



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Řízení rehabilitačního ergometru nové generace

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Martin Červa**

Vedoucí práce: Ing. Josef Černohorský, Ph.D.





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Control of next generation rehabilitation ergometr

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics

Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Martin Červa**

Supervisor: Ing. Josef Černohorský, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Červa**
Osobní číslo: **M13000215**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Řízení rehabilitačního ergometru nové generace**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se se záměrem a aktuálním stavem řešení projektu TA040111161.
2. Proveďte analýzu vhodných funkčních bloků pro silově momentové řízení.
3. Ověřte využitelnost těchto funkčních bloků a realizujte oblužné programy.
4. Navrhněte a realizujte nultou verzi rozhraní člověk stroj.



[Handwritten signature]

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Rydlo Pavel.: Řízení elektrických střídavých pohonů. TUL 2007, ISBN 978-80-7372-223-4**
- [2] **Souček Pavel.: Servomechanismy ve výrobních strojích. Vydavatelství ČVUT 2004, ISBN 80-01-02902-6**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce:

Ing. Martin Diblík, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2015**

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.

děkan



doc. Ing. Milan Kolář, CSc.

vedoucí ústavu

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí vloženou do IS STAG.

Datum: 6. 5. 2015

Podpis:



Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Josefu Černoorskému, Ph.D. za jeho odborné vedení a podnětné rady.



Abstrakt

Úkolem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat řídicí software a rozhraní člověk-stroj pro rehabilitační ergometr nové generace.

Inovací tohoto ergometru je zavedení elektronické hřídele mezi pedály, namísto hřídele pevné. Pedály jsou zde řízeny synchronními servomotory a elektronická hřídel je realizována synchronizací těchto servomotorů. Zátěž je zde realizována na základě silově momentového řízení. Pro účely synchronizace a momentového řízení byla provedena analýza funkčních bloků obsažených v normě PLCopen Motion Control.

V rozhraní člověk-stroj jsou implementovány ovládací prvky, diagnostika a výběr rehabilitačních režimů.

Celé zařízení je řízeno PLC automatem od firmy B&R.

Klíčová slova:

Osa, Elektronická hřídel, Motor, Krouticí moment, Funkční blok, PLC, Otáčky, Výkon



Abstract

The aim of the diploma thesis was to design and implement software control and human-machine interface for next generation rehabilitation ergometer.

Innovation of this ergometer is an electronic shaft between the pedals instead of a solid shaft. The pedals are driven by synchronous servomotors and electronic shaft is realized by synchronizing these servomotors. Load is based on power-torque control. Function blocks contained in PLCopen motion control were analysed for realization of synchronization and torque control.

Controls, diagnostics and rehabilitation options are implemented in the human-machine interface.

The whole device is controlled by a PLC from B & R.

Keywords:

Axis, Electronic shaft, Motor, Torque, Function block, PLC, Speed, Power



Obsah

1. ÚVOD.....	13
2. PRINCIPY ZMĚNY ZÁTĚŽE BĚŽNÝCH ROTOPEŮ.....	14
3. PRINCIP ŘEŠENÍ	15
4. HARDWARE.....	16
4.1 Řídící jednotka.....	16
4.2 Servozesilovač.....	17
4.3 Servomotory	18
5. BEZPEČNOSTNÍ PLC.....	19
5.1 Safe Torque Off (STO)	20
5.2 Safe Operating Stop (SOS).....	20
5.3 Safe Stop 1 (SS1)	20
5.4 Safe Stop (SS2)	21
5.5 Safety Limited Speed (SLS).....	21
5.6 Safety Direction (SDI)	21
5.7 Safe Limited Increment (SLI)	22
6. MOMENTOVÉ ŘÍZENÍ.....	23
6.1 MC_TorqueControl	23
6.2 MC_BR_TorqueControl.....	26
6.3 MC_BR_VelocityControl.....	27
6.4 MC_LimitLoad	29
6.5 Implementace funkčních bloků do řídicí struktury ergometru.....	29
7. ELEKTRONICKÁ HŘÍDEL	31
7.1 MC_GearIn	31
7.2 MC_GearInPos	32
7.3 Elektronická vačka.....	33
7.3.1 MC_CamTableSelect	34
7.3.2 MC_CamIn.....	35
7.3.3 MC_CamOut.....	38
7.4 Implementace elektronické hřídele do řídicího programu ergometru.....	39
8. SOFTWARE.....	40
8.1 Řídící program	40
8.2 Vizualizace.....	41

9. REHABILITAČNÍ REŽIMY	43
9.1 Režim konstantního výkonu.....	43
9.2 Režim proměnného momentu.....	44
10. DIAGNOSTIKA	46
11. ZÁVĚR.....	49
POUŽITÁ LITERATURA	50
PŘÍLOHA A – PŘILOŽENÉ CD	52

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: PŘÍPRAVEK REPREZENTUJÍCÍ REHABILITAČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	16
OBRÁZEK 2: PLC B&R 4PP065.0571-P74F	17
OBRÁZEK 3: ACOPOS 80VD100PD.C022-01	17
OBRÁZEK 4: SYNCHRONNÍ SERVOMOTOR B&R 8LVA23.B1030D100-0	18
OBRÁZEK 5 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ KOMPONENT	18
OBRÁZEK 6: SAFE TORQUE OFF	20
OBRÁZEK 7: SAFE OPERATING STOP	20
OBRÁZEK 8: SAFE STOP 1	20
OBRÁZEK 9: SAFE STOP 2	21
OBRÁZEK 10: SAFETY LIMITED SPEED	21
OBRÁZEK 11: SAFETY DIRECTION	21
OBRÁZEK 12: SAFE LIMITED INCREMENT.....	22
OBRÁZEK 13: ČASOVÝ PRŮBĚH VÝSTUPŮ FUNKČNÍHO BLOKU MC_TORQUECONTROL	25
OBRÁZEK 14: REGULAČNÍ SCHÉMA FUNKČNÍHO BLOKU MC_TORQUECONTROL	25
OBRÁZEK 15: ČASOVÝ PRŮBĚH VÝSTUPŮ FUNKČNÍHO BLOKU MC_BR_TORQUECONTROL	27
OBRÁZEK 16: REGULAČNÍ STRUKTURA FUNKČNÍHO BLOKU MC_BR_VELOCITYCONTROL.....	28
OBRÁZEK 17: ČASOVÝ DIAGRAM SPUŠTĚNÍ FUNKČNÍHO BLOKU MC_GEARIN	32
OBRÁZEK 18: PRINCIP MECHANICKÉ VAČKY	34
OBRÁZEK 19: PRINCIP ELEKTRONICKÉ VAČKY. VLEVO PERIODICKÁ, VPRAVO NEPERIODICKÁ.	34
OBRÁZEK 20: MASTER - SLAVE OFFSET	35
OBRÁZEK 21: MASTER-SLAVE SCALLING (VLEVO PŘÍZPŮSOBENÝ, VPRAVO NORMALIZOVANÝ VAČKOVÝ PROFIL)	36
OBRÁZEK 22: MCABSOLUTE.....	37
OBRÁZEK 23: MCRELATIVE	37
OBRÁZEK 24: MCDIRECT	38
OBRÁZEK 25: LINEÁRNÍ VAČKOVÝ PROFIL OS ERGOMETRU	39
OBRÁZEK 26: STAVOVÝ DIAGRAM ŘÍDICÍ ČÁSTI PROGRAMU	40
OBRÁZEK 27: OVLÁDACÍ STRANA VIZUALIZACE	42
OBRÁZEK 28: STRANA STATUS	42
OBRÁZEK 29: OBRAZOVKA VÝBĚRU REHABILITAČNÍCH REŽIMŮ	43
OBRÁZEK 30: OBRAZOVKA REŽIMU KONSTANTNÍ FREKVENCE	44
OBRÁZEK 31: STRANA NASTAVENÍ REŽIMU PROMĚNNÝ MOMENT	45
OBRÁZEK 32: VÝPIS SEKTORŮ A AKTIVACE REŽIMU PROMĚNNÝ MOMENT.....	45
OBRÁZEK 33: ORIENTAČNÍ DIAGNOSTICKÉ INFORMACE	46
OBRÁZEK 34: VYHODNOCENÍ VÝKONU	47
OBRÁZEK 35: VÝKONOVÉ MINIMUM, MAXIMUM A ROZDÍL	47
OBRÁZEK 36: VYHODNOCENÍ KROUTICÍHO MOMENTU	47

Seznam tabulek

TABULKA 1: VSTUPY A VÝSTUPY VÝSTUPŮ FUNKČNÍHO BLOKU MC_TORQUECONTROL.....	24
TABULKA 2: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_BR_TORQUECONTROL	26
TABULKA 3: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_BR_VELOCITYCONTROL.....	28
TABULKA 4: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_LIMITLOAD	29
TABULKA 5: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_GEARIN	31
TABULKA 6: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_GEARINPOS	33
TABULKA 7: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_CAMTABLESELECT	35
TABULKA 8: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_CAMIN	36
TABULKA 9: VSTUPY A VÝSTUPY FUNKČNÍHO BLOKU MC_CAMOUT	38

Seznam zkratek

PLC	Programable Logical Controller
FBD	Function Block Diagram
LAD	Ladder Diagram
STO	Safe Torque Off
SOS	Safe Operating Stop
SS1	Safe Stop 1
SS2	Safe Stop 2
SLS	Safety Limited Speed
SDI	Safety Direction
SLI	Safety Limited Increment

1. Úvod

Ergometr je zařízení podobné rotopedu s možností přesně definovat zatížení. Ovládání zátěže je u ergometrů elektronické. Využití těchto přístrojů je buď pro sledování srdce pacienta při přesně definované zátěži, nebo pro rehabilitační účely. Ergometry jsou vyráběny v bicyklovém provedení, nebo v provedení běžícího pásu.

Současná nabídka rehabilitačních ergometrů založených na kruhovém pohybu umožňuje rehabilitaci dolních i horních končetin. Tyto přístroje dovolují nastavit zatížení a na základě rozdílu period pohybu vykonaných levou a pravou končetinou monitorovat jejich vytížení. Žádný z těchto přístrojů však nenabízí možnost nastavit proměnné zatížení v rámci jedné otáčky, možnost nastavit rozdílné zatížení pro pravou a levou končetinu, aktivní dopomoc při překonávání pro pacienta problematického místa a nezávislé měření výkonu pravé a levé končetiny.

Rehabilitační přístroj, jímž se zabývá tato práce, je inovativní díky zavedení elektronické hřídele mezi pedály namísto hřídele pevné. Tato změna eliminuje veškeré nepříznivé ovlivnění pedálů navzájem zhoršující nejen rehabilitační proces, ale především naměřené výsledky vytížení levé a pravé končetiny. Díky možnosti separátního řízení pohonů pro levý a pravý pedál zde bylo možné implementovat nastavení různé zátěže či aktivní dopomoci pro oba pedály zvlášť. Dále toto řešení umožňuje nastavení proměnné zátěže v rámci jedné otáčky a nezávislé měření výkonu pravé a levé končetiny.

Zásadní je u tohoto řešení otázka bezpečnosti z důvodu absence volnoběhu oproti klasickým bicyklovým rehabilitačním přístrojům. U běžného ergometru, kde pacient pouze překonává pasivní odpor uložený v setrvačnicku, jenž je umístěn na volnoběžce, je riziko, že by pedál zranil člověka, téměř nulové. U tohoto nového řešení však pedál přímo vyvíjí sílu, buď ve směru, nebo proti směru záběru končetiny. Krouticí moment motoru, který ovládá pedál je zde řízen programem, a proto bylo nutné vyřešit nebezpečné stavy, jež mohou nastat se selháním programu.

2. Principy změny zátěže běžných rotopedů.

U běžně dostupných ergometrů funguje změna zátěže na základě brždění setrvačnicku uloženého na volnoběžce, jež je řemenem spojen s pedály. Tím je vytvářen krouticí moment působící proti pohybu končetiny. Využívají se brzdné systémy trojího typu. Přímé brzdné systémy, magnetické brzdné systémy a systémy s odporem vzduchu.

Principiálně jednoduché a levné jsou systémy přímé. Dříve bylo k brždění využíváno pásku obepínajícího setrvačnick, jehož napínáním docházelo k brždění. Dnes probíhá brždění nejčastěji pomocí čelistí s brzdnými destičkami, které tlačí na setrvačnick. Výhodou tohoto brzdného systému je možnost nastavení vysoké míry zatížení. Nevýhodou je pak nízká přesnost zatížení, opotřebovávání brzdných destiček a hlučný provoz.

