



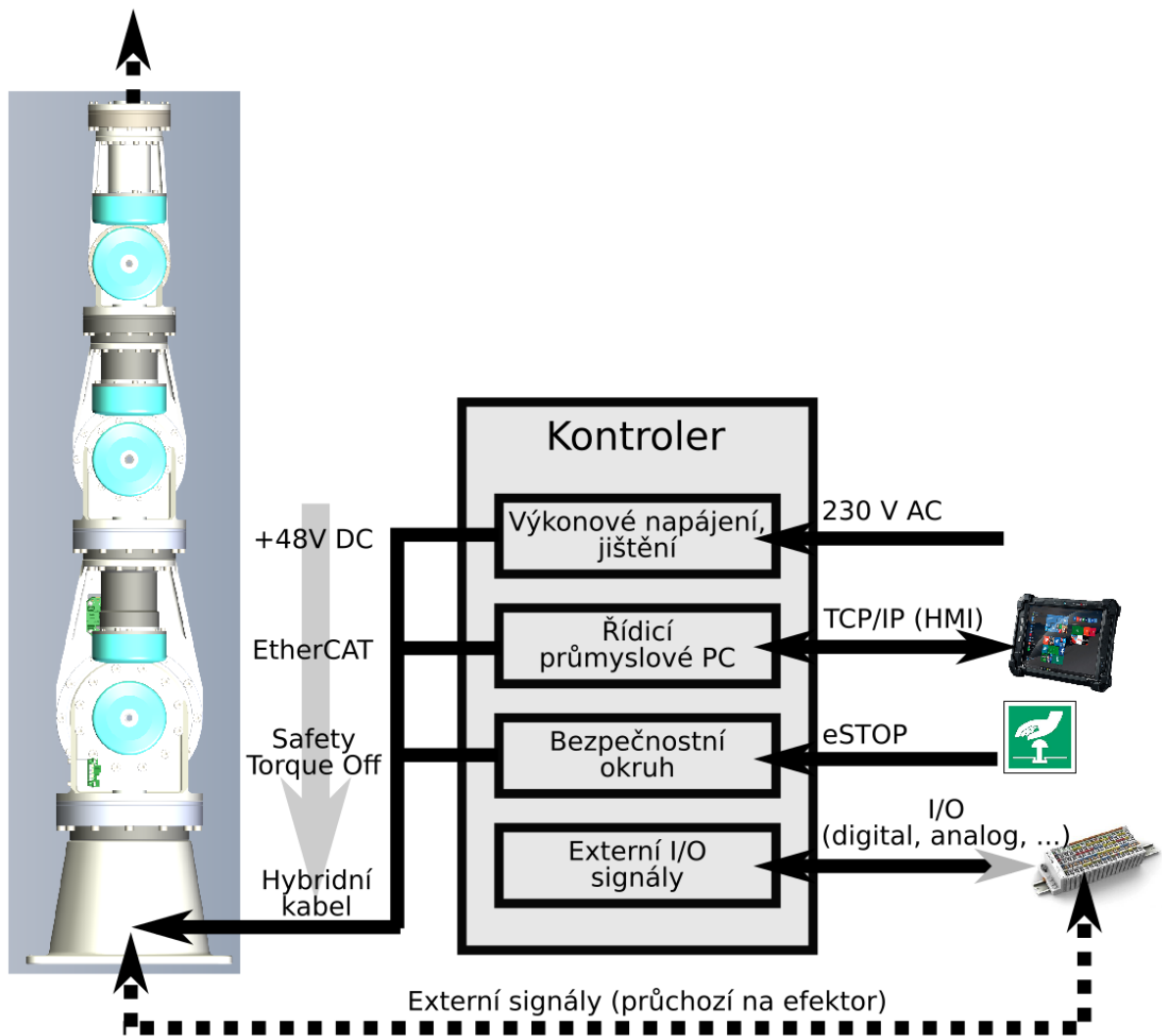
Obrázek 2: Rozměry robotu

Více, viz samostatný dokument [4].

