

MPO TRIO

Název projektu:

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

(FV 10044)

Prototyp

Prototyp kompaktního aktuátoru (Technická a uživatelská dokumentace)

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

10. května 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] Inovovaná konstrukce kompaktního rotačního aktuátoru (motor, převodovka, brzda, enkodery, řídicí jednotka), integrace komponent do jednoho pouzdra, podpora algoritmů pro řízení pohybu s ohledem na kolaborativní robotiku, optimalizovaný HW řídicí desky (TRL 6).

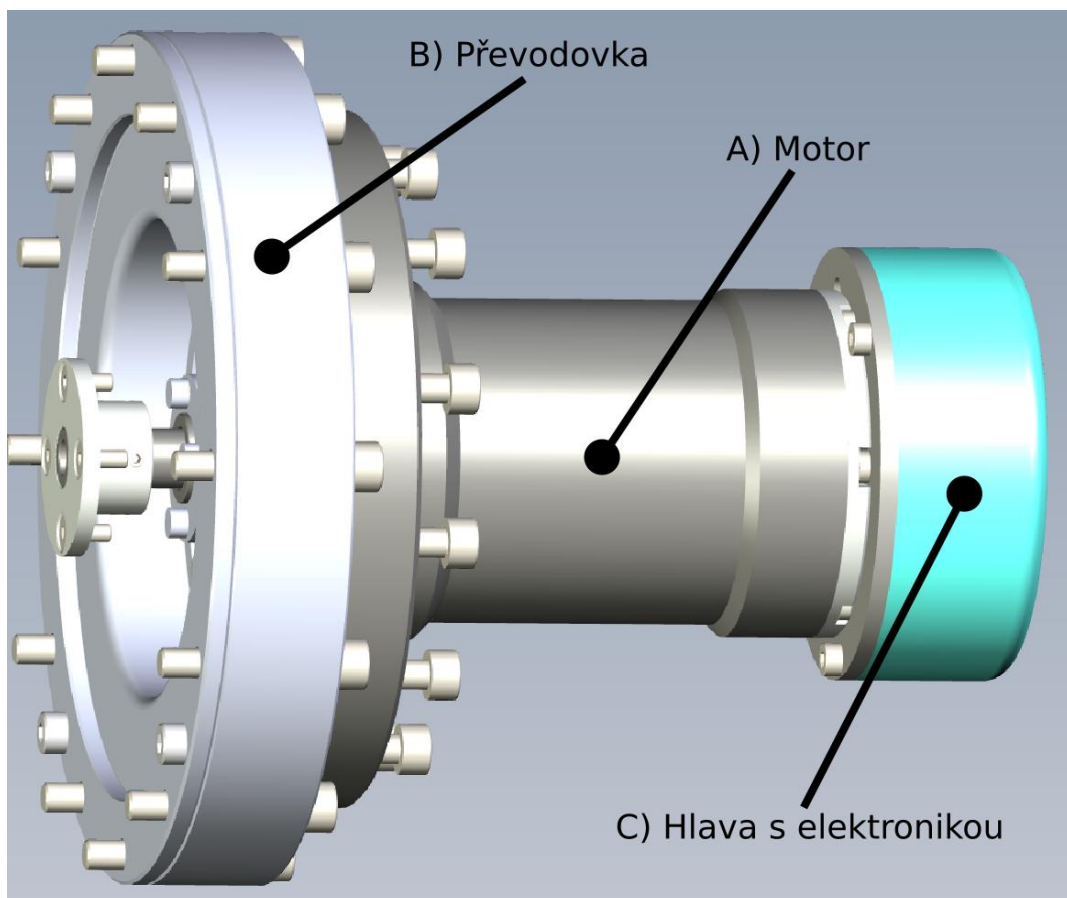
Popis kompaktního aktuátoru

Kompaktní aktuátorem se rozumí samostatný aktivní rotační kloub, který je určen pro realizaci různých kinematických architektur robotů či dalších mechatronických systémů ve smyslu jejich konstrukčního uspořádání (geometrie ramen robotu), počtu a umístění kloubů.