Magnetické brzdné systémy lze rovněž rozdělit na dva typy. Systémy s permanentním magnetem a indukční systémy. První typ funguje na principu přibližování a oddalování permanentního magnetu k setrvačnicku, a tím dochází k jeho brždění. Výhodou je tichý chod, nicméně velikost zátěže je zde značně omezena. U indukčních systémů je magnetická síla brzdící setrvačnick vytvářena proudem procházejícím cívkou. Díky tomuto principu je možné nastavit velmi přesné zatížení, avšak cena je výrazně vyšší.

U posledního typu brzdného systému byl nahrazen setrvačnick ventilátorem, jež se zvyšující se rychlostí otáčení exponenciálně zvyšuje odporovou sílu.

Ačkoli u některých z těchto brzdných systémů můžeme nastavit velikost zatížení velmi přesně, stále se zde jedná o zátěž ve formě brždění. Žádný z těchto principů tudíž nedovoluje pacientovi pomáhat v problematických místech, nebo pohybovat končetinami za pacienta, jak je tomu u pasivního cvičení. Systém popsany v následujících kapitolách využívá zatížení založené na odlišném principu, jež eliminuje zmiňované nevýhody. [1]

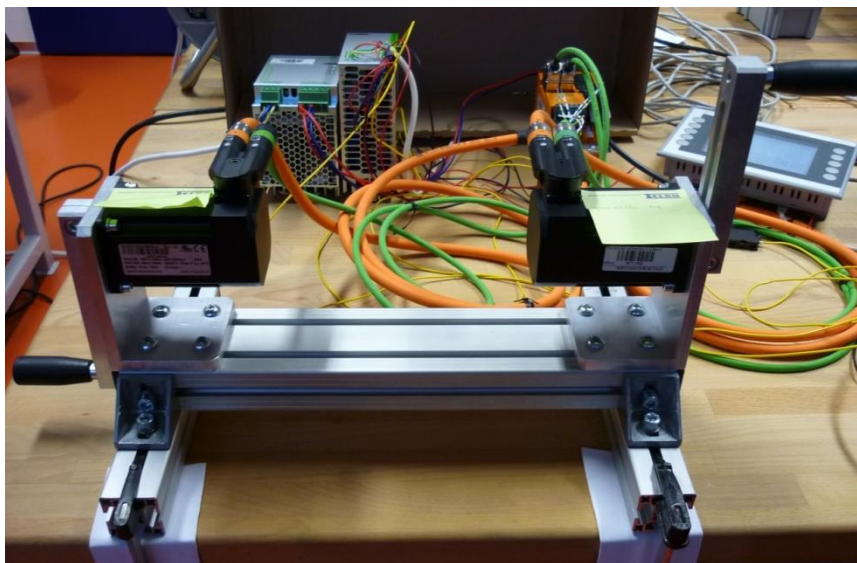
3. Princip řešení

Jak již bylo zmíněno v úvodu, pevná hřídel zde byla nahrazena hřídelí elektronickou. Tímto způsobem jsou propojeny dva synchronní servomotory, ke kterým jsou upevněny pedály. Motory jsou připojeny k servozesilovači, který je řízen PLC automatem (viz obrázek 1). Elektronická hřídel je zde realizována pomocí programu v PLC automatu využívajícího funkční bloky obsažené v normě PLCopen Motion Control.

Elektromotory pohybující s pedály jsou v této úloze rozděleny na řídicí a řízené. Pokud se pravý pedál nachází v poloze záběru, stává se řídicím (pravý elektromotor je přepnut do režimu Master, levý do režimu Slave). Na levý elektromotor je přenášen točivý moment a je kopírován pohyb pravého pedálu, pouze s pootočením o 180°. Po dosažení levého pedálu polohy záběru se levý pedál stane řídicím (levý elektromotor je přepnut do režimu Master, pravý do režimu Slave) a proces se opakuje. V Aktivní části pohybu končetiny je možné přizpůsobit zátěž podle rehabilitačních potřeb (krouticí moment působící proti pohybu končetiny, nebo pomocný krouticí moment). Při správném nastavení by mělo být dosaženo efektu, kdy bude mít pacient s jednou slabší končetinou pocit ekvivalentního vytížení obou končetin. K nastavování klíčových parametrů slouží softwarová vizualizace, kterou je možné ovládat pomocí dotykového panelu integrovaného na PLC automatu.

4. Hardware

Při vývoji softwaru pro toto rehabilitační zařízení probíhalo testování pouze na přípravku reprezentující přístroj (viz obrázek 1). Jedná se o kovovou konstrukci, ke které byly připevněny synchronní servomotory a k těmto servomotorům provizorní pedály. Napájení, řídicí jednotka a servozesilovač byly umístěny mimo tento přípravek.



Obrázek 1: Přípravek reprezentující rehabilitační zařízení

4.1 Řídicí jednotka

Jedná se o PLC s integrovaným displejem od firmy B&R, konkrétně typ 4PP065.0571 – P74F.

Rozhraní tohoto PLC sestává z jednoho slotu pro Compact Flash, dvou USB 2.0, ethernetu a sběrnice POWERLINK.

Jádro kontroléru je zde 32 bitový procesor GeodeLX800 s frekvencí 500 MHz. Pro firmware zde nalezneme 4 MB paměti typu FLASH. Dále kontrolér disponuje standardní pamětí 128 MB DDR SDRAM a uživatelskou pamětí 200 kB SRAM.

Displej je zde dotykový typu TFT s úhlopříčkou 5,7 palce a rozlišením QVGA, 320 × 240 pixelů.

Nominální napájecí napětí a proud jsou zde 24 VDC, 0,45 A. [2]



Obrázek 2: PLC B&R 4PP065.0571-P74F [2]

4.2 Servozesilovač

V této úloze je použit servozesilovač B&R ACOPOS 80VD100PD.C022-01.

Servozesilovač obsahuje 2 vstupy pro připojení synchronních servomotorů s resolverem. Spínací frekvence jsou zde 5, 10 a 20 kHz. Dále se zde nachází vstup na připojení elektromagnetické brzdy. Servozesilovač dovoluje napájení v rozmezí 24 V až 64 V, maximálně 10 A stejnosměrných.

Pro komunikaci se zde nachází rozhraní POWERLINK.

Funkce servozesilovače jsou kompletně integrovány ve vývojovém softwaru Automation studio. Pro ovládání je využíváno funkčních bloků obsažených v normě PLCopen. [3]



Obrázek 3: ACOPOS 80VD100PD.C022-01 [3]

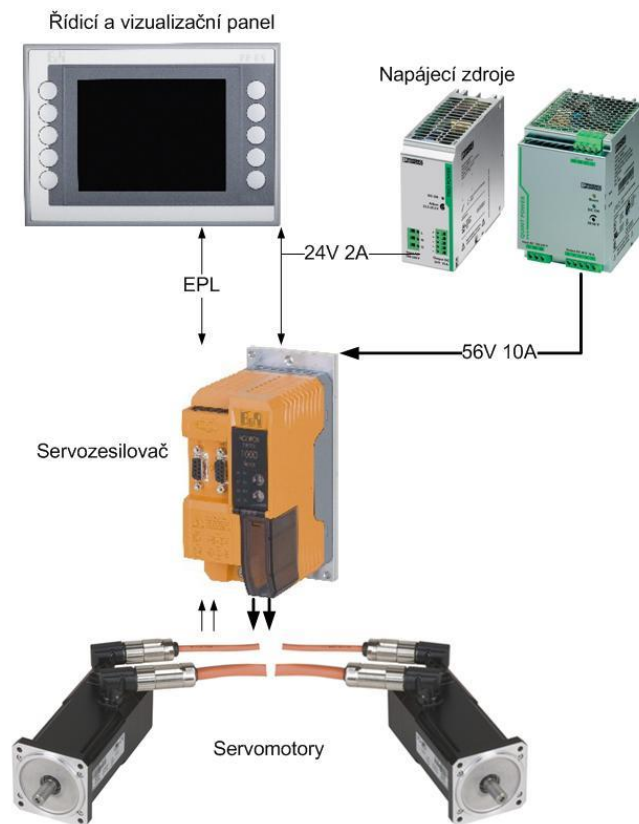
4.3 Servomotory

Jsou zde použity dva synchronní servomotory B&R 8LVA23.B1030D100-0. Tento servomotor disponuje čtyřmi pólovými páry, jmenovitými otáčkami až 3000 ot/min a jmenovitým krouticím momentem 1,3 Nm při nominálním proudu 5,8 A. Maximální hodnoty otáček dosahují až 6600 ot/min, krouticího momentu až 4 Nm při proudu 20,7A. [4]



Obrázek 4: Synchronní servomotor B&R 8LVA23.B1030D100-0 [5]

Vzájemné propojení jednotlivých komponent znázorňuje obrázek 5.



Obrázek 5: Blokové schéma zapojení komponent [2][3][5][6][7]

5. Bezpečnostní PLC

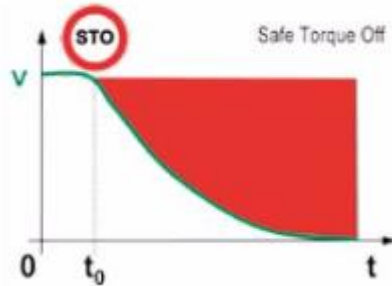
Při vývoji tohoto zařízení bylo využito klasického PLC automatu, jež je popsán v předešlé kapitole. Avšak u finálního zařízení, kde bude kladen důraz na vysokou bezpečnost provozu, bude doplněn bezpečnostní PLC automat. Tato kapitola popisuje základní možnosti a výhody bezpečnostních PLC automatů.

Podstatou bezpečnostního PLC je zdvojení procesoru a paměti. Chod procesorů je synchronizován synchronizačním obvodem. Informace jsou dále porovnávány. Z hlediska hardwaru je bezpečnostní PLC odolnější vůči rušení, garantovaný čas změny stavu vstupů, detekci zkratu na přívodních vodičích, či detekci jejich přerušování. Pro vlastní programování mají k dispozici speciální vývojový software. Tento software obsahuje rozšířené funkční bloky pro řešení funkční bezpečnosti. Pro programování bezpečnostních PLC jsou podporovány pouze jazyky využívající funkčních bloků (FBD, LAD), pro názorné zobrazení funkčnosti.

Pro potřeby bezpečnosti v Motion control jsou zavedeny základní myšlenky. Musí být definován bezpečný stav, a to nejčastěji jako kontrolované zastavení osy a následná deaktivace. Jsou vyžadovány rychlé zastavovací rampy. Dále musí být bráno na vědomí, že bezpečný stav není vždy stav vypnuto (např. chlazení reaktoru v jaderné elektrárně). Byly proto zavedeny bezpečnostní funkce umožňující využití pohonů v omezeném provozním rozsahu, jako je například kontrola chodu motoru v definovaných bezpečných otáčkách. Pro zajištění bezpečnostních funkcí je nutné realizovat komplexní bezpečnostní pohonný systém složený z bezpečnostního kontroléru, bezpečnostní komunikace prostřednictvím Ethernet powerlink a z bezpečnostních vstupů a výstupů. Dále je potřeba bezpečnostní servozesilovač a servomotor s bezpečnostním enkodérem. V takovémto systému je možné využívat následujících bezpečnostních funkcí. [8][9]

5.1 Safe Torque Off (STO)

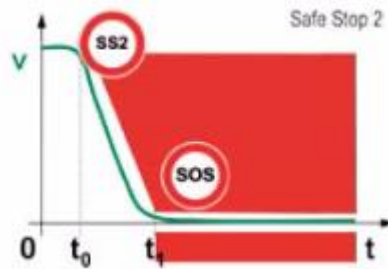
Pomocí této bezpečnostní funkce dojde k poklesu krouticího momentu na nulovou hodnotu pomocí odpojení polovodičového střídače. [10]



Obrázek 6: Safe Torque Off [10]

5.2 Safe Operating Stop (SOS)

Funkce SOS spouští monitoring nulových otáček po uplynutí definované doby ($t_0 - t_1$). Při nárůstu otáček je aktivován SS1. [10]



Obrázek 7: Safe Operating Stop [10]

5.3 Safe Stop 1 (SS1)

Aktivací funkce SS1 dojde k rychlému zastavování motoru na základě definované rampy a následně je aktivována funkce STO. Decelerace je monitorována. [10]



Obrázek 8: Safe Stop 1 [10]

5.4 Safe Stop (SS2)

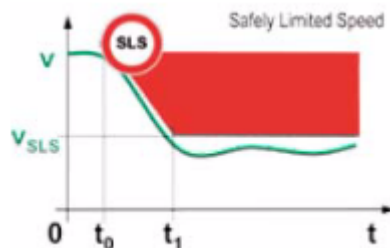
Opět se zde jedná o aktivní brždění s monitorováním decelerace jako v případě SS1, avšak zde je po dosažení nulových otáček hodnota nulových otáček monitorována pomocí SOS. V případě porušení nulových otáček je aktivováno STO. [10]



Obrázek 9: Safe Stop 2 [10]

5.5 Safety Limited Speed (SLS)

Aktivací SLS dojde k omezení otáček na definovanou hodnotu bezpečných otáček. K tomuto omezení dojde za definovanou dobu. Pokud dojde k nárůstu otáček nad hranici otáček bezpečných, je vyvoláno STO, SS1, SS2 nebo SOS. [10]



Obrázek 10: Safety Limited Speed [10]

5.6 Safety Direction (SDI)

SDI provádí monitorování směru otáčení hřídele motoru. Je-li zaznamenána změna pohybu otáčení, je vyvolána funkce STO. [10]



Obrázek 11: Safety Direction [10]

5.7 Safe Limited Increment (SLI)

Funkce SLI monitoruje definovaný inkrement žádané hodnoty pozice. SLI je zavolána v případě změny žádané hodnoty pozice. [10]



Obrázek 12: Safe Limited Increment [10]

6. Momentové řízení

Pohon této úlohy je tvořen synchronními servomotory, které jsou připojeny k servozsilovači ACOPOS. Řídící jednotkou je zde PLC automat. Regulační struktura obsahující proudovou, rychlostní a polohovou smyčku je obsažena právě v servozsilovači ACOPOS. Při vlastním programování je ve vývojovém prostředí Automation studio s řízenou osou pracováno prostřednictvím funkčních bloků. Pomocí funkčních bloků je možné zadávat osám příkazy a také číst informace o aktuálních hodnotách rychlostí, zrychlení, poloze, točivých momentů atd.

Z momentové rovnice pohonu 6.1

$$M_{motor}(t) = M_{load}(t) + (J_{load}(t) + J_{motor}) \cdot \varepsilon(t) \quad (6.1)$$

vyplývá, že porušením rovnosti momentu motoru a momentu dynamické zátěže dojde ke změně úhlového zrychlení, a tím ke změně otáček motoru. Pokud dojde k nárůstu zatěžovacího momentu, dojde k zastavení motoru. Při snížení zatěžovacího momentu dojde naopak k nárůstu otáček. Firma B&R nabízí varianty funkčních bloků pro momentové řízení se zahrnutím rychlostního regulátoru pro kompenzaci otáček právě při změnách zatěžovacího momentu, ale také varianty bez rychlostního regulátoru, kde je nutné kompenzaci otáček ošetřit jiným způsobem.

Pro potřeby momentového řízení byly uvažovány funkční bloky obsažené v normě PLCopen Motion Control, upravené firmou B&R. Konkrétně bylo vybíráno mezi MC_TorqueControl, MC_BR_TorqueControl a MC_BR_VelocityControl. [11]

6.1 MC_TorqueControl

Tento funkční blok zahájí pohyb osy na základě definovaného krouticího momentu a limitní rychlosti. Hodnota krouticího moment je zadávána pomocí vstupu „Torque” a je možné realizovat postupný nárůst na tuto hodnotu za určitý čas pomocí vstupu „TorqueRamp“. Moment může být definován kladnou i zápornou hodnotou. Indikaci dosažení definovaného krouticího momentu zde zajišťuje výstup „InTorque”. Vstupní parametry jako moment, momentová rampa, rychlost a akcelerace reagují na náběžnou hranu binárního vstupu „Execute“. Sestupnou hranou tohoto vstupu dojde k resetování všech výstupů kromě „Busy“, „Active“ a „AxisLimitActive”. Momentové řízení

zůstává aktivní, dokud není přerušeno jiným funkčním blokem nebo chybovým stavem.

[12]

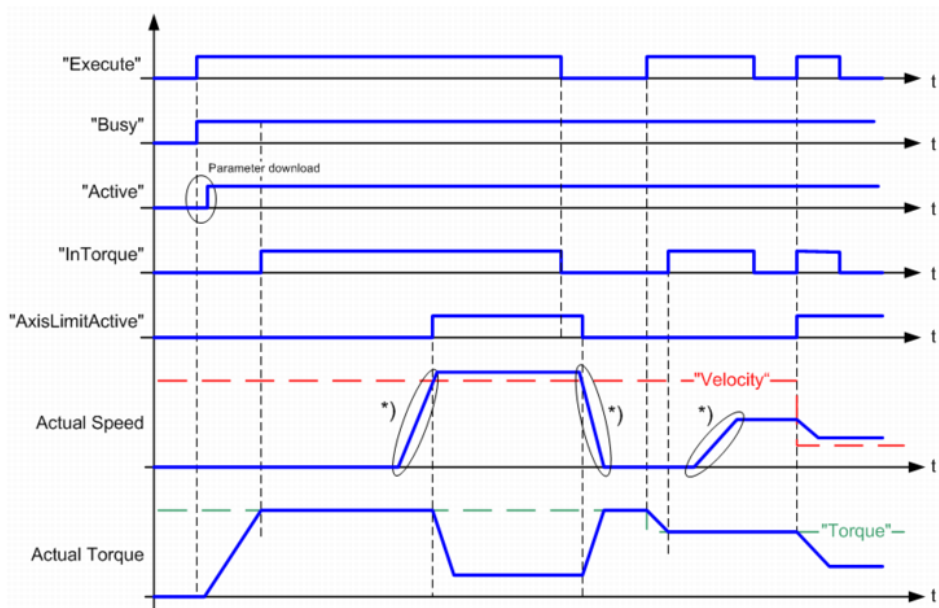
Tabulka 1: Vstupy a výstupy výstupů funkčního bloku MC_TorqueControl [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Axis	UDINT	Reference osy
IN	Execute	BOOL	Start pohybu reagující na náběžnou hranu
IN	Torque	REAL	Nastavení momentu pro osu (kladný/záporný) [Nm]
IN	TorqueRamp	REAL	Moment roste dokud nedosáhne hodnoty "Torque" [Nm/s]
IN	Velocity	REAL	Rychlostní omezení osy [PLCopen unit/s]
IN	Acceleration	REAL	Maximální akcelerace/decelerace při změně parametru "Velocity" [PLCopen unit/s ²]
OUT	InTorque	BOOL	Dosažena hodnota parametru "Torque"
OUT	Active	BOOL	Funkční blok řídí osu
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	CommandAborted	BOOL	Příkaz zrušen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	UINT	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	AxisLimitActive	BOOL	Byla překročena hodnota parametru "Velocity"

Chování vstupů a výstupů viz obrázek 4. Jak již bylo zmíněno, při změnách zátěže dochází ke změnám otáček. Po překročení dovolených otáček dochází k omezení točivého momentu. Maximální rychlost může být překročena podle vzorce 6.2.

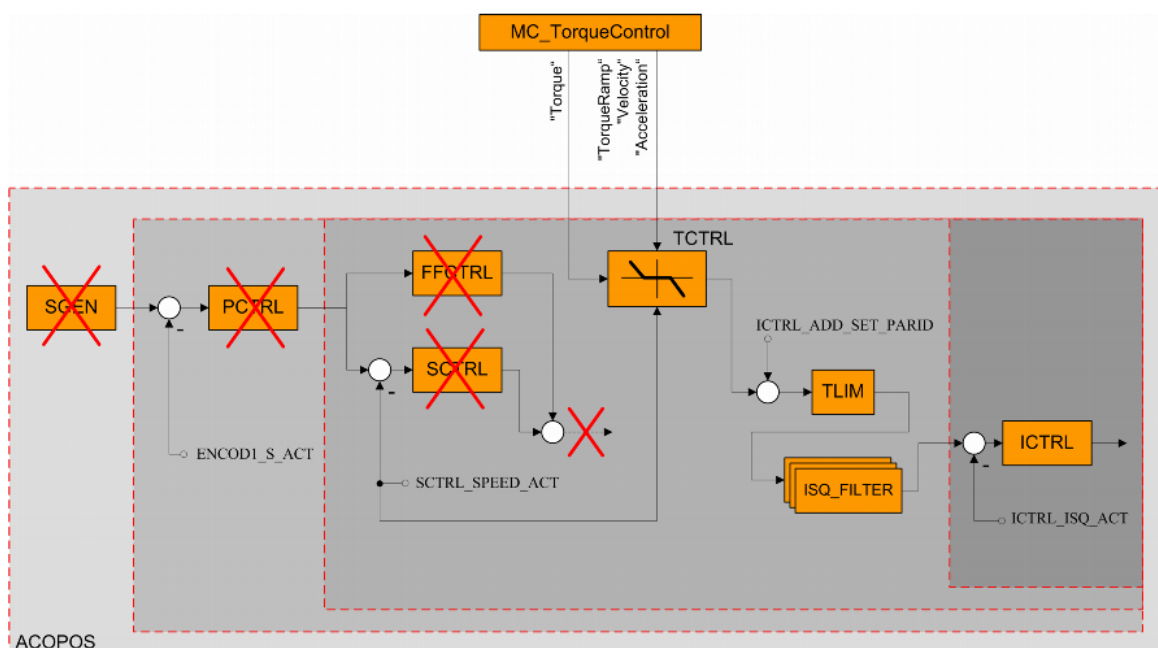
$$actSpeed = Velocity + \frac{Torque}{sctrl_kv \cdot \frac{motor_torq_const}{\sqrt{2}}} \quad (6.2)$$

kde „Velocity” a „Torque” jsou vstupní parametry funkčního bloku, „sctrl_kv” je proporcionální zesílení rychlostního regulátoru a „motor_torq_const” je momentová konstanta motoru. V praxi se však ukázalo, že při překročení maximální rychlosti se pouze nastaví příznak „AxisLimitActive“, ale dále dochází ke zvyšování otáček. [12]



Obrázek 13: Časový průběh výstupů funkčního bloku MC_TorqueControl [12]

Z regulační struktury (viz obrázek 4) je vidět, že polohová (PCTRL) a rychlostní (SCTRL) regulace nezasahuje do chodu tohoto funkčního bloku. Funkční blok TCTRL pouze čte informaci o aktuální rychlosti, podle níž dochází k omezení momentu (TLIM). Převod aktuálního momentu na elektrický proud zajišťuje blok ISQ_FILTER. Pomocí vstupu ICTRL_ADD_SET_PARID je možné navázat na jinou regulační strukturu. [12]



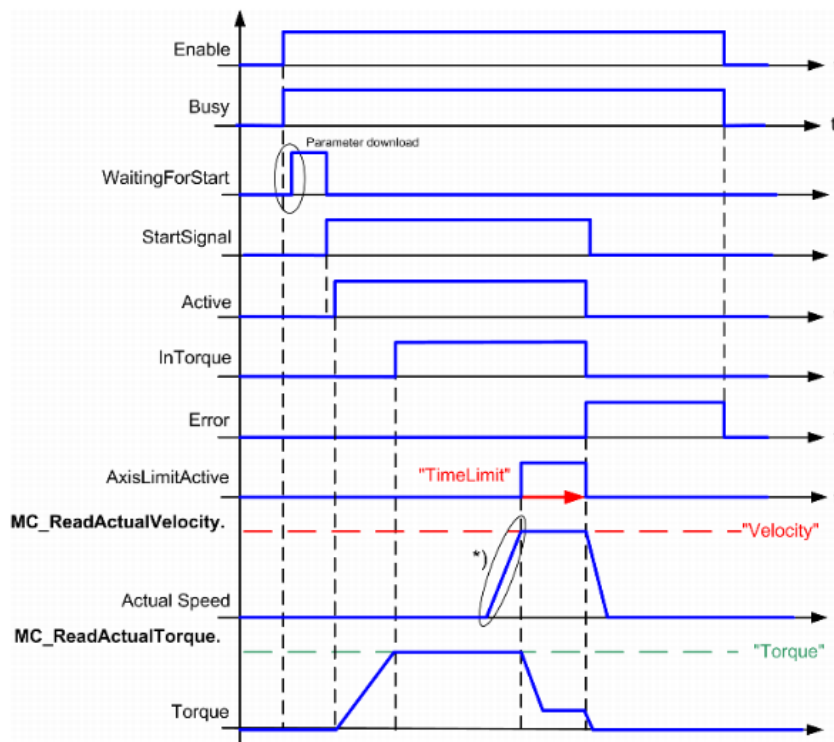
Obrázek 14: Regulační schéma funkčního bloku MC_TorqueControl [12]

6.2 MC_BR_TorqueControl

Jedná se o funkční blok MC_TorqueControl rozšířený o několik užitečných funkcí. Aktivace je zde prováděna vstupem „Enable“, avšak k fyzickému pohybu dojde až se vstupem „StartSignal“. K zapsání parametrů dochází s náběžnou hranou vstupu „Enable“, nebo vstupu „InitData“. Přibylo zde rychlostní omezení zvláště pro pohyb po směru a proti směru hodinových ručiček pomocí parametrů „PosMaxVelocity“ a „NegMaxVelocity“. Pomocí parametru „Mode“ je možné spustit tento funkční blok v několika režimech. Prvním režimem je mcCHECK_HOMING_OFF, který dovoluje spustit momentové řízení bez předchozího dosažení Home pozice. Pomocí režimů mcV_LIMIT_OFF a mcV_LIMIT_CALC je možné deaktivovat, nebo naopak aktivovat otáčkové omezení. Posledním režimem je mcTIME_LIMIT, který na základě vstupního parametru „TimeLimit“ automaticky deaktivuje funkční blok při absenci dostatečné zátěže. Dále tento blok disponuje parametry „TorqueParID“ a „StartParID“, pomocí nichž lze získat hodnotu a spustit momentové řízení na úrovni servozesilovače, což značně snižuje reakční dobu. [12]

Tabulka 2: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_BR_TorqueControl [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Axis	UDINT	Reference osy
IN	Enable	BOOL	Aktivace funkčního bloku
IN	InitData	BOOL	S náběžnou hranou nastavuje parametry funkčního bloku
IN	StartSignal	BOOL	Start momentového řízení
IN	Torque	REAL	Nastavení momentu pro osu (kladný/záporný) [Nm]
IN	TorqueRamp	REAL	Moment roste dokud nedosáhne hodnoty "Torque" [Nm/s]
IN	PosMaxVelocity	REAL	Omezení rychlosti po směru hodinových ručiček
IN	NegMaxVelocity	REAL	Omezení rychlosti proti směru hodinových ručiček
IN	Acceleration	REAL	Maximální akcelerace/decelerace při změně parametru "Velocity" [PLCopen unit/s ²]
IN	Mode	UINT	výběr módu mcCHECK_HOMING_OFF (Start bez homingu) mcV_LIMIT_OFF (deaktivace rychlostního omezení) mcV_LIMIT_CALC (nepřekročí rychlostní omezení) mcTIME_LIMIT (automatická deaktivace po časovém limitu, bez přítomné
IN	TimeLimit	REAL	Časový limit po jehož dosažení dojde k automatické deaktivaci (nutná aktivace na vstupu Mode)
IN	StartParID	UINT	Start s ParID
IN	TorqueParID	UINT	Získání hodnoty momentu z ParID místo použití "Torque"
OUT	InTorque	BOOL	Dosažena hodnota parametru "Torque"
OUT	Active	BOOL	Funkční blok řídí osu
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	CommandAborted	BOOL	Příkaz zrušen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	UINT	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	AxisLimitActive	BOOL	Byla překročena hodnota parametru "Velocity"
OUT	DataInialized	BOOL	Transfer parametrů s příkazem InitData byl dokončen
OUT	WaitingForStart	BOOL	Hodnoty inicializovány, čekání na StartSignal nebo StartParID



Obrázek 15: Časový průběh výstupů funkčního bloku MC_BR_TorqueControl [12]

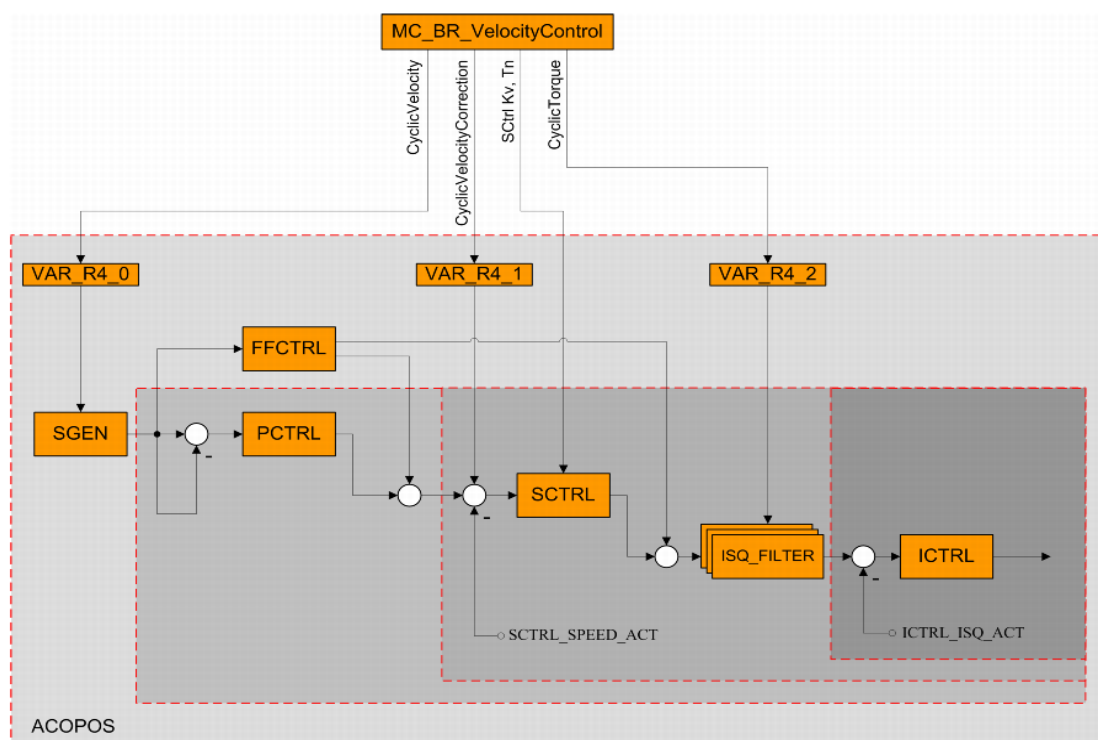
Regulační struktura je zde shodná jako u funkčního bloku MC_TorqueControl (viz obrázek 4).

6.3 MC_BR_VelocityControl

Jak napovídá název tohoto funkčního bloku, jedná se ve své podstatě o rychlostní řízení, doplněné však o možnost momentového řízení. Momentové řízení lze využít dvěma způsoby pomocí vstupu „TorqueMode“. První způsob je momentová limitace, kde je hodnota vstupu „CyclicTorque“ chápána jako limitní parametr. Druhý způsob je momentový feedforward, kde je tato hodnota přičtena k hodnotě momentu závislé na aktuálních otáčkách. Odlišnost od předešlých funkčních bloků je zde především ve využití kompletní regulační struktury, tj. proudové, rychlostní a polohové regulační smyčky (viz obrázek 16).. Rychlostní regulátor nám zde drží požadované otáčky i v případě snížení zátěžného momentu na ose. Pomocí vstupu „CyclicVelocity“ jsou nastavovány požadované otáčky. Vstupem „CyclicVelocityCorection“ je možné provádět korekci těchto otáček přímo na úrovni rychlostního regulátoru Parametry rychlostního regulátoru je možné nastavit přímo v tomto funkčním bloku pomocí vstupů „SctrlKv“ a „SctrlTn“. Vstupem „InitSctrl“ jsou tyto hodnoty zapsány. [12]

Tabulka 3: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_BR_VelocityControl [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Axis	UDINT	Reference osy
IN	Enable	BOOL	Aktivace funkčního bloku
IN	Cyclic velocity	REAL	Parametr rychlosti (kladný/záporný)[unit/s]
IN	Cyclic velocityCorrection	REAL	Znaménková rychlostní korekce (kladná/záporná) [unit/s]
IN	CyclicTorque	REAL	Moment pro dopřednou vazbu nebo momentové omezení [Nm]
IN	TorqueMode	USINT	Specifikace použití parametru "CyclicTorque"
			mcFF.....FeedForward
			mcLIMIT..TorqueLimiter
IN	Acceleration	REAL	Maximální akcelerace [PLCopen unit/s ²]
IN	Deceleration	REAL	Maximální decelerace [PLCopen unit/s ²]
IN	SctrlKv	REAL	Proporcionální složka rychlostního regulátoru
IN	SctrlTn	REAL	Integrační složka rychlostního regulátoru
IN	InitSctrl	BOOL	Předání nastavených parametrů regulátoru
OUT	Active	BOOL	Funkční blok řídí osu
IN	TimeLimit	REAL	Časový limit po jehož dosažení dojde k automatické deaktivaci (nutná aktivace na vstupu Mode)
IN	StartParID	UINT	Start s ParID
IN	TorqueParID	UINT	Získání hodnoty momentu z ParID místo použití "Torque"
OUT	InTorque	BOOL	Dosažena hodnota parametru "Torque"
OUT	Active	BOOL	Funkční blok řídí osu
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	CommandAborted	BOOL	Příkaz zrušen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	UINT	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	AxisLimitActive	BOOL	Byla překročena hodnota parametru "Velocity"
OUT	DataInitialized	BOOL	Transfer parametrů s příkazem InitData byl dokončen
OUT	WaitingForStart	BOOL	Hodnoty inicializovány, čekání na StartSignal nebo StartPartID



Obrázek 16: Regulační struktura funkčního bloku MC_BR_VelocityControl [12]

Zásadním nedostatkem tohoto funkčního bloku je možnost jeho zavolání pouze z klidového stavu. Při přepínání osy ze stavu Slave do stavu Master, kdy se osa pohybuje, by tedy nebylo možné tento funkční blok zavolat.

6.4 MC_LimitLoad

Tento funkční blok nedisponuje možností momentového řízení jako takového, ale funguje pouze jako momentové omezení. Spouštění je prováděno pomocí vstupu „Enable” a funkční blok je aktivní, dokud je tento vstup nastaven. Pomocí vstupního parametru „Load” je zadávána limitní hodnota krouticího momentu, která nemá být překročena. Dále je zde umožněno zvolit si směr, ve kterém bude momentové omezení prováděno. Vstup „Direction” dovoluje omezovat moment buď v pozitivním, nebo negativním směru. Je zde také možnost omezení v obou směrech. [12]

Tabulka 4: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_LimitLoad [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Axis	UDINT	Reference Slave osy
IN	Enable	BOOL	Aktivace funkčního bloku
OUT	Load	REAL	Limitní hodnota krouticího momentu [Nm]
OUT	Direction	UINT	Definice směru, ve kterém bude provedeno omezení
			mcPOSITIVE_DIR...0
			mcNEGATIVE_DIR...1
			mcCURRENT_DIR...2
OUT	Busy	BOOL	Nastaveno pokud není funkční blok přerušen jiným příkazem
OUT	Ready	BOOL	Parametry nastaveny, funkční blok je připraven k použití
OUT	Active	BOOL	Limit je aktivní
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	BOOL	Identifikační číslo chybového stavu

6.5 Implementace funkčních bloků do řídicí struktury ergometru

K nastavení momentu a momentové rampy bylo možné využít nejjednodušší blok pro momentové řízení a to blok MC_TorqueControl, jehož výbava vstupních parametrů je pro danou aplikaci dostačující. Jediný problém nastával při odlehčení motoru, kdy docházelo k nekontrolovanému zvyšování otáček. Tento problém byl ošetřen softwarově.

U přepínání os Master-Slave, kde docházelo k momentovým rázům, bylo s výhodou využito bloku MC_LimitLoad. Tyto rázy byly způsobeny nepřesnou reakcí

vnějších sil na ramena pedálů. Při přechodu osy ze stavu Slave do stavu Master došlo ke skokové změně z předávaného momentu předchozí Master osou na nový moment. Při této změně došlo k trhnutí motoru, což je pro rehabilitační účely nežádoucí. Byl proto zaveden funkční blok MC_LimitLoad, kde je hodnota momentového omezení vypočítávána na základě kvadrátu aktuální polohy Master osy. K momentovému omezení dochází, když je aktuální pozice větší než 180°, a je vypočítáváno podle následujícího vzorce 6.3.

$$\text{Momentové omezení} = 0.02 \cdot (\text{Aktuální pozice} - 180^\circ)^2 \quad (6.3)$$

Kvadratická závislost momentového omezení zaručuje, že moment při přechodu osy ze Slave na Master narůstá postupně.

7. Elektronická hřídel

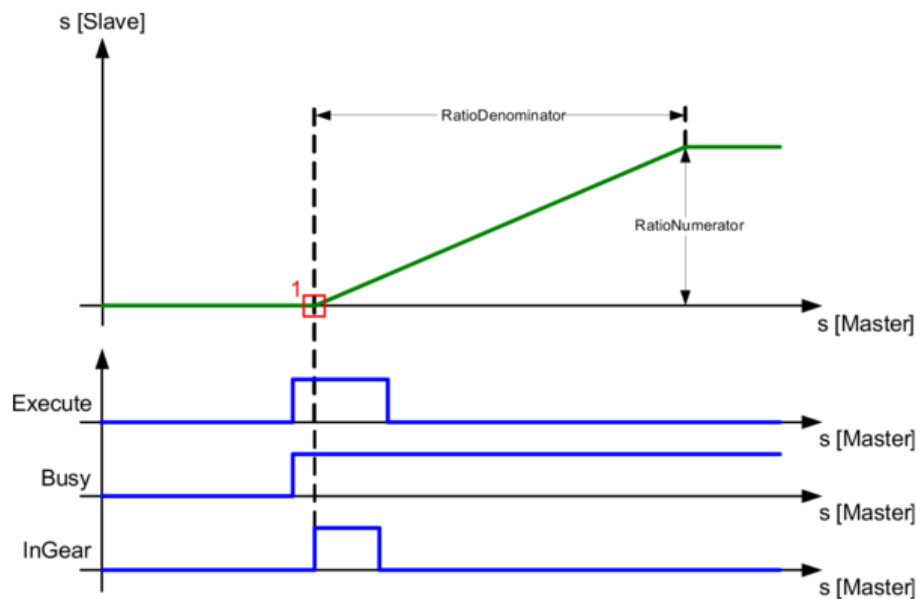
Elektronickou hřídel bylo možno realizovat opět pomocí funkčních bloků obsažených v normě PLCopen. PLCOpen Motion Control obsahuje několik funkčních bloků, jež dovolují vzájemnou synchronizaci os. V následujících kapitolách je popsána většina těchto funkčních bloků modifikovaných firmou B&R.

7.1 MC_GearIn

Pomocí tohoto funkčního bloku je možné uvést osy do vzájemné synchronizace na základě specifického rychlostního poměru. Pokud započne synchronizace během pohybu řídicí „Master“ osy, řízená „Slave“ osa vstoupí do synchronizace se zavedeným rychlostním poměrem a na základě definované akcelerace. Pokud je rozdíl mezi pozicemi řízené a řídicí osy, řízená osa akceleruje, dokud není rozdíl vyrovnán. Následně se osa pohybuje rychlostí definovanou rychlostním poměrem. Rychlostní poměr je zaváděn pomocí vstupních parametrů „RatioNumerator“ a „RatioDenominator“. Všechny parametry potřebné k zahájení synchronizace jsou přeneseny do pohonu s náběžnou hranou vstupu „Execute“. Dokud není dosaženo požadovaného rychlostního poměru, je nastaven příznak „Busy“, následně je nastaven příznak „InGear“. Rychlostní poměr je možné měnit vždy s náběžnou hranou vstupu „Execute“. Zavoláním funkčních bloků MC_Stop nebo MC_Halt je řízená osa zastavena. Zavoláním funkčního bloku MC_GearOut dojde k přerušení synchronizace a řízená osa se dále pohybuje poslední dosaženou rychlostí v dosavadním směru. [12]

Tabulka 5: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_GearIn [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Master	UDINT	Reference Master osy
IN	Slave	UDINT	Reference Slave osy
IN	Execute	BOOL	Spuštění příkazu nebo synchronizace s náběžnou hranou
IN	RatioNumerator	INT	Čítatel převodového poměru
IN	RatioDenominator	UINT	Jmenovatel Převodového poměru
IN	Acceleration	REAL	Akcelerace vstupu do synchronizace
IN	Deceleration	REAL	Decelerace vstupu do synchronizace
IN	MasterParID	UINT	Využití ParID Master osy místo žádané hodnoty
IN	MasterParIDMaxVelocity	REAL	Maximální rychlost z ParID Master osy
OUT	InGear		Dosaženo synchronizace
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	BOOL	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	CommandAborted	BOOL	Příkaz zrušen



Obrázek 17: Časový diagram spuštění funkčního bloku MC_GearIn [12]

Z předchozího popisu vyplývá, že tento blok umožňuje synchronizaci založenou pouze na rychlosti. Není zde možné definovat polohové rozmezí, ve kterém se budou osy synchronizovaně pohybovat. Rozmezí je možné zavést posunutím home pozic os. Při takto zavedené synchronizaci však docházelo načítající se chybou při přepínání řídicí a řízené osy k postupnému porušení tohoto rozmezí. Tento blok byl tedy vyhodnocen pro vyvíjenou aplikaci jako nevhodný.

7.2 MC_GearInPos

Funkční blok MC_GearInPos řeší výše zmíněné problémy. Synchronizace je zde navázána na základě specifické polohy řídicí osy. Pomocí vstupů „MasterSyncPos“ a „SlaveSyncPos“ lze definovat pozici, na které dojde k synchronizaci. Opět je zde zaveden poměr mezi osami parametry „RatioNumerator“ a „RatioDenominator“. Parametr „MasterStartDistance“ definuje vzdálenost, za kterou má dojít k synchronizaci os se specifickým poměrem. Novinkou je zde možnost spouštět synchronizaci v různých režimech. V režimu mcCATCH_UP dojde od startovního bodu k pohybu Slave osy v kladném směru. Režim mcSLOW_DOWN uvádí Slave osu do pohybu v záporném směru. Režim mcWITHIN_PERIOD uvádí Slave osu do synchronizace na základě předešlého směru otáčení Slave osy (může být pozitivní i negativní). V režimu mcSHORTEST_WAY je využita nejkratší možná cesta do bodu synchronizace. [12]

Tabulka 6: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_GearInPos [12]

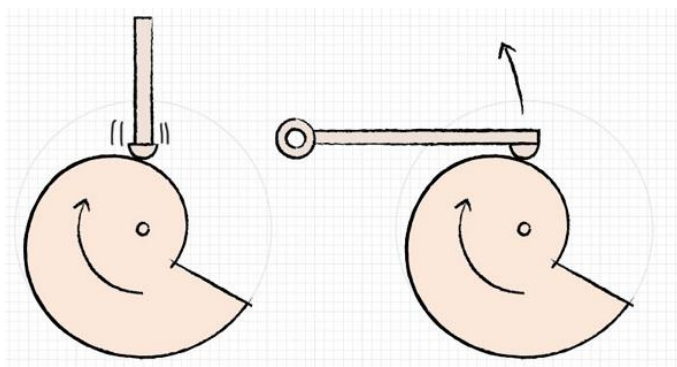
I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Master	UDINT	Reference Master osy
IN	Slave	UDINT	Reference Slave osy
IN	Execute	BOOL	Spuštění příkazu nebo synchronizace s náběžnou hranou
IN	RatioNumerator	INT	Čítatel převodového poměru
IN	RatioDenominator	UINT	Jmenovatel Převodového poměru
IN	MasterSyncPosition	REAL	Master pozice startu synchronizace
IN	SlaveSyncPosition	REAL	Slave pozice startu synchronizace
IN	SyncMode	USINT	Definice typu synchronizace
			mcSHORTEST_WAY ... 3
			mcCATCH_UP ... 4
			mcSLOW_DOWN ... 5
			mcWITHIN_PERIOD ... 6
	MasterStartDistance	REAL	Vzdálenost po kterou dochází k synchronizaci
	Velocity	REAL	Maximální rychlost mezi StartSync a InSync
IN	Acceleration	REAL	Akcelerace mezi StartSync a InSync
IN	MasterParID	UINT	Využití ParID Master osy místo žádané hodnoty
IN	MasterParIDMaxVelocity	REAL	Maximální rychlost z ParID Master osy
OUT	StartSync	BOOL	Start synchronizace
OUT	InSync	BOOL	Dosaženo synchronizace
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	BOOL	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	CommandAborted	BOOL	Příkaz zrušen

Zásadní nevýhodou tohoto funkčního bloku je možnost jeho aktivace pouze z klidového stavu osy. Pro potřeby řízení ergometru, kdy je nutné aktivovat synchronizaci během momentového řízení, je tedy tento funkční blok opět nepoužitelný.

7.3 Elektronická vačka

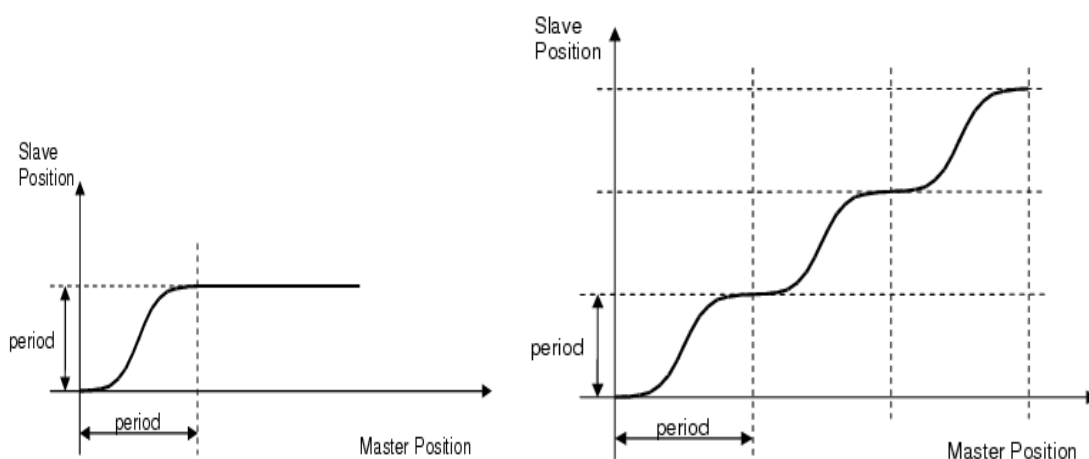
Kvůli otevřenějším možnostem synchronizace os ergometru, bylo využito odlišného principu synchronizace, v podobě elektronické vačky. Elektronickou vačku reprezentují funkční bloky MC_CamTableSelect, MC_CamIn a MC_CamOut, jež budou probrány později.

Elektronická vačka je založena na principu vačky mechanické. U mechanické vačky je rozhodující její tvar při převodu rotačního pohybu na pohyb translační. Vačkou (Master) je otáčeno a na základě jejího tvaru a její pozice je realizován zdvih posuvné části (Slave).



Obrázek 18: Princip mechanické vačky [14]

U elektronické vačky nerozhoduje o míře a rychlosti pohybu řízené osy (Slave) tvar vačky, ale uživatelem definovaná závislost řízené osy na řídící ose (Master), neboli takzvaný vačkový profil. Ke svázání os dochází pomocí programu. Elektronická vačka tedy nepřevádí pouze pohyb rotační na translační, ale i pohyb rotační na pohyb rotační o jiném polohovém profilu. Další výhodou je možnost periodického či neperiodického vykonávání pohybu. [13]



Obrázek 19: Princip elektronické vačky. Vlevo periodická, vpravo neperiodická. [12]

7.3.1 MC_CamTableSelect

Tento funkční blok připravuje vačkové tabulky pro blok MC_CamIn. Pomocí vstupů „Master“ a „Slave“ je nejprve nutné provést reference os, tj. přiřadit fyzickým osám, zda budu řídící nebo řízené. Vačkové tabulky obsahují uživatelem definovaný profil, vybíraný na základě jména přivedeného na vstup „CamTable“. Tomuto jménu je přiřazeno celé nezáporné číslo „CamTableID“, které je výstupem z tohoto funkčního bloku a dále zpracováváno ve funkčním bloku MC_CamIn. Pomocí vstupu „Periodic“ je možné zvolit buď periodický, nebo neperiodický vačkový profil.[12]

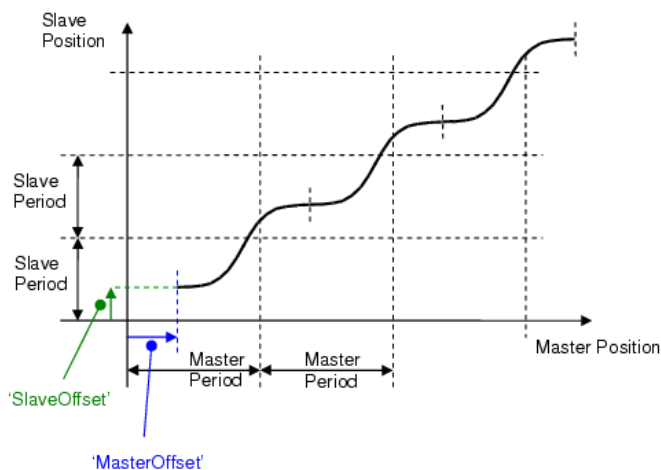
Tabulka 7: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_CamTableSelect [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Master	UDINT	Reference Master osy
IN	Slave	UDINT	Reference Slave osy
IN	CamTable	STRING [12]	Název vačkové tabulky
IN	Execute	BOOL	Aktivace bloku s náběžnou hranou
IN	Periodic	BOOL	Periodicita vačky
			mcNONPERIODIC ... 0
			mcPERIODIC 1
OUT	Done	BOOL	Výběr tabulky dokončen
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	BOOL	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	CamTableID	UINT	Identifikátor tabulky pro blok MC_CamIn

7.3.2 MC_CamIn

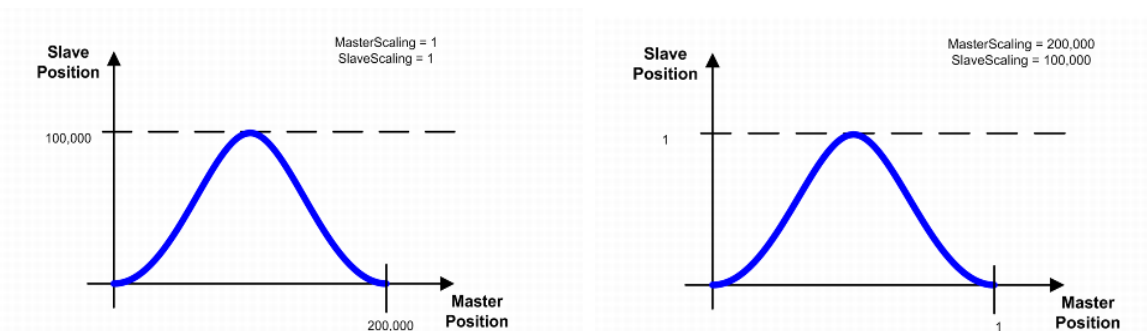
Tento funkční blok umožňuje navázání synchronizace os skrze elektronickou vačku na základě vačkového profilu. Opět je nejprve nutná reference os pomocí vstupů „Master” a „Slave”. Vačkový profil je vyčítán ze vstupu „CamTableID” a je aktivován s náběžnou hranou vstupu „Execute”. Je možné jej změnit i při aktivní synchronizaci změnou „CamTableID” a opětovným potvrzením.

Pomocí vstupů „MasterOffset” a „SlaveOffset” je možné zpožděné spouštění synchronizace os (viz obrázek 10). [12]



Obrázek 20: Master - Slave offset [12]

Pokud je dosaženo hodnoty nastavené v „MasterOffset”, dojde k nastavení příznaku „InSync” a osy se synchronizují. Vstupy „MasterScaling” a „SlaveScaling” dovolují přizpůsobit normalizovaný vačkový profil požadovaným parametřům na fyzické ose. [12]



Obrázek 21: Master-Slave scaling (vlevo přizpůsobený, vpravo normalizovaný vačkový profil) [12]

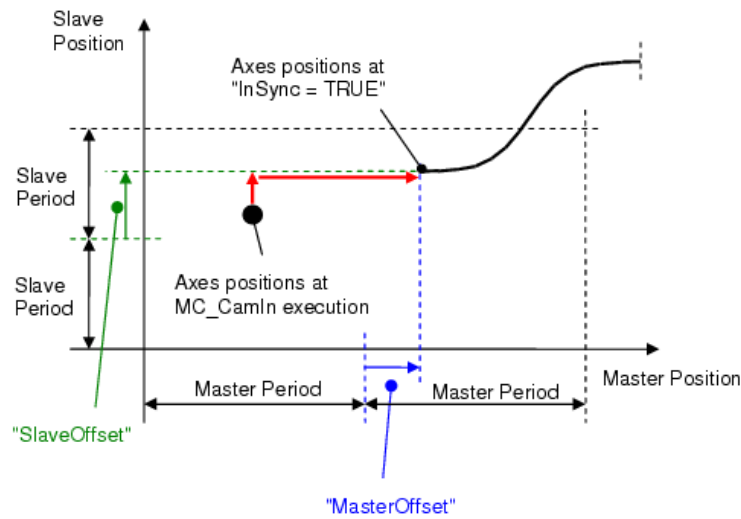
Tabulka 8: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_CamIn [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Master	UDINT	Reference Master osy
IN	Slave	UDINT	Reference Slave osy
IN	Execute	BOOL	Aktivace bloku s náběžnou hranou
IN	MasterOffset	REAL	Offset Master osy [Master jednotky]
IN	SlaveOffset	REAL	Offset Slave osy [Slave jednotky]
IN	MasterScaling	REAL	Škálování Master osy
IN	SlaveScaling	REAL	Škálování Slave osy
IN	StartMode	USINT	Spouštěcí mód mcABSOLUTE ... 0 mcRELATIVE ... 1 mcDIRECT 0
IN	CamTableID	USINT	Identifikátor vačkové tabulky mcLINEAR_CAM_PERIODIC mcLINEAR_CAM_NON_PERIODIC
IN	MasterParID	BOOL	Použití ParID Master osy namísto nastavené pozice
OUT	InSync	BOOL	Vačka je poprvé zavazbena
OUT	Busy	BOOL	Nastaveno pokud není funkční blok přerušen jiným příkazem
OUT	CommandAborted	BOOL	Funkční blok zrušen jiným příkazem
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	BOOL	Identifikační číslo chybového stavu
OUT	EndOfProfile	BOOL	Konec vačkového profilu

mcABSOLUTE

Při spouštění s tímto vstupním parametrem je MasterOffset a Slaveoffset odečítán absolutně, tj. od začátku periody pohybu. Pokud přijde žádost o synchronizaci (Execute) až za hodnotou MasterOffset, k synchronizaci dojde po dosažení hodnoty MasterOffset, ale až v další periodě pohybu Master osy. Pokud je Master osa v pohybu, může být

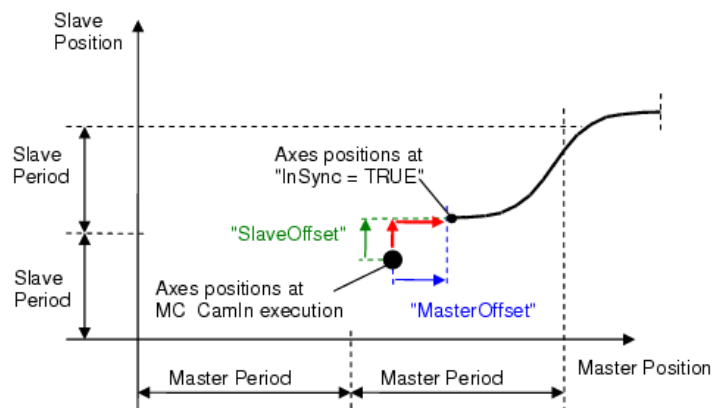
vazba Slave osy zpožděna několik period pohybu z důvodu nedosažené Slave startovní pozice. [12]



Obrázek 22: mcABSOLUTE [12]

mcRELATIVE

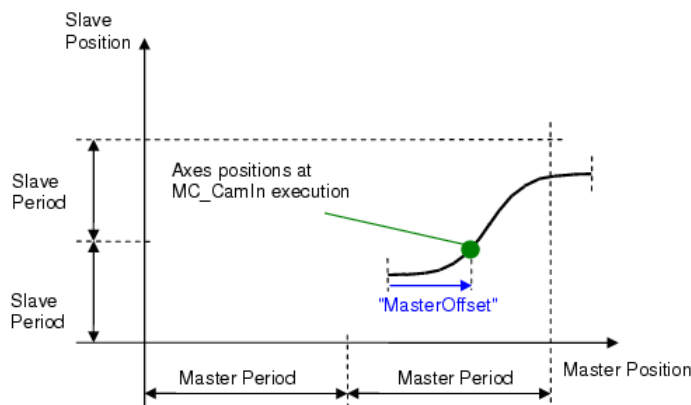
Zde je MasterOffset a SlaveOffset odečítán od aktuální pozice, ve které byla zaznamenána žádost o synchronizaci. K synchronizaci dojde ihned po dosažení hodnoty MasterOffset. Pokud je Master osa v pohybu, může být vazba Slave osy zpožděna několik period pohybu z důvodu nedosažené Slave startovní pozice. [12]



Obrázek 23: mcRELATIVE [12]

mcDIRECT

MasterOffset zde udává, v jaké části vačkového profilu má dojít k synchronizaci. MasterOffset zde nesmí být záporný a SlaveOffset zde není uvažován. [12]



Obrázek 24: mcDIRECT [12]

7.3.3 MC_CamOut

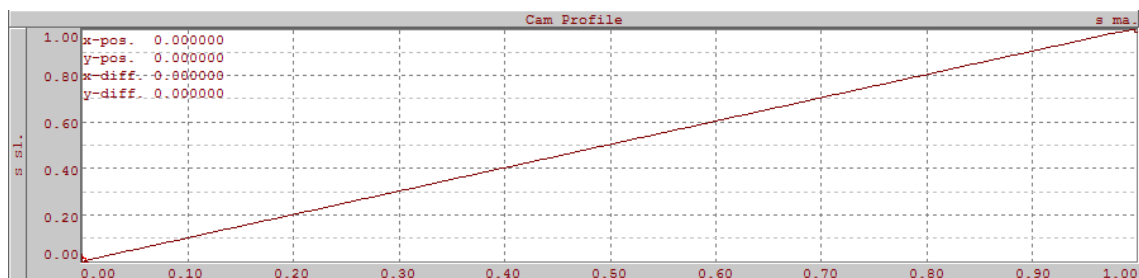
Tento funkční blok ruší vazbu mezi Master a Slave osou. K rozpojení os dojde s náběžnou hranou vstupu „Execute“. Náběžná hrana výstupu „Done“ podává informaci o dokončení rozpojení, dále Slave osa dokončuje pohyb svou rychlostí, respektive je přepnuta do stavu Continuous motion. [12]

Tabulka 9: Vstupy a výstupy funkčního bloku MC_CamOut [12]

I/O	Parametr	Datový typ	Popis
IN	Slave	UDINT	Reference Slave osy
IN	Execute	BOOL	Aktivace bloku s náběžnou hranou
OUT	Done	BOOL	Výběr tabulky dokončen
OUT	Busy	BOOL	Příkaz není dokončen
OUT	Error	BOOL	Funkční blok je v chybovém stavu
OUT	ErrorID	BOOL	Identifikační číslo chybového stavu

7.4 Implementace elektronické hřídele do řídicího programu ergometru

Aby bylo dosaženo přirozeného pohybu pedálů jako na klasickém bicyklovém ergometru, je nutné přepínat řídicí a řízenou osu na 180° periody pohybu pedálu. Osa motoru se nachází ve stavu Master, pokud se na ní připevněný pedál nachází v poloze záběru. Druhá osa se v tomto případě nachází ve stavu Slave. Aby byla nahrazena funkce pevné hřídele, jako u klasických bicyklových ergometrů, byl zde nastaven lineární vačkový profil. K tomuto účelu byl využit Cam designer implementovaný ve vývojovém softwaru Automation studio.



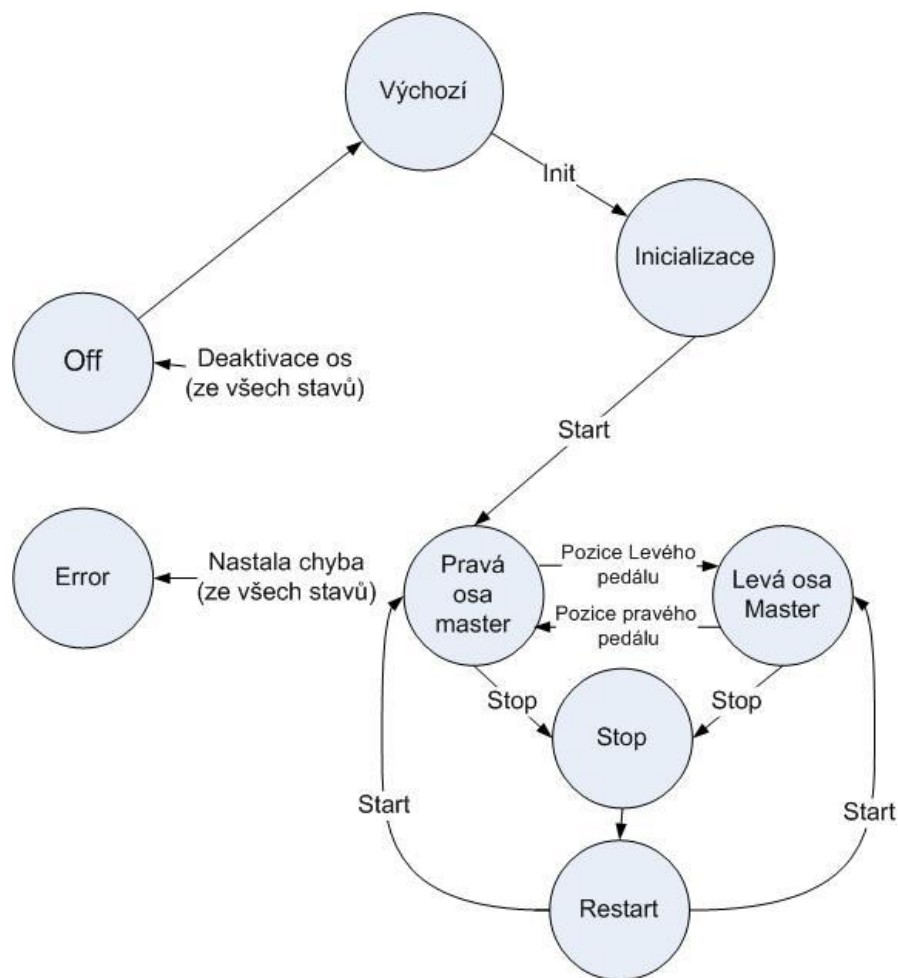
Obrázek 25: Lineární vačkový profil os ergometru

Díky lineárnímu vačkovému profilu je zajištěno, aby Slave osa přesně kopírovala pohyb Master osy. Při definici os bylo nastaveno vzájemné posunutí „Home“ pozic o 180° a tím odpadla nutnost zavádět offset Master – Slave. Nakonec bylo nutné přizpůsobit jednotky vačkového profilu, aby odpovídaly jednotkám na reálné ose. Rozlišení snímání polohy bylo zavedeno 3600 unit/ot. Délka vačkového profilu je zde vyžadována polovina otáčky, tj. 1800 unit. Jednotky byly přizpůsobeny zadáním této hodnoty do parametrů „MasterScaling” a „SlaveScaling”.

8. Software

Řídicí jednotkou tohoto zařízení je PLC automat od firmy B&R, tudíž bylo pro tvorbu softwaru využíváno vývojového prostředí Automation studio. Software zařízení je rozdělen na řídicí část a část vizualizace. Řídicí část programu se stará o nastavení funkčních bloků, inicializaci, přesné a bezpečné přepínání mezi osami. Vizualizace obsahuje ovládací prvky a dále prvky diagnostické. Kompletní kód je psán v jazyce ST.

8.1. Řídicí program



Obrázek 26: Stavový diagram řídicí části programu

Ve výchozím stavu řídicího programu jsou resetovány aktivační vstupy veškerých použitých funkčních bloků a je vyčkáváno na inicializační povel.

Stav inicializace obsahuje několik podstavů. První z nich je aktivace os a ověření, že aktivace proběhla v pořádku. Dalším podstavem je homing os a jeho ověření. V následujícím podstavu probíhá výběr vačkové tabulky a opět ověření, zda vše proběhlo v pořádku. Pokud je při ověřování detekována chyba, je program uveden do chybového stavu. Posledním podstavem je nastavení synchronizace os.

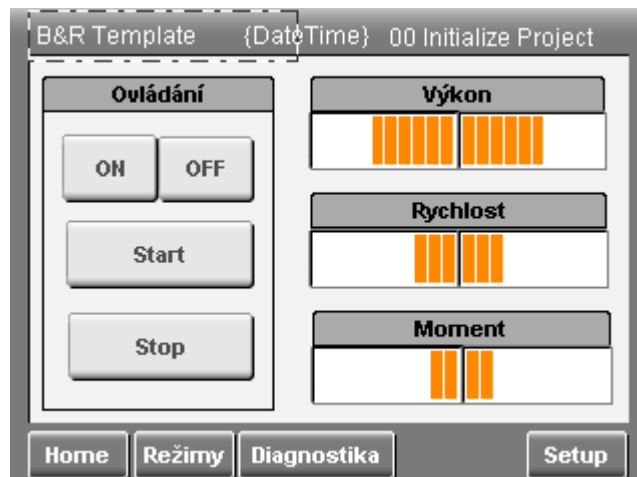
Po ukončení inicializace je možné příkazem „Start“ uvést program do stavu synchronizace os. Stav „Pravá osa Master“ a „Levá osa Master“ opět obsahují několik podstavů zajišťujících plynulé přepnutí os. V prvním podstavu dojde k vazbě os a je nastaven nízký přepínací krouticí moment na řídicí ose. V dalším podstavu je provedeno ověření, zdali je aktivní momentové řízení. Je zde nastaven požadovaný krouticí moment a pro prvních několik stupňů otáčky je zavedeno momentové omezení, které s narůstající polohou exponenciálně klesá. Díky tomuto omezení nedochází k momentovým rázům při přepínání os. Na základě polohy jsou v dalším podstavu resetovány aktivační vstupy bloků MC_CamIn a MC_LimitLoad, aby nedošlo k situaci, že by program vyhodnotil obě osy najednou jako Master. Po dosažení polohy blížící se přepnutí osy z Master na Slave, je opět nastaven nízký přepínací krouticí moment a celý proces se pro druhou osu opakuje.

Příkazem Stop je program uveden do stavu Stop. V tomto stavu osy setrvají v poslední dosažené poloze. Příkazem Start je možné osy opět uvést do pohybu.

Příkazem PowerOff je program uveden do vypnutého stavu, ve kterém jsou resetovány aktivační vstupy všech funkčních bloků.

8.2. Vizualizace

Program pro vizualizaci je rozdělen na ovládací a diagnostickou část. Ovládací část komunikuje s řídicím programem a umožňuje tak zadáváním příkazů pohyb mezi stavy řídicího programu.



Obrázek 27: Ovládací strana vizualizace

Stisknutím tlačítka ON je uveden řídicí program do inicializačního stavu. Zelená kontrolka podává informaci o tom, že inicializace proběhla v pořádku a přístroj je možné uvést do provozu. Poté je možné tlačítkem Start zařízení aktivovat a přejít tak do stavu synchronizace os. Tlačítkem Stop je zastaven pohyb os v poslední dosažené pozici. Tlačítkem OFF je zařízení deaktivováno. Možnou nastalou chybu indikuje rozsvícení červené kontrolky. Tato chyba je vypsána na obrazovce „Status“, kde je ji možné potvrdit.



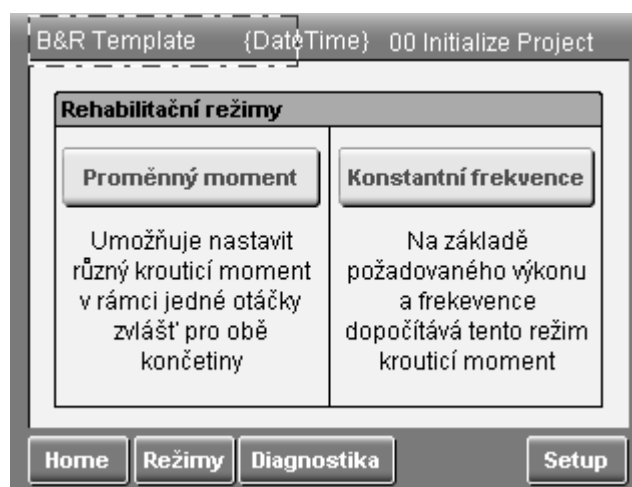
Obrázek 28: Strana status

Diagnostická část společně s rehabilitačními režimy bude podrobněji popsána v následujících kapitolách.

9. Rehabilitační režimy

Programy rehabilitačních režimů jsou implementovány do programu vizualizace. Tyto programy nemění strukturu řídicího programu. Výstupem těchto programů je pouze žádaná hodnota krouticího momentu vypočítaná na základě uživatelem definovaných parametrů.

System disponuje režimem konstantního výkonu a režimem proměnného krouticího momentu. Výběr daného režimu je možný na obrazovce „Režimy“.



Obrázek 29: Obrazovka výběru rehabilitačních režimů

9.1 Režim konstantního výkonu

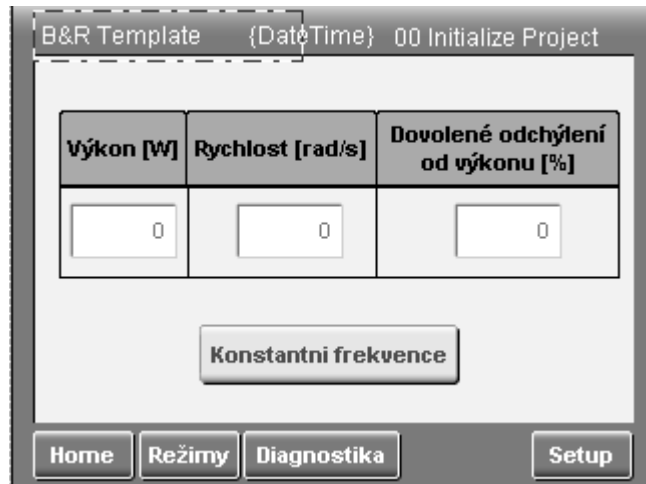
U tohoto režimu je paradoxně dpočítáván nikoli konstantní výkon, ale konstantní krouticí moment. Název tohoto rehabilitačního režimu je odvozen od principu cvičení. Pacient se v tomto režimu snaží udržet konstantní výkon na základě uživatelem zadané žádané hodnoty výkonu, a frekvence pedálů. Z těchto dvou údajů je podle vzorce 7.1 dpočítáván krouticí moment působící proti, nebo ve směru záběru končetiny.

$$P = M \cdot \omega \quad (9.1)$$

Pro zamezení momentovému rázu při startu režimu je nejprve nastaven nízký moment a výpočet momentu na základě vstupních údajů započne, jakmile pacient dosáhne požadované frekvence.

Dále je zde možné zadat procentuální rozmezí žádaného výkonu. Rozmezí je zadáváno jednou hodnotou, která odpovídá procentům ze žádané hodnoty výkonu. Tato

hodnota ohraničuje žádanou hodnotu zdola i shora. Pokud se pacient pohybuje mimo tuto mez, je graficky upozorněn, viz kapitola diagnostika.



Obrázek 30: Obrazovka režimu konstantní frekvence

9.2 Režim proměnného momentu

V tomto režimu je 180°, kdy se nachází končetina v záběru, možné rozdělit na několik dílčích částí. Uživatel definuje rozmezí ve stupních, ve kterém je dále možné nastavit různý krouticí moment. Zadaný moment je uložen po jednotlivých stupních do pole o 180 prvcích. Aby nedocházelo k rázům při přechodu z jednoho krouticího momentu na druhý, je vypočítávána žádaná hodnota momentu podle vzorce 7.2.

$$M_{SETPOINT}[i] = A \cdot M_{SETPOINT}[i-1] + B \cdot M_{DEMAND}[i-1] \quad (9.2)$$

$M_{SETPOINT}$ je hodnota vstupující do funkčního bloku MC_TorqueControl. M_{DEMAND} je hodnota žádaná, uložená v poli. Změnou parametrů A a B je možné ovlivnit strmost momentové rampy. V současné verzi řešeno výběrem mezi třemi přednastavenými hodnotami, jimiž jsou pomalá, střední a rychlá momentová rampa. Díky tomuto přístupu dosáhne moment žádané hodnoty za stejný čas nezávisle na velikosti rozdílu po sobě jdoucích momentů.

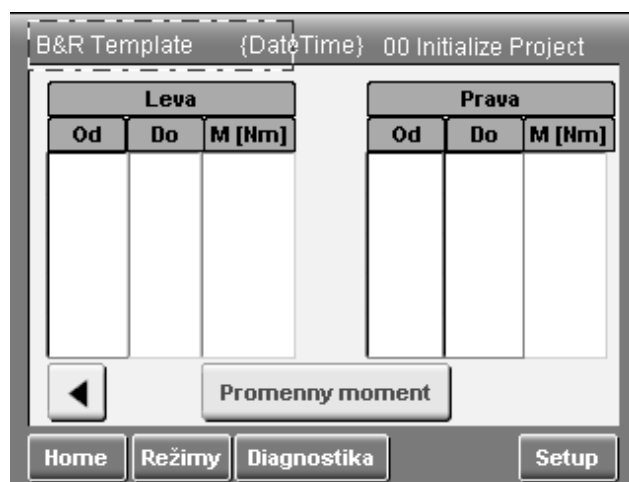
Definice rozmezí je prováděna prostřednictvím vizualizace. Počáteční bod rozmezí je pevný (u prvního sektoru je vždy nulový) a je zadáván pouze koncový bod.

Pokud je hodnota koncového bodu nižší než hodnota bodu počátečního, dojde k upozornění a hodnota není uvažována. Do nově vytvořeného sektoru je následně možné zadat požadovaný krouticí moment (kladný nebo záporný). Zadané údaje je nutné potvrdit tlačítkem. Následkem potvrzení se koncová hodnota sektoru přiřadí do počáteční hodnoty sektoru nového. Stejným způsobem je možné definovat libovolně široké sektory od 0° do 180°.



Obrázek 31: Strana nastavení režimu proměnný moment

Stisknutím šipky doje k přepnutí na obrazovku, kde jsou vypsány všechny definované sektory a k nim přiřazené momenty.

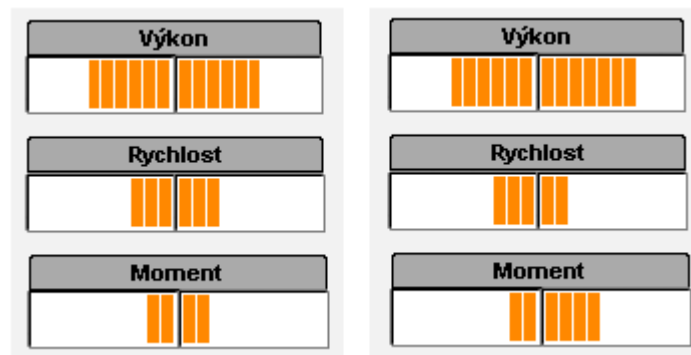


Obrázek 32: Výpis sektorů a aktivace režimu proměnný moment

Vyhodnocován je zde opět průměrný výkon ve čtyřech úsecích, maximální a minimální výkon a výkonový rozdíl. Ty samé výsledky jsou zaznamenávány také u krouticího momentu.

10. Diagnostika

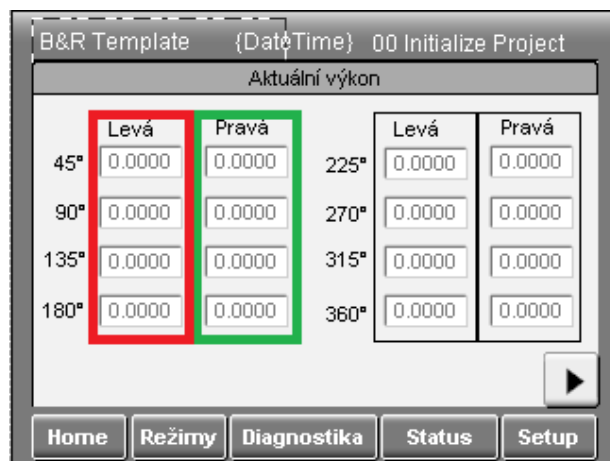
Na obrazovce „Ovládání“, kde se nacházejí klíčové ovládací prvky, je zobrazována orientační informace o dosaženém průměrném výkonu, krouticím momentu a rychlosti za aktivní polovinu periody pohybu. Zobrazení probíhá formou bargrafů. Pro každou veličinu se zde nachází jeden bargraf zvlášť pro obě končetiny. Pro pravou končetinu rostou hodnoty na bargrafu směrem doprava a pro levou končetinu naopak. Výsledkem je obrazec, který pokud je souměrný, podává informaci o tom, zda pacient cvičí oběma končetinami stejně (viz obrázek 33).



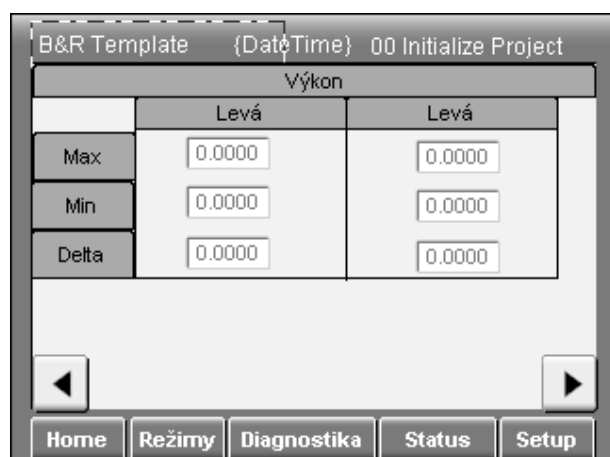
Obrázek 33: Orientační diagnostické informace (vlevo souměrný záběr končetin, vpravo nesouměrný záběr končetin)

Detailní informace o namáhání končetin pacienta jsou dostupné opět ve vizualizaci na obrazovce diagnostika.

Aktuální výkon je počítán pro každý stupeň otáčky a je ukládán do pole o 360 prvcích. V následující periodě pohybu je výkon v každém stupni průměrován s hodnotou z předešlé periody. Na displeji je z důvodu přehlednosti výkon navíc zprůměrován do osmi kvadrantů rozdělených po 45 stupních. První čtyři kvadranty zobrazují hodnoty výkonu v aktivní části pohybu, zbylé čtyři kvadranty zobrazují výkon v části pasivní. Neobvyklý nárůst výkonu v pasivní části, kde by se končetina měla pouze nechat táhnout, upozorňuje na možné vzniklé křeče. Aby nedocházelo ke ztrátě důležitých informací, je zde navíc zobrazována maximální a minimální dosažená hodnota výkonu. Dále je zde informace o rozdílu výkonu aktuální a předešlé otáčky. U této informace je důležité především to, zdali je číslo kladné, nebo záporné. Pokud je číslo kladné, znamená to, že v nové otáčce byl pacient výkonnější. Pokud je záporné, pacient vyvinul nižší výkon.

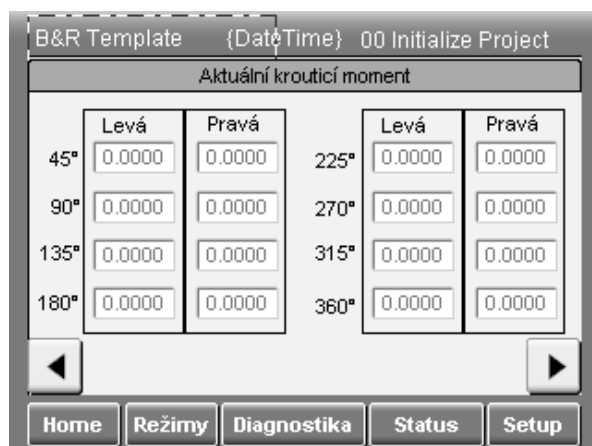


Obrázek 34: Vyhodnocení výkonu



Obrázek 35: Výkonové minimum, maximum a rozdíl

U krouticího momentu jsou vyhodnocovány totožné informace jako u výkonu.



Obrázek 36: Vyhodnocení krouticího momentu

U režimu konstantní frekvence je navíc monitorováno, zdali se pacient pohybuje v uživatelem daných výkonových mezích, nebo se nachází mimo. Upozornění probíhá

ve formě barevného zvýraznění rámečku okolo hodnot výkonu pro pravou a levou končetinu zvlášť. Tyto meze je možné nastavit jako procentuální odchylky od žádané hodnoty výkonu. Pokud se pacient pohybuje více jak pět sekund pod minimální výkonovou mezí, dojde k zastavení režimu, vyhodnocování výkonu je ukončeno a je nastaven bezpečný krouticí moment.

11. Závěr

Výsledkem této diplomové práce je řídicí software a rozhraní člověk-stroj určený pro rehabilitační zařízení bicyklového typu. Pohonné jednotky zajišťující zátěž pedálů zde zprostředkovávají dva synchronní servomotory řízené PLC automatem. Systém je možné implementovat do zařízení pro rehabilitaci dolních a horních končetin. Je zde také možnost rehabilitace pacientů s amputovanou končetinou.

Díky revolučnímu systému elektronické hřídele umožňuje zařízení nastavit rozdílnou zátěž obou končetin, dále proměnnou zátěž v rámci jedné periody otáčení a přesné měření výkonu končetin s eliminovaným vzájemným vlivem končetin. Systém zátěže je zde, oproti klasickým rehabilitačním přístrojům s pasivní zátěží, řešen jako momentové řízení synchronního servomotoru. Toto řešení vnáší výhodu použití krouticího momentu nejen jako zátěž, ale také jako aktivní pomoc. Bylo zde ovšem nutné klást větší důraz na bezpečnost, z důvodu možnosti selhání řídicího softwaru a uvedení tak přístroje do nebezpečného stavu.

Systém disponuje dvěma druhy rehabilitačních režimů. Režim konstantního výkonu a režim proměnného krouticího momentu. U těchto režimů je možné nastavovat klíčové parametry skrze dotykový panel. V tomto dotykovém panelu nalezneme dále diagnostické prvky, jež nám dávají informace o výkonu, otáčkách a krouticím momentu. Tyto veličiny jsou měřené v každém stupni periody otáčení. Pro přehledné zobrazování jsou hodnoty zprůměrované do osmi kvadrantů po pětáctyřiceti stupních v rámci jedné otáčky a doplněné o výkonové maximum a minimum. První čtyři kvadranty zaznamenávají hodnoty z aktivní části pohybu. Pasivní část pohybu reprezentují druhé čtyři kvadranty, kde je ze skokových změn hodnot možné určit, zdali pacient dostal křeč. Systém také podává informaci o výkonovém rozdílu mezi končetinami. Dále se zde nachází indikace, zdali se pacient pohybuje v uživatelem definovaných výkonových mezích, zdali výkon převyšuje, nebo je pod minimální mezí. Tyto informace jsou podávány v definovatelném časovém intervalu, po který je daný rehabilitační režim aktivní.

Použitá literatura

- [1] SNĚTIVÝ, Tomáš, 2014. *Návrh řídicího systému rehabilitačního rotopedu*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta mechatroniky.
- [2] B&R. *4PP065.0571-P74F* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.brautomation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP44400000000000000000000316537/4PP065.0571-P74F-ENG.pdf
- [3] B&R. 2013. *ACOPOSmicro User's Manual* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.br-automation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP44400000000000000000000248765/MAACPMICRO1-ENG.pdf
- [4] B&R. 2014. *8LVA2* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: http://www.br-automation.com/downloads_br_productcatalogue/BRP44400000000000000000000295166/8LVA2.pdf
- [5] *AC Brushless Servo Motor* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://velectricalwork.com/ac-brushless.asp>
- [6] *Phoenix Contact QUINT SFB 48VDC/10A Power Supply* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://steven-engineering.blogspot.cz/2009/12/phoenix-contact-quint-sfb-48vdc10a.html>
- [7] *PHOENIX CONTACT TRIO-PS/1AC/24DC/10 PSU, DIN RAIL, 24V, 10A* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://uk.farnell.com/phoenix-contact/trio-ps-1ac-24dc-10/psu-din-rail-24v-10a/dp/2068486>
- [8] B&R. *Integrated Safe Motion Control TM540*. 2012.

- [9] SIEMENS, 2008. *Bezpečnost integrovaná v pohonech* [online]. [cit. 2015-05- 08].
Dostupné z:
[http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/49338_2008\\$cerven\\$09\\$dbSI\\$Safety\\$funkce.pdf](http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/49338_2008$cerven$09$dbSI$Safety$funkce.pdf)
- [10] ČERNOHORSKÝ, Josef. 2014. *Safety functions in motion control* [online].
[cit. 2015-05-12]. Dostupné z:
<http://www.fm.tul.cz/esf0050/index.php?p=subjects&subject=34>
- [11] ČERNOHORSKÝ, Josef. 2014. *Momentové řízení a jeho implementace v systémech řízení pohonů* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z:
<http://www.fm.tul.cz/esf0050/index.php?p=subjects&subject=34>
- [12] B&R, 2013. *Automation studio* [software]. Version 3.0.90.28. Eggelsberg: B&R
[přístup 3.5.2014]
- [13] PARKER. *Programmable motion control according to IEC 61131-3* [online].
6/2008 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://www.parker.com/literature/Literature%20Files/emn/Service-User%20Guides/C3T40%20eng.pdf>
- [14] *Cam followers, a brief diversion* [online]. 2011. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z:
<http://www.robives.com/blog/camfollowers>

Příloha A – Přiložené CD

Obsah CD:

- Diplomová práce ve formátu „pdf“
- Řídicí a vizualizační program pro rehabilitační ergometr