Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, Budějovická 421

Programování řídicích systémů 2

Řízení virtuálního simulinkového modelu PLC automatem s použitím karty MF 624

Tomáš Čuchna, Patrik Kupec (Tomas.Cuchna2@student.copsu.cz)

6. listopadu 2025

1 Úvod

V posledních letech dochází k výraznému rozvoji v oblasti průmyslové automatizace a řízení technologických procesů. Se stále rostoucími požadavky na efektivitu, přesnost a bezpečnost výrobních systémů roste také význam počítačových simulací (modelování reálných procesů). Virtuální modely technologických zařízení umožňují předem analyzovat chování řízených systémů, testovat různé strategie řízení a ověřovat stabilitu a kvalitu regulace bez nutnosti zásahu do reálného zařízení. Díky tomu lze zkrátit dobu vývoje, snížit riziko chyb a optimalizovat parametry regulátorů ještě před jejich implementací.

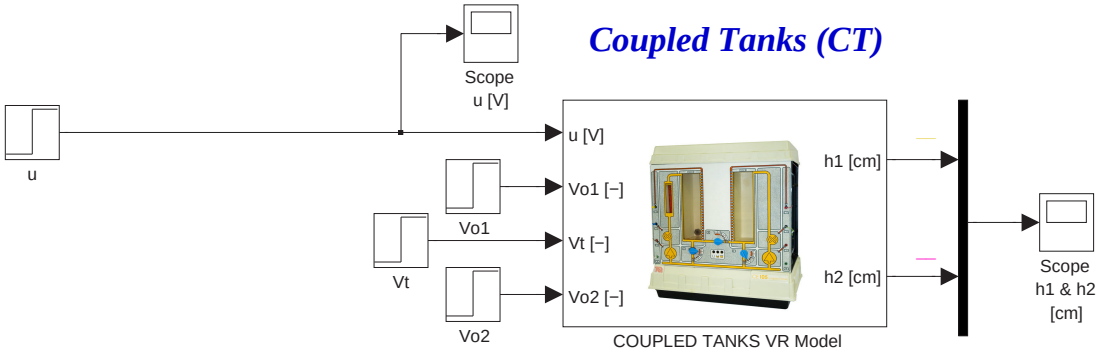
V Laboratoři aplikované informatiky [6] na Vyšší odborné škole v Sezimově Ústí je k dispozici Model vodního hospodářství [8], na kterém lze experimentálně ověřovat principy regulace. Použití tohoto laboratorního systému je však omezeno prostorem výše zmíněné učebny. V prostředí Matlab/Simulink [3, 2] lze však vytvářet virtuální reprezentace reálných zařízení, které umožňují provádět experimenty i mimo laboratoř. Jak ale takový virtuální model řídit například pomocí programovatelného automatu (PLC) na výše zmíněné škole ještě nikdo prakticky nevyzkoušel.

Cílem této práce je realizovat propojení virtuálního modelu spojených nádob vytvořeného v prostředí Simulink s PLC automatem prostřednictvím karty MF 624, navrhnout vhodný PID regulátor, ověřit jeho funkčnost v prostředí Simulink a následně implementovat tento regulátor do PLC automatu.

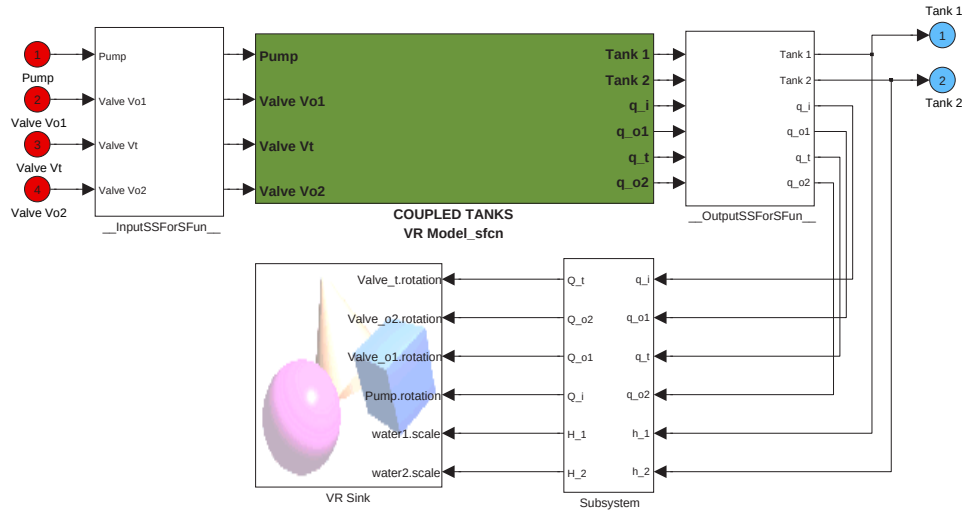
Struktura této práce je následující: Kapitola 2 se věnuje návrhu řízení virtuálního modelu, zahrnuje identifikaci systému, určení jeho přenosové funkce, návrh PID regulátoru a jeho ověření v prostředí Simulink. V kapitole 3 je popsán postup připojení virtuálního modelu spojených nádob k PLC automatu pomocí karty MF 624. Kapitola 4 popisuje postup implementace PID regulátoru v prostředí DetStudio a jeho realizaci v PLC automatu.

2 Návrh řízení pro virtuální modelu spojených nádob

Tato kapitola se bude zabývát identifikací modelu spojených nádob a následným návrhem PID regulátoru pro řízení hladiny ve druhé nádrži. Model spojených nádob je simulinkový model s virtuální scénou [7, příklad 12.21], který obsahuje dvě nádrže, jedno čerpadlo a tři ventily, viz následující obrázek[1]. Po kliknutí pravého tlačítka myši na bloček `COUPLED TANKS VR Model` a výběru položky `Look Under Mask` lze zobrazit model pod maskou[2], viz obr. 2.



Obrázek 1: Model spojených nádrží[3] – převzato z [7, příklad 12.21]



Obrázek 2: Model spojených nádrží – náhled pod masku

[1] Pro správné otevření virtuálního simulinkového modelu je třeba nejprve spustit Matlab, dále v něm nastavit pracovní složku (`Current Directory`) a až poté v Matlabu otevřít soubor `CoupledTanks.mdl`.

[2] Podle [7] byl reálný model zakódován do tak zvaného mex-souboru. Tyto mex-soubory jsou funkce vytvořené v MATLABu a volají program v jazyce C/C++ nebo ve Fortranu [4].

[3] Jak vygenerovat simulinková schémata do souboru `*.eps` je popsáno v příloze této práce.

Model spojených nádobmá čtyři vstupy. Prvním vstupem je napětí na čerpadle u [V], které vhání vodu do první (levé) nádrže. Dalšími vstupy jsou míry otevření tří ventilů. Ventilem V_{o1} [-] lze vodu z první nádrže vypustit. Ventilem V_t [-] je spojena levá nádrž s pravou a ventilem V_{o2} [-] lze vodu vypustit ze druhé (pravé) nádrže. Model má dva výstupy, a to výšky hladin v jednotlivých nádržím h_1, h_2 [cm].

V této práci bude řízena formou regulace výška hladiny v pravé nádrži h_2 [cm] pomocí napětí na čerpadle u [V]. Akční veličinou bude tedy napětí na čerpadle u [V] a regulovanou veličinou výška hladiny h_2 [cm]. Otevření ventilů v_{o1}, v_t, v_{o2} [-] bude představovat poruchové signály.

2.1 Identifikace modelu

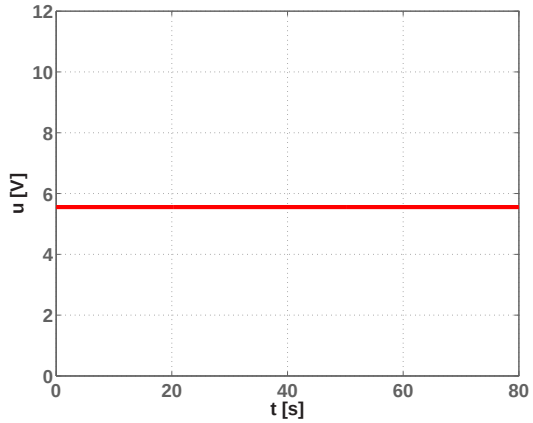
Virtuální model spojených nádob je nelineární systém [7] ale znalosti autorů této práce dosahují pouze na lineární teorii řízení. Z tohoto důvodu bude v této práci navržen PID regulátor založený pouze na lineárním modelu, který bude platit pouze v okolí zvoleného pracovního bodu [7, kapitola 2].

Autoři se rozhodli řídit hladinu v pravé nádrži v okolí 10 cm při zavřeném ventilu V_{o1}, plně otevřeném ventilu V_t a na 65 % otevřeném ventilu V_{o2}. Pro toto nastavení bylo experimentálně hledáno vstupní napětí na čerpadle. Nalezenou hodnotou bylo 5,554 V. Při výše uvedených podmínkách a při tomto napětí na čerpadle se hladina v levé nádrži ustálila na hodnotě 13,9 cm a hladina v pravé nádrži na hodnotě 10,127 cm. Pracovní bod je tedy charakterizován následujícími hodnotami

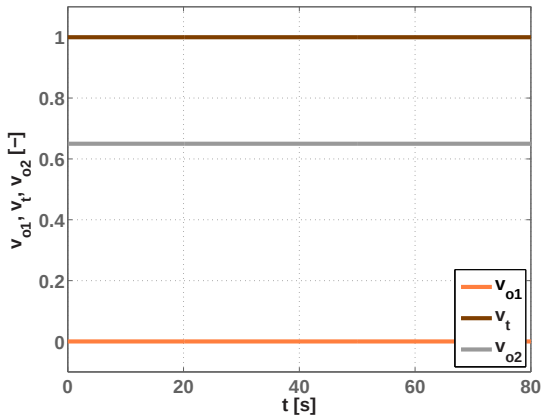
$$\begin{aligned} u_0 &= 5{,}554\,\mathrm{V}, \\ v_{o10} &= 0, \\ v_{t0} &= 1, \\ v_{o20} &= 0.65, \\ h_{10} &= 13{,}9\,\mathrm{cm}, \\ h_{20} &= 10{,}127\,\mathrm{cm}. \end{aligned}$$

Tyto hodnoty byly následně zadány do simulinkového modelu, čímž byl model nastaven do pracovního bodu. Správnost výše uvedených hodnot jednotlivých veličin dokazuje obrázek 3.

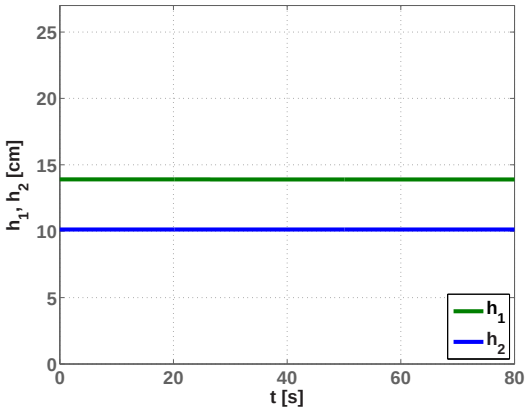
Kvalitnější identifikací by bylo nalezení konstant stavového modelu podle [5, kapitola 3.1.3]. V této práci byl však zvolen postup jednodušší, který poskytne sice méně kvalitní výsledek, ale pro tuto práci zcela dostačující. Ve výše uvedeném pracovním bodě byla změřena skoková odezva modelu spojených nádob, ze které byl následně určen přenos mezi vstupním napětí na čepadle u [V] a hladinou v pravé nádrži h_2 [cm]. Naměřená skoková odezva modelu spojených nádob je na obr. 4.



(a) napětí na čerpadle u

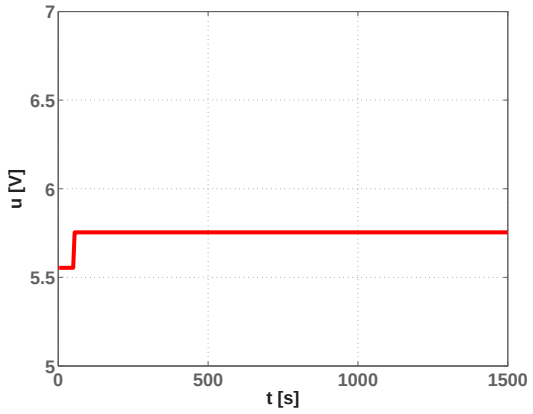


(b) otevení ventilů v_{o1}, v_t, v_{o2}

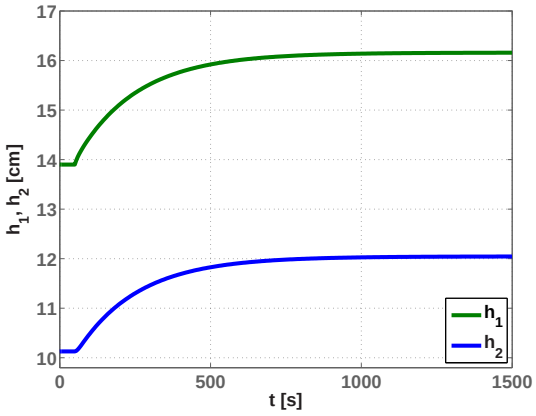


(c) výšky hladin v nádržích h_1, h_2

Obrázek 3: Časové odezvy modelu spojených nádrží v pracovním bodě



(a) napětí na čerpadle u



(b) výšky hladin v nádržích h_1, h_2

Obrázek 4: Odezva modelu spojených nádrží na skokový vstup

Z obr. 4(b) je patrné, že přenos mezi vstupním napětím na čepadle u [V] a hladinou v pravé nádrži h_2 [cm] bude druhého řádu (modrý průběh má v čase vstupního skoku pozvolný rozběh). Určit přenos druhého řádu je možné například podle [7, příklad 12.3], ale v této práci se nabízí využití odezvy hladiny v levé nádrži h_1 [cm], kde přenos mezi vstupním napětím na čepadle u [V] a hladinou h_1 [cm] bude prvního řádu a bude mít tvar

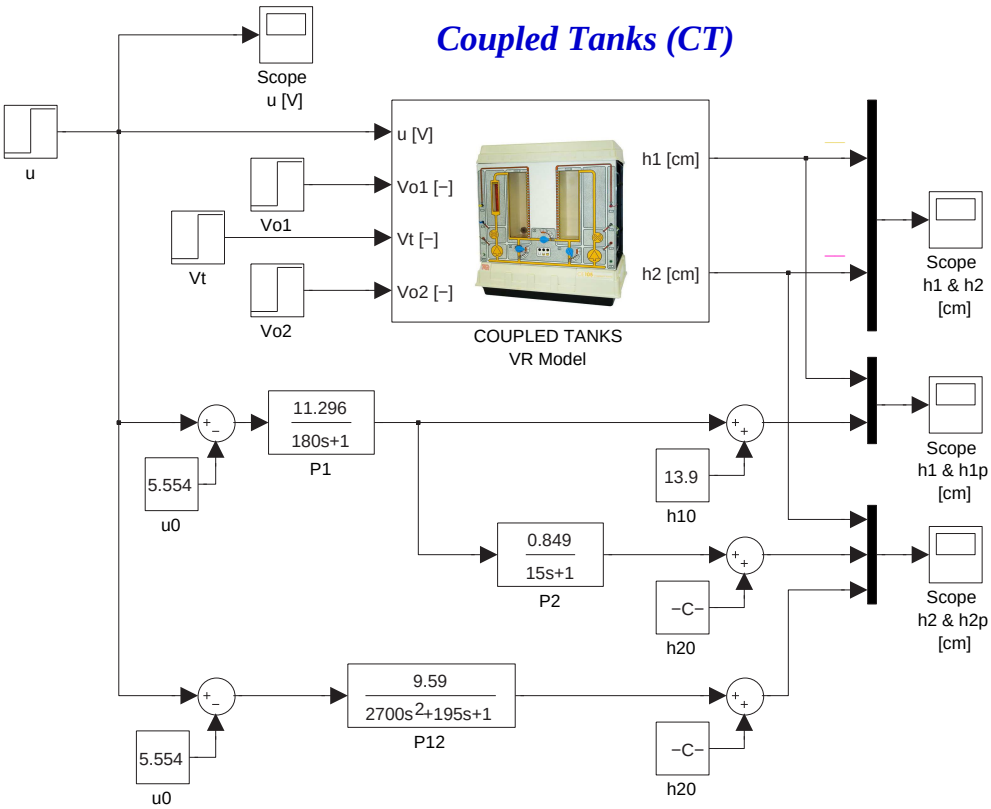
$$P_1(s) = \frac{k}{\tau s + 1}\,,$$

kde k je zesílení a τ časová konstanta [7, příklad 12.2]. Ze zeleného průběhu na obr. 4(b) byly určeny hodnoty těchto konstant $k = 11{,}296$ a $\tau = 180\,\mathrm{s}$. Přenos mezi vstupním napětím na čepadle u [V] a hladinou h_1 [cm] tedy je

$$P_1(s) = \frac{11{,}296}{180s + 1}\,.$$

Přenos mezi napětím na čepadle u [V] a hladinou v pravé nádrži h_2 [cm] byl určen pomocí následujícího schématu, ve kterém byly postupně upravovány konstanty bloku `P2`, dokud nedošlo ke shodě odezvy virtuálního modelu s tím přenosovým. Nalezený přenos byl

$$P_2(s) = \frac{0{,}849}{15s + 1}\,.$$



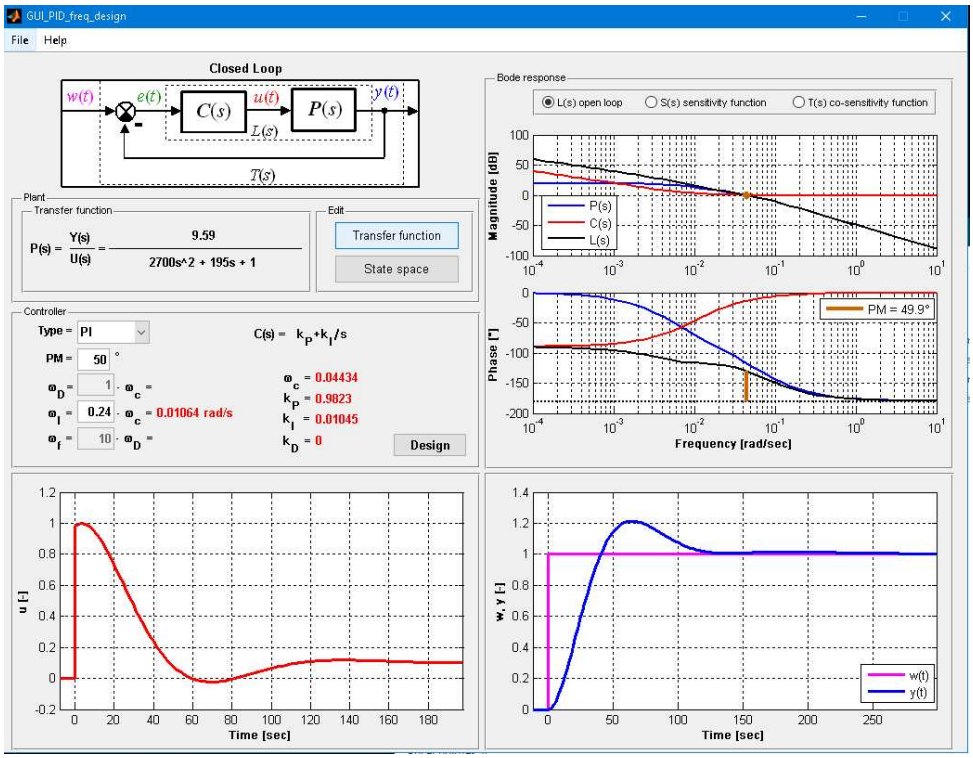
Obrázek 5: Model spojených nádrží a přenosy $P_1(s)$ a $P_2(s)$

Celkový přenos mezi napětím na čepadle u [V] a hladinou v pravé nádrži h_2 [cm] byl podle [7, kapitola 10] vypočítán jako součin přenosu $P_1(s)$ a $P_2(s)$, tedy

$$P(s) = P_1(s) \cdot P_2(s) = \frac{9{,}59}{2700s^2 + 195s + 1} \,. \tag{1}$$

2.2 Návrh PID regulátoru

K návrhu PID regulátoru byl použit nástroj `GUI_PID_freq_design` [7, kapitola 15], do kterého byl vložen přenos (1). Cílem bylo navrhnout regulátor, který zajistí co nejrychlejší regulační odezvu s překmitem regulované veličiny do 20 %. V nástroji `GUI_PID_freq_design` byl nakonec zvolen PI regulátor, fázová bezpečnost otevřené regulační smyčky 50 ° a integrační frekvence tohoto regulátoru jako 0,24 násobek kritické frekvence ω_c [rad s^{-1}], viz následující obrázek.



Obrázek 6: Nástroj pro návrh PID regulátoru frekvenční metodou [7]

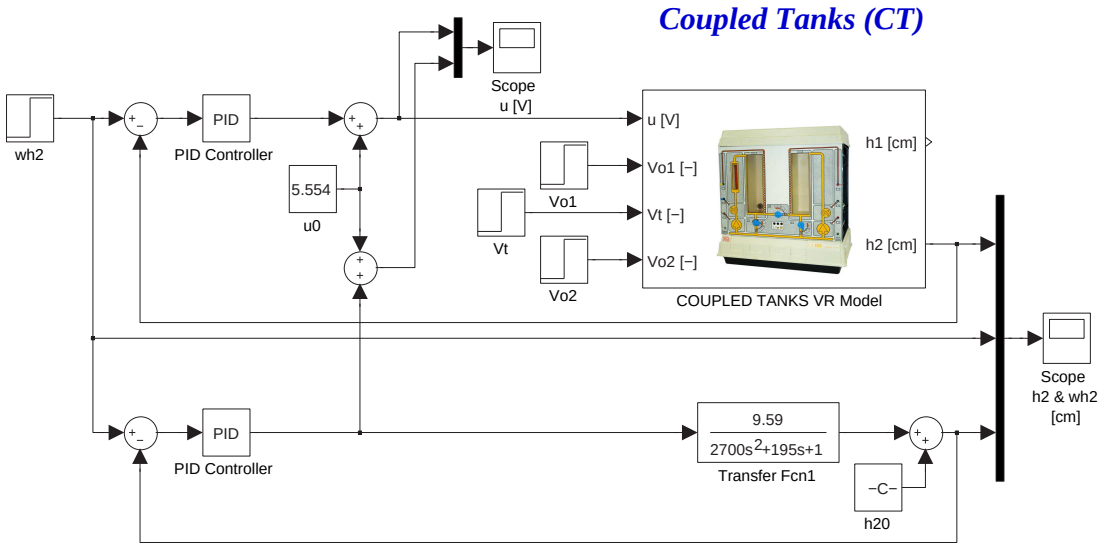
Z nástroje `GUI_PID_freq_design` na obr. 6 je patrné, že hodnoty zesílení jednotlivých složek PI regulátoru jsou

$$k_\mathrm{P} = 0{,}9823, \qquad k_\mathrm{I} = 0{,}01045\,. \tag{2}$$

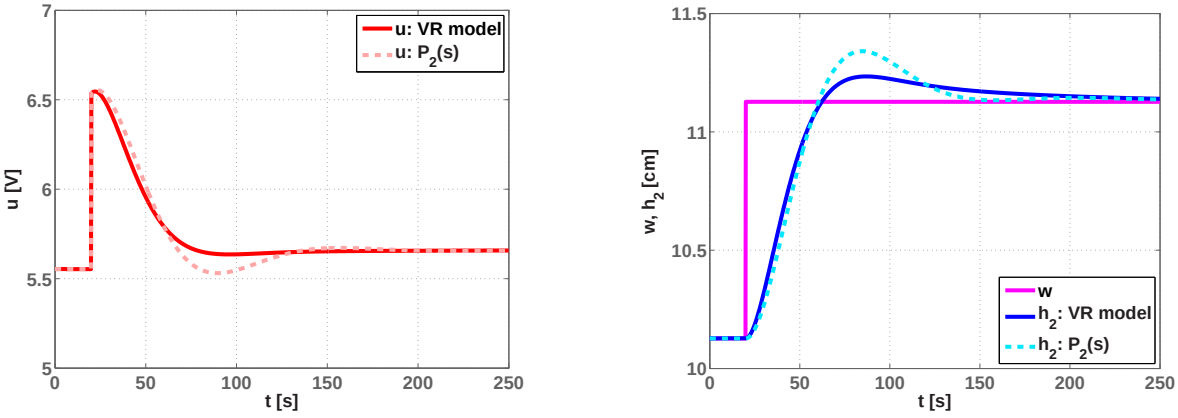
Také z časových odezev na obr. 6 je vidět, že navržený regulátor splňuje výše zvolené požadavky na regulační děj.

2.2.1 Ověření funkce navrženého PID regulátoru

Dalším krokem bylo ověření funkce navrženého regulátoru v prostředí Simulink, jak s přenosovou funkcí $P_2(s)$, tak s kompletním virtuálním modelem z obr. 1. Zapojení obou regulačních smyček je uvedeno na následujícím obrázku a jejich časové odezvy na obr. 8.



Obrázek 7: Regulační obvod s virtuálním modelem z obr. 1 a s přenosovou funkcí $P_2(s)$



(a) napětí na čerpadle u

(b) výška hladiny v pravé nádrži h_2

Obrázek 8: Časový průběh PID regulace virtuálního modelu z obr. 1 a přenosové funkce $P_2(s)$

Z časových odezev na obr. 8 je patrné, že celý proces návrhu PID regulátoru včetně identifikace přenosu (1) byl proveden správně – časové průběhy s přenosem (1) odpovídají průběhům s vituálním modelem.

3 Připojení virtuálního simulinkového modelu k PLC automatu pomocí karty MF 624

V této kapitole bude popsáno, jak spojit virtuální simulinkový model spojených nádob, viz obr. 1 a 2, s programovatelným automatem (PLC) pomocí vstupně výstupní karty MF 624 od firmy Humusoft, s. r. o. Tento virtuální model lze také nalézt v Laboratoři aplikované informatiky [6] na ploše Windows ve složce `MATLAB - work` v podsložce `VR models`.

Proto, aby mohl být virtuální model spojených nádob řízen PLC automatem, je třeba schéma z obr. 1 upravit následujícím způsobem. V knihovnách prostředí Simulink se nalezne `Real-Time Toolbox`, ze kterého se použijí bločky: `Adapter`, `RT In` a `RT Out`. Nejprve se nastaví bloček `Adapter`: po dvojkliku na tento bloček se vybere ovladač `MF624.rtd`, který je ve složce `Humusoft` a nastavení se potvrdí tlačítkem `OK`. Dále se nastaví následujícím způsobem bloček `RT Out`:

- `Sample time`: 5 ms,
- `Output type`: `Analog Output`,
- `Output channel`: 1,
- `Initial output value`: 0,
- `Final output value`: 0,
- `Output range`: −10 to 10 V.

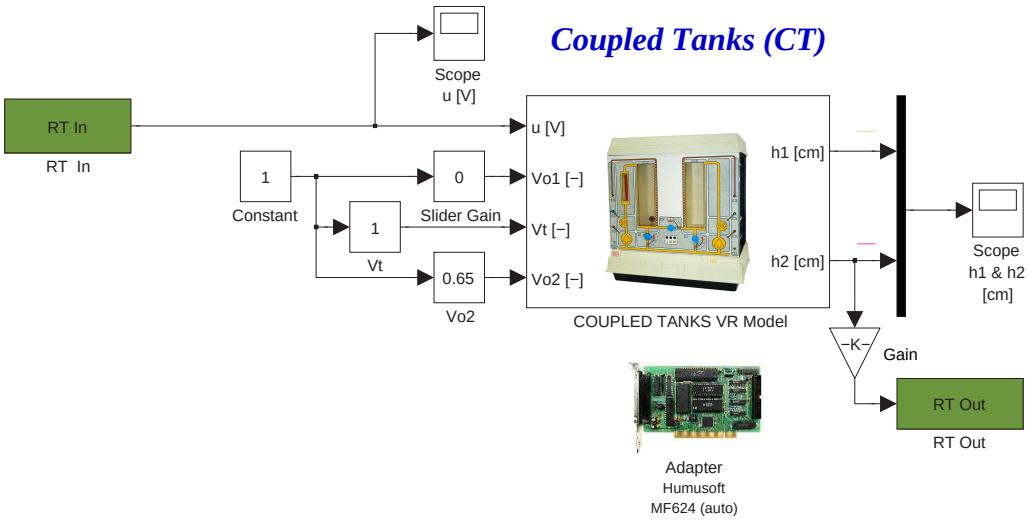
Nakonec se nastaví následujícím způsobem bloček `RT In`:

- `Sample time`: 5 ms,
- `Output type`: `Analog Input`,
- `Input channel`: 1,
- `Output range`: −10 to 10 V,
- `Output units`: `Volts`.

Upravený simulinkový model spojených nádrží pro komunikaci s PLC automatem prostřednictvím karty MF 624 je na následujícím obrázku. Na tomto obrázku je také použit bloček `Slider Gain`, který umožňuje měnit otevření ventilů V_{o1}, V_t, V_{o2} [-] během simulace.

Protože model z obr. 1 obsahuje virtuální 3D scénu, která by brzdila komunikaci v reálném čase, je nutné prodloužit periodu jejího vykreslování. To se provede pod maskou modelu,

viz obr. 2, tak, že se otevře 3D scéna dvojklikem na bloček `VR sink` a na této scéně se klikne na ikonku `Block Parameters`. Zde se nastaví `Sample time` na vhodnou hodnotu.



Obrázek 9: Model spojených nádrží připravený pro komunikaci pomocí karty MF 624

4 Implementace PID regulátoru do PLC automatu

Tato kapitola se zabývá implementací výše navrženého PID regulátoru do programovatelného automatu AMiNi4DW2 od firmy AMiT, s. r. o. Cílem je ověřit funkčnost navrženého regulátoru v tomto řídicím systému.

4.1 Tvorba aplikace pro PLC v prostředí DetStudio

Výše zmíněná firma dodává k tvorbě aplikací pro své řídicí systémy vývojové prostředí, které se jmenuje DetStudio. V tomto prostředí je potřeba vytvořit proměnné, nakonfigurovat vstupy a výstupy a následně naprogramovat PID regulaci. V první fázi byly v prostředí DetStudio definovány následující proměnné:

- `Aliasy` – typ `integer` – pro logické proměnné (tzv. aliasy),
- `u` – typ `float` – pro akční veličinu (napětí na čerpadle),
- `y` – typ `float` – pro regulovanou veličinu (výška hladiny v pravé nádrži),
- `w` – typ `float` – pro žádanou hodnotu regulované veličiny,
- `u_man` – typ `float` – pro manuální řízení modelu (napětí na čerpadle).

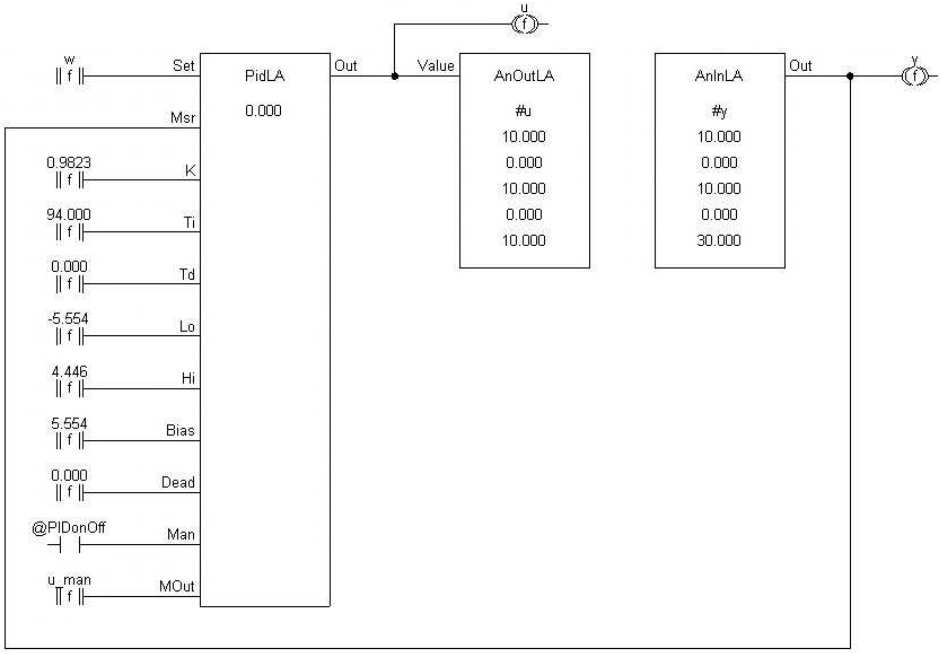
Pro přepínání mezi automatickým a manuálním řízením byl vytvořen *alias*[4] s názvem `@PIDonOff`, který je používán pro zapnutí/vypnutí PID algoritmu.

V dalším kroku byla provedena tak zvaná IO konfigurace kanálů. To znamená, že byly pojmenovány vstupní a výstupní kanály PLC automatu:

- vstup `AI.06` – byl pojmenován y (regulovaná veličina),
- výstup `AO.00` – byl pojmenován u (akční veličina).

Dále byl v prostředí DetStudio v sekci Procesy založen proces v jazyce CFC (Continuous Flow Chart) s periodou spouštění 1 sekunda. V tomto procesu bylo vytvořeno následující schéma s bločky:

- `PidLA` — blok realizující algoritmus PID regulátoru,
- `AnOutLA` – blok pro zápis hodnoty akční veličiny do výstupního kanálu,
- `AnInLA` — blok pro čtení hodnoty regulované veličiny ze vstupního kanálu,
- `LDf` — blok pro načtení hodnoty proměnné typu `float`,
- `LD` — blok pro načtení hodnoty aliasu.



Obrázek 10: Proces PID regulace v prostředí DetStudio

[4]Pro logické (jednobitové) proměnné používá prostředí DetStudio pojem Alias.

Vstupní parametry `Lo`, `Hi`, `Bias`, `Dead` bločku `PidLA` z obr. 10 byly nastaveny v souladu s obr. 7, ale zesílení jednotlivých složek PID regulátoru musela být přepočítána, protože PID algoritmus v Simulinku a v PLC automatu je naprogramován jinak. Hodnoty `K`, `Ti` a `Td` lze získat například pomocí následujícího matlabovského skritpu.

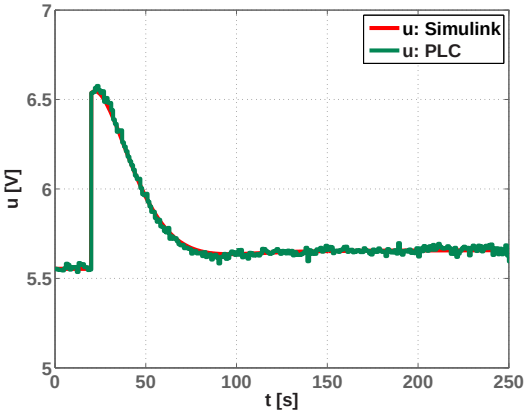
```
%% Převod konstant PID regulátoru do PLC automatu
PIDtf = tf(0.9823,1) + tf(0.01045, [1 0])
[PID,PIDt] = tf2PIDAMiT(PIDtf)
```

Konstanty PID regulátoru pro PLC automat jsou

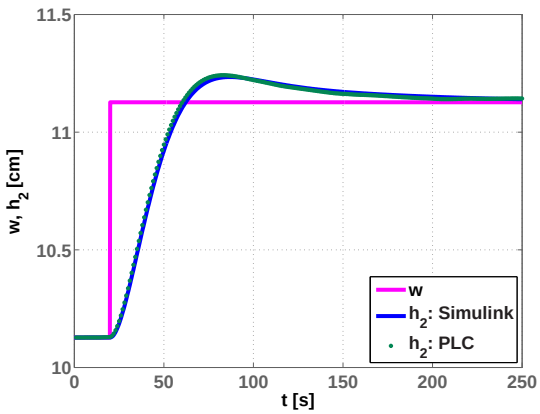
$$K = 0{,}9823, \qquad T_\mathrm{i} = 94, \qquad T_\mathrm{d} = 0, \qquad N = 0. \tag{3}$$

4.2 Porovnání regulace pomocí Simulinku a PLC automatu

V prostředí DetStudio byla výše zmíněná aplikace přeložena (zkompilována) a následně nahrána do PLC automatu AMiNi4DW2. Poté byl proveden stejný regulační experiment jako na obr. 8. Na následujícím obrázku jsou porovnány časové odezvy obou regulačních smyček, jak té z prostředí Simulink, tak té pomocí PLC automatu.



(a) napětí na čerpadle u



(b) výška hladiny v pravé nádrži h_2

Obrázek 11: Časový průběh PID regulace virtuálního modelu spojených nádrží pomocí Simulinku a pomocí PLC automatu

Z předchozího obrázku je patrné, že byl regulátor, navržený v kapitole 2, naprogramován do PLC automatu správně – časové odezvy akčních veličin i regulovaných veličin obou regulačních smyček se shodují.

5 Závěr

Cílem této práce bylo propojit virtuální model spojených nádob vytvořený v prostředí Simulink s PLC automatem prostřednictvím karty MF 624, navrhnout a implementovat PID regulátor a ověřit jeho funkčnost, jak v prostředí Simulink, tak v PLC automatu. Všechny tyto cíle byly úspěšně splněny.

Návrhem řízení virtuálního modelu založeném na jeho identifikaci a následným ověřením v prostředí Simulink se zabývá kapitola 2. Postup připojení virtuálního modelu spojených nádob k PLC automatu pomocí karty MF 624 je uveden v kapitole 3. Implementace PID regulátoru v prostředí DetStudio a jeho realizace v PLC automatu jsou popsány v kapitole 4.

V prostředí DetStudio byl regulátor úspěšně implementován: byly vytvořeny proměnné, nastavena I/O konfigurace a naprogramována PID regulace. Pro přepínání mezi automatickým a manuálním řízením byla vytvořena v PLC automatu logická proměnná. Obsah všech proměnných lze také sledovat na obrazovce PLC automatu. Porovnání simulace ze Simulinku s regulací pomocí PLC automatu z obr. 11 potvrzuje, že byla tato práce zpracována správně.

Literatura

[1] LoAI. *Úvod do prostředí LaTeX 2ε*. YouTube video, [cit. 2022-01-13], ⟨https://www.youtube.com/watch?v=Pt6-xu9XSm0⟩, 2021.

[2] LoAI. *Úvod do prostředí Matlab*. YouTube video, [cit. 2025-10-21], ⟨https://www.youtube.com/watch?v=F-H9zsEstak⟩, 2021.

[3] LoAI. *Úvod do prostředí Simulink*. YouTube video, [cit. 2025-10-21], ⟨https://www.youtube.com/watch?v=9GHwmKu1rnc⟩, 2025.

[4] MathWorks. *Matlab* [online]. [cit. 2025-10-21], ⟨https://www.mathworks.com⟩, 2025.

[5] Roubal, J. Výukové materiály pro Laboratoř aplikované informatiky na VOŠ. (Bakalářská práce), ČVUT v Praze, MUVS, Praha, 2012.

[6] Roubal, J. a Chvátal, S. *Laboratoř aplikované informatiky* [online]. [cit. 2025-05-21], ⟨https://LoAI.copsu.cz⟩, 2025.

[7] Roubal, J., Hušek, P. a kol. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011.

[8] Šikýř, T. Systém vodního hospodářství – laboratorní model. (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí, 2011.

Příloha

K vygenerování simulinkového schématu do souboru `*.eps` nebo `*.png` lze použít skript, který je součástí šablony pro referáty [1] připravené v publikačním prostředí LaTeX2e. Skript se nachází ve složce `_Matlab` a jmenuje se `WaterTank_sim.m`. Tento skript byl zkopírován do složky `Coupled Tanks` a byly upraveny hodnoty proměnných `ModelName` a `ModelMaskName`. Upravený skript je uveden níže.

```
clc; clear; close all

%% Model name and ModelMask name
ModelName = 'CoupledTanks';
ModelMaskName = 'COUPLED TANKS VR Model';

%% Simulink Scheme to EPS and PNG
open_system(sprintf('%s.mdl',ModelName));
get_param(ModelName, 'PaperType')
get_param(ModelName, 'PaperOrientation')
get_param(ModelName, 'PaperPositionMode')
get_param(ModelName, 'PaperPosition')
set_param(ModelName, 'PaperOrientation', 'portrait')
    print(sprintf('-s%s',ModelName),'-depsc2','../Figures/ModelCT');
    print(sprintf('-s%s',ModelName),'-dpng','../Figures/ModelCT');
open_system(sprintf('%s/%s',ModelName,ModelMaskName), 'force');
set_param(sprintf('%s/%s',ModelName,ModelMaskName), 'PaperOrientation', 'portrait')
    print(sprintf('-s%s/%s',ModelName,ModelMaskName),'-depsc2','../Figures/ModelCTunderMask');
    print(sprintf('-s%s/%s',ModelName,ModelMaskName),'-dpng','../Figures/ModelCTunderMask');
bdclose(sprintf('%s.mdl',ModelName));
```

Poděkování

Děkujeme především správci Laboratoře aplikované informatiky Jiřímu Roubalovi za podporu při práci na tomto projektu a za šablonu v publikačním prostředí LaTeX 2_ε. Rádi bychom také poděkovali škole za možnost využívat její odborné vybavení.