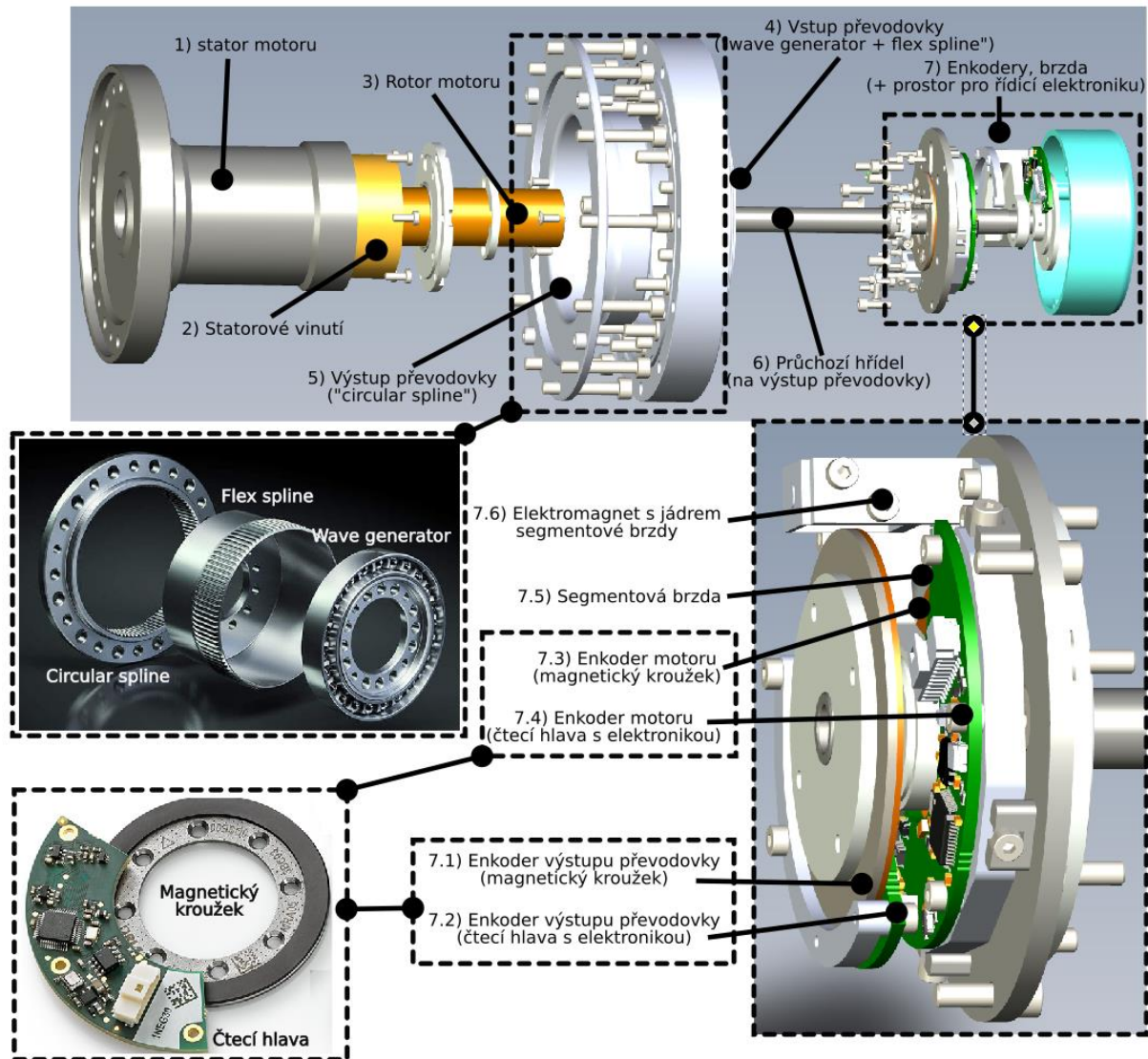
Kompaktní aktuátor je realizován jako sestava mechanických komponent (motor, převodovka, brzda další konstrukční díly) a elektronických komponent (enkodery, řídicí deska servoměniče a komunikací). Schématické uspořádání aktuátoru je znázorněno na Obrázku 1.

Klíčové přednosti kompaktního aktuátoru:

- Ucelené řešení pro aktuování mechanických systémů (=> tzv. "gear motor")
- Kompaktní zástavba (především díky zástavbovým rozměrům převodovek a motorů řešených na míru)
- Integrované absolutní odměřování polohy vstupu převodovky (motoru) i výstupu převodovky (připojené zátěže) => pro účely řízení, počáteční ustavení aktuátoru ("homing")
- Možnosti přímé integrace jednotky servoměniče (může být integrován či osazen vně - dle možností zástavby, režimu provozu aktuátoru, atd.)
- Snadná možnost customizace (realizace vlastních robotů speciálních architektur)
- Otevřený systém řízení (řízení aktuátoru může být otevřené, až na úroveň dílčích regulačních smyček) => možnosti integrace pokročilých algoritmů řízení
- Dutá průchozí hřídel aktuátoru pro snadné kompaktní vedení kabeláže



Obrázek 1: Kompaktní aktuátor robotu



Obrázek 2: Kompaktní aktuátor (detail)

Detailní popis dílčích komponent kompaktního aktuátoru

Tabulka 1 shrnuje základní specifikace dílčích komponent kompaktního aktuátoru, viz Obrázek 1, 2. Více informací lze nalézt v [1].

A) Motor	
Motor kompaktního aktuátoru je realizován jako bezkartáčový třífázový servomotor s dutou hřídelí vyrobený na míru společností TG drives (tgdrives.cz) za účelem dosažení minimálních zástavbových rozměrů kompaktního aktuátoru při zachování deklarovaných parametrů (zatížení, rychlosti, atd.).	
Komponenta	Popis
1) Stator motoru	Monolit těla motoru aktuátoru slouží prioritně k ochraně statorového vinutí motoru, zároveň tvoří nosný díl kompaktního aktuátoru (vstupní strana - vstupní příruba kompaktního aktuátoru), ke které je připojováno vstupní rameno realizovaného mechatronického systému (robotu).

2) Statorové vinutí	Třífázové statorové vinutí servomotoru s integrovaným čidlem teploty pro diagnostiku stavu motoru. Statorové vinutí je zalito do těla statoru servomotoru.
3) Rotor motoru	Rotor synchronního servomotoru s permanentními magnety připojený na vstup 4) (wave generátor) navazující harmonické převodovky.
B) Převodovka Převodovka kompaktního aktuátoru je realizována výrobními řadami SHD (kompaktní design určený pro další zástavbu) harmonických převodovek s dutou hřídelí dodávaný firmou Harmonic Drive AG (harmonicdrive.de).	
Komponenta	Popis
4) Vstup převodovky	Výstupní hřídel motoru roztáčí "wave generator", který společně s "flex spline" tvoří vstupní stranu harmonické převodovky. Princip funkce převodovky je vysvětlen např. zde: https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_drive
5) Výstup převodovky	Výstup harmonické převodovky je tvořena "circular spline", který je mechanicky pootáčen pohybem "flex spline" buzeného díky "wave generator" - výstupní strana (příruba) kompaktního aktuátor, ke které je připojováno výstupní rameno realizovaného mechatronického systému (robotu). Princip funkce převodovky je vysvětlen např. zde: https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_drive
6) Průchozí hřídel (na výstup převodovky)	Zajišťuje přenos pohybu výstupní příruby převodovky zpět do hlavy s elektronikou C), za účelem možnosti odměřování polohy na výstupu kompaktního aktuátoru. Hřídel je vyrobena jako dutá pro účely protahování kabeláže.
C) Hlava s elektronikou 7) Enkodery, brzda (+ prostor pro řídicí elektroniku) Hlavní část elektronické výbavy kompaktního aktuátoru. Jsou zde umístěny především enkodery (motorový, za převodovkou), segmentová brzda (na motorové hřídeli), případně řídicí elektronika (servoměnič) - dle konfigurace při použití kompaktního aktuátoru.	
Komponenta	Popis
7.1) + 7.2) Enkoder výstupu převodovky	Kompaktní aktuátor je osazen absolutními jednotáčkovými magnetickými enkodery řady AKSIM2 výrobce RLS (člen skupiny Renishaw) www.rls.si . Enkoder se skládá z magneticky kódovaného kroužku 7.1) a čtecí hlavy 7.2) s elektronikou. Enkoder na výstupu převodovky slouží k měření polohy výstupní příruby aktuátoru (především pro počáteční ustavení - homing).
7.3) + 7.4) Enkoder výstupu převodovky	Kompaktní aktuátor je osazen absolutními jednotáčkovými magnetickými enkodery řady AKSIM2 výrobce RLS (člen skupiny Renishaw) www.rls.si . Enkoder se skládá z magneticky kódovaného kroužku 7.3) a čtecí hlavy s elektronikou 7.4).

	Enkoder na motorové straně aktuátoru je určen prioritně pro účely samotného řízení aktuátoru, a to ve dvou úrovních: 1) Řízení komutace synchronního servomotoru s permanentními magnety použitým servoměničem (podřazená vrstva), 2) Odečet polohy aktuátoru pro účely nadřazeného řízení (nadřazená vrstva) - např. pro řízení koordinovaného pohybu realizovaného mechatronického systému (robotu).
7.5) + 7.6) Segmentová brzda	Kompaktní aktuátor může být vybaven segmentovou elektromagnetickou brzdou na motorové straně sloužící k uzamčení aktuátoru v definované poloze (např. po ztrátě napájení, při nouzovém zastavení, atd.). Segmentová brzda se skládá s kroužku segmentové brzdy 7.5) spojeným s rotorem motoru a elektromagnetu 7.6), jehož jádro zapadá do segmentů kroužku a generuje tak brzdny efekt.

Tabulka 1: Detailní specifikace kompaktního aktuátoru

Realizované konstrukční řady kompaktního aktuátoru (dle užitého zatížení)

Kompaktní aktuátor je realizován v současnosti v řadě 4 variant dle užitého momentového zatížení výstupní příruby. Konkrétní konstrukční konfigurace jsou sumarizovány v Tabulce 2.

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
HW uspořádání				
Motor TG drives (varianta)	TGN2-0095 (TGN2-0075)	TGN2-0075 (TGN2-0054)	TGN2-0028	TGS1-0020
Převodovka Harmonic Drive AG	SHD-32-160-2SH	SHD-25-160-2SH	SHD-20-160-2SH	SHD-17-100-2SH
Enkoder motor Enkoder výstup převodovky	AKSIM2 039 AKSIM2 049	AKSIM2 039 AKSIM2 049	AKSIM2 039 AKSIM2 049	AKSIM2 039 AKSIM2 049
Brzda (variantně)	elmag. segment	elmag. segment	elmag. segment	elmag. segment
Parametry				
Max. nominální moment na výstupu [Nm] (varianta)	109 (80)	80 (50)	27	13
Max. rychlost na výstupu [deg/s]	113 (150)	150 (225)	225	360
Max. axiální zatížení [N]	19100	10900	7300	5200

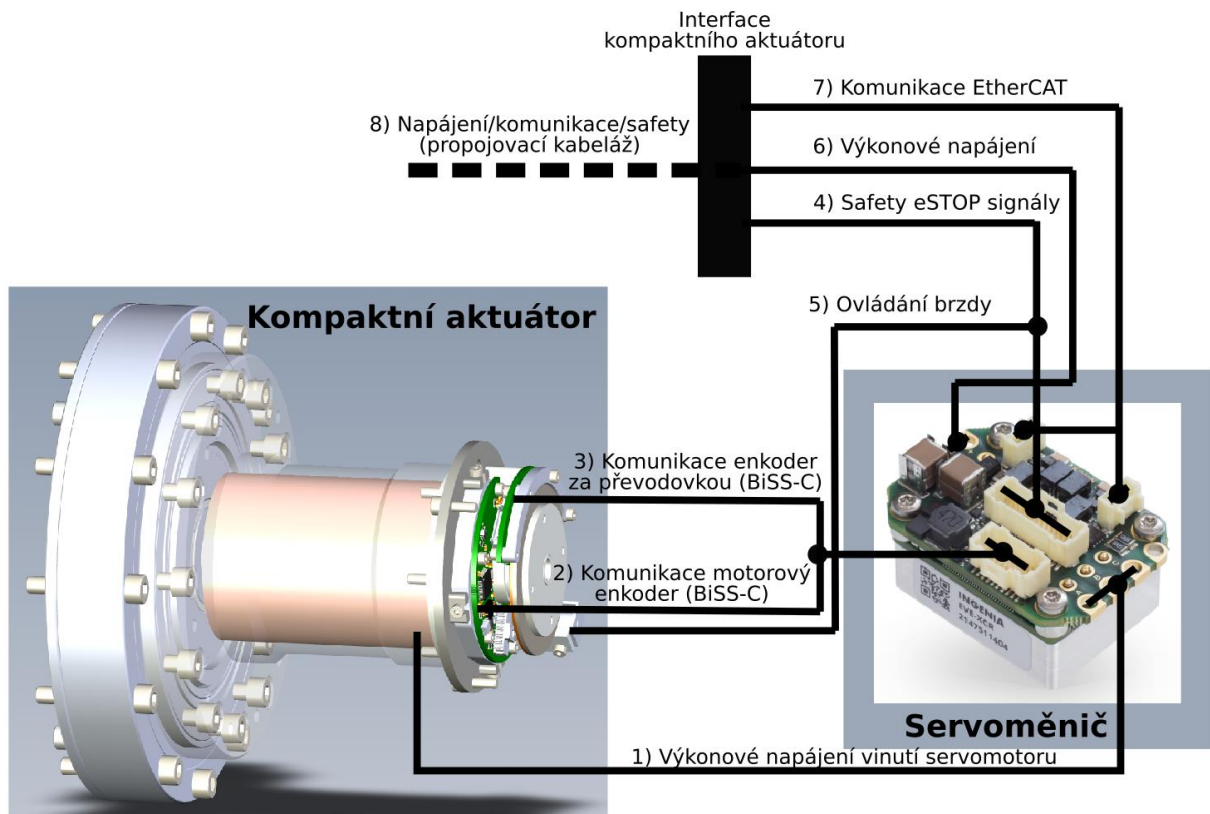
Max. klopný moment [Nm]	239	90	61	37
Mech. vlastnosti				
Hmotnost [kg] (variantně dle elektroniky)	2 (1.8)	1.4 (1.3)	1	0.9
Vnější rozměry průměr/ délka [mm]	162/147 (142/147)	110/142 (110/127)	90/109	80/121
Montážní rozměry	viz výkresová dokumentace [6]	viz výkresová dokumentace [6]	viz výkresová dokumentace [6]	viz výkresová dokumentace [6]

Tabulka 2: Konstrukční varianty kompaktního aktuátoru

Elektrické zapojení kompaktního aktuátoru

Kompaktní aktuátor je v současné podobě osazen miniauturními servoměniči Everest XCR Home firmy INGENIA (<https://ingeniamc.com/>). Více informací lze nalézt v [2]. Jednotka servoměniče je standardně umístěna samostatně vně hlavy s elektronikou (v případě nutnosti ji lze integrovat), viz Obrázek 3. Popis dílčích signálů je shrnut v Tabulce 3. Elektroinstalace je principiálně shodná pro všechny varianty kompaktního aktuátoru.

Mezi hlavní přednosti patří možnost propojovat vzájemně kompaktní aktuátory pouze signály 6) výkonového napájení: 2 vodiče, 4) nouzového zastavení: 2 vodiče a 7) komunikace EtherCAT: 4 vodiče.



Obrázek 3: Schéma elektroinstalace kompaktního aktuátoru

Komponenta	Popis
1) Výkonové napájení vinutí servomotoru	Třífázové napájení (Phase A, B, C) servomotoru jako výkonový výstup servoměniče, buzení PWM signálem dle komutace (podpora Field Oriented Control) - využívá se přímo absolutní motorový enkoder.
2) Komunikace motorový enkoder (BiSS-C)	Komunikační sběrnice BiSS-C (data+, data-, clock+, clock-, +5V, GND).
3) Komunikace enkoder za převodovkou (BiSS-C)	Komunikační sběrnice BiSS-C (data+, data-, clock+, clock-, +5V, GND).
4) Safety eSTOP signály	Signály nouzového zastavení (safe torque off), duplicitní zapojení (STO1, STO2).
5) Ovládání brzdy	Napájení brzdy, možno konfigurovat PWM a tak řídit výkon např. pro bezpečné odbrždění, (+Ucc, GND).
6) Výkonové napájení	Výkonové napájení DC 48V (+Ucc, GND).
7) Komunikace EtherCAT	10Mbit komunikace přes sběrnici EtherCAT (TxD+, TxD-, RxD+, RxD-).
8) Propojovací kabeláž	Společné kabelový svazek pro propojení kompaktních aktuátorů. Napájení (+Ucc 48V, GND), safety torque off (STO1, STO2), EtherCAT (TxD+, TxD-, RxD+, RxD-).

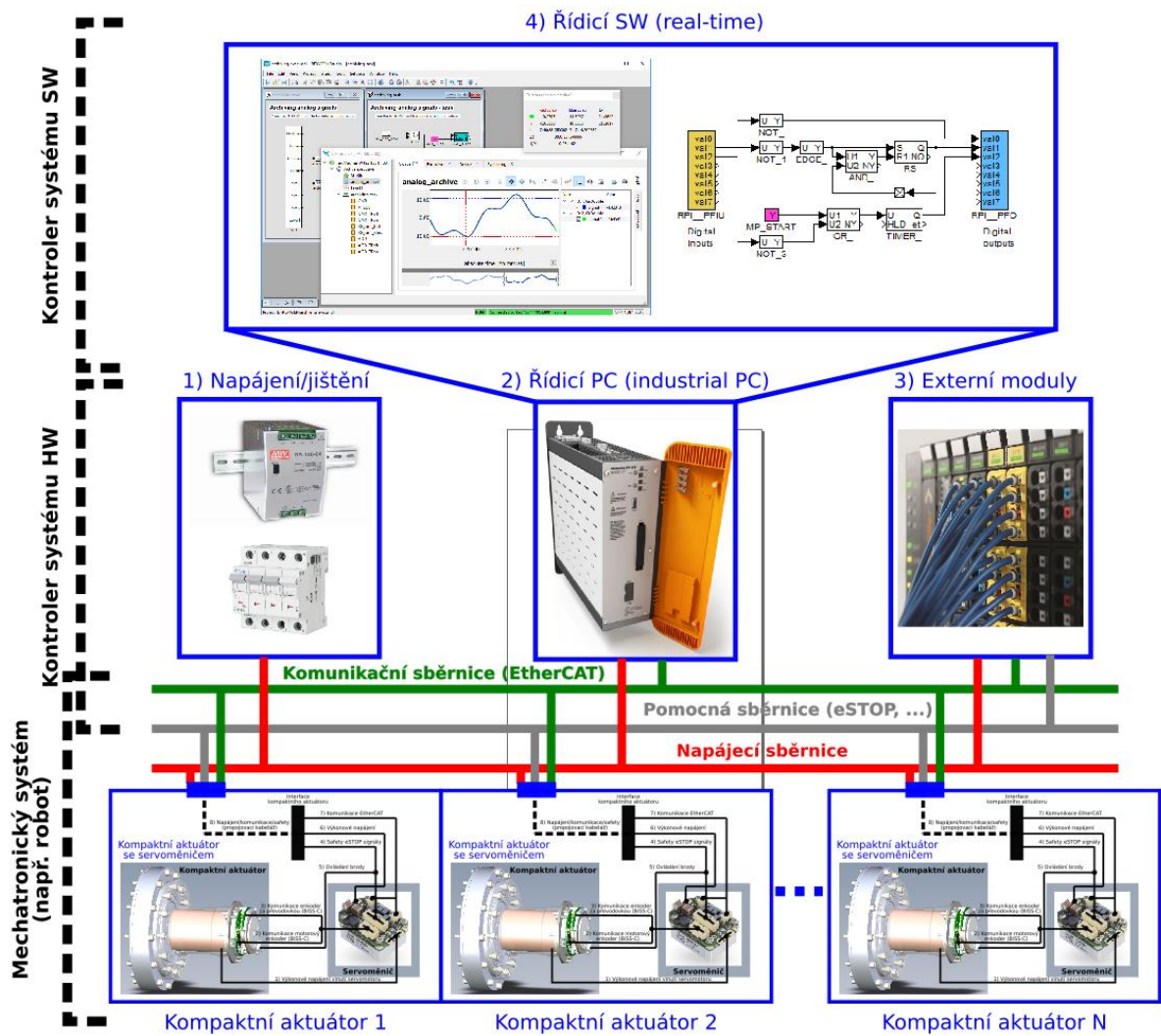
Tabulka 3: Význam signálů elektroinstalace kompaktního aktuátoru

Řídicí software kompaktního aktuátoru

Řízení kompaktního aktuátoru je schématicky znázorněno na Obrázku 4. Kompaktní aktuátory mohou být libovolně řazeny a jsou vzájemně propojovány *napájecí sběrnici, komunikační sběrnici a pomocnou sběrnici* (prioritně určena pro signály safety stop).

HW část řídicího systému (kontroleru) je typicky realizována:

- Subsystémem napájení/jištění:** Výkonové napájení a jištění kompaktních aktuátorů a dalšího HW vybavení.
- Subsystém řídicího PC:** Standardní průmyslové PC jako cílová platforma SW části kontroleru. V testované aplikaci využit systém Automation PC 910 výrobce B&R Industrial Automation GmbH (<https://www.br-automation.com/cs/produkty/industrial-pcs/automation-pc-910/>)
- Subsystém externích modulů:** Požadované další HW rozšíření, typicky vzdálené vstupy/výstupy, atd.



Obrázek 4: Schéma řídicí architektury pro kompaktní aktuátory

SW část řídicího systému (kontroleru) je implementována v prostředí řídicího systému reálného času **REXYGEN**, viz [3]. Vlastní řídicí systém je koncipován do 3 vrstev, viz Obrázek 5, jejichž funkce popisuje Tabulka 4.

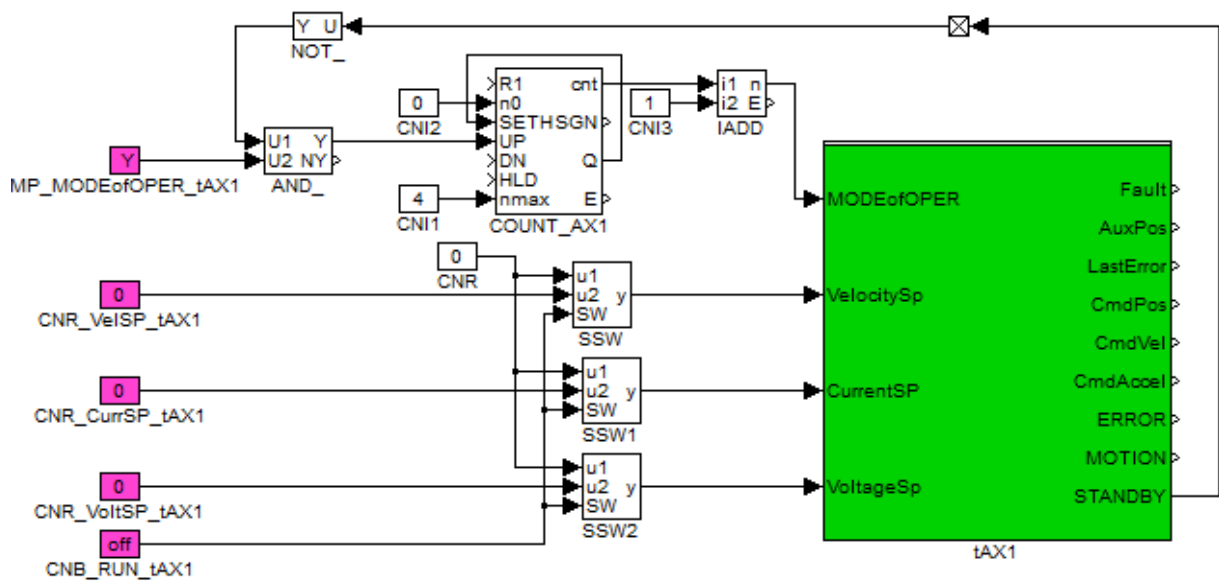
Vrstva 1: Low-level řízení / komunikace	Popis
1.1) Konfigurace parametrů aktuátoru	Nastavení parametrů kompaktního aktuátoru, viz dialogové okno na Obrázku 6 (ID, konfigurace vlastností enkoderů, rozsahy povolených pohybů). Další parametry lze konfigurovat uvnitř bloku subsystému (konfigurace servoměniče, nastavení regulačních smyček).
1.2) Inicializace servoměniče	Servisní nastavení servoměniče aktuátoru a procedury jeho inicializace (dle normy CiA402).
1.3) Komunikace EtherCAT	Implementace driveru komunikace přes EtherCAT (konfigurace, běh, diagnostika, atd.).
Vrstva 2:	Popis

Řízení pohybu	
2.1) Ovládání aktuátoru / chyby	Vrstva pro vlastní ovládání : zapnutí/vypnutí, správa chyb (viz použitý servoměnič), reset, atd.
2.2) Režimy aktuátoru	Vstupy bloku subsystému, viz Obrázek 6, navíc umožňují konfigurovat měnič aktuátoru do různých režimů: polohová regulace (=> rozšíření pro koordinovaný pohyb), rychlostní regulace, proudová regulace, bez regulace-PWM napěťový režim (vhodný pro ladění aktuátoru).
2.3) Základní pohybové funkce	Základní pohybové funkce aktuátoru jsou: 1) JOG positive/negative, MoveRelative/ MoveAbsolute. Navíc lze prostřednictvím této vrstvy zařadit více aktuátorů do pohybové skupiny (reference na osy, viz norma PLC open Motion Control, www.plcopen.org) a realizovat tak koordinovaný pohyb více aktuátorů (mechatronické systémy, roboty, atd.).
Vrstva 3: HMI	Popis
3.1) Vizualizace stavu	Operátorský panel vizualizace stavu aktuátoru (standardně podpořena tvorba vizualizací a operátorských panelů v systému REXYGEN: REXYGEN HMI Designer). HMI kompaktního aktuátoru popisuje Obrázek 7.
3.2) Operátorské ovládání	Operátorský panel ovládání aktuátoru (standardně podpořena tvorba vizualizací a operátorských panelů v systému REXYGEN: REXYGEN HMI Designer). HMI kompaktního aktuátoru popisuje Obrázek 7.

Tabulka 4: Vrstvy řídicího systému kompaktního aktuátoru



Obrázek 5: Vrstvy řídicího systému kompaktního aktuátoru



Block properties

Block name: tAX1 Block type: INGENIA_AXIS_LIB\tAX1

Block type description: Subsystem block

[Open block documentation ...](#) [Toggle quick reference](#)

Parameters Runtime Style

Scalar parameters

Parameter	Value	Type	Description
1 etc_id	1	Unk...	
2 motorEncPPR	524288	Unk...	Motor Encoder Puls Per Revolution
3 gearEncPPR	32768	Unk...	Gear Encoder Puls Per Revolution
4 GearRatio	160	Unk...	GearRatio
5 GearEncoderOffset	4939	Unk...	ABS Encoder [puls]
6 maxPos	180	Unk...	[deg]
7 minPos	-180	Unk...	[deg]
8 maxVel	10	Unk...	[deg/s]
9 maxAccel	60	Unk...	[deg/s ²]

etc_id:

Quick reference

Subsystem block

unknown > MODEofOPER Fault float

unknown > AuxPos AuxPos float

unknown > LastError LastError float

unknown > VelocitySp VelocitySp float

unknown > CmdPos CmdPos float

unknown > CmdVel CmdVel float

unknown > CurrentSP CurrentSP float

unknown > CmdAccel CmdAccel float

unknown > ERROR ERROR float

unknown > MOTION MOTION float

unknown > VoltageSp VoltageSp float

tAX1

Inputs

MODEofOPER

VelocitySp

CurrentSP

VoltageSp

Outputs

Fault

AuxPos

LastError

CmdPos

CmdVel

CmdAccel

ERROR

MOTION

[Open block documentation ...](#)

OK Cancel

Obrázek 6: Implementace řízení kompaktního aktuátoru jako funkční blok (subsystém) systému REXYGEN

Monitor aktuátoru:
Ovládání aktuátoru
Aktuální stav aktuátoru
Správa chyb

Axis 1	
Axis STANDBY	OFF(0)
Axis IN MOTION	OFF(0)
Axis ERROR	OFF(0)
EtherCAT ERROR	ON(1)
Axis Enable	OFF(0) ON(1)
Axis Reset	Axis Reset
Act Position [°]	0
Reg Last Error	0
Cmd Position [°]	0
Act Velocity [°/s]	0
Act Current [%]	0
Auxiliary DO2 [pulse]	0

Režimy provozu aktuátoru :
Polohový režim (koordinovaný pohyb)
Rychlostní režim (pro servisní testy)
Proudový režim (pro servisní testy)
Bez regulace - napěťový režim (pro servisní testy)

Modes of Oper	Modes of Oper
Modes of Operation	1
2: Velocity SP [°/s]	0
3: Current SP [% z Inom]	0
4: Voltage SP [V]	0
RUN	OFF(0)

Základní pohybové funkce:
JOG positive/negative
Move relative/absolute

Jog Velocity [°/s]	10
Jog Acceleration [°/s ²]	60
Jog >>>	OFF(0)
Jog <<<	OFF(0)
Move Distance [°]	10
Move Velocity [°/s]	10
Move Acceleration [°/s ²]	60
Move GO!	Move GO!

Obrázek 7: HMI kompaktního aktuátoru (webový prohlížeč)

Fotodokumentace

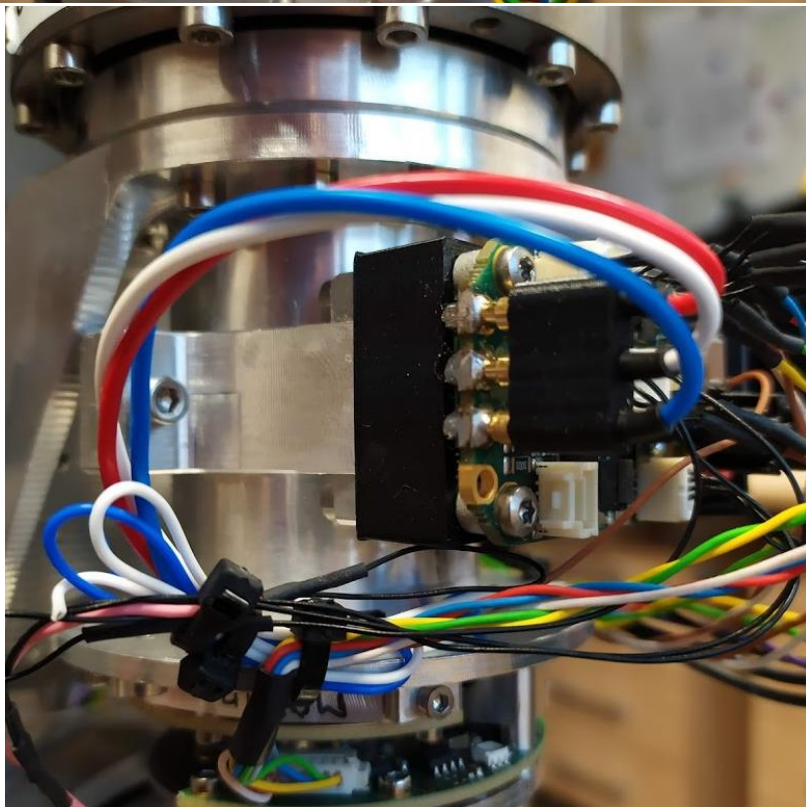
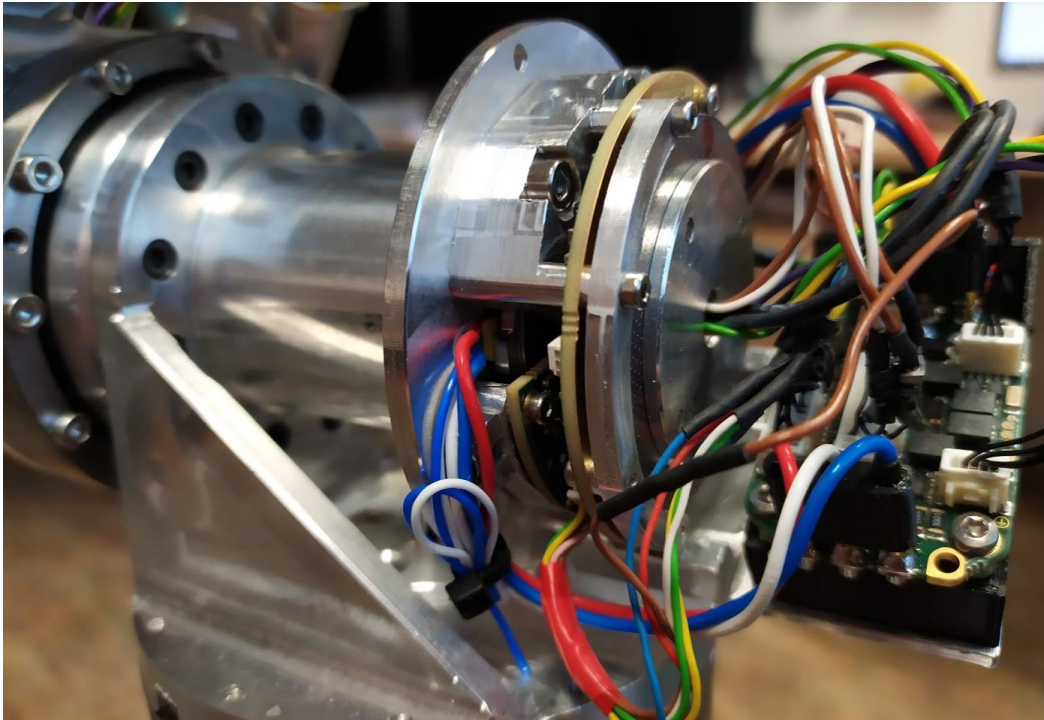


Foto 1: Prototyp kompaktního aktuátoru s externě umístěnými servoměniči Everest XCR Home



Foto 2: Prototypový rozvaděč k ovládání kompaktního aktuátoru

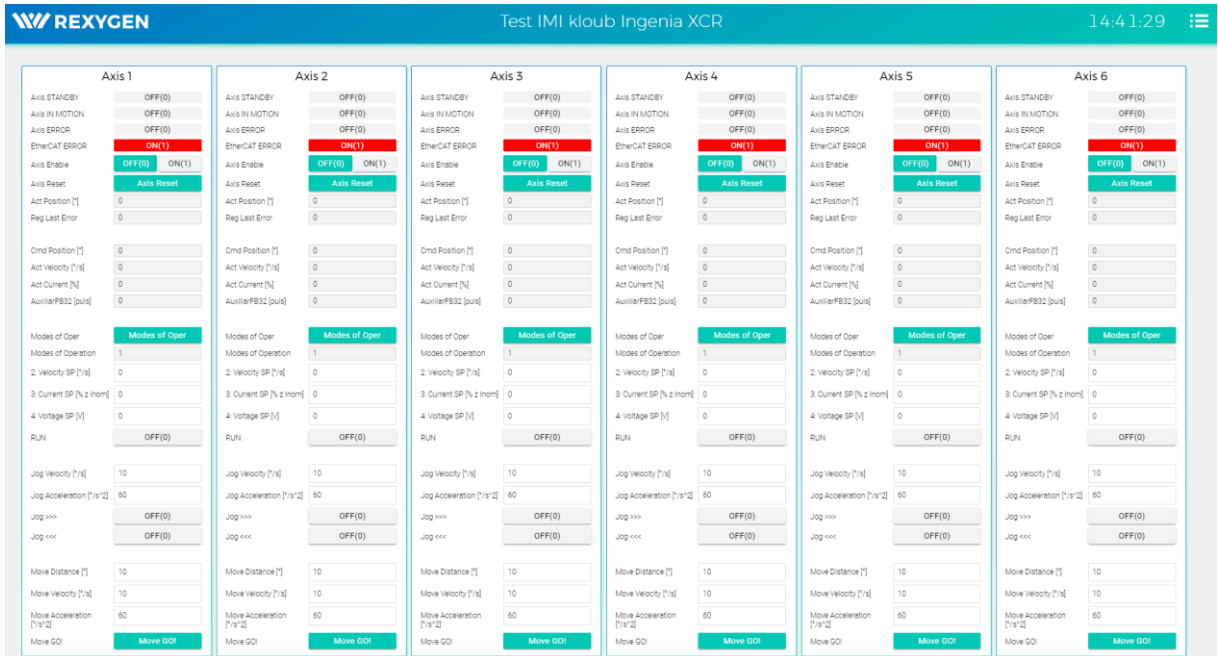


Foto 3: Servisní HMI pro 6 kompaktních aktuátorů

Provozní testování kompaktního aktuátoru (Protokol o zkoušce prototypu)

Viz samostatný dokument [5].

Reference

- [1] P. Barták (SM), M. Habrda (SM), V. Šetka (ZČU), D. Tolar (ZČU): *Výzkum, vývoj a realizace kompaktních aktuátorů*, výzkumná zpráva, ZČU v Plzni, červen 2018
https://drive.google.com/file/d/1Qm41vbuGsaADp-4hQb9BozcXiHdjc_N3/view
- [2] INGENIA: *EVEREST XCR 30/80: PANEL MOUNT, ETHERCAT SERVO DRIVE*,
<https://ingeniamc.com/servo-drives/dc/ethercat/everest-xcr-30a-80v-panel-mount>,
<https://doc.ingeniamc.com/eve-xcr>
- [3] REXYGEN (Programming Automation Devices without Hand Coding), www.rexygen.com
- [4] Petr Barták (SM), Ondřej Houra (SM): *Konstrukce a oživení kompaktních aktuátorů*, technická zpráva, ZČU v Plzni, červen 2019.
- [5] Verifikace a testování prototypu kompaktního aktuátoru (Protokol o zkoušce prototypu), výzkumná zpráva, ZČU v Plzni, květen 2019.
- [6] P. Barták (SM), O. Houra (SM): *Konstrukce a oživení kompaktních aktuátorů a kolaborativního robotu*, technická zpráva, ZČU v Plzni, červen 2019.

Další přílohy

Odkazy na další technické a doplňující informace.

1. Technická specifikace převodovek Harmonic Drive:
https://drive.google.com/drive/folders/1Lhp1xxAtanLZhwALJFfcudNvAst_X8EL?usp=sharing
2. Technická specifikace motorů:
<https://drive.google.com/drive/folders/1ZkiVA1X90SiL6Rev7IbNSXPRtHWPUZZb?usp=sharing>