Elektrické zapojení

Součástí robotu je kontroler, viz Obrázek 3, realizující následující funkce:

- Výkonové napájení, jištění (zdroje, jističe)
- Běh řídicích algoritmů (řídicí průmyslové PC), komunikace (EtherCAT)
- Management externích signálů (externí rozšiřující I/O karty - např. logické, analogové signály)
- Bezpečnostní funkce (eSTOP, safety relé, atd.) => Safety Torque Off
- Operátorské ovládání (průmyslový tablet, 3D myš)

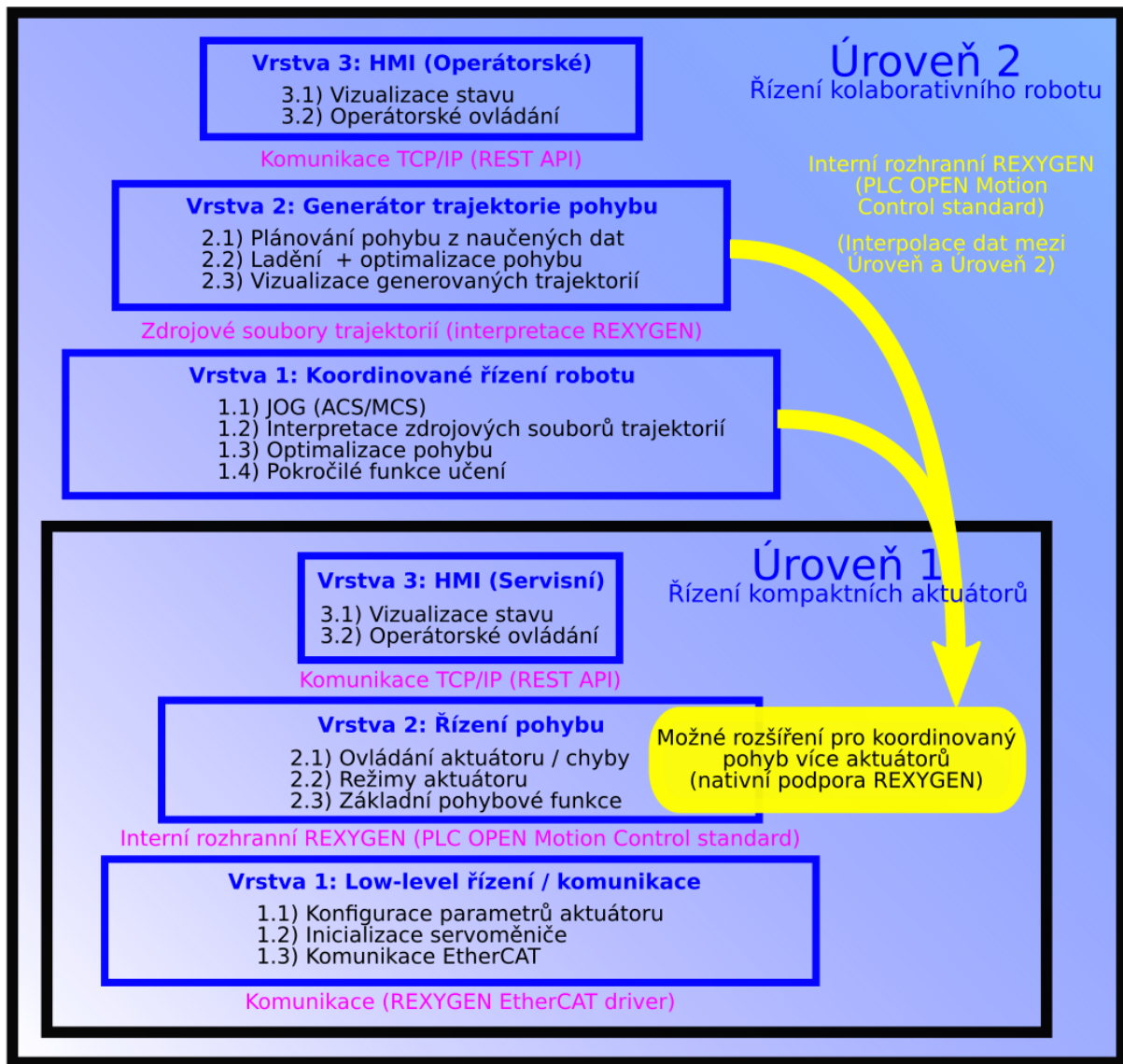


Obrázek 3: Elektrické zapojení robotu

Řídicí systém robotu

Řídicí systém robotu je implementován v řídicím systému reálného času REXYGEN [2], a je koncipován ve dvou úrovních (Úroveň 1, Úroveň 2). První úroveň (Úroveň 1) řídicího systému je zabezpečena vlastním řízením dílčích kompaktních aktuátorů, tak jak je popsáno v [1]. Vrstva 2 řídicího systému kompaktních aktuátorů, viz Obrázek 4, zajišťuje interface mezi těmito dvěma úrovněmi řídicího systému robotu.

Úroveň 2 zabezpečuje koordinované řízení celého robotu. Dílčí funkce jednotlivých vrstev řízení jsou popsány v Tabulce 2.

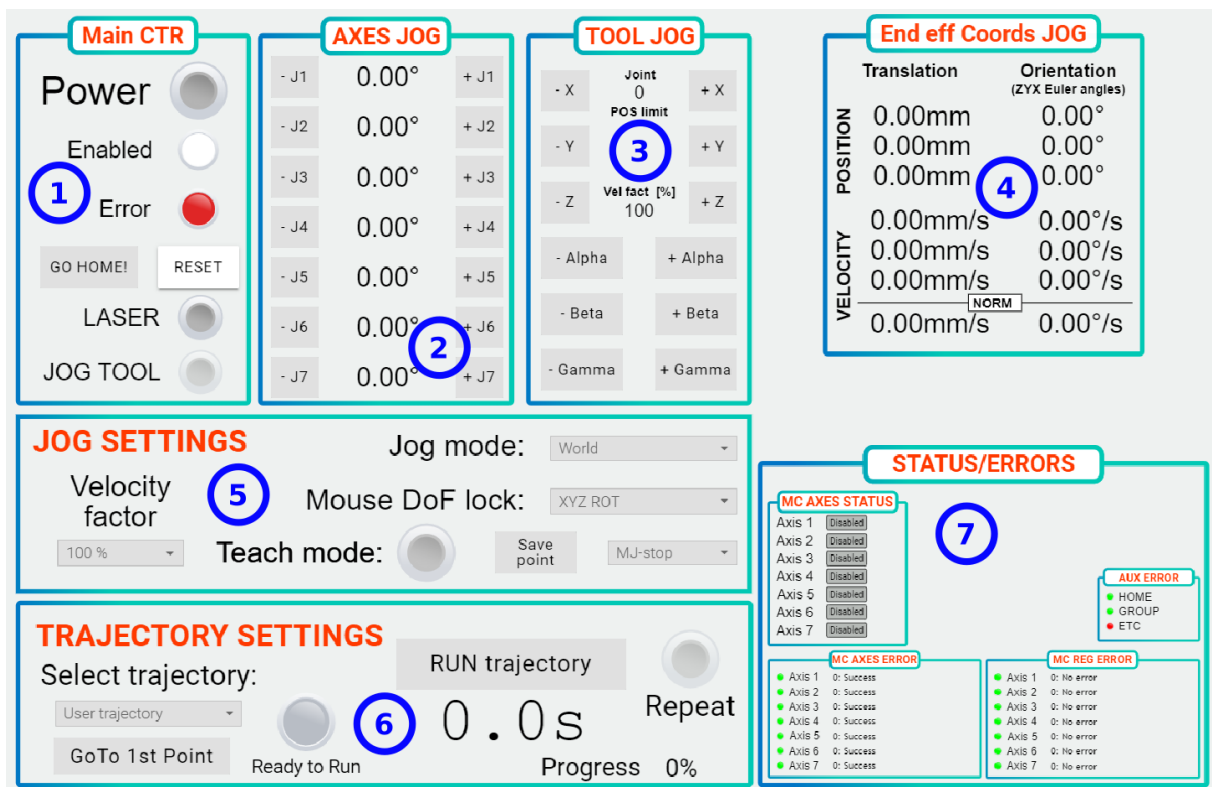


Obrázek 4: Úrovně (a vrstvy) řídicího systému robotu

Úroveň 2 (Řízení kolaborativního robotu)	
Vrstva 1: Koordinované řízení robotu	Popis
1.1) JOG (ACS/MCS)	Základní pohyb robotu (JOG) v jednotlivých osách (Axes Coordinate System) a koordinovaný pohyb robotu (JOG) ve vybraných souřadných systémech (Machine Coordinate System). Podpořeny jsou koordinované pohyby v souřadném systému: <ol style="list-style-type: none"> 1) Základny robotu (JOG WORLD) či v definovaném posunutí/natočení souřadného systému základny - PCS (Piece Coordinate System) 2) Koncovém efektoru robotu (JOG TOOL)

	3) JOG pomocí 3D myši (hand-guidance system) (JOG MOUSE) - navádění koncového efektoru robotu tažením rukou
1.2) Interpretace zdrojových souborů trajektorií	Funkce pro interpretaci generovaných pohybů (viz Vrstva 2: Generátor trajektorie pohybu).
1.3) Optimalizace pohybu	Možnost konfigurovat využití redundance (7DoF robot): Minimalizace rychlostí kloubů; Optimalizace pohybu mimo polohové limity kloubů.
1.4) Pokročilé funkce učení	Hand-guidance (tažení za rukou), viz 1.1). Možnosti auto-zarovnání efektoru do nejbližší roviny (WORLD CS, PCS). Učení zájmových bodů.
Vrstva 2: Generátor trajektorie pohybu	Popis
2.1) Plánování pohybu z naučených dat	Generování trajektorií pohybu ze zájmových bodů (naučených) - kloubový pohyb, lineární pohyb s polynomiálním napojováním, plynulý režim aproximace/interpolace. Více, viz Generátor trajektorie pohybu.
2.2) Ladění + optimalizace pohybu	Generátor trajektorií pohybu využívá analogicky systém optimalizace pohybu pro redundantní roboty, viz 1.3) optimalizace pohybu. Parametrizace pohybu - definice profilu rychlosti (zrychlení), atd.
2.3) Vizualizace generovaných trajektorií	Možnost vizualizovat generované trajektorie, zobrazovat časové průběhy (klouby, efektor), simulovat pohyb robotu po trajektorii.
Vrstva 3: HMI (Operátorské)	Popis
3.1) Vizualizace stavu	Operátorský panel vizualizace stavu robotu (standardně podpořena tvorba vizualizací a operátorských panelů v systému REXYGEN: REXYGEN HMI Designer). Operátorské uživatelské rozhraní robotu popisuje Obrázek 5, Tabulka 3.
3.2) Operátorské ovládání	Operátorský panel ovládání robotu (standardně podpořena tvorba vizualizací a operátorských panelů v systému REXYGEN: REXYGEN HMI Designer). Operátorské uživatelské rozhraní robotu popisuje Obrázek 5, Tabulka 3.

Tabulka 2: Vrstvy řídicího systému robotu (Úroveň 2)



Obrázek 5: HMI (operátorské ovládání robotu)

HMI (operátorské ovládání robotu)	
Sekce HMI	Popis
1) Panel řízení napájení robotu	Ovládání napájení robotu (Power); Diagnostika obecné chyby (Error); Resetování chyb (RESET); Homování robotu (GO HOME!) - ustavení robotu do domovské (vzpřímené) polohy; Přepínání režimu JOG (JOG TOOL) - ACS/MCS
2) Panel JOGování v jednotlivých osách robotu (AXES JOG)	Pojezd v jednotlivých osách robotu (+/- Ji) a zobrazení aktuální polohy
3) Panel JOGování v koncovém efektoru robotu (TOOL JOG)	Koordinovaný pojezd (translace/rotace) s koncovým efektozem robotu (+/- X, Y, Z, Alpha, Beta, Gamma); Identifikace polohového limitu kloubu (POS limit); Omezení rychlosti pohybu koncového efektoru z plánované hodnoty díky dojezdům do polohových limitů a singularit (Vel fact)
4) Panel displeje aktuálního pohybu koncového efektoru	Translace, orientace, normy translace, orientace.
5) Panel nastavení JOGu	Proporcionální snížení rychlostí (Velocity factor); Režim JOGu (Jog mode) - WORLD, TOOL, MOUSE, AUTO ALIGN...; Uzamčení počtu DoF efektoru při JOG MOUSE (Mouse DoF lock); Spuštění kontinuálního záznamu pohybu (Teach mode); Uložení zájmového bodu (Save point) včetně

	identifikátoru funkce (zastavení, projetí, atd.)
6) Panel nastavení pohybu po generované trajektorii (z Generátoru dat, viz dále)	Volba vygenerované trajektorie (Select trajectory); Start najetí na 1. bod trajektorie (Go To 1st Point); Spuštění pohybu po trajektorii (RUN trajectory) s možností opakování (Repeat)
7) Panel monitor chyb	Status a diagnostika chyb na pohybových osách (MC AXES STATUS a MC AXES ERROR); Chyby servoměničů kompaktních aktuátorů - os robotu (MC REG ERROR); Obecné chyb (AUX ERROR) - homming, grupy os pro koordinovaný pohyb, chyba EtherCAT komunikace

Tabulka 3: Popis funkcí operátorského uživatelského rozhraní (HMI)

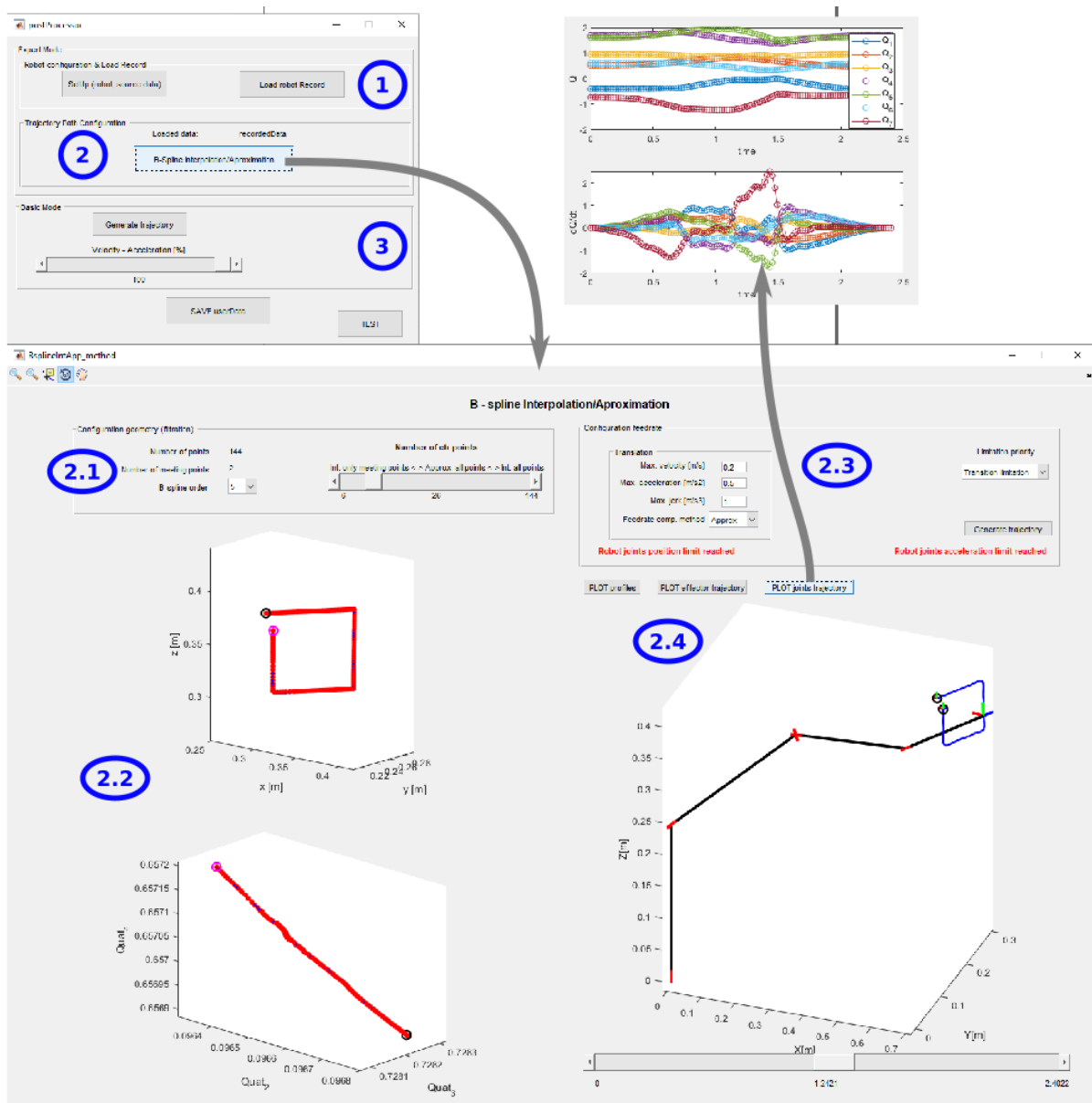
Generátor trajektorie robotu

Generátor trajektorie robotu je volně běžící aplikace (Stand Alone Application) implementovaná v prostředí Matlab (www.mathworks.com). Aplikace je určena pro zpracování naučených dat (zájmových bodů) zaznamenaných při učení robotu (viz režimy v Tabulce 3). Screenshot z aplikace je znázorněn na Obrázku 6. Stručný popis aplikace shrnuje Tabulka 4. Data z aplikace jsou zpětně distribuována do průmyslového PC řídicího systému robotu a interpretována v řídicím systému, viz Tabulka 3 bod 6).

Generátor trajektorie robotu (aplikace)	
Sekce aplikace	Popis
Hlavní okno aplikace: Inicializace a nastavení generátoru trajektorie	
1) Robot configuration & Load Record	Nastavení parametrů generátoru (SetUp) - kinematické parametry, kompenzace základny a efektoru, limity kloubů (polohy, rychlosti, zrychlení), zdroj naučených dat (online z kontroleru robotu, offline z úložiště), nastavení filtrace naučených dat (ve smyslu rozlišení v translaci/orientaci), nastavení výstupu vygenerované trajektorie (jméno cílového souboru, perioda vzorkování)
2) Load robot Record	Načtený naučených dat + pre-filtrace
3) Basic Mode	Zjednodušený režim generování trajektorie s defaultním nastavením (v SetUp)
Okno B-spline Interpolation/Approximation Jeden z příkladů generování pohybu: Smíšená úloha aproximace/interpolace	
2.1) Konfigurace interpolace/aproximace	Nastavení řádu interpolačního polynomu (B-spline order), nastavení kompromisu mezi interpolací/aproximací (Number of ctr points)
2.2) Vizualizace interpolovaných naučených dat	Translace a orientace plánovaného pohybu koncového efektoru (červená - naučené body, modrá - interpolovaná

	data)
2.3) Konfigurace profilu rychlosti	Konfigurace profilu rychlosti pohybu podél generované trajektorie (feedrate). Přesné sledování profilu rychlosti/aproximativní sledování profilu rychlosti.
2.4) Vizualizace	Vizualizace (simulace) pohybu robotu (zjednodušený model robotu). Možnosti generování časových průběhů: Profil rychlosti, pohyb koncového efektoru, pohyb kloubů (viz Obrázek)

Tabulka 4: Generátor trajektorie (aplikace)



Obrázek 6: Screenshot z aplikace generátoru trajektorie

Fotodokumentace

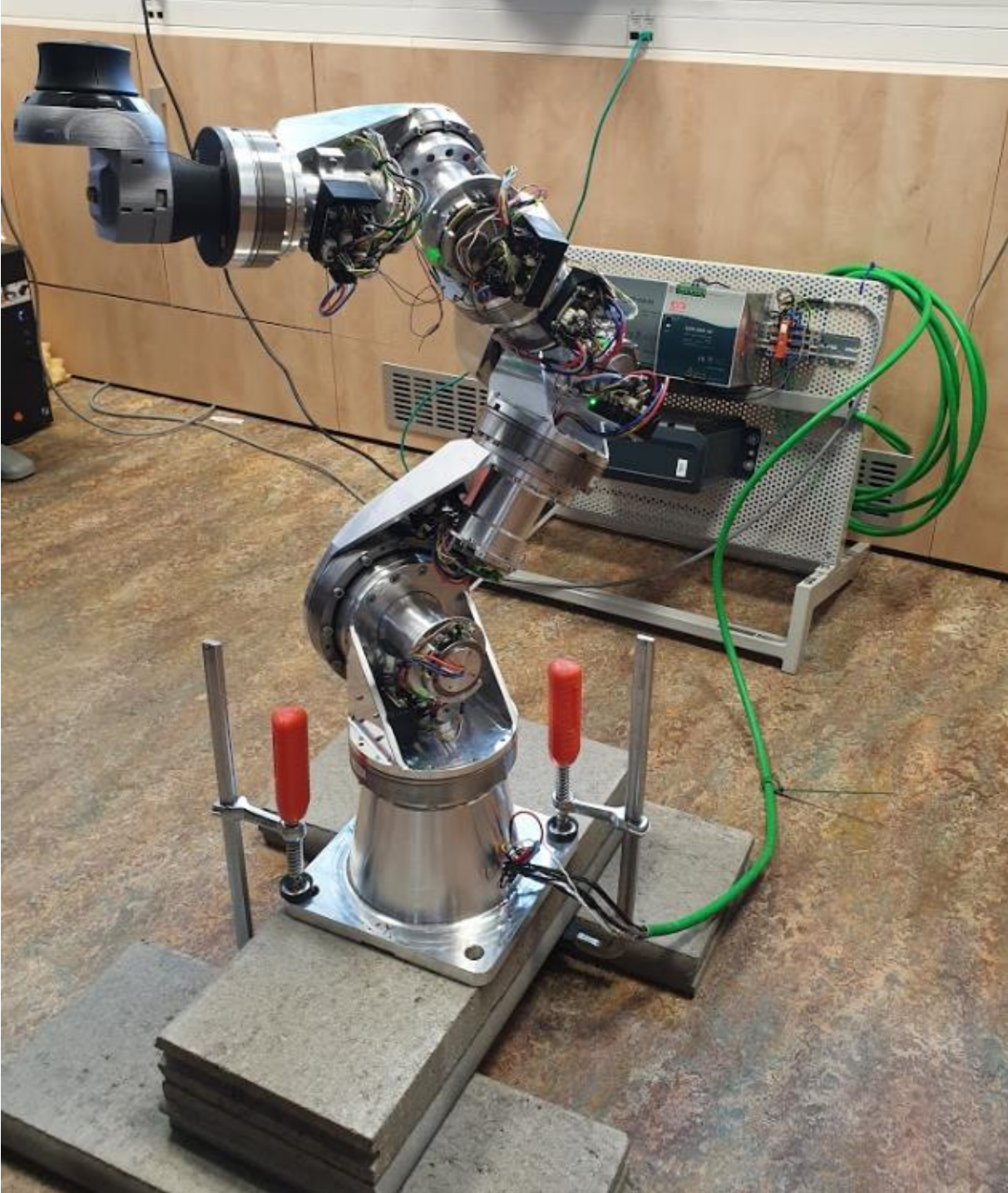


Foto 1: Prototyp robotu



Foto 2: Detail 3D myši pro navádění koncového efektoru (hand-guidance)



Foto 3: Reduktor příruby robotu - kompatibilita s přírubami robotů Universal Robots

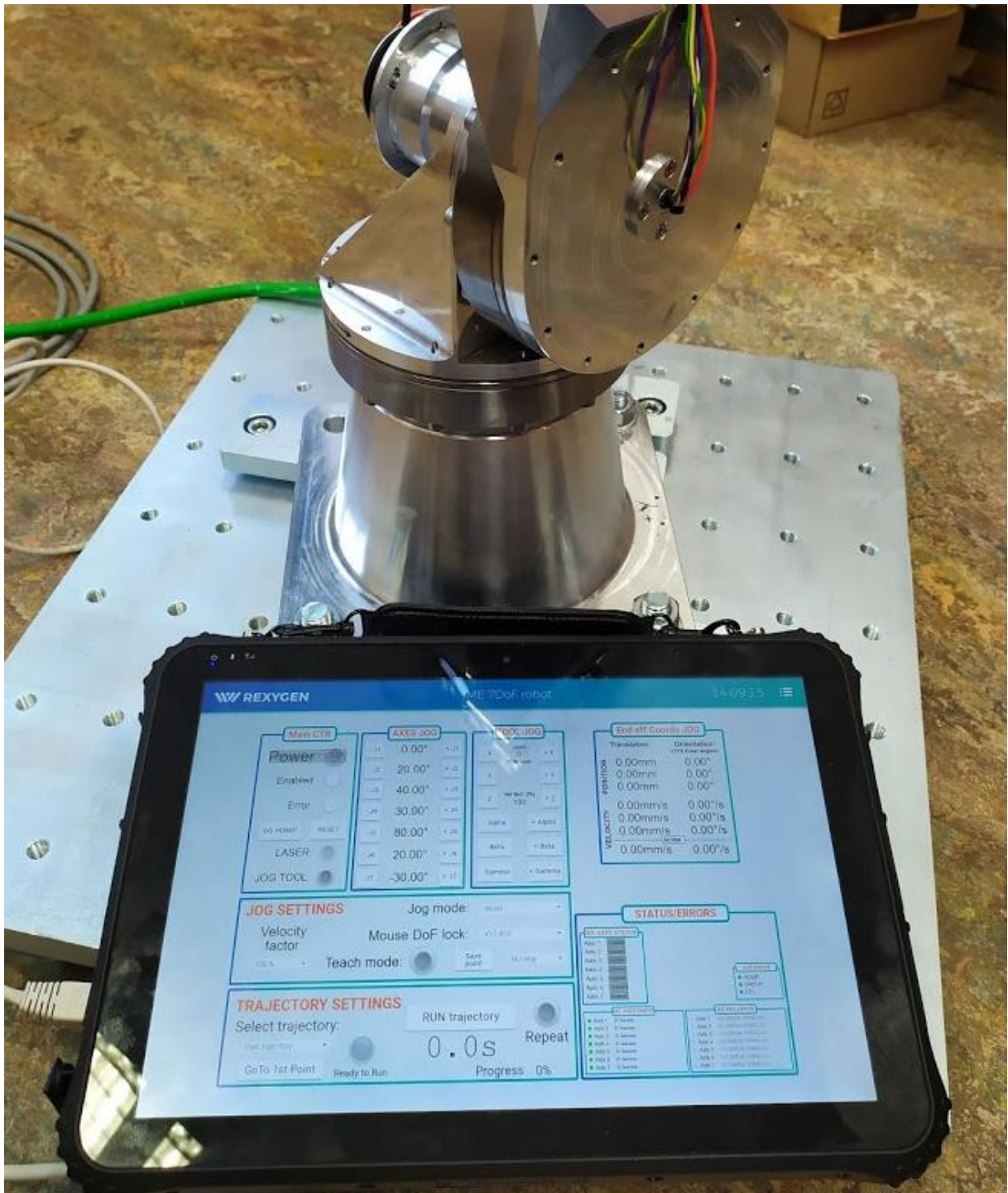


Foto 4: Operátorský panel (HMI) pro ovládání robotu (HW průmyslový tablet s webovým prohlížečem)

Provozní testování kompaktního aktuátoru (Protokol o zkoušce prototypu)

Viz samostatný dokument [3].

Reference

- [1] M. Švejda (ZČU), P. Barták (SM), A. Jáger (ZČU), D. Tolar (ZČU): *Prototyp kompaktního aktuátoru (Technická a uživatelská dokumentace)*, ZČU v Plzni, květen 2019.
- [2] REXYGEN (Programming Automation Devices without Hand Coding), www.rexygen.com
- [3] Verifikace a testování prototypu kolaborativního robotu (Protokol o zkoušce prototypu), výzkumná zpráva, ZČU v Plzni, prosinec 2019.
- [4] P. Barták (SM), O. Houra (SM): *Konstrukce a oživení kompaktních aktuátorů a kolaborativního robotu*, technická zpráva, ZČU v Plzni, červen 2019.