



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## REALIZACE LABORATORNÍHO MODELU PRO DEMONSTRACI ŘÍZENÍ JEDNODUCHÝCH TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ

IMPLEMENTATION OF THE LABORATORY MODEL FOR DEMONSTRATION OF THE SIMPLE  
TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Stanislav Pacal**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Stanislav Pacal

**ID:** 195405

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Realizace laboratorního modelu pro demonstraci řízení jednoduchých technologických procesů**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a realizovat vzorovou laboratorní úlohu pro demonstraci řízení jednoduchých technologických procesů. Výsledkem by měla být platforma vybavená analogovými obvody s nastavitelnými parametry simulující různé dynamiky připojitelná na vstupy/výstupy PLC. Dále se předpokládá návrh a realizace vzorové laboratorní úlohy pro demonstraci řízení modelu jednoduchého technologického procesu.

1. Navrhněte a popište koncepci systému.
2. Navrhněte obvodové řešení, realizujte DPS a oživte.
3. Změřte základní charakteristiky realizovaných dynamických systémů a vyhodnoťte jejich parametry.
4. Navrhněte vzorovou laboratorní úlohu pro demonstraci řízení vybraného modelu jednoduchého technologického procesu či zařízení.
5. Připojte zařízení k PLC Simatic S7-1200, resp. S7-1500, a pro danou úlohu navrhněte a implementujte řídicí systém.
6. Sepište zadání vzorové laboratorní úlohy.
7. Sepište bakalářskou práci.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

SIEMENS. SIMATIC S7-1200 and S7-1500 PID Control. Siemens AG. [Online] [Citace: 20.8.2018] Dostupné z:

[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att\\_916450/v1/s71500\\_pid\\_control\\_function\\_manual\\_enUS\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916450/v1/s71500_pid_control_function_manual_enUS_en-US.pdf)

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 20.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík,**  
**CSc.**

*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **1.1 Abstrakt**

Předmětem této bakalářské práce je návrh a realizace platformy pro simulaci jednoduchých technologických procesů a návrh vzorové laboratorní úlohy pro demonstraci řízení jednoduchých technologických procesů. Výsledkem je platforma vybavená analogovými obvody s nastavitelnými parametry simulující různé dynamiky připojitelná na vstupy/výstupy PLC.

## **1.2 Klíčová slova**

System, řízení, PT1, PT2, simulátor, model, PLC

## **1.3 Abstract**

The subject of this bachelor thesis is to design and implement a platform for simulation of simple technological processes and to design a sample laboratory task for demonstration of controlling simple technological processes. The result platform is equipped with analog circuits with adjustable parameters simulating various dynamics. It can be connected to PLC inputs and outputs.

## **1.4 Keywords**

System, control, PT1, PT2, simulator, model, PLC

## **1.5 Bibliografická citace**

PACAL, Stanislav. Realizace laboratorního modelu pro demonstraci řízení jednoduchých technologických procesů [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119065>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Miroslav Jirgl.

## 1.6 Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Realizace laboratorního modelu pro demonstraci řízení jednoduchých technologických procesů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a literárních zdrojů.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem neporušil autorská práva třetích osob a jsem si plně vědom následků porušení autorského zákona č. 121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## 1.7 Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Jirglovi Ph.D. za trpělivou, účinnou a shovívavou pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Systémový úvod pro teorii automatického řízení.....	9
2.1	Vymezení pojmu systém .....	9
2.2	Definování systému .....	9
2.3	Chování systému .....	10
2.4	Typy řízených systémů.....	11
2.5	Samoregulovatelné systémy.....	11
2.5.1	Proporcionální řízené systémy.....	11
2.5.2	PT1 řízené systémy .....	12
2.5.3	PT2 řízené systémy .....	13
2.6	Řízené systémy bez samoregulace.....	14
2.7	Řízené systémy s dopravním zpožděním .....	15
3	Návrh koncepce systému.....	16
4	Návrh obvodového řešení .....	18
4.1	Návrh a popis jednotlivých bloků.....	18
4.1.1	PT1 člen (simulace krátké dynamiky) .....	18
4.1.2	Pásmo necitlivosti.....	19
4.1.3	PT1 člen (třetí blok systému).....	19
4.1.4	PT2 člen (čtvrtý blok návrhu).....	20
4.1.5	Rozdílový člen .....	22
4.1.6	P člen (pátý blok návrhu).....	22
4.1.7	I člen (simulace systému bez samoregulace).....	23
4.1.8	Napájení OZ.....	23
4.2	Simulace v Micro-Cap 10.0.9.2.....	24
4.3	Obvodové řešení a návrh DPS.....	25
4.3.1	Program KiCad .....	26
4.3.2	Návrh DPS .....	27
4.3.3	Realizace laboratorního modelu a oživení.....	28
5	Měření základních charakteristik realizovaného modelu .....	31
6	Návrh vzorové laboratorní úlohy .....	35
6.1	Popis regulované soustavy.....	35
6.2	Simulace navržené soustavy .....	37
6.3	Návrh regulátoru .....	38
7	Realizace vzorové laboratorní úlohy .....	42
7.1	Propojení laboratorního modelu s PLC.....	42
7.2	Popis stavového automatu.....	43
7.3	Implementace regulátoru.....	43

7.4 Vizualizace.....	44
8 Závěr .....	46
Literatura .....	47
Seznam příloh.....	50

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma regulovaného systému [2] .....	10
Obrázek 2: a) Proporcionálně řízený systém průtoku b) Blokové schéma a dynamické chování [6].....	12
Obrázek 3: a) PT1 řízený systém, řízená veličina: teplota b) Dynamické chování PT1 řízeného systému, y: nastavení směšovacího ventilu, x: teplota vody v nádrži [6].	13
Obrázek 4: a) PT2 řízený systém, řízená veličina: teplota b) Dynamické chování PT2 řízeného systému, y: nastavení směšovacího ventilu, x: teplota vody v druhém tanku [6] .....	13
Obrázek 5: Odezva PT1 řízeného systému na jednotkový skok [6] .....	14
Obrázek 6: a) Integrovaný řízený systém; řízená veličina: výška hladiny b) Dynamické chování integračního systému[6] .....	15
Obrázek 7: a) Řízený systém s dopravním zpožděním b) Dynamické chování systému s dopravním zpožděním [6] .....	15
Obrázek 8: Blokový diagram návrhu koncepce systému.....	16
Obrázek 9: Setrvačný člunek prvního řádu [8] .....	18
Obrázek 10: Komplementární sledovače [8], [9] .....	19
Obrázek 11: Setrvačný člunek prvního řádu s nastavitelnou časovou konstantou a nelinearitou [8] .....	20
Obrázek 12: Realizace přenosových funkcí druhého řádu [8] .....	21
Obrázek 13: Invertující zapojení OZ s nastavitelným zesílením [8].....	22
Obrázek 14: Integrovaný zapojení OZ s nastavitelnou časovou konstantou [8].....	23
Obrázek 15: Zapojení DC/DC měniče .....	23
Obrázek 16: Ukázka nástroje MicroCap, okno 1 .....	24
Obrázek 17: Ukázka nástroje MicroCap, okno 2 .....	25
Obrázek 18: Ukázka nástroje MicroCap, okno 3 .....	25
Obrázek 19: Návrh DPS.....	27
Obrázek 20: Horní a spodní strana DPS .....	28
Obrázek 21: Výsledný laboratorní model.....	28
Obrázek 22: Popis laboratorního modelu .....	29
Obrázek 23: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT1 člen .....	32
Obrázek 24: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen $sw4 = 0k$ .....	32
Obrázek 25: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen $sw4 = 47k$ .....	32
Obrázek 26: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen $sw4 = 160k$ .....	33
Obrázek 27: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen $sw4 = 330k$ .....	33
Obrázek 28: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen $sw4 = 620k$ .....	34
Obrázek 29: Porovnání měřených průběhů se simulací, P člen a I člen.....	34
Obrázek 30: Schéma systému dvou nádrží .....	35
Obrázek 31: Schéma simulace vzorové úlohy .....	37

Obrázek 32: Odezva navržené soustavy na skokovou změnu žádané hodnoty.....	38
Obrázek 33: Odezva regulované soustavy na skokovou změnu žádané hodnoty....	41
Obrázek 34: Stavový automat .....	43
Obrázek 35: Vizualizace technologického procesu.....	45
Obrázek 36: Výsledek regulace pomocí PLC.....	45
Obrázek 37: Schéma systému dvou nádrží .....	65
Obrázek 38: Přechodová charakteristiky systému nastaveného na laboratorním modulu .....	66
Obrázek 39: PID_Compact – výběr struktury a nastavení parametrů [12] .....	68



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Obtížnost regulace systémů vyšších řádů [6] .....	14
Tabulka 2: Popis laboratorního modelu.....	29
Tabulka 3: Popis laboratorního modelu.....	30
Tabulka 4: Zapojení plochého propojovacího kabelu k PLC.....	42

# 1 ÚVOD

Jelikož by bylo finančně i prostorově nákladné pořídit větší množství různých laboratorních soustav pro možnosti výuky řízení technologických procesů pomocí programovatelných automatů, je cílem této práce, jak už její název napovídá, realizace multifunkčního laboratorního modelu, který bude sloužit pro výukové účely jako simulátor technologických procesů vyšších řádů.

Cílem je tedy navrhnout platformu, která bude simulovat nejčastěji se v průmyslové praxi vyskytující aproximované systémy a bude připojitelná na vstupy/výstupy PLC.

Dalším cílem této práce je návrh a realizace vzorové laboratorní úlohy jednak jako demonstraci řízení vybraného modelu jednoduchého technologického procesu a za druhé jako ukázka funkčnosti modelu.

## 2 SYSTÉMOVÝ ÚVOD PRO TEORII AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ

Vlastnosti řízeného systému lze jen těžko ovlivnit, protože jsou určeny technickými vlastnostmi procesu a stroje. Přijatelných výsledků řízení může být dosaženo výběrem vhodného typu regulátoru pro konkrétní řízený systém a přizpůsobením regulátoru časové odezvě řízeného systému. Proto je pro konfiguraci regulátoru nezbytné, abychom měli přesné znalosti o typu a parametrech řízeného systému [5].

Běžně se vyskytující řízené systémy jsou obvykle systémy vyšších řádů, například ohřev vody v nádrži, kde akumulátorem energie je samotná voda, čidlo, nádoba nebo okolí, jestliže nádrž není izolována. Kdyby byly brány v potaz všechny tyto dynamiky, jednalo by se hned o systém čtvrtého řádu. Avšak oproti dynamice ohřevu samotné vody jsou ostatní dynamiky zanedbatelné, a proto je možné systém aproximovat pouze na systém prvního řádu, pro který je návrh regulátoru znatelně jednodušší [3].

### 2.1 Vymezení pojmu systém

Pojmem systém se rozumí soubor prvků, které mezi sebou mají vzájemné vztahy (vazby) a jako celek mají určité vztahy (vazby) ke svému okolí [1], [2].

Každý systém můžeme charakterizovat dvěma základními vlastnostmi:

- Chováním systému, charakterizujícím jeho chování vzhledem k vnějším vztahům k okolí [1], [2].
- Strukturou systému, charakterizující jeho vnitřní funkční vztahy [1], [2].

Obě tyto vlastnosti jsou ve velmi úzkém vztahu, který lze popsat jednak, že určitému chování systému odpovídá určitá třída struktur, definovaná tímto chováním, a naopak, že určité struktury odpovídá jednoznačně určité chování [1], [2].

### 2.2 Definování systému

Při definování systému dochází často k redukci neboli zjednodušení. Redukce spočívá v eliminaci nebo agregaci. Při agregaci dochází k zanedbání některých prvků nebo vztahů, naproti tomu při agregaci některé vztahy nebo prvky slučujeme[1].

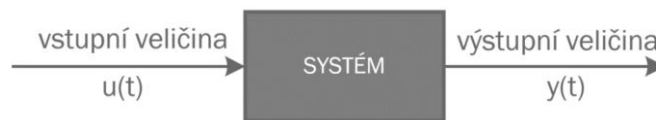
Každý prvek systému může být systémem nižšího řádu, podsystémem (subsystémem). Právě tak každý definovaný systém může být prvkem systému vyššího řádu neboli nadsystémem (supersystémem). Tato vlastnost je spjata s rozlišovací úrovní [1].

Snížením rozlišovací úrovně, tzv. integrací, dosáhneme spojováním prvků do systémů. Systém s nejnižší rozlišovací úrovní uvažujeme jako takový, který zkoumáme jako celek, tj. nerozlišujeme u něj žádné prvky [1].

Zvýšení rozlišovací úrovně neboli diferencí, docílíme rozkladem systémů na jednotlivé prvky. Systém s nejvyšší rozlišovací úrovní je takový, který již obsahuje pouze nejjednodušší, dále již z funkčního hlediska nerozložitelné prvky, u kterého můžeme poznat všechny jeho vnitřní vazby [1].

## 2.3 Chování systému

Je uvažován systém s jedním vstupem  $u(t)$  a jedním výstupem  $y(t)$ . Chování je formulováno závislostí mezi vstupním a výstupním signálem systému a dá se posuzovat pomocí dvou základních kritérií. Prvním z nich jsou statické vlastnosti systému určeny statickou charakteristikou. Jejíž hodnoty jsou získány v ustálených stavech (po odeznění přechodových dějů). Statické charakteristiky se dělí na lineární a nelineární. [1], [2].



Obrázek 1: Schéma regulovaného systému [2]

Druhým kritériem jsou dynamické vlastnosti systému, které vyšetřují chování systému při změnách vstupní i výstupní veličiny. Tyto vlastnosti se dají popsat dvěma různými způsoby [2]:

- Vnitřní popis systému
- Vnější popis systému

Vnitřní popis systému vyjadřuje dynamické vlastnosti dané vztahy mezi vstupem, stavem systému a výstupem. Pro určení vnitřního popisu systému je třeba znát jeho strukturu a všechny fyzikální děje, které v něm probíhají. Vnitřní popis systému se zapisuje stavovými rovnicemi ve stavovém prostoru, je to dokonalejší popis systému [2].

Vnější popis systému vyjadřuje dynamické vlastnosti závislostí mezi vstupní a výstupní veličinou. Oproti vnitřnímu popisu není třeba vědět, co se děje uvnitř systému, ale záleží pouze na reakci výstupní veličiny na změnu vstupní veličiny. Výhodou vnějšího popisu oproti vnitřnímu je jeho názornost a jednoduchost, vnější popis lze získat experimentálně naměřením průběhů vstupních a výstupních veličin [2].

## 2.4 Typy řízených systémů

V této podkapitole jsou uvedeny základní typy v praxi se často vyskytujících aproximací jednoduchých řízených systémů, které lze klasifikovat například na základě časové odezvy výstupního signálu na skokovou změnu vstupního signálu. Reálné systémy jsou obecně nelineární, avšak vhodnou volbou pracovního rozsahu a linearizací v okolí zvoleného pracovního bodu lze často tyto systémy uvažovat jako lineární. V případě, že jsou dané nelinearity snadno identifikovatelné a popsitelné, lze oddělit lineární část a nelinearity modelovat samostatně.

Rozlišujeme mezi těmito řízenými systémy:

- 1) Samoregulovatelné řízené systémy
  - Proporcionální řízené systémy
  - PT1 řízené systémy
  - PT2 řízené systémy
- 2) Řízené systémy bez samoregulace
- 3) Řízené systémy s dopravním zpožděním [5]

## 2.5 Samoregulovatelné systémy

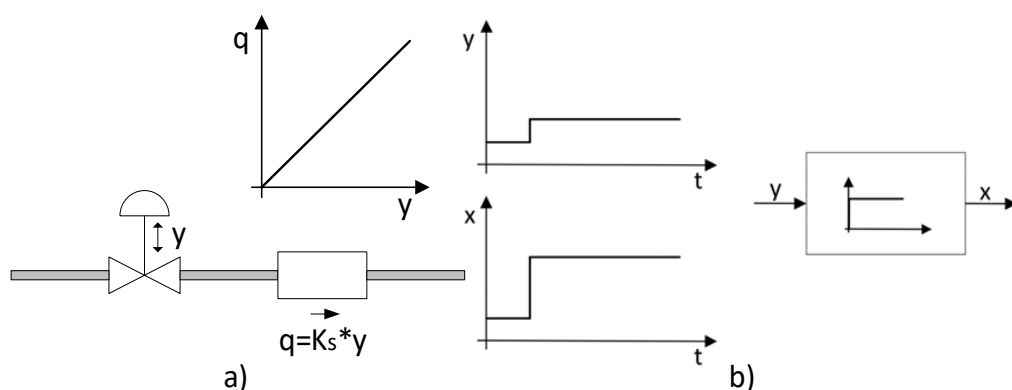
U samoregulovatelných systémů je zaručeno, že při změně vstupní žádané hodnoty dojde k dosažení nového rovnovážného stavu [5], [6].

### 2.5.1 Proporcionální řízené systémy

U proporcionálních řízených systémů (například: ventil v potrubí, dělič napětí nebo hydraulický píst) je výstupní signál přímo úměrný vstupnímu signálu. Výstupní veličina sleduje vstupní veličinu téměř bez zpoždění, resp. s tak malým zpožděním, které nemá na celkový systém žádný vliv [5], [6].

Příklad: Řízení průtoku

Jestliže pomocí ventilu znázorněném na obrázku 2a změním průtok trubkou, nový průtok  $q$  bude dosažen téměř okamžitě. Hodnota nového průtoku je přímo úměrná vstupní veličině v závislosti na velikosti koeficientu průtoku  $K_s$  [5], [6].



Obrázek 2: a) Proporcionálně řízený systém průtoku b) Blokové schéma a dynamické chování [6]

Na obrázku 2b je zobrazeno blokové schéma systému a jeho dynamické chování.

Z obrázku 2b je patrné, že proporcionálně řízený systém je systémem samoregulovatelným, protože nového rovnovážného stavu je dosaženo ihned po přivedení skokové změny vstupní veličiny [5], [6].

## 2.5.2 PT1 řízené systémy

V PT1 řízeném systému se vyskytuje jedna složka charakterizována schopností uchovávat energii (například zásobník na vodu, tlumící pružina, kondenzátor, apod...) [5], [6].

U takového řízeného systému se výstupní veličina nejdříve mění přímo úměrně ke změně vstupní hodnoty. Rychlost změny výstupní veličiny se snižuje v závislosti na čase, dokud není dosažena žádaná hodnota [5], [6].

Příklad: Ohřev vody v tanku

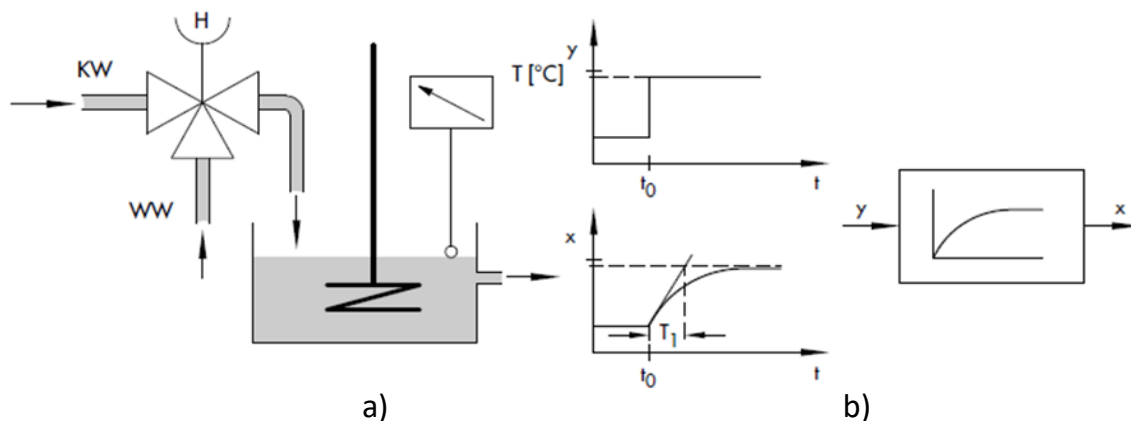
Na obrázku 3a je znázorněna nádrž s vodou, jedním odtokem, přítokem a směšovací ventilem pro nastavení teploty kapaliny v nádrži. Teplota se mění pouze po nastavení směšovacího ventilu [5], [6].

Dynamické chování PT1 řízeného systému je znázorněno na obrázku 3b. Rychlost odezvy udává časová konstanta  $T1$ , která představuje dobu, za kterou žádaná hodnota  $x$  dosáhne 63% své konečné hodnoty při skokové změně vstupního signálu. Průběh funkce je dán následujícím vztahem [5], [6].

$$x(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T1}} \quad (1)$$

Čím vyšší je časová konstanta  $T1$ , tím pomalejší je změna řízené proměnné a tím větší je složka akumulující energii, která způsobuje toto zpoždění.

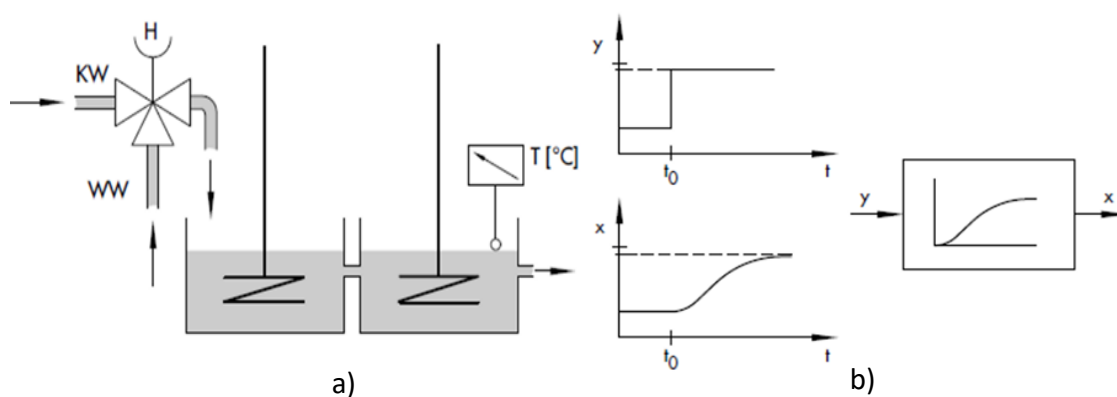
Časové konstanty takového systému jsou často shodné pro zahřívání i ochlazování, nebo pro nabíjecí i vybíjecí charakteristiku. V případě, kdy jsou tyto časové konstanty rozdílné, je řízení jednoznačně složitější [5], [6].



Obrázek 3: a) PT1 řízený systém, řízená veličina: teplota b) Dynamické chování PT1 řízeného systému, y: nastavení směšovacího ventilu, x: teplota vody v nádrži [6]

### 2.5.3 PT2 řízené systémy

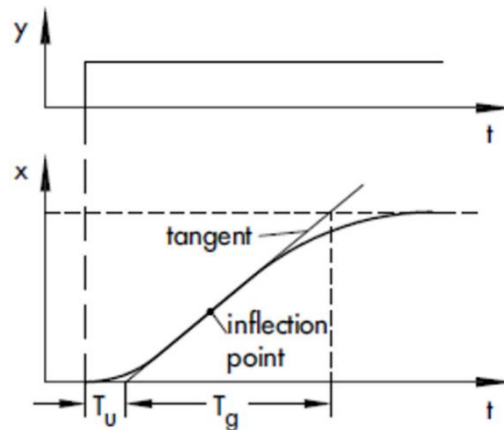
V PT2 řízeném systému se vyskytují dvě složky schopny uchovávat energii. Takovýto systém může být vytvořen například spojením dvou PT1 členů, uvažováním dynamiky čidla umístěného v regulované soustavě prvního řádu, nebo uvažováním schopnosti nádoby, ve které je ohřívána nějaká kapalina, akumulovat energii (viz obrázek 4a) [5], [6].



Obrázek 4: a) PT2 řízený systém, řízená veličina: teplota b) Dynamické chování PT2 řízeného systému, y: nastavení směšovacího ventilu, x: teplota vody v druhém tanku [6]

V PT2 řízených systémech se žádaná hodnota nemění hned po přivedení skokové změny vstupního signálu přímo úměrně s časem, zpočátku se rychlost změny zvyšuje až do inflexního bodu a poté průběžně stoupá srovnatelně se systémem prvního řádu viz obrázek 4b a obrázek 5 [5], [6].

Dynamické chování PT2 systémů je zobrazeno na obrázku 4b a 5. Odezva řízené veličiny na jednotkový skok vytváří křivku s inflexním bodem, která je charakteristická pro systémy vyšších řádů. Takovýto systém se dá charakterizovat pomocí dvou časových konstant, doby průtahu  $T_u$  a doby náběhu  $T_n$ , určených tečnou vedenou inflexním bodem (viz obrázek 5). Dlouhá doba průtahu má značný vliv na jakost regulace, tudíž čím vyšší je řád systému, tím více se  $T_u$  přibližuje k  $T_n$  a regulace se tak stává obtížnější (viz Tabulka 1) [6].



Obrázek 5: Odezva PT1 řízeného systému na jednotkový skok [6]

Process type	$T_u / T_g$	Suitability of the controlled system for controlling
I	$< 0.1$	can be controlled well
II	0.1 to 0.3	can still be controlled
III	$> 0.3$	difficult to control

Tabulka 1: Obtížnost regulace systémů vyšších řádů [6]

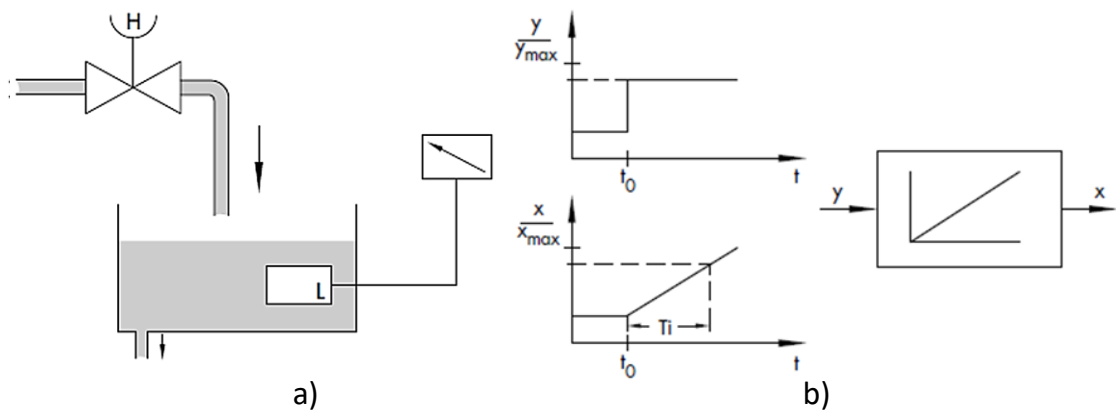
## 2.6 Řízené systémy bez samoregulace

U systémů bez samoregulace nedojde při změně vstupní žádané hodnoty k dosažení nového rovnovážného stavu. Systémy bez samoregulace mají integrální odezvu [5], [6].

Příklad: hladina kapaliny v nádrži

Jestliže máme nádrž s odtokem a stejně velkým přítokem, dostaneme v nádrži konstantní velikost hladiny. Pokud se změní průtokový proud nebo výtlak, hladina kapaliny v nádrži bude konstantně klesat nebo stoupat. Ovládaná proměnná se zvyšuje nebo snižuje pouze dokud nedosáhne mezní hodnoty související s daným systémem, v tomto případě je to přetečení nebo vypuštění nádrže [5], [6].





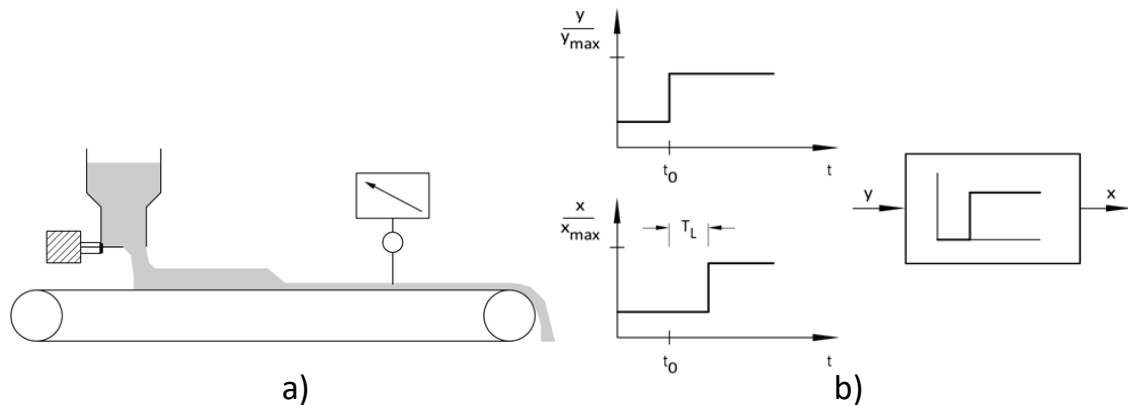
Obrázek 6: a) Integrovaný řízený systém; řízená veličina: výška hladiny b) Dynamické chování integračního systému [6]

Na obrázku 6b je znázorněno dynamické chování systému při odezvě na skokovou změnu vstupní veličiny. Časová konstanta  $T_i$  představuje dobu nárůstu regulované veličiny [6].

## 2.7 Řízené systémy s dopravním zpožděním

Dopravní zpoždění reprezentuje dobu, po kterou se změna vstupní veličiny neprojeví na výstupu soustavy [5], [6].

Příklad: pásový dopravník



Obrázek 7: a) Řízený systém s dopravním zpožděním b) Dynamické chování systému s dopravním zpožděním [6]

Dynamické chování systému je zobrazeno na obrázku 7b. Časová konstanta  $T_L$  určuje dobu dopravního zpoždění. Protože v systémech s dopravním zpožděním mají změny akčního zásahu opožděný účinek na změnu žádané hodnoty, je jejich regulace velmi obtížná [6].

Výše uvedené systémy se v praxi nevyskytují pouze tak, jak jsou zde uvedeny, ale rovněž i jejich kombinace.

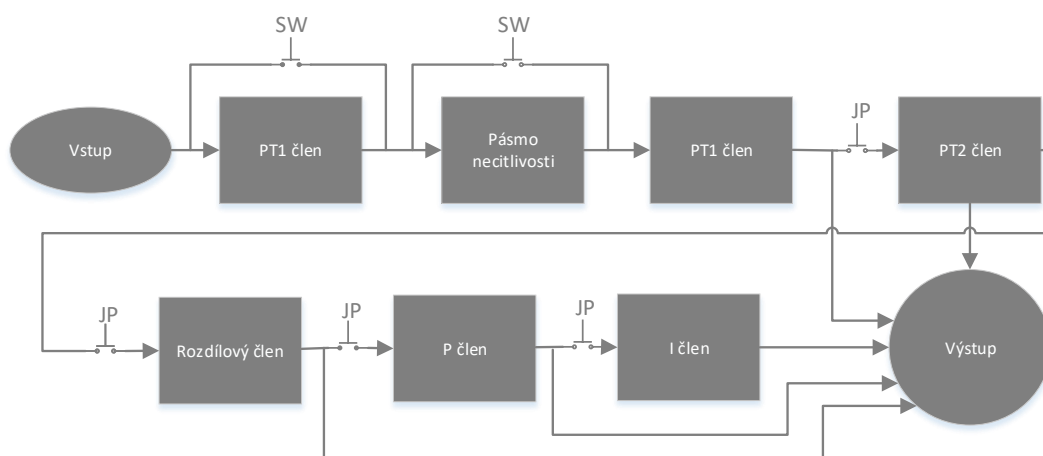
### 3 NÁVRH KONCEPCE SYSTÉMU

Cílem je navrhnout platformu pro simulaci jednoduchých technologických procesů, vybavenou analogovými obvody s nastavitelnými parametry simulující různé dynamiky. Jelikož nejčastěji řízené systémy v průmyslové praxi jsou systémy uvedