



Návrh a implementace Hardware-in-the-loop simulátorů s využitím průmyslové PLC platformy Beckhoff

Bakalářská práce

Ondřej Taut

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej TAUT**
Osobní číslo: **A20B0355P**
Studijní program: **B0714A150005 Kybernetika a řídicí technika**
Specializace: **Automatické řízení a robotika**
Téma práce: **Návrh a implementace Hardware-in-the-loop simulátorů s využitím průmyslové PLC platformy Beckhoff**
Zadávající katedra: **Katedra kybernetiky**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s průmyslovými řídicími systémy Beckhoff a jazyky pro jejich programování podle normy IEC 61131-3 v nativním prostředí TwinCAT3.
2. Navrhněte metodiku tvorby numerických simulátorů dynamických systémů pro HIL simulace s využitím dostupných HW a SW prostředků.
3. Vytipujte vhodné modely systémů určených pro výuku automatického řízení a implementujte jejich virtuální model na platformě Beckhoff, včetně rozhraní vizualizace.
4. Otestujte vyvinuté modely a srovnajte výsledky s offline numerickými simulacemi v prostředí Matlab.

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stránek A4**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

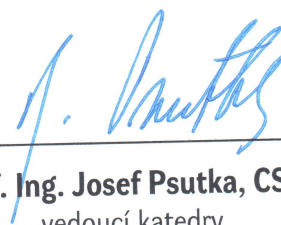
Přednášky ZČU/KKY z předmětu IŘS1 Norma IEC-EN-61131-3 Dokumentace systému TwinCAT – dostupné online na <https://infosys.beckhoff.com/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Goubej, Ph.D.**
Katedra kybernetiky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2023**



Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2022

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne

.....
Ondřej Taut

Poděkování

Tímto bych chtěl ze srdce poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Martinu Goubejovi Ph.D. za poskytnutí příležitosti vypracovat toto téma v mé práci a za vedení během práce, společnosti Beckhoff za dodání HW nástrojů, celé ZČU za možnost studovat na této fakultě a svým přátelům Tomovi a Jiřímu, že mě přesvědčili, abych tuto práci dokončil.

Anotace

Tématem této bakalářské práce je poznat a použít prostředky pro řízení od firmy Beckhoff. Seznam zařízení Beckhoff zahrnuje PLC CP6606, sběrnice EK110 a I/O terminály EL9198, EL9188, EL1008, EL2008, EL3068, EL4732. Mikropočítač Monarco HAT plnil funkci programovatelného regulátoru ve zpětnovazební smyčce. Komunikace mezi PLC a Monarcem probíhala skrze periferní zařízení - sběrnici a I/O terminály. Návrh řídicích algoritmů probíhal v rámci speciálního vývojového prostředí TwinCAT3. Byly navrženy dva modely - stabilizace satelitu a spojené nádrže. Chování prvního modelu bylo simulováno v rámci PLC. Druhý model byl zapojen do regulační smyčky. Výsledky obou modelů byly srovnány s variantami modelů navrženými v programu Simulinku.

Klíčová slova: Beckhoff, TwinCAT, Programmable Logic Controller (PLC), Hardware In the Loop (HIL), Simulink, automatické řízení. Diagram funkčních bloků.

Abstract

The topic of this thesis is introduction and application of tools for automation made by Beckhoff company. The list of devices includes PLC CP6606, bus EK110 and I/O terminals EL9198, EL9188, EL1008, EL2008, EL3068, EL4732. Micro controller Monarco HAT was used as programmable compensator in closed loop. Information between PLC and Monarco hardware runs on external devices - bus and I/O terminals. Design of algorithms for automation was made in dedicated development interface TwinCAT3. Two model systems were created - Satellite Stabilization and System of Tanks. First model was simulated solely in PLC. The second one was wired into feedback loop. Results of both model were compared to their counterparts made inside Simulink software.

Keywords: Beckhoff, TwinCAT, Programmable Logic Controller (PLC), Hardware In the Loop (HIL), Simulink, automation. Function block diagram.

Obsah

1	Backhoff Automation	1
1.1	O společnosti	1
1.2	TwinCAT	1
1.3	EtherCAT	3
2	Hardwarové prostředky	4
2.1	CP60600	4
2.2	EK1100	5
2.3	EL9189	6
2.4	EL9188	7
2.5	EL1008	8
2.6	EL2008	9
2.7	EL3068	10
2.8	EL4732	11
2.9	Monarco	12
3	Algoritmus pro tvorbu modelu	13
3.1	Stavový model	13
3.2	Blokové schéma	13
3.3	Implementace do TwinCAT	14
3.4	Linearizace	16
3.5	Návrh regulátoru	17
3.6	Implementace regulátoru do Monarca	17
3.7	Zapojení	17
3.8	Komunikace Beckhoff-Monarco	19
3.9	Funkční bloky a funkce	20
3.9.1	Jednoduchý integrátor	20
3.9.2	Aproximace Diracova pulzu	21
3.9.3	Step	22
3.9.4	Jen nezáporná čísla	22
3.9.5	Převod napětí-číslo	22
3.9.6	Převod číslo-napětí	23
3.9.7	Vektorový integrátor	24
3.9.8	Změna velikosti vektoru	24
3.9.9	Maticové násobení	24
3.9.10	Vektorový součin	24
3.9.11	Vektorový součet	25
3.9.12	Vektorový rozdíl	25
3.9.13	Vektorový rozdíl se třemi vstupy	25
3.9.14	Délka Vektoru	25
3.9.15	Normování vektoru	25

4	Vybrané modely	26
4.1	Stabilizace satelitu	26
4.2	Systém dvou nádrží	27
5	Testování a srovnání modelů	30
5.1	Princi testování	30
5.2	Testování modelů satelitu	31
5.3	Testování modelů spojených nádrží	33
6	Výsledky	35
6.1	Výsledky modelu satelitu	35
6.2	Výsledky modelu spojených nádrží	41
6.3	Shrnutí	45
7	Závěr	46
8	Zdroje	48

Seznam obrázků

2	CP6606	4
3	EK1100	5
4	EL9189	6
5	EL9188	7
6	EL1008	8
7	EL2008	9
8	EL3068	10
9	EL4732	11
10	Monarco	12
11	Zapojení Beckhoff-Monarco	18
12	Převod napětí-číslo	23
13	Převod číslo-napětí	23
14	Spojené nádrže	28
15	Model satelitu v Simulinku.	32
16	Model satelitu v TwinCATu.	33
17	Model spojených nádrží v Simulinku.	34
18	Model spojených nádrží v TwinCATu.	35
19	Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{b}$, $\boldsymbol{\omega}_0 = \mathbf{0}$	36
20	Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [-3, -2, -1]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [10, 10, 10]^T$	36
21	Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [1, 2, 3]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [0, 0, 10]^T$	37
22	Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [-7, 1, 5]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [10, -10, -10]^T$	37
23	Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [4, -8, 3]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [-10, 10, -10]^T$	38

24	Vektor $\boldsymbol{\omega}$. $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{b}$, $\boldsymbol{\omega}_0 = \mathbf{0}$	38
25	Vektor $\boldsymbol{\omega}$. $\mathbf{d}_0 = [-3, -2, -1]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [10, 10, 10]^T$	39
26	Vektor $\boldsymbol{\omega}$. $\mathbf{d}_0 = [1, 2, 3]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [0, 0, 10]^T$	39
27	Vektor $\boldsymbol{\omega}$. $\mathbf{d}_0 = [-7, 1, 5]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [10, -10, -10]^T$	40
28	Vektor $\boldsymbol{\omega}$. $\mathbf{d}_0 = [4, -8, 3]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [-10, 10, -10]^T$	40
29	Aproximace Diracova pulzu $\delta(t)$	41
30	Model spojených nádrží. Odezva na diracův pulz.	42
31	Model spojených nádrží. Odezva na jednotkový skok.	42
32	Test řízení.	43
33	Chyba na vstupu.	44
34	Chyba na výstupu.	44

Seznam tabulek

2	Meze 16-bit integeru a k nim odpovídající napětíT.	20
3	Počáteční úhlové rychlosti $\boldsymbol{\omega}_0$	32
4	Počáteční směrové vektory \mathbf{d}_0	32
5	Kritéria ISE pro modely satelitů. Rozdíly modelů v $\boldsymbol{\omega}$ a \mathbf{d}	41
6	ISE pro modely spojených nádrží. Rozdíly v H_1 , H_2 a Q	45

1 Backhoff Automation

1.1 O společnosti

Beckhoff Automation je německá technologická společnost, která se specializuje na vývoj a výrobu průmyslových systémů v automatizaci. Byla založena v roce 1980 Ingem Hans Beckhoffem a od té doby se stala jedním z předních světových dodavatelů automatizačního vybavení a řešení pro průmysl. Základním kamenem automatizační technologie společnosti jsou filozofie řízení na bázi PC, Bus terminály, vynález systému Lightbus a v neposlední řadě TwinCAT. Což je nejen software, ale především široká produktová řada, která spojuje PLC (Programmable Logic Controller) s operačním systémem Windows. Dalším vynálezem Beckhoffu je systém EtherCAT navržený speciálně pro přenos dat v průmyslu.

Společnost Beckhoff realizuje otevřené automatizační systémy na základě počítačové řídicí techniky. Výrobní spektrum zahrnuje: průmyslová PC, komponenty I/O a komponenty průmyslových sběrnic, technologii pohonů, automatizační software, automatizaci bez rozváděčů a hardware pro průmyslové zpracování obrazu. Pro všechny oblasti firma nabízí skupiny výrobků, které fungují jako jednotlivé komponenty, nebo společně jako úplný, vzájemně sladěný řídicí systém. Po celém světě se používají jejich univerzálními, oborově nezávislými řešeními řízení a automatizace, ať se jedná o aplikace řízených obráběcích strojů CNC nebo o inteligentní řízení budov.

Výzkum a vývoj jsou dalšími důležitými složkami filosofie společnosti Beckhoff. Díky investicím do inovací a neustálé vyvíjení nových technologií a produktů firma nabízí zákazníkům moderní a efektivní řešení pro jejich potřeby v automatizaci.

1.2 TwinCAT

TwinCAT je vlajkovou lodí společnosti Beckhoff Automation a jedná se o vysoce výkonný software pro řízení průmyslových procesů na bázi PC. Tento software kombinuje funkce PLC a HMI (Human-Machine Interface). To celé je pak integrováno do operačního systému Windows. Takto TwinCAT dokáže přeměnit téměř každé PC na systém řízení v reálném čase. Díky tomu poskytuje uživatelům vysokou flexibilitu a

škálovatelnost při implementaci řídicích systémů. Software je také navržen tak, aby umožňoval rozšíření o vnější komponenty a to nejen od firmy Beckhoff.

Hlavními složkami TwinCATu jsou:

1. TwinCAT PLC: Poskytuje prostředí pro programování a ovládání PLC funkcí. Umožňuje vytváření logických řídicích programů pomocí jazyků, jako je IEC 61131-3 (známý také jako "PLCopen"), který zahrnuje jazyky jako ST (Structured Text), IL (Instruction List), FBD (Function Block Diagram) a další. TwinCAT PLC také podporuje vývoj softwarových modelů s využitím objektově orientovaného přístupu.
2. TwinCAT NC (Numerical Control): Poskytuje funkce pro řízení a monitorování numerických řídicích systémů pro stroje jako CNC frézky, soustruhy a další. Tato funkcionality umožňuje vytváření složitých pohybových profilů a synchronizaci s dalšími systémy v automatizovaném procesu.
3. TwinCAT HMI: Poskytuje nástroje pro vytváření interaktivního uživatelského rozhraní (HMI), které umožňuje operátorům vizualizovat a ovládat průmyslové procesy. TwinCAT HMI podporuje tvorbu grafických obrazovek, alarmů, trendů a dalších prvků pro sledování a ovládání průmyslových zařízení.
4. TwinCAT ADS (Automation Device Specification): Je komunikační protokol, který umožňuje výměnu dat mezi různými komponenty TwinCAT systému a dalšími zařízeními nebo systémy. ADS poskytuje vysokou rychlost, spolehlivost a efektivitu přenosu dat, což je klíčové pro synchronizaci a koordinaci průmyslových procesů.

TwinCAT je široce využíván v průmyslové automatizaci a najde uplatnění v různých odvětvích, jako je automotive, potravinářství, farmacie, energetika a další. Jeho přínosy zahrnují rychlý vývoj aplikací, flexibilitu při úpravách a rozšiřování systému, vysokou spolehlivost a otevřenost pro integraci s dalšími systémy a zařízeními.

1.3 EtherCAT

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) je rychlý a efektivní komunikační protokol navržený specificky pro průmyslovou automatizaci. Tento protokol umožňuje synchronizovanou komunikaci mezi různými průmyslovými zařízeními a komponenty v reálném čase. EtherCAT byl vyvinut s cílem zlepšit rychlost, spolehlivost a výkonnost průmyslových komunikačních systémů.

Zde jsou některé důvody, proč se EtherCAT používá:

1. **Rychlost a Latence:** EtherCAT je známý pro svou vysokou rychlost a nízkou latenci. Tento protokol umožňuje velmi rychlou komunikaci mezi zařízeními až do řádů mikrosekund. To je potřebné pro řízení procesů v reálném čase a pro synchronizaci zařízení.
2. **Jednoduchost Kabeláže:** EtherCAT používá jedno sériové kabelové propojení pro přenos dat i napájení v síti. To eliminuje potřebu složitého drátování a snižuje náklady na instalaci.
3. **Flexibilita:** EtherCAT umožňuje snadnou přidávání nových zařízení do sítě a rychlou rekonfiguraci sítě bez velkých obtíží. To zajišťuje větší flexibilitu v návrhu a provozu průmyslových systémů.
4. **Synchronizace:** EtherCAT podporuje synchronizaci mezi různými zařízeními a komponenty v síti. To je důležité pro aplikace, které vyžadují přesnou časovou koordinaci, například v robotice nebo výrobních linkách.

Rozdíl mezi EtherCAT a tradičním Ethernetem spočívá v tom, že EtherCAT byl navržen specificky pro průmyslové aplikace, zatímco tradiční Ethernet byl původně vyvinut pro kancelářské a datové sítě. EtherCAT se liší svými synchronizačními mechanismy, rychlostí přenosu dat a deterministickým chováním, což zajišťuje spolehlivou a rychlou komunikaci v průmyslovém prostředí, kde jsou tyto vlastnosti vyžadovány.

2 Hardwarové prostředky

2.1 CP60600



Obrázek 2: CP6606

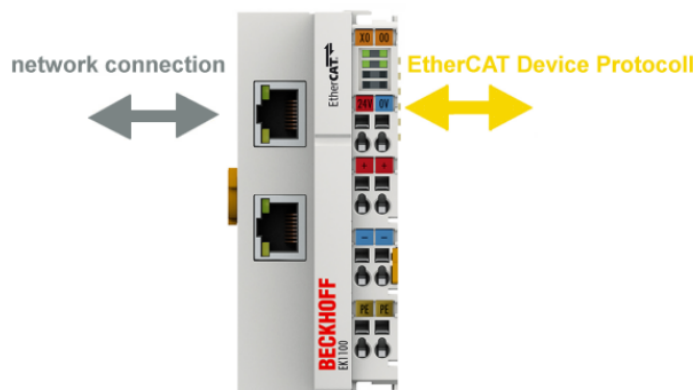
Zařízení CP6606 od firmy Beckhoff je kompaktní průmyslový počítač z rodiny CP66xx, který kombinuje výpočetní výkon s robustním průmyslovým provedením. Jeho hlavním účelem je poskytovat spolehlivý a výkonný výpočetní základ pro automatizační a řídicí úlohy v průmyslovém prostředí.

Několik funkcí zařízení CP6606 zahrnuje mimo jiné:

1. **Výpočetní Výkon:** CP6606 je vybaven výkonným procesorem ARM Cortex™-A8, 1 GHz, který umožňuje provádění náročných výpočtů a řídicích algoritmů v reálném čase. To je klíčové pro efektivní řízení průmyslových procesů.
2. **Robustní Konstrukce:** CP6606 je navržen s ohledem na průmyslové prostředí. Má odolné kovové provedení a je odolný proti otřesům, vibracím a prachu, což ho činí vhodným pro náročné provozní podmínky.
3. **Flexibilní Montáž:** Zařízení lze montovat na DIN lištu nebo na stěnu, což umožňuje snadnou instalaci a umístění v různých částech průmyslového zařízení.

4. **Rozsáhlou konektivitu:** Zařízení nabízí širokou škálu komunikačních rozhraní, včetně Ethernetu, USB a sériových portů. Toto umožňuje snadnou integraci s dalšími průmyslovými zařízeními a systémy.
5. **Rozšířitelnost:** Zařízení je navrženo tak, aby bylo možné ho rozšířit o další moduly a periferie dle potřeby. To znamená, že je vhodné pro různé typy aplikací a může se přizpůsobit změnám požadavků.

2.2 EK1100



Obrázek 3: EK1100

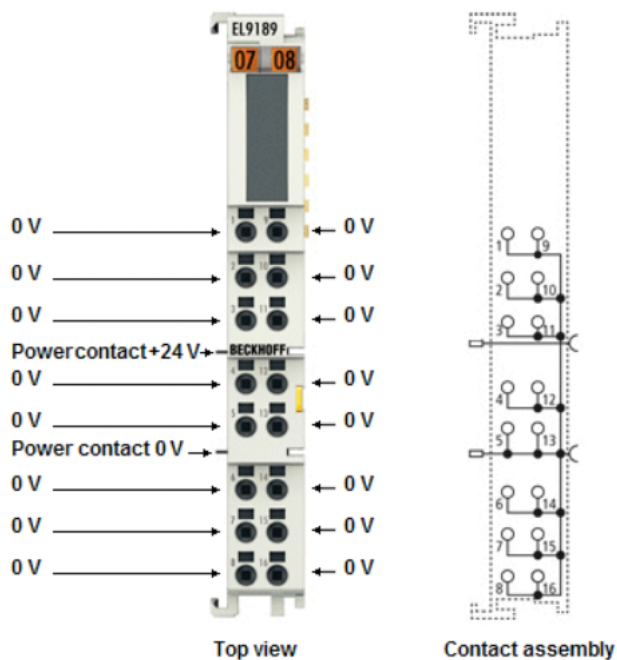
Zařízení EK1100 představuje kompaktní EtherCAT Klemme (kartu) určenou pro instalaci na DIN lištu v průmyslovém prostředí. Jeho hlavním cílem je zprostředkovat rychlou a spolehlivou komunikaci mezi EtherCAT sběrnici a různými periferními zařízeními či senzory v automatizačních a řídicích systémech.

Toto zařízení nabízí širokou paletu funkcí, které zahrnují vysokou přenosovou rychlost a nízkou latenci, kterou zaručuje právě EtherCAT protokol. V neposlední řadě zařízení nabízí kompaktní design, což umožňuje jeho instalaci i v omezených prostorech.

EK1100 umožňuje jednoduché rozšiřování průmyslových systémů díky možnosti přidání dalších EtherCAT Klemm pro propojení s více periferiemi. Kromě toho podporuje robustní průmyslový provoz díky pevné konstrukci, která je odolná vůči otřesům, vibracím a prachu. Tímto způsobem zařízení EK1100 představuje stěžejní prvek

pro rychlou a spolehlivou komunikaci a integraci periferních zařízení do průmyslových automatizačních a řídicích systémů.

2.3 EL9189



Obrázek 4: EL9189

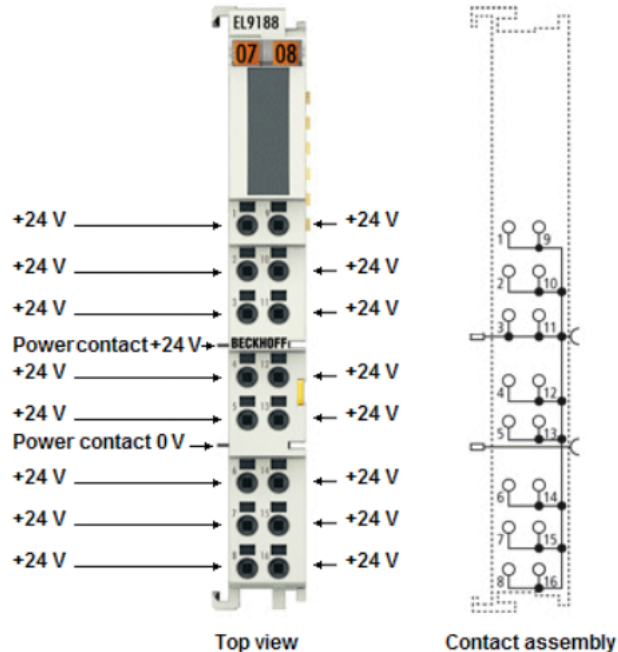
Zařízení EL9189 od společnosti Beckhoff je kompaktní EtherCAT I/O modul navržený pro průmyslové aplikace. Jeho hlavním záměrem je poskytovat spolehlivý a rychlý způsob řízení a monitorování výstupních signálů v průmyslových automatizačních systémech.

Tento modul je vybaven šestnácti nezávislými porty typu GND s vysokým rozlišením, což umožňuje přesné řízení různých aktuátorů a zařízení v reálném čase. Díky kompatibilitě s EtherCAT sběrnici je dosaženo nízké latence a vysoké přenosové rychlosti, což je klíčové pro řízení rychlých procesů.

EL9189 stejně jako následující moduly může být zacvaknutý k EK110 do jednoho bloku. Což zjednodušuje značně zapojení a snižuje potřebný počet vodičů. Takto spojený blok modulů lze namontovat celý na DIN lištu.

Svou odolnou konstrukcí je EL9189 připraven na náročné průmyslové prostředí, kde je vystaven otřesům, vibracím a prachu. To zaručuje spolehlivý provoz i v nejnáročnějších podmínkách.

2.4 EL9188

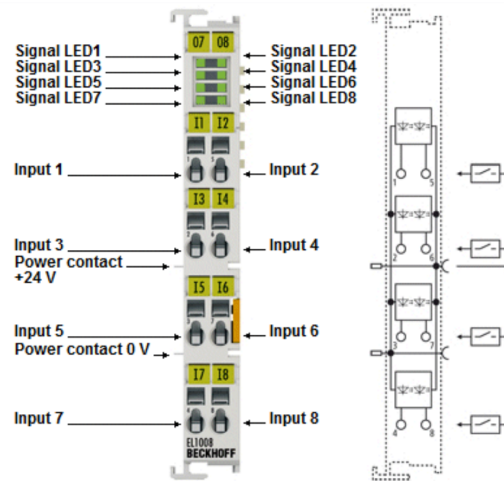


Obrázek 5: EL9188

Zařízení EL9188 od společnosti Beckhoff je kompaktní EtherCAT výstupní modul, který slouží k řízení a monitorování výstupních signálů v průmyslových automatizačních systémech. Jeho hlavním cílem je poskytnout spolehlivé a výkonné řešení pro řízení aktuátorů a periferií v reálném čase.

EL9188 disponuje šestnácti nezávislými porty s napájecím napětím + 24 V s vysokým rozlišením, což umožňuje přesné a individuální řízení různých aktuátorů nebo zařízení v průmyslovém prostředí. Podobně jako u zařízení EL9189, i u EL9188 je využívána EtherCAT sběrnice pro dosažení nízké latence a vysoké přenosové rychlosti, což je potřebné pro řízení dynamických procesů.

2.5 EL1008

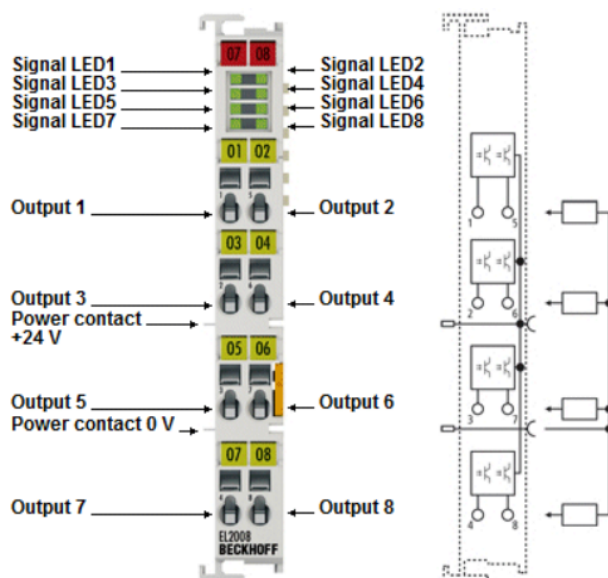


Obrázek 6: EL1008

EL1008 je kompaktní vstupní EtherCAT modul navržený s cílem zajišťovat spolehlivý a přesný sběr vstupních signálů v průmyslových automatizačních systémech. Tento modul je konstruován pro snadnou integraci do různých průmyslových aplikací, přičemž klade důraz na rychlou odezvu a vysokou přesnost.

S osmi digitálními vstupy nabízí EL1008 rozsáhlou možnost připojení a monitorování různých vstupních signálů, což je důležité pro efektivní řízení a sledování průmyslových procesů. Modul využívá EtherCAT komunikační protokol, což zaručuje nízkou latenci a vysokou rychlost datového přenosu.

2.6 EL2008

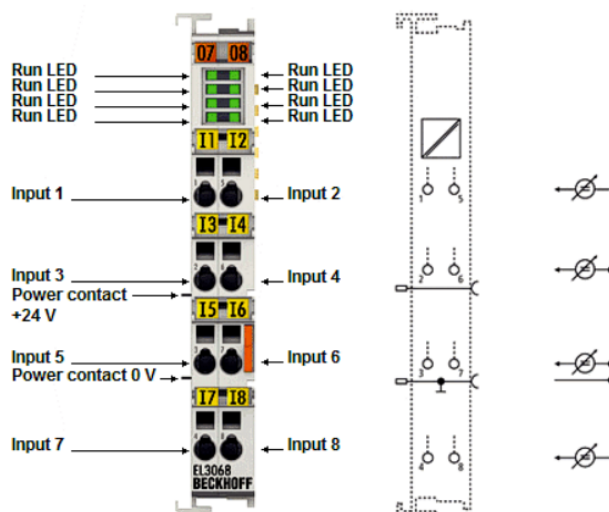


Obrázek 7: EL2008

Zařízení EL2008 je kompaktní výstupní EtherCAT modul, navržený s cílem zajišťovat spolehlivou a přesnou distribuci výstupních signálů v průmyslových automatizačních systémech. Tento modul je konstruován pro snadnou integraci do různých průmyslových aplikací, přičemž klade důraz na rychlou odezvu a vysokou přesnost.

EL2008 má k dispozici osm digitálních výstupních portů, což umožňuje připojení a monitorování různých vstupních signálů, což je důležité pro efektivní řízení a sledování průmyslových procesů. Modul využívá EtherCAT komunikační protokol, což zaručuje nízkou latenci a vysokou rychlost datového přenosu.

2.7 EL3068

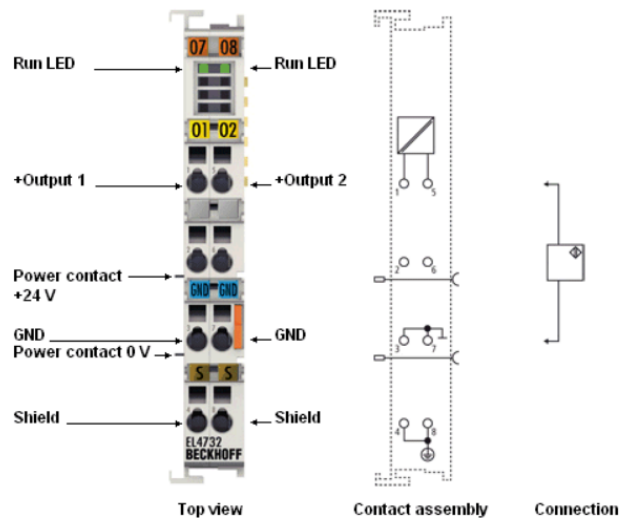


Obrázek 8: EL3068

EL3068 je vybaven osmi univerzálními analogovými vstupy. Informace je přenášena přes napětí o rozsahu 0 až 10V. Napětí je v modulu digitalizováno v rozsahu 12 bitů. Tento modul poskytuje vyšší flexibilitu ve sběru různých typů dat z průmyslových senzorů a zařízení.

Celkově je EL3068 výkonným vstupním modulem, který nabízí větší možnosti rozšíření a flexibilitu v sběru vstupních dat. Rozdíly v počtu vstupních kanálů a podporovaných signálů dělají z EL3068 vhodnou volbu pro aplikace, které vyžadují širokou škálu vstupních měření.

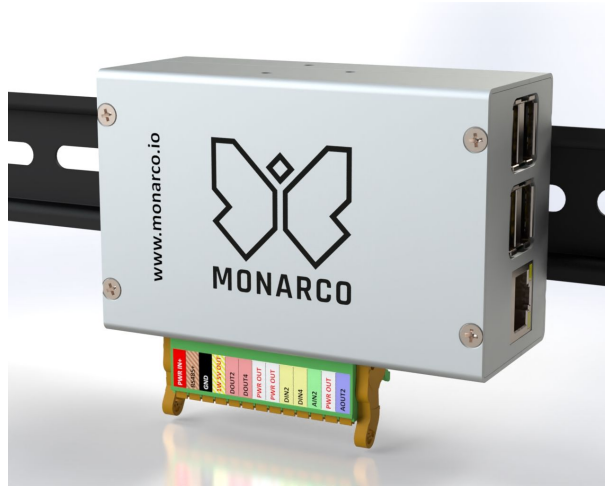
2.8 EL4732



Obrázek 9: EL4732

Zařízení EL4732 je kompaktní výstupní EtherCAT modul, navržený s cílem zajišťovat spolehlivou a přesnou distribuci výstupních signálů signálů v průmyslových automatizačních systémech. EL4732 je vybaven dvěma analogovými výstupy, které se skládají z datového portu, portu GND a portu Shield. Informace se přenáší - jako u EL3068 - přes napětí s tím rozdílem, že tento modul pracuje v rozsahu -10 až 10V.

2.9 Monarco



Obrázek 10: Monarco

Monarco nebo také Monarco HAT je zařízení určené původně pro Raspberry Pi, které slouží jako rozšiřující modul pro sběr dat a řízení průmyslových procesů. Jedná se o kompaktní řešení, které umožňuje propojit svět Raspberry Pi s průmyslovými senzory, aktuátory a dalšími periferiemi. Název "HAT" znamená "Hardware Attached on Top" a označuje zařízení, které je připevněno přímo na GPIO piny Raspberry Pi. Obdobně lze Monarco spárovat s periferiemi od Beckhoffu.

Některé vlastnosti a funkce Monarco HAT zahrnují:

1. **Univerzální Vstupy a Výstupy:** Monarco HAT je vybaven digitálními a analogovými vstupy a výstupy, což umožňuje sběr různých typů dat z průmyslových senzorů a aktuátorů. Tato flexibilita je užitečná pro širokou škálu průmyslových aplikací. Přenos informace realizuje napětí v rozsahu od 0 do 10V.
2. **Komunikace:** Modul podporuje komunikaci přes rozhraní Ethernet, což umožňuje přístup k datům a řízení zařízení v síti. To je klíčové pro sledování a řízení procesů na dálku.
3. **Průmyslová Odolnost:** Modul byl navržen s ohledem na průmyslovou odolnost, což zahrnuje odolnost proti otřesům, vibracím a prachu. To umožňuje jeho spolehlivý provoz i v náročném prostředí.

4. **Programovatelnost:** Monarco HAT může být programováno pomocí různých programovacích jazyků, jako je Python, nebo prostřednictvím nástrojů pro automatizaci, jako je například Rexygen.

Monarco bude použito pro realizaci regulátoru ve smyčce. Technické rozhraní v našem případě zajišťuje systém Rexygen.

3 Algoritmus pro tvorbu modelu

3.1 Stavový model

Nejprve je nutné sestavit stavový model systému určeného k řízení. K tomu lze využít fyzikální popis systému. Další možnou technikou je stanovení struktury modelu a provedení následné identifikace

Poté se je třeba stanovit vektor stavových proměnných \mathbf{x} . Stavové proměnné jsou nezávislé proměnné, které plně určují chování systému v čase. Je vhodné zvolit veličiny, které lze přímo měřit nebo pozorovat.

Popis systému upraven do tvaru stavových rovnic

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

3.2 Blokové schéma

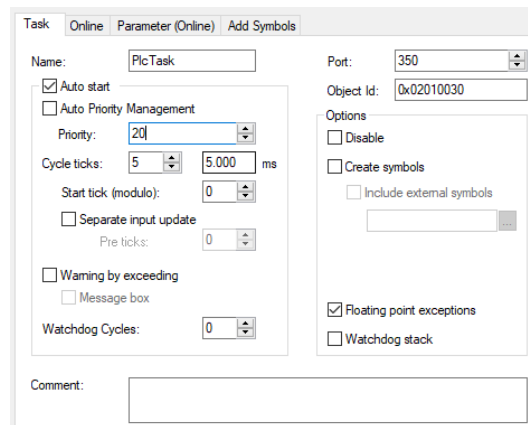
Na základě stavového modelu je vhodné sestavit blokové schéma. V TwinCATu nebo v Simulinku se pracuje s modelem v blokovém schématu. TwinCAT sice podporuje také formát strukturovaného textu, ale blokové schéma je přehlednější. Pro návrh model je silně doporučeno použít nejprve Simulinku. Modelování s bloky v Simulinku je snadé a přímočaré. Nejsme zde zatíženi hardwarovými nároky a je možné vytvořené schéma rychle otestovat. Nepatrně náročnější je modelování v Rexygenu, kde je třeba řešit tasky a vzorkovací periodu. Výhodou obou prostředí je, že nabízí téměř neomezené možnosti co se blokových schémat týče. Naproti tomu TwinCATovská bloková schémata jsou omezená v zapojení bloků a značně neintuitivní. Někdy je

výhodnější rozdělit schémata v TwinCATu na více vláken, a ve vzácných případech může být výhodnější dokonce použití strukturovaného textu. Navíc práce s TwinCATem vyžaduje také nastavení tasku s periodou vzorkování, vytvoření PLC projektu a mnoho dalších nutností. Ve výsledku je práce s TwinCATem náročná a vyžaduje určitou zkušenost a vizi, jak by měl výsledný model vypadat. Proto je vhodné model nejprve model navrhnout v Simulinku/Rexu a poté implementovat do TwinCATu.

3.3 Implementace do TwinCAT

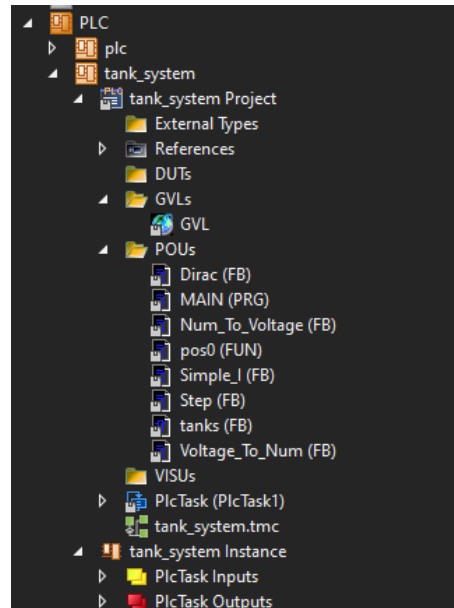
TwinCAT nabízí širokou škálu možností, jak sestavit model systému. Nejvíce doporučované jsou strukturovaný text nebo diagram funkčních bloků. V prvním případě se jedná o klasické programování ve skriptu, pouze se specifickým programovacím jazykem. Ve druhém případě mluvíme o propojování stromu funkčních bloků. Výraz „strom“ je zde použit záměrně, protože bloky v TwinCATu nelze zapojit do smyčky jako například v Simulinku. Přenos dat v místech bez spojnic se realizuje pomocí proměnných.

TwinCAT jakožto systém běžící v reálném čase je založen na tasku, který funguje na pevné vzorkovací periodě. Pro účely této práce byla tato perioda nastavena na 5 milisekund. To by mělo zajistit plynulý chod simulace blížící se spojitému modelu.

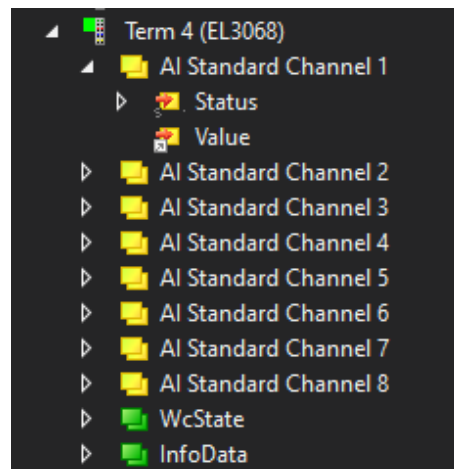


Do záložky PLC se umístí patřičný project, který se skládá z funkčních bloků (FB), funkcí (FC), z seznamu proměnných (GVL), popřípadě dalších komponent.

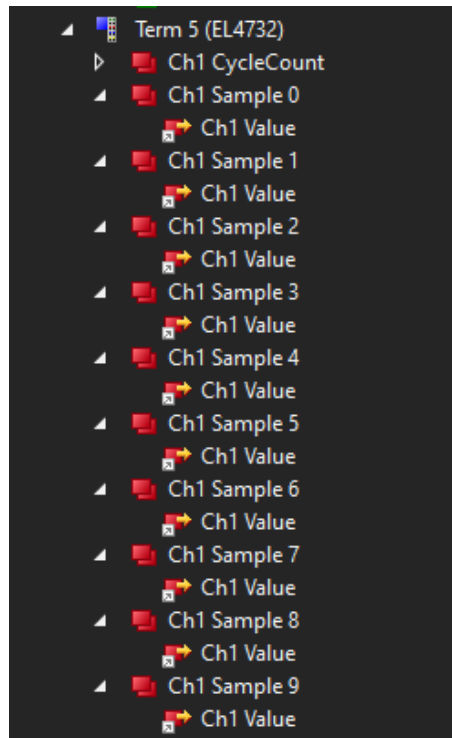
Vybrané proměnné pak v projektu plní funkce pro příjem a odeslání dat na vstupech a výstupech.



Terminál EL3068 slouží jako vstup do PLC zařízení. Rozhraní TwinCATu umožňuje snadné a efektivní zprostředkování komunikace projektu s periferiemi. Není třeba řešit manuální připojení a nastavení příslušných datových toků. Software sám rozpozná připojené zařízení a umožní potřebnou konfiguraci.



Obdobně jako terminál EL3068 slouží EL4732 pro komunikaci s externími zařízeními s tím rozdílem, že EL4732 vysílá výstupy z PLC zařízení.



3.4 Linearizace

Aby bylo možné systém řídit, je nejprve potřeba provést linearizaci modelu a následně pro něj navrhnout vhodný regulátor. Pro lineární aproximaci se nejčastěji používá Taylorův rozvoj. Zde je na místě upravit stavové rovnice do maticového tvaru

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (3)$$

nebo do přenosové funkce

$$\frac{y(s)}{u(s)} = F(s) \quad (4)$$

Na řízení lineárních systémů máme k dispozici široké spektrum nástrojů a formulí.

3.5 Návrh regulátoru

Regulátor je možné navrhnout více způsoby. Je možné využít ruční loop shaping. K tomu poslouží nejlépe Sisotool toolbox pro Matlab. Dále je doporučené využít možnosti skvělého programu na tvorbu regulátorů PidLab, popřípadě existuje nástroj H-infinity, pokud si vystačíme s PI regulátorem. Volba návrhových požadavků nám pomůže při výběru ideální platformy. Například pokud je středem zájmu rychle navržený regulátor na základě odezvy uzavřené smyčky, je nevhodnější Sisotool. Naproti tomu PidLab nabízí širokou škálu návrhových kritérií. Toto ocenění převážně zkušenější inženýři, kteří si dokáží vybrat nevhodnější kritérium pro daný případ.

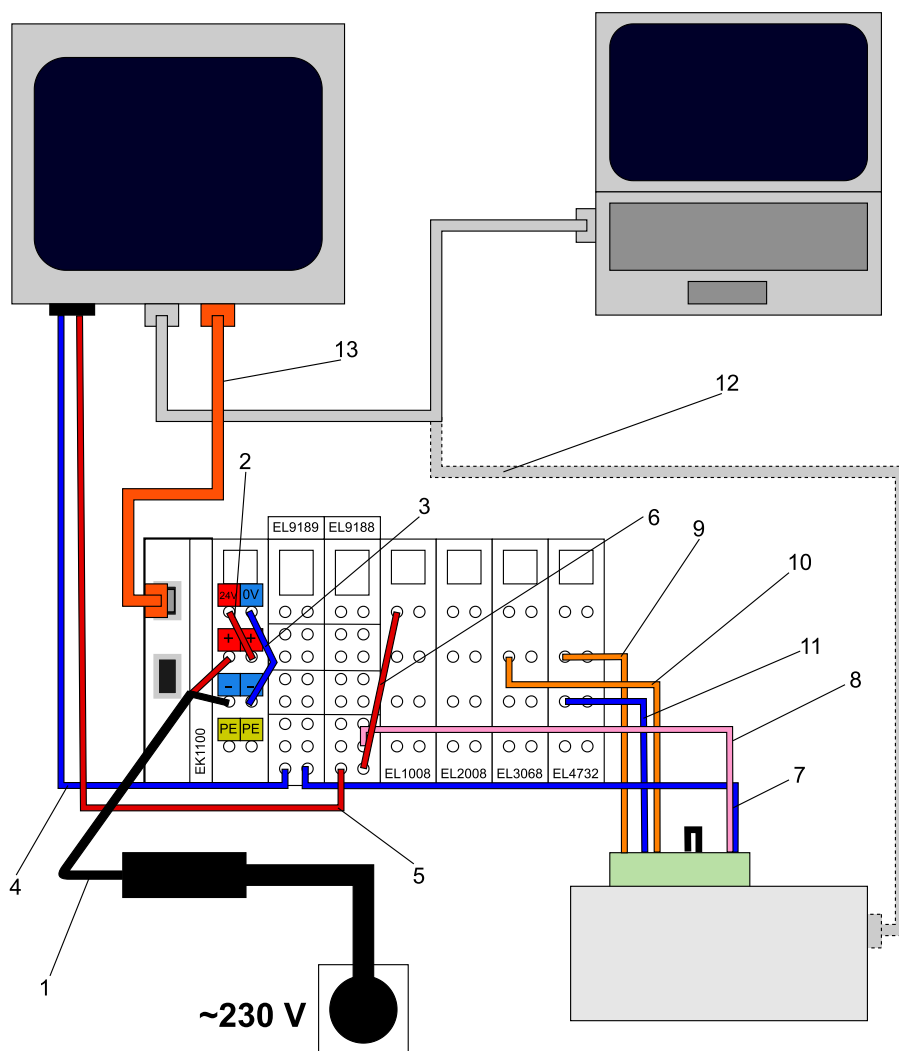
3.6 Implementace regulátoru do Monarca

Monarco používá systém Rexygen verze 2.50.10.12569 x64, díky čemuž je vytvoření regulátoru velmi jednoduché. K tomu stačí pouze Rex Studio odpovídající verze. Na samotný regulátor je použitý blok *PIDU*. Vstup a výstup se realizuje bloky *Signal connection or input* a *Signal source or output*. Lineární interpolace se používá k přepočtu napětí-číslo, číslo-napětí. Před výstup se umístí blok SAT pro omezení na minimální a maximální napětí.

Výpočty v Monarcu běží prostřednictvím tasku se vzorkovací periodou nastavenou na 5 milisekund stejně jako v TwinCATu.

3.7 Zapojení

Správné zapojení tvoří stěžejní část komunikace ve HIL smyčce. Nákres HILu je znázorněn na diagramu 11. Pro lepší orientaci jsou níže uvedeny popisky jednotlivých vodičů.



Obrázek 11: Zapojení Beckhoff-Monarca

1. Sběrnice EK1100 slouží pro napájení samotného PLC a Monarca. Na zdířky plus (červená) a mínus (černá) se přivede střídavé napětí ze sítě.
2. Propojení (červená) plus a napěťového kontaktu pro 24V.
3. Propojení (modrá) mínus a nulového vodiče.
4. Z portu 8 EL9189 je vyveden modrý nulový vodič do PLC.
5. Z portu 8 EL9188 je vyveden červený kladný napájecí vodič do PLC.

6. Červený napájecí vodič spojuje port 16 sběrnice EL9188 s portem 1 na EL1008.
7. Modrý nulový vodič propojí port 16 EL9189 s PWR GND portem Monarca.
8. Růžový vodič propojí port 15 na EL9188 s kladným napájecím portem Monarca PWR IN +.
9. Oranžový vodič posílá analogový signál z portu 1 na EL4732 do portu AIN1 na Monarcu.
10. Oranžový vodič přijímá analogový signál z portu AOOUT1 na Monarcu do portu 1 na EL3068.
11. Modrý vodič slouží pro uzemnění výstupu z EL4732. Vodič je zapojen do portu 3 na EL4732 a do portu GND na Monarcu.
12. Ethernet kabel je použit při konfiguraci Monarca nebo PLC.
13. EtherCAT kabel spojuje PLC a sběrnici EK1100.

3.8 Komunikace Beckhoff-Monarco

V komunikace PLC od Beckhoffu s Monarcem se vyskytuje problém ve formě napětí přenášejíci informaci. Terminál EL4732 používá výstupní napětí -10 až +10 voltů. Naproti tomu Monarco a terminál EL3068 používají 0 až +10 voltů. V přenosu dat Monarco-PLC tedy není žádný problém, v případě PLC-Monarco je nutné zabránit vysílání záporného napětí na straně TwinCATu, které by mohlo poškodit Monarco

Co se týče AD/DA převodníku, je o vše postaráno jak na straně Beckhoffu, tak na straně Monarca.

Díky systém REXYGEN, je ovládání výstupního napětí je v Monarcu velmi jednoduché. Docílíme toho tak, že do modelu umístíme blok *Signal source or output*. Do bloku zadáváme požadované napětí. Před výstupní blok byly umístěny bloky *Linear interpolation* a *Saturation with variable limits*. Interpolace přepočte zásah regulátoru na odpovídající hodnotu napětí. Blok saturace pak ošetří případné překročení mezí napětí 0 až 10 V. Numerické meze akčního zásahu u_1 , u_2 je vhodné volit

tak, aby se výstupní napětí pohybovalo v rozmezí zhruba od 1 do 9 V. Takto bude docíleno 10% rezervy na každé straně a nebude docházet ke ztrátě informace v simulaci. Zároveň je vhodné toto pracovní pásmo využít co nejvíce, aby hodnoty akčního zásahu byly rozeznatelné i přes působení šumu. Jinými slovy rozdílné hodnoty akčního zásahu musí být rozeznatelné i na výstupním napětí. Blok lineární interpolace se používá také na vstupu, kde převádí vstupní napětí na numerické hodnoty.

TwinCAT naproti tomu používá - prostřednictvím modulu EL4732 - 16 bitový integer pro reprezentaci výstupního napětí. Odpovídající meze napětí a tohoto datového typu jsou zobrazeny v tabulce 2.

	16-bit Integer	I/O Napětí
Horní mez	32767	+10 V
Dolní mez	-32767	-10 V

Tabulka 2: Meze 16-bit integeru a k nim odpovídající napětíT.

Jiné než celočíselné hodnoty v rozsahu -32 767 až 32 767 TwinCAT odmítne zapsat do analogového výstupu. Abychom docílili převodu z reálných čísel, byly do TwinCATu implementovány funkční bloky *Num_To_Voltage()* a *Voltage_To_Num()*. Modul EL3068, který zprostředkovává vstupní signál, se chová stejně jako EL4732 pouze s tím rozdílem, že přijímá napětí v rozsahu 0V až 10V.

3.9 Funkční bloky a funkce

Pro potřeby této bakalářské práce byl vytvořeny vlastní funkční bloky, které usnadní implementaci matematických funkcí použitých při modelování systémů. Jedná se především o funkce vektorů, které TwinCAT nemá zabudované, nebo například jednoduchého integrátoru.

3.9.1 Jednoduchý integrátor

Pro TwinCAT existuje knihovna T2 Controller Toolbox, která přidává do systému blok integrátoru zvaný *FB_CTRL_I*. Pro účely této bakalářské práce byl však napsán

vlastní integrační blok nazvaný *simple_I*. Motivace k napsání speciálního bloku i přestože existuje knihovní integrátor byla asi takováto:

V Simulinku je například zaveden SISO blok integrátor s jedním významným parametrem - počáteční podmínky. V Rexu jsou k dispozici dva, jednoduchý integrátor *SINT* a rozšířený integrátor *INTE*. Tento systém tedy nabízí jak jednoduchost, tak plnou funkcionalitu. Totéž však nezle tvrdit o TwinCATu. Zde je k dispozici funkční blok *FB_CTRL_I*, který je součástí knihovny *T2_Controller_Toolbox*. Tento toolbox je však nutné pro každý nový projekt dodatečně importovat. Dále velkým, časově náročným problémem tohoto bloku je jeho zdlouhavé uvedení do provozu. Je to dáno množstvím a typem jeho vstupů a také výstupů. Jedná se například o manuální vstup, přepínače do manuálního režimu, přepínač pracovních módů bloku, výstupy chybových hlášení a v neposlední řadě datová struktura s parametry integrátoru. Tato struktura je pracná na implementaci sama o sobě. Ačkoliv tyto náležitosti mají své využití, ba jsou dokonce vyžadované pro bezpečné provoz v průmyslovém odvětví, pro školní úlohy představují přílišnou zátěž. Ve výsledku je *FB_CTRL_I* oproti *INTE* zhruba třikrát náročnější na implementaci.

Vlastní integrátor *simple_I* byl navržen tak, aby byl co nejjednodušší s minimálním počtem parametrů a nároků na implementaci.

Výstup *simple_I* je závislý na vstupu $u(t)$, počáteční podmínce y_o a vzorkovací periodě T , kterou je obtížné jinak přechíst ze softwaru bez použití knihovních funkcí, jejichž použití je v protikladu s ideou jednoduchosti *simple_I*. Integrace je vypočtena lichoběžníkovou aproximací.

$$\text{Simple_I}(z) = \frac{T}{2} \frac{z + 1}{z - 1} \quad (5)$$

3.9.2 Aproximace Diracova pulzu

Funkční blok *Dirac* aproximuje chování Diracovy $\delta(t)$ funkce. Používá k tomu obdélníkový pulz, kdy v čase 0.5 sekundy se nastaví výstupní hodnota na 200. Následující krok - tedy v čase 0.505 sekundy - je výstup opět nastaven na nulu. Průběh

výstupního signálu je znázorněn v diagramu 29.

3.9.3 Step

Funkční blok *Step* simuluje chování jednotkového skoku. V čase 0.5 sekundy se výstupní hodnota skokově změní z nuly na 1.

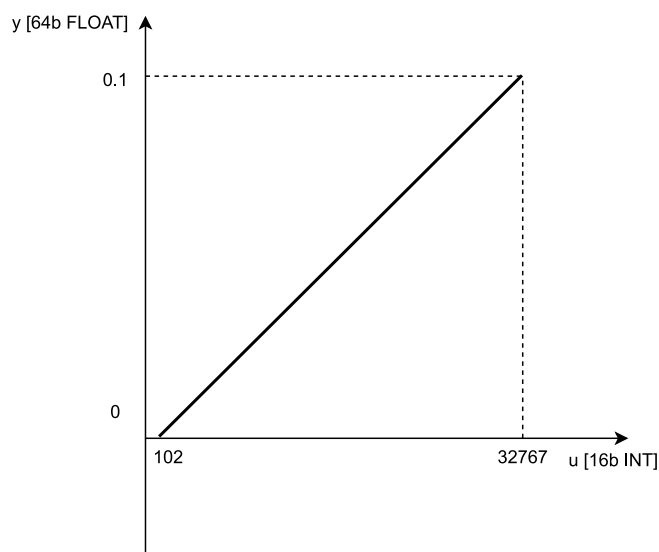
3.9.4 Jen nezáporná čísla

Funkce *pos0* vrací jen kladná čísla a nulu. Tuto funkci používáme pokud je žádáno zamezit výskytu záporných hodnot v modelu.

$$f(x) = \begin{cases} x : x \geq 0 \\ 0 : x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.9.5 Převod napětí-číslo

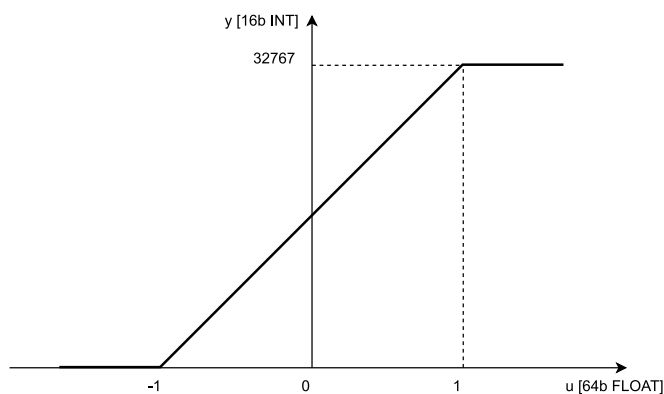
Funkce *Voltage_To_Num* převádí napětí přijaté z Monarca na reálné číslo. V rámci TwinCATu se vstupní napětí převádí automaticky na 16 bitový integer. Meze vstupu 0 a 32767 odpovídají po řadě napětí 0V a 10V. K přepočtu se používá lineární interpolace zobrazená na obrázku 12. Spodní hranice u byla posunutá z 0 na 102, protože nulový výstup z Monarca generuje - vlivem šumu - hodnotu přibližně 102 v TwinCATu.



Obrázek 12: Převod napětí-číslo

3.9.6 Převod číslo-napětí

Funkce *Num_To_Voltage* převádí reálné číslo z TwinCATu na výstupní napětí. Stejně jako u vstupního převodu i zde je výstupní napětí reprezentováno 16 bitovým intigerem. Rozdíl je v tom, že modul s výstupy EL4732 pracuje v rozsahu -10V až 10V, což odpovídá číslům -32767 a 32767. Záporného napětí na výstupu je ale třeba se vyhnout, neboť Monarco přijímá jen kladná napětí. Přepočtení napětí je realizováno lineární interpolací s omezením na spodní a horní hranici (vizte 13).



Obrázek 13: Převod číslo-napětí

3.9.7 Vektorový integrátor

Vektorový integrátor *simple_Vec_I* je v zásadě rozšíření *Simple_I* s tím rozdílem, že vstupem a výstupem je vektor (pole) dimenze tři. Integrace se provádí po složkách.

$$\frac{y_i(z)}{u_i(z)} = \frac{T z + 1}{2 z - 1} \quad (7)$$

3.9.8 Změna velikosti vektoru

Funkce s názvem *VecGain* reprezentuje násobení vektoru dimenze 3 (první vstup), skalární hodnotou (druhý vstup).

$$f(\mathbf{u}, x) = x\mathbf{u} \quad (8)$$

3.9.9 Maticové násobení

Funkce *MatMul* provádí násobení matice (první vstup) vektorem (druhý vstup) zprava. Matice je zadaná ve formě dvojrozměrného pole 3×3 . Vstupní vektor má dimenzi 3.

$$f(\mathbf{M}, \mathbf{v}) = \mathbf{M}\mathbf{v} \quad (9)$$

3.9.10 Vektorový součin

Funkce *CrossMul* vypočte vektorový součin ze dvou vstupních vektorů, obou o délce 3.

$$f(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{u} \times \mathbf{v} = \mathbf{i} \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} + \mathbf{j} \begin{vmatrix} u_3 & u_1 \\ v_3 & v_1 \end{vmatrix} + \mathbf{k} \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} \quad (10)$$

3.9.11 Vektorový součet

Funkce *VecAdd* vypočte součet dvou vektorů o délce 3 na vstupech.

$$f(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{u} + \mathbf{v} \quad (11)$$

3.9.12 Vektorový rozdíl

Funkce *VecSub* počítá rozdíl dvou vektorů dimenze 3 na vstupech.

$$f(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{u} - \mathbf{v} \quad (12)$$

3.9.13 Vektorový rozdíl se třemi vstupy

Funkce *VecSub3* obdobně jako *VecSub* počítá rozdíl vstupních vektorů s tím rozdílem, že na vstupu jsou tři vektory dimenze 3. Od prvního vstupu je odečten druhý a třetí vektor.

$$f(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) = \mathbf{u} - \mathbf{v} - \mathbf{w} \quad (13)$$

3.9.14 Délka Vektoru

Funkce *VecLen* přiřadí vektoru jeho délku. Výstupem této funkce na rozdíl od ostatních vektorových funkcí je skalární číslo.

$$f(\mathbf{u}) = \|\mathbf{u}\| \quad (14)$$

3.9.15 Normování vektoru

Funkce *Normalize* přeškáluje vstupní vektor tak, aby jeho délka byla rovná jedné. Účelem funkce je zajistit, aby jednotkovému vektoru byla ponechána jeho délka i při numerických simulacích.

$$f(\mathbf{u}) = \frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|} \quad (15)$$

4 Vybrané modely

4.1 Stabilizace satelitu

Tento systém se vyskytuje v předmětu Nelineární systémy (NS). Jedná se o jeden z úkolů zadávaných v rámci zápočtové práce. Účelem modelu je na něm vyzkoušet postupy a výpočty používané v předmětu NS. To jest nalézt rovnovážné body a ověřit jejich stability ve smyslu podle Lyapunovy teorie stability. Dále za pomoci linearizace se určí typy rovnovážných stavů.

Systém byl vybrán pro aplikaci v TwinCATu, protože je popsán diferenciálními vektorovými rovnicemi. TwinCAT na rozdíl od Simulinku v základu nepodporuje práci s vektory jako jednotlivými signály. Umožňuje však použít datový typ pole.

Zadání zní: Satelit s momentovou maticí setrvačnosti \mathbf{J} rotuje kolem své osy s vektorem úhlové rychlosti $\boldsymbol{\omega}$. Na satelitu je umístěná anténa, jejíž směr udává jednotkový vektor \mathbf{b} , který zůstává neměnný. Na povrchu Země je umístěna anténa s proměnným směrovým vektorem \mathbf{d} . Systém je popsán následujícími rovnicemi.

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{u} \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{d}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b} \quad (17)$$

Úkolem je nasměrovat pozemskou anténu \mathbf{d} a anténu na satelitu \mathbf{b} do jednoho směru a zároveň antény musí mířit vzájemně na sebe, tedy musí platit $\mathbf{d} = -\mathbf{b}$.

Vektor řízení \mathbf{u} je pro tuto úlohy nastaven do tvaru

$$\mathbf{u} = -\alpha\boldsymbol{\omega} + \mathbf{d} \times \mathbf{b}$$

Po dosazení za \mathbf{u} do rovnice 16 dostáváme kompletní popis satelitu

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} - \alpha\boldsymbol{\omega} + \mathbf{d} \times \mathbf{b} \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{d}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b} \quad (19)$$

Poloha satelitu je závislá na jeho setrvačnosti a řízení \mathbf{u} a poloha zemské antény závisí na úhlové rychlosti satelitu a směru antény satelitu.

Je možné spočítat rovnovážné stavy systému, položením rovnic 18 a 19 rovno nulovému vektoru. Dále je potřeba znát vektorovou algebru a Lyapunovu teorii stability, aby bylo možné ověřit, že je systém opravdu stabilní. S těmito nástroji vychází, že systém je stabilní a právě se dvěma rovnovážnými stavy $[\boldsymbol{\omega}_0, \mathbf{d}_0]^T = [\mathbf{0}, \pm \mathbf{b}]^T$. Použití Lyapununovy teorie zde nebylo uvedeno, protože není relevantní pro tuto bakalářskou práci. Spokojíme se pouze s tvrzením, že systém je stabilní v těchto rovnovážných stavech.

Pozorováním chování systému je možné dojít k závěru, že stanovené řízení \mathbf{u} zabrání, aby stav neskončil ve stavu $\mathbf{d}_0 = \mathbf{b}$, ale ve stavu $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{b}$. Jinými slovy rovnovážný stav $\mathbf{d}_0 = +\mathbf{b}$ je nestabilní a $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{b}$ je stabilní.

V této práci byl systém satelitu otestován pro pět různých sad počátečních podmínek. Zde bylo použito pouze prostředí TwinCAT a samotné PLC bez nutnosti dalších externích zařízení.

Modelové parametry byly pro testování zvoleny následovně.

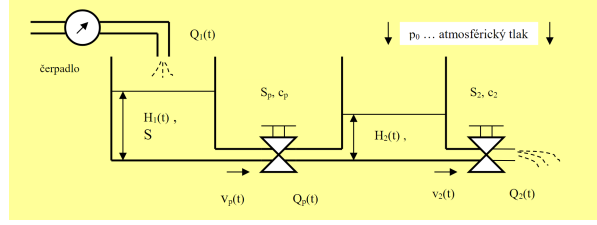
$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\alpha = 10 \quad (21)$$

$$\mathbf{b} = \frac{1}{\sqrt{14}} [1, 2, 3]^T \quad (22)$$

4.2 Systém dvou nádrží

Tento systém pochází ze zadání semestrální práce v předmětu Lineární systémy 1. Model slouží jako demonstrativní přesto jednoduchý systém, na kterém si lze osvojit základy teorie lineárních systémů. Úkolem je systému najít vhodný model a poté provést jeho linearizaci. Dále je třeba k modelu najít vhodný regulátor.



Obrázek 14: Spojené nádrže

Model systému lze sestavit podle zákonů hydrostatiky. Zde V_i značí objem nádrže $i \in \{1, 2\}$, H_i značí výšky hladiny v dané nádrži a výstupy systému. Q_1 je přítok do nádrže 1 a zároveň vstup do systému. Q_p je symbol průtoku z první do druhé nádrže. Q_2 je výtok ze druhé nádrže. Hustota vody je reprezentovaná písmenem ρ .

$$\dot{V}_1 = S\dot{H}_1 = Q_1 - Q_p \quad (23)$$

$$\dot{V}_2 = S\dot{H}_2 = Q_p - Q_2 \quad (24)$$

$$Q_p = c_p S_p v_p \quad (25)$$

$$Q_2 = c_2 S_2 v_2 \quad (26)$$

$$p_0 + \rho g H_1 = p_0 + \rho g H_2 + 0.5 \rho v_p^2 = \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad (27)$$

$$p_0 + \rho g H_2 = p_0 + 0.5 \rho v_2^2 \quad (28)$$

$$v_2 = \sqrt{2gH_2} \quad (29)$$

Úpravou rovnic dostáváme výsledný model o dvou nelineárních diferenciálních rovnicích.

$$\dot{H}_1 = \frac{Q_1}{S} - \frac{c_p S_p \sqrt{2g} \sqrt{H_1 - H_2}}{S} \quad (30)$$

$$\dot{H}_2 = \frac{c_p S_p \sqrt{2g} \sqrt{H_1 - H_2}}{S} - \frac{c_2 S_2 \sqrt{2g} \sqrt{H_2}}{S} \quad (31)$$

Nedílnou součástí teorie řízení je stanovení pracovního bodu pro hladiny nádrží

H_{10} , H_{20} a přítoku Q_{10} . Parametry modelu byly zvoleny následovně.

$$S = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (32)$$

$$c_p = c_2 = 0.6 \quad (33)$$

$$Q_{10} = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (34)$$

$$H_{10} = 0.1 \text{ m} \quad (35)$$

$$H_{20} = 0.06 \text{ m} \quad (36)$$

$$(37)$$

Nyní je možné stanovit, jaké mají být průřezy spojovacích trubic S_p a S_2 , aby bylo docíleno rovnovážného stavu.

$$S_p = \frac{Q_{10}}{c_p \sqrt{2g} \sqrt{H_{10} - H_{20}}} = 2.822 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (38)$$

$$S_2 = \frac{Q_{10}}{c_2 \sqrt{2g} \sqrt{H_{20}}} = 2.3042 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (39)$$

Numerické parametry lze přepočítat na tři konstanty p_1 , p_2 a p_3 .

$$p_1 = \frac{c_p S_p \sqrt{2g}}{S} = 0.3 \quad (40)$$

$$p_2 = \frac{c_2 S_2 \sqrt{2g}}{S} = 0.2449 \quad (41)$$

$$p_3 = \frac{1}{S} = 400 \quad (42)$$

Takto se značně zjednoduší zápis a implementace modelu do numerických solverů.

$$\dot{H}_1 = p_3 Q_1 - p_1 \sqrt{H_1 - H_2} \quad (43)$$

$$\dot{H}_2 = p_1 \sqrt{H_1 - H_2} - p_2 \sqrt{H_2} \quad (44)$$

Aby bylo možné nalézt vhodný regulátor, byl stanoven linearizovaný model sys-

tému

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_3 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (45)$$

který se skládá z nových stavových souřadnic x_1 a x_2 definovaných jako odchylkové proměnné od rovnovážného stavu.

$$x_1 = H_1 - H_{10} \quad (46)$$

$$x_2 = H_2 - H_{20} \quad (47)$$

$$u = Q_1 - Q_{10} \quad (48)$$

$$a_{11} = - \frac{p_1}{2\sqrt{H_{10} - H_{20}}} \quad (49)$$

$$a_{12} = - a_{11} \quad (50)$$

$$a_{21} = a_{11} \quad (51)$$

$$a_{22} = a_{11} - \frac{p_3}{\sqrt{H_{20}}} \quad (52)$$

Z linearizovaného modelu lze snadno spočítat přenosové funkce pro hladinu 1 $F_1(s)$ a pro hladinu 2 $F_2(s)$.

$$F_1(s) = \frac{400s + 6.535 \cdot 10^5}{s^2 + 1634s + 1225} \quad (53)$$

$$F_2(s) = \frac{300}{s^2 + 1634s + 1225} \quad (54)$$

5 Testování a srovnání modelů

5.1 Princi testování

Idea pro srovnání TwinCATovského a Simulinkového modelu je následující. Byly provedeny testy nejprve modelů v TwinCATu a poté modelů v Simulinku. Více se

oběma variantám budeme věnovat níže.

Důležitým bodem je práce s časem. TwinCAT jakožto real-time systém využívá kvantování času po konstantním kroku. Naproti tomu Simulink může pracovat jak s pevným, tak s proměnným krokem a pro obě varianty má k dispozici širokou škálu solverů. V rámci této práce byl středem zájmu spojité modely, protože zaručují velmi přesné výsledky.

Výstupní data z TwinCATu budou společně s daty ze Simulinku porovnána skrze matlabovský skript. Aby to bylo srovnání co nejjednodušší, upravíme výstupní signály v Simulinku *To Workspace* do stavu s pevným krokem. Takto budeme mít jinak spojité simulace, avšak vzorkované v rovnoměrně rozložených okamžicích.

Průběhy odpovídajících veličin z obou modelů byly zaneseny do stejného grafu pro snadnější porovnání. Pro každou zkoumanou veličinu bylo vypočteno rozdílové kritérium ISE (Integral Square Error) v diskrétní formě

$$\text{ISE} = T \sum_k \frac{\Delta^2(k+1) + \Delta^2(k)}{2} \quad (55)$$

Zde $T=0.005$ značí periodu vzorkování a $\Delta(k)$ rozdíl mezi daty v TwinCATu a v Simulinku v k -tém kroku. Pro vektorové proměnné bylo použito ISE ve tvaru

$$\text{ISE} = T \sum_k \frac{\|\Delta(k+1)\|^2 + \|\Delta(k)\|^2}{2} \quad (56)$$

5.2 Testování modelů satelitu

U úlohy zaměřené na stabilizaci satelitu je zkoumaná pouze stabilita systému. Bylo tedy provedeno několik testů pro různé počáteční podmínky. První z nich byla záměrně zvolena do nestabilního rovnovážného stavu. Obdobně je nastavená třetí počáteční podmínka, také v nestabilní stavu $\mathbf{d} = -\mathbf{b}$, ale s nenulovým vektorem úhlové rychlosti. V prvním případě očekáváme setrvání v klidovém stavu, ve druhém vychýlení do stabilního rovnovážného bodu. Zbylé tři počáteční podmínky jsou zvoleny nahodile.

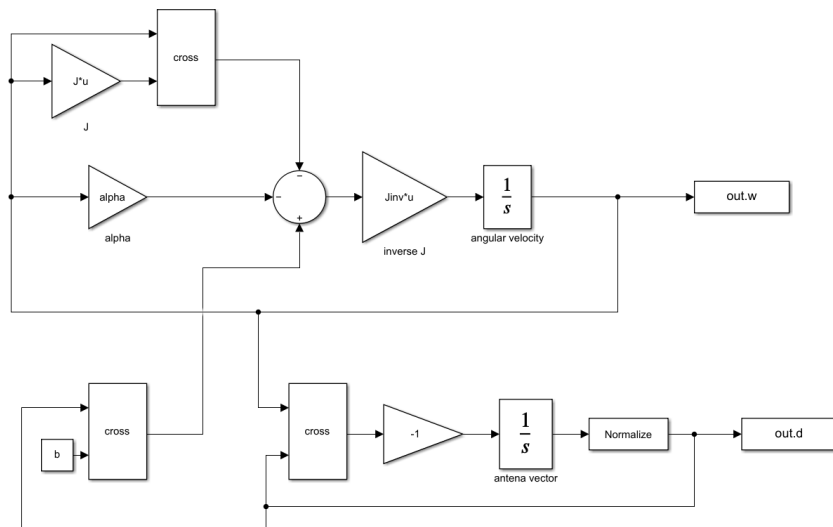
	ω_0
1	$[0, 0, 0]^T$
2	$[10, 10, 10]^T$
3	$[0, 0, 10]^T$
4	$[10, -10, -10]^T$
5	$[-10, 10, -10]^T$

Tabulka 3: Počáteční úhlové rychlosti ω_0 .

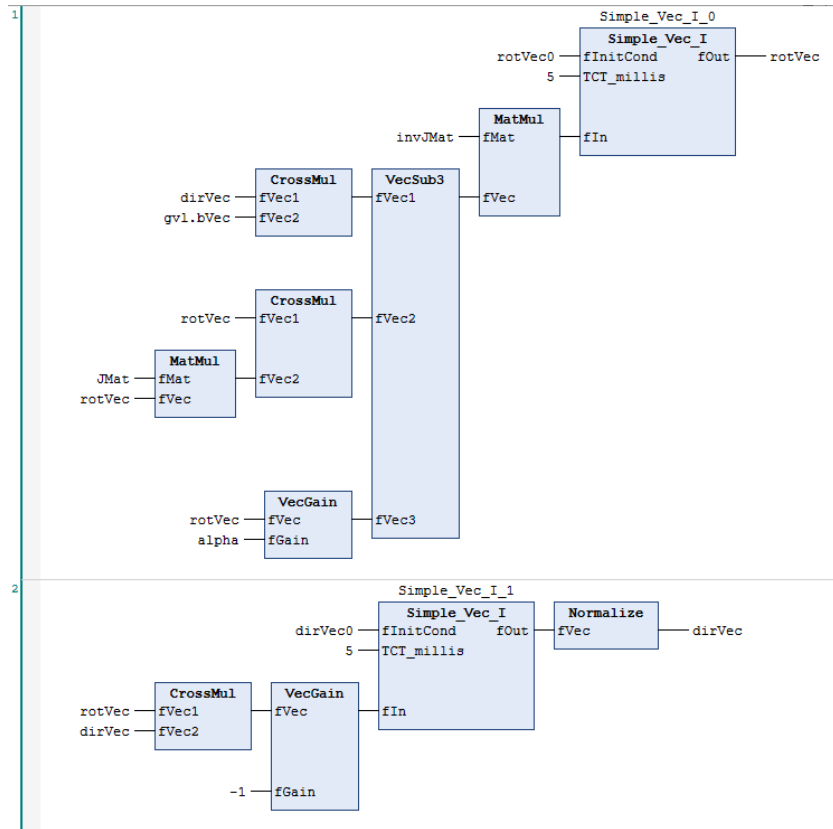
	d_0
1	$[1, 2, 3]^T$
2	$[-3, -2, -1]^T$
3	$[1, 2, 3]^T$
4	$[-7, 1, 5]^T$
5	$[4, -8, 3]^T$

Tabulka 4: Počáteční směrové vektory d_0 .

Zapojení blokových schémat je uvedeno níže na diagramech 15 a 16. Rozdíly mezi modelem v Simulinku a TwiCATu jsou markantní. Nejedná se jen o design modelů, ale především je především stromová struktura v TwinCATu, který neumožňuje zapojení do smyčky. Namísto spojnic je tedy smyčka uzavřena pomocí proměnných *rotVec* a *dirVec*. V případě satelitu jsou použita dvě vlákna, první pro rovnici 18 a druhé pro rovnici 19.



Obrázek 15: Model satelitu v Simulinku.



Obrázek 16: Model satelitu v TwinCATu.

5.3 Testování modelů spojených nádrží

Pro model spojených nádrží budou provedeny numerické testy různého rázu: odezva na Diracův pulz, odezva na jednotkový skok na vstupu. Dále testy v uzavřené smyčce s regulátorem $C(s)$ jsou: Systémový test pro měnící se referenční hodnotu w uzavřené smyčky, test zvládnutí skokové poruchy na vstupním přítoku a skokové poruchy měření výstupu první hladiny.

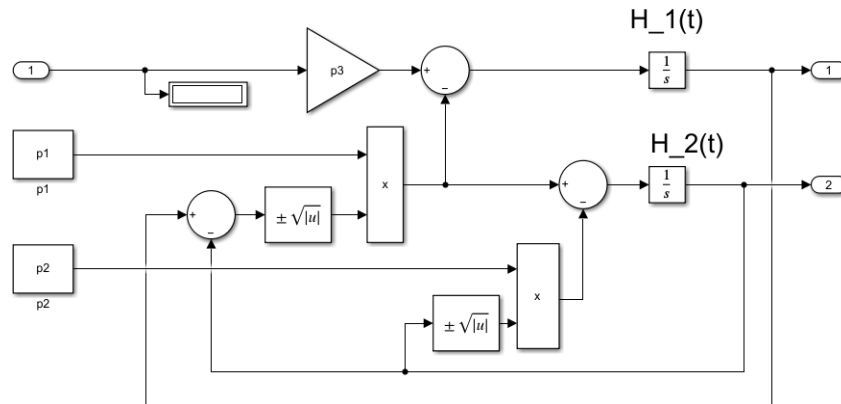
Řízení bude aplikováno ze vstupu u (přítok do nádrže 1) na výstup/stav y_1/x_1 (hladina v nádrži 1). Protože linearizovaný model obsahuje hodnoty ustáleného stavu H_{10} a H_{20} a regulátor $C(s)$ je vhodný pro tento systém, bude tak zajištěno i řízení hladiny x_2 . Alespoň podle nástroje Sisotool by tento regulátor měl zajistit rychlost regulace do jedné vteřiny a také by si měl poradit jak se skokovou poruchou na vstupním přítoku, tak na chybě měření hladiny jedna.

Po několika pokusech, bylo dosaženo závěru, že pro řízení hladiny v nádrži 1 postačí jednoduchý PI regulátor.

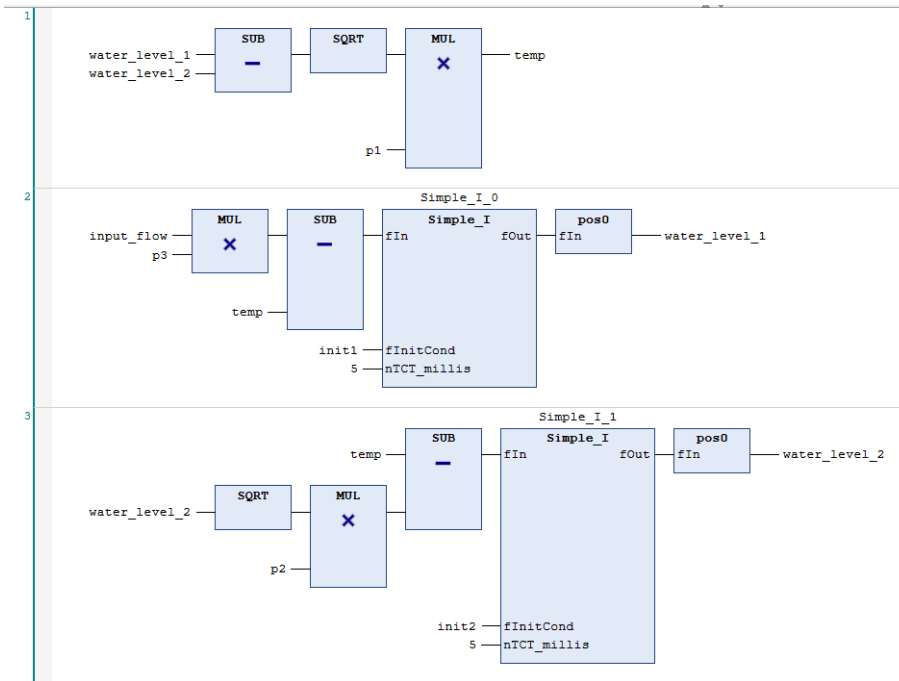
$$C(s) = 1 + \frac{1}{s} \quad (57)$$

$$(58)$$

Níže jsou k vidění schémata modelů spojených nádrží. Obdobně jako v případě satelitu je simulinkovská varianta přehlednější a jednodušší. V rámci TwinCATu jsou tentokrát použita vlákna tři. Oddělením společné části se zkrátila délka zbylých dvou vláken. Pro srovnání je v diagramu 18 použit původní design bloku *simple_I* se vstupním portem nahoře nikoliv dole jako tomu je v diagramu 16, přičemž dochází zde ke zbytečnému prodloužení bloku a plýtvání drahocenným místem na displeji.



Obrázek 17: Model spojených nádrží v Simulinku.



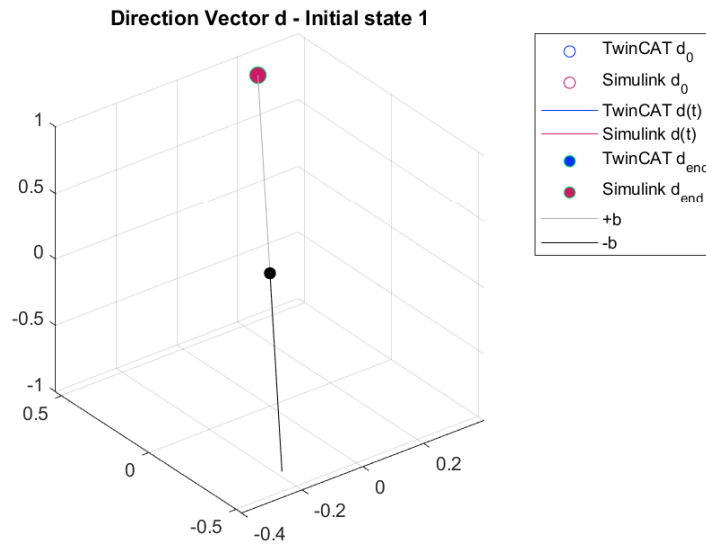
Obrázek 18: Model spojených nádrží v TwinCATu.

6 Výsledky

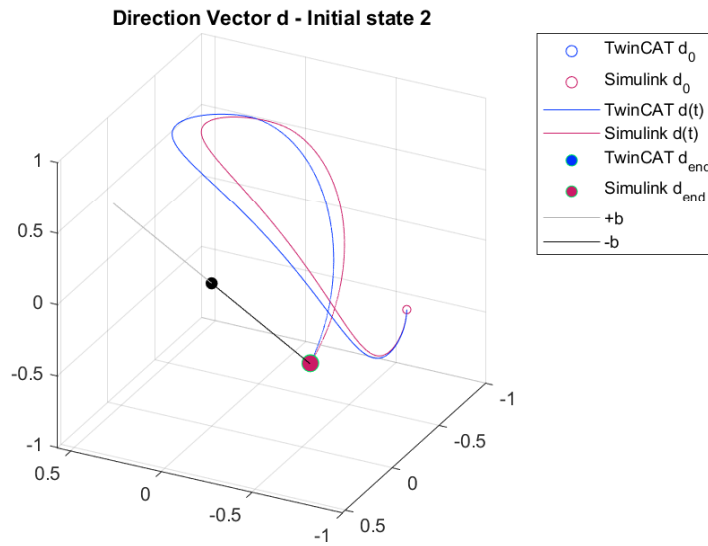
6.1 Výsledky modelu satelitu

Výstupem modelů satelitu jsou diagramy průběhu vektorů \mathbf{d} a $\boldsymbol{\omega}$ pro počáteční podmínky v tabulkách 3 a 4. Po nahlédnutí do výsledků můžeme předpokládat, že navržený systém je opravdu stabilní s rovnovážnými stavy $\mathbf{d} = \pm \mathbf{b}$, $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$.

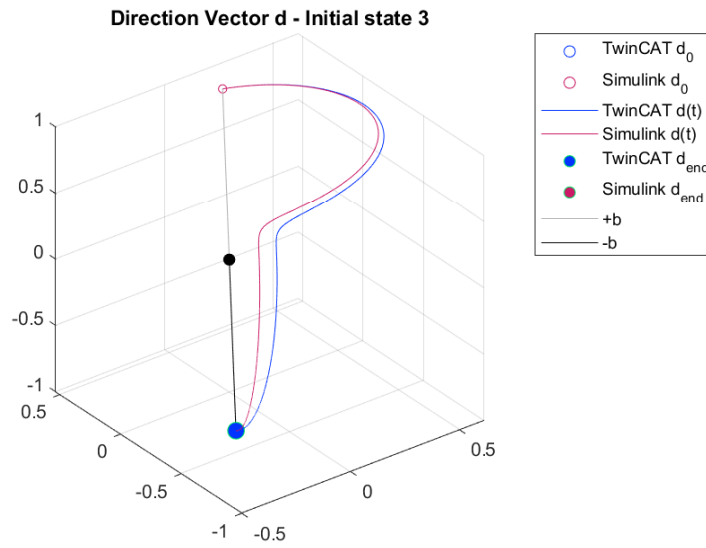
Přestože průběhy obou modelů jsou zdánlivě podobné, bystrý pozorovat si všimne, že křivky na obrázcích 19, 20, 21, 22 a 23 nejsou totožné. A nejedná se jen o hrubší vzorkování Simulinku, kde se solver rozhodl použít v průměru delší krok. Modely se liší ale důvod proč se tomu tak děje, nebyl odhalen.



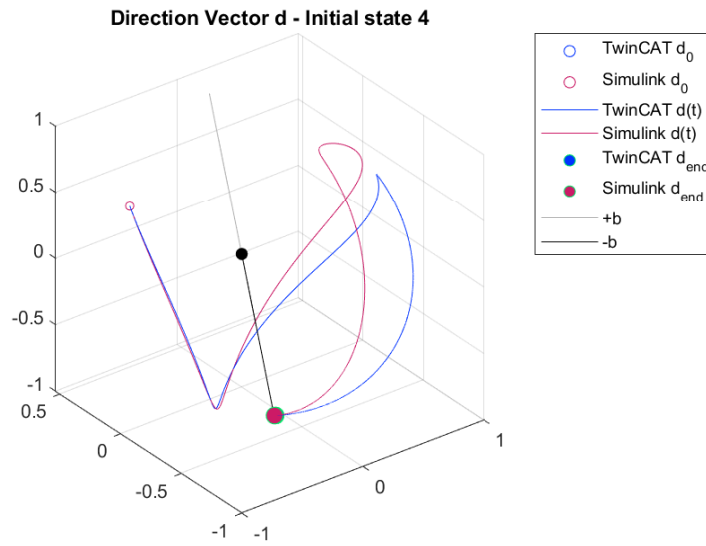
Obrázek 19: Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{b}$, $\boldsymbol{\omega}_0 = \mathbf{0}$.



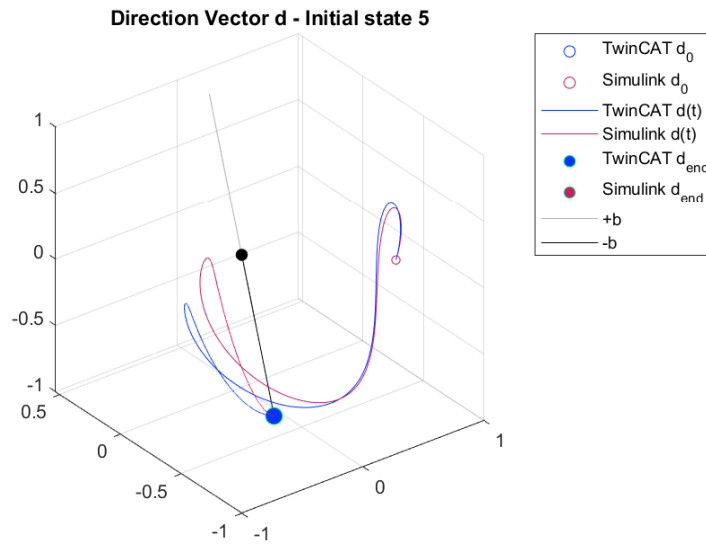
Obrázek 20: Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [-3, -2, -1]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [10, 10, 10]^T$.



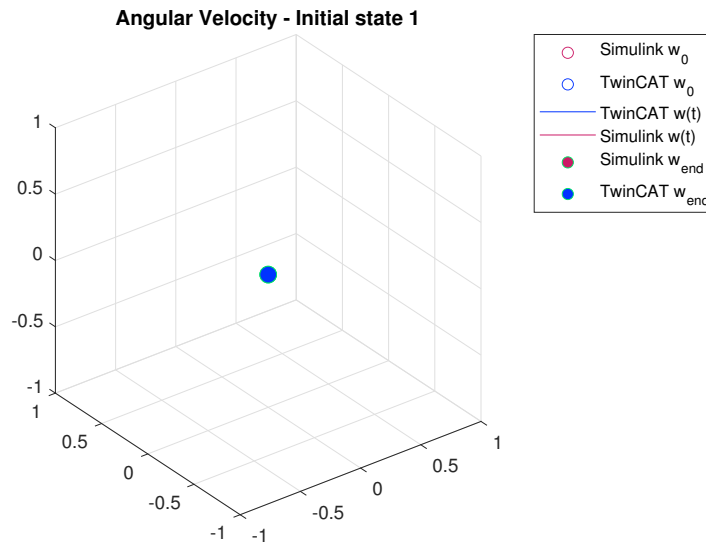
Obrázek 21: Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [1, 2, 3]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [0, 0, 10]^T$.



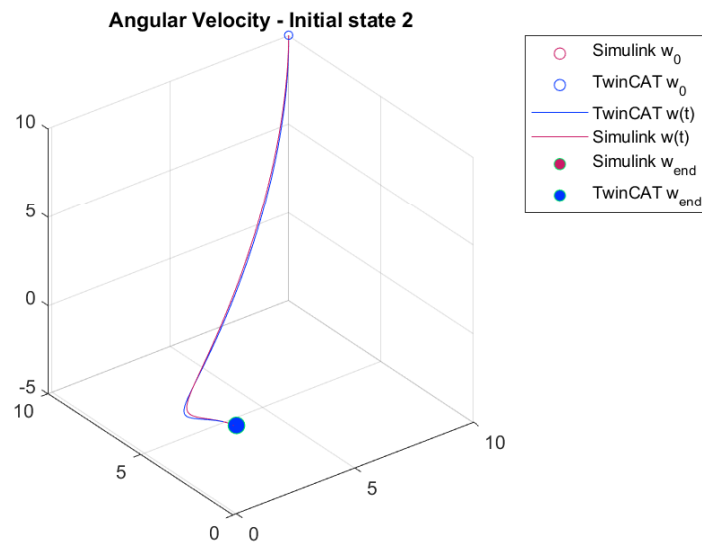
Obrázek 22: Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [-7, 1, 5]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [10, -10, -10]^T$.



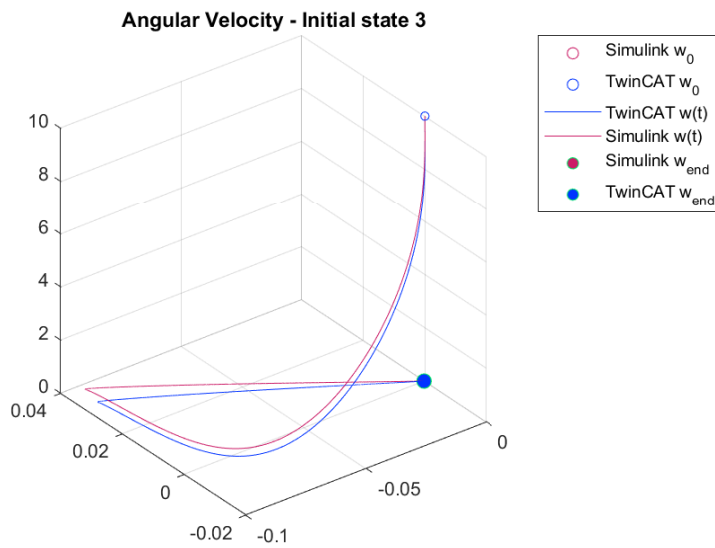
Obrázek 23: Vektor \mathbf{d} . $\mathbf{d}_0 = [4, -8, 3]^T$, $\boldsymbol{\omega}_0 = [-10, 10, -10]^T$.



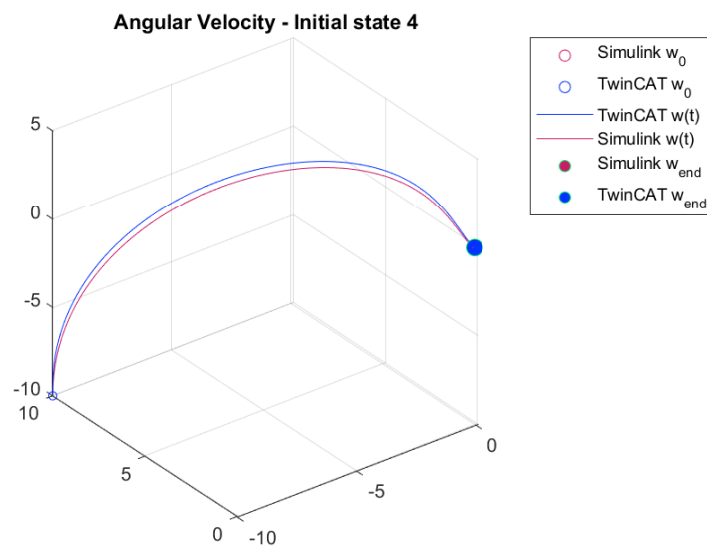
Obrázek 24: Vektor $\boldsymbol{\omega}$. $\mathbf{d}_0 = -\mathbf{b}$, $\boldsymbol{\omega}_0 = \mathbf{0}$.



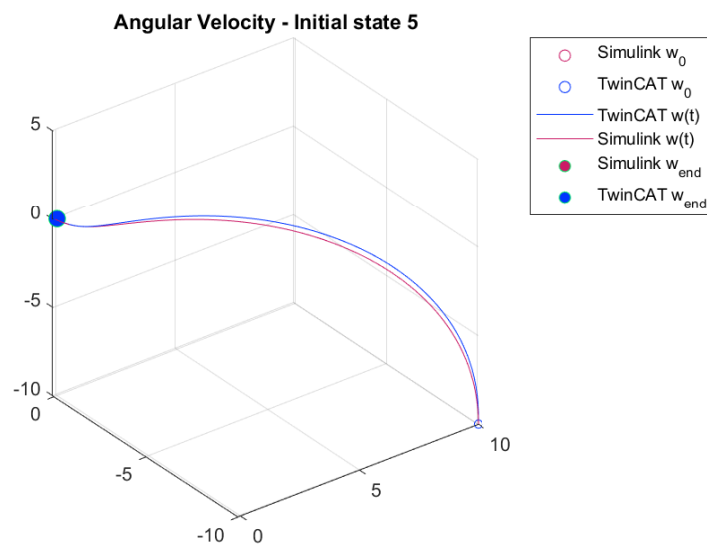
Obrázek 25: Vektor ω . $d_0 = [-3, -2, -1]^T$, $\omega_0 = [10, 10, 10]^T$.



Obrázek 26: Vektor ω . $d_0 = [1, 2, 3]^T$, $\omega_0 = [0, 0, 10]^T$.



Obrázek 27: Vektor ω . $\mathbf{d}_0 = [-7, 1, 5]^T$, $\omega_0 = [10, -10, -10]^T$.



Obrázek 28: Vektor ω . $\mathbf{d}_0 = [4, -8, 3]^T$, $\omega_0 = [-10, 10, -10]^T$.

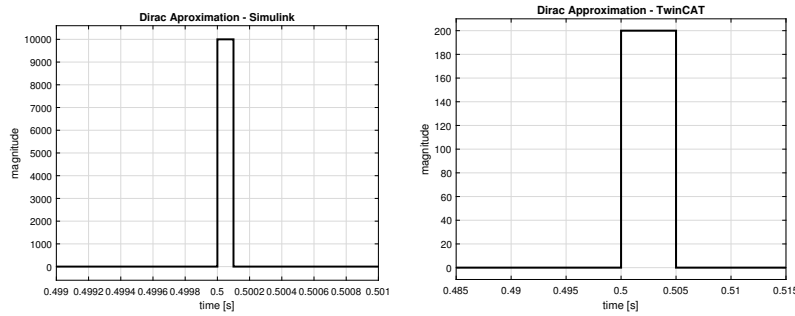
Kritéria ISE pro model satelitu vycházela nezanedbatelně velká. Nejpatrnější rozdíly nastaly pro čtvrtou sadu počátečních podmínek. Nejmenší odchylky se vyskytovaly - pomineme-li model začínající v rovnovážném stavu - u třetí sady počátečního stavu.

Init. cond.	ω	\mathbf{d}
1	0	0
2	4.199×10^{-2}	8.300×10^{-1}
3	1.582×10^{-3}	6.931×10^{-2}
4	1.375×10^{-1}	1.015×10^1
5	4.277×10^{-2}	9.809×10^{-1}

Tabulka 5: Kritéria ISE pro modely satelitů. Rozdíly modelů v ω a \mathbf{d} .

6.2 Výsledky modelu spojených nádrží

Srovnávací testy pro chování spojených nádrží byly důmyslnější než pro satelit. Nejprve byly porovnány výsledky pro odezvy na Diracův pulz $\delta(t)$. Přestože $\delta(t)$ není fyzikálně realizovatelným signálem, uvedeme odezvu systémů na tento typ signálu, protože hraje důležitou roli v teorii řízení. Diracovu $\delta(t)$ aproximujeme jako skokovou změnu z nuly na vysokou hodnotu. Za krátký časový okamžik dojde ke skoku na nulu. V TwinCATu je amplituda kmitu a časový krok nastaven na 200 resp. na 0.005 s (doba jednoho real-time kroku). V Simulinku si můžeme dovolit jemnější časový úsek - amplituda 10 000 a časový krok 0.000 1.



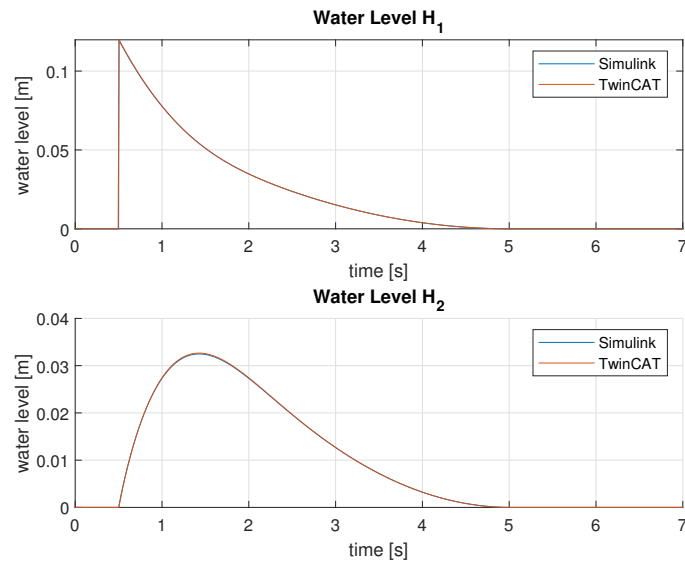
Obrázek 29: Aproximace Diracova pulzu $\delta(t)$.

Z výše zmíněných diagramů je patrné mimo jiné, že bylo zachováno pravidlo definující $\delta(t)$.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (59)$$

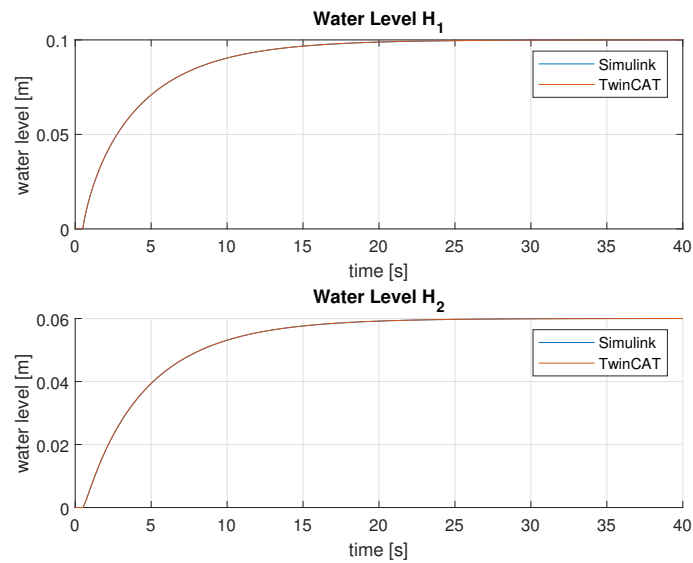
V testech na aproximaci $\delta(t)$ docházelo k minimálnímu rozdílu mezi mo-

delem v TwinCATu a Simulinku.



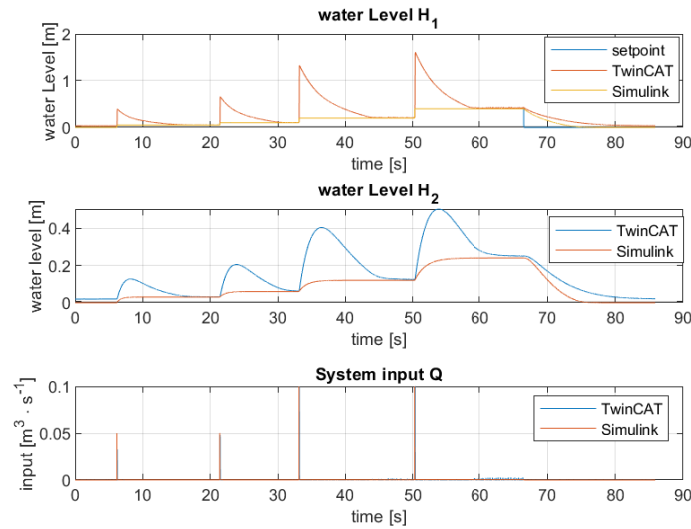
Obrázek 30: Model spojených nádrží. Odezva na diracův pulz.

Po té jsou porovnány odezvy na jednotkový skok. Rozdíly mezi modely nejsou z grafů patrné. Podle níže uvedených srovnávacích ISE kritérií vycházejí zanedbatelné rozdíly.

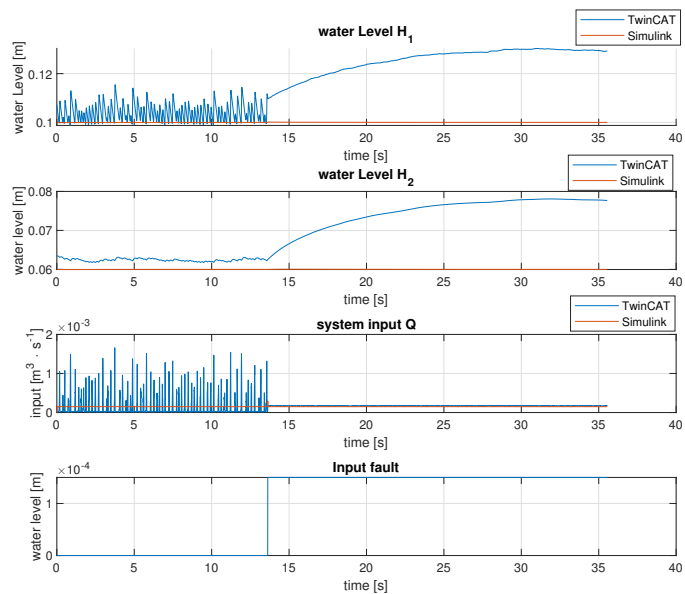


Obrázek 31: Model spojených nádrží. Odezva na jednotkový skok.

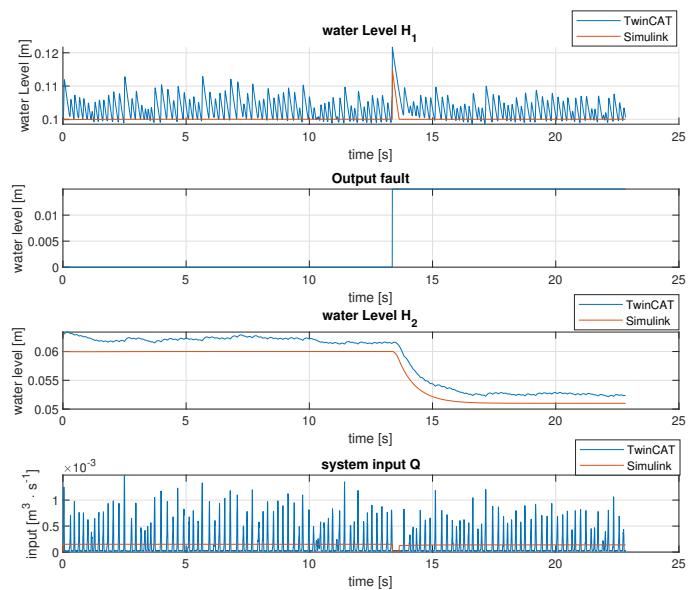
Ve druhé fázi testu je porovnaný HIL simulátor se zapojeným regulátorem a simulinkovým modelem. Prvním srovnávacím testem v této části bylo sledování skokově měnícího se referenčního signálu $w(t)$. Zde se objevuje několik patrných rozdílů mezi modely. Za prvé se v HIL simulátoru vyskytuje šum vlivem přenosu dat přes kabelový vodič. Za druhé se modely jeví pomalejší nežli simulinkové modely. Příčina této nedokonalosti zůstává neznámá. A za třetí bylo odhaleno, že se v komunikaci HIL-regulátor dochází k dopravnímu zpoždění. Odhadovaná délka zpoždění je přibližně 3 kroky neboli 0.015 sekundy, přesto nedokáže regulátor včas zareagovat a dojde k prudkému nárůstu hodnot v integrátoru reprezentující nádrž číslo jedna. Důsledkem čehož jsou velké výkyvy v regulované veličině.



Obrázek 32: Test řízení.



Obrázek 33: Chyba na vstupu.



Obrázek 34: Chyba na výstupu.

Kritéria ISE pro model spojených nádrží jsou zaneseny v tabulce níže. Nominální

Typ testu	H_1	H_2	Q
Odezva na Diracovu $\delta(t)$	1.804×10^{-5}	3.863×10^{-8}	
Odezva na skok	8.493×10^{-8}	2.927×10^{-8}	
Test řízení	5.607	9.314×10^{-1}	7.281×10^{-4}
Chyba na vstupu	1.510×10^{-2}	5.103×10^{-3}	1.034×10^{-6}
Chyba na výstupu	4.030×10^{-4}	9.296×10^{-5}	1.270×10^{-6}

Tabulka 6: ISE pro modely spojených nádrží. Rozdíly v H_1 , H_2 a Q .

hodnoty vycházeli přibližně o tři až čtyři řády menší. To však ale může být dáno i tím, že pracovní bod byl pro model spojených nádrží zvolen v řádech o jedna až o dva menší. Nejmenší rozdíly pozorujeme v chování systému na základní odezvy bez zapojeného regulátoru. Nejhůře si vedl test řízení a hned po něm test s chybou na vstupu. Test na odregulování chyby na výstupu dopadl překvapivě dobře v porovnání s ostatními.

6.3 Shrnutí

Testy spojených nádrží bez zapojeného regulátoru dopadly téměř identicky pro oba modely. Naproti tomu v testech satelitu se vyskytují znatelné rozdíly. Chyba se pravděpodobně nenachází v integrátoru *simple_Vec_I* neboť se jedná o rozšířený *simple_I* a ten zřejmě v modelu nádrží fungoval. Je možné, že se nepřesnosti vyskytují v jiných funkcích blocích a funkcích. Nebo je to dáno spojitou simulací v Simulinku.

Bylo prokázáno, že v rámci TwinCATu lze pracovat s vektorovými signály (polemi), avšak je potřeba mít vytvořené vlastní nástroje (funkce a funkční bloky) nebo najít nějakou knihovnu k tomu určenou.

Po zapojení zpětnovazební smyčky s regulátorem kolem modelu spojených nádrží se ve výstupech simulace projevilo působení šumu a v komunikaci se projevilo zpoždění. Jak je patrné z diagramů 33 a 34, amplituda šumu přesahovala v hodnoty pracovního bodu $H_{10} = 0.1$ m, $H_{20} = 0.06$ m. Tento problém by se dal teoreticky odstranit upravením parametrů lineární interpolace při převodu digitální hodnoty na napětí, aby bylo přenosové napětí od 0 V do 10 V využito v co největším rozsahu.

Celková délka byla odhadnuta na přibližně 15 milisekund. Jak velká část zpoždění se vyskytuje na komunikaci PLC-Monarco a jak velká na komunikaci Monarco-PLC se nepodařilo objasnit. A přestože doba, o kterou se signál zpožduje, může působit zanedbatelně, výsledky testu řízení (Obr. 32) a testu s chybou vstupu (Obr. 33) se značně rozcházejí s modely v Simulnku, kde zpoždění a šum byl zanedbán. V testu řízení docházelo ke zhruba 6-ti násobnému překmitu. To by bylo možné odstranit omezením sklonu náběžné hrany vstupu do systému nebo změnou regulátoru. Při testu chyby na vstupu se ve výstupech projevila trvalá odchylka. To lze odstranit pouze úpravou regulátoru.

7 Závěr

Náplní této bakalářské práce bylo seznámení s řídicími prostředky Beckhoff a jazyky pro jejich programování. Firma Beckhoff vyrábí a dodává široké spektrum systémů pro automatické řízení v průmyslu. Pro účely této práce byly k dispozici tato zařízení

Programmable Logic Controller CP6606.

Sběrnice EK110.

Terminál EL9198.

Terminál EL9188.

Terminál EL1008.

Terminál EL2008.

Terminál EL3068.

Terminál EL4732.

Všechny výše uvedené prostředky jsou kvalitní. Mají odolný a kompaktní design, velmi dobré přenosové vlastnosti a dají se snadno zapojují.

Prostřednictvím TwinCATu - softwaru na programování PLC - byly na CP6606 implementovány a otestovány v simulaci modely stabilizace satelitu a spojených nádrží. Pro sestavení modelu satelitu byly vytvořeny potřebné vektorové funkce a funkční bloky. Chování tohoto modelu a jeho varianty v Simulinku se však rozcházelo. Důvod proč tomu tak bylo, přestože v simulování odezev na skok a na Diracův pulz u modelů spojených nádrží se vyskytovaly minimální rozdíly, je třeba objasnit.

Při zkoumání modelu spojených nádrží bylo CP6606 rozšířeno o sadu I/O sběrnic. Na vstupy a výstupy bylo připojeno zařízení Monarco HAT, které bylo použito jako programovatelný regulátor. Regulační smyčka s PI regulátorem byla otestována pro odezvu na referenční hodnotu, chybu na vstupu do PLC a na chybu výstupu z PLC. Výsledky byly porovnány s regulační smyčkou zkoustruovanou v programu Simulink. Velké rozdíly ve výstupech modelů, ke kterým došlo, byly dány hardwarovými nedostatky, které byly v Simulinku zanedbány. Jedná mimo jiné o zpoždění v komunikaci a působení šumu.

TwinCAT je velmi dobře navržený software. Nabízí uživatelskou dostupnost díky integraci do Windows OS, vysoký výpočetní výkon, široké spektrum nástrojů pro řídicí systémy v reálném čase, přesto si zůstává jistě míře intuitivní. A v neposlední řadě dokáže rozpoznat a automaticky nastavit periferní zařízení.

Nevýhodou softwaru TwinCAT zůstává fakt, že jeho rozhraní a práce s ním se liší od ostatních programů, se kterými se studenti bakalářského programu mohou setkat. Software REXYGEN, se kterým se nabízí srovnání, je podobný programu Simulink a také je hojně zastoupený v projektech v oboru Automatického řízení na katedře Kybernetiky. Díky čemuž mají studenti mnoho příležitostí REXYGEN poznat. REXYGEN podporuje plně diagram blokových schémat, TwinCAT je má omezené možnosti, jak bloky zapojit.

TwinCAT podporuje programování ve strukturovaném textu (programování v kódu) a snadnou tvorbu vlastních funkcí a funkčních bloků. REXYGEN musí použít speciální blok, který importuje externí kód.

Základem každého jazyku integrovaného v TwinCATu jsou proměnné, které jsou definované názvem, datovým typem a hodnotou. Díky tomu nabízí snazší práci s

daty, s bitovými operacemi a všemi činnostmi, kdy je potřeba práce s datovými typy. Rexygen používá pouze signály a bloky s konstantami.

Vizuální rozhraní modelu spojených nádrží na PLC se nepodařilo zprovoznit z technických důvodů a nedostatku času. V tomto směru se nachází velký prostor pro zlepšení. Na tuto část je možné v budoucnu navázat v rámci jiného projektu.

Zařízení a vývojový SW od firmy Beckhoff se osvědčily při práci se simulacemi modelových systémů. Numerické přesnost je vysoká a výpočetní výkon jsou vysoké. Řídící systémy a periferie k nim mohou být použity v rámci výuky řízení a prací s HIL simulátory.

8 Zdroje

1. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“TwinCAT 3 Engineering.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/automation/twincat/texxxx-twincat-3-engineering/te1000.html?
2. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“7-inch Economy Panel PC.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/ipc/panel-pcs/cp6xxx-cp7xxx-single-touch-panel-pcs/cp6606-0001-0020.html.
3. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“EtherCAT Coupler.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/ek1xxx-bk1xx0-ethercat-coupler/ek1100.html.
4. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“Potential Distribution Terminal, 16 X 24 V DC.” Beckhoff Automation,
www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el9xxx-system/el9188.html.
5. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“Potential Distribution Terminal, 16 X 0 V DC.” Beckhoff Automation,
www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/el9xxx-system/el9189.html.

6. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“EtherCAT Terminal, 8-channel Digital Input, 24 V DC, 3 Ms.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/el1xxx-digital-input/el1008.html.
7. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“EtherCAT Terminal, 8-channel Digital Output, 24 V DC, 0.5 A.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/el2xxx-digital-output/el2008.html.
8. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“EtherCAT Terminal, 8-channel Analog Input, Voltage, 0 . . . 10 V, 12 Bit, Single-ended.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3068.html.
9. Germany, Beckhoff Automation GmbH & Co. Kg Hülshorstweg 20, 33415 Verl.,
“EtherCAT Terminal, 2-channel Analog Output, Voltage, ± 10 V, 16 Bit, Oversampling.” Beckhoff Automation, www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/el4xxx-analog-output/el4732.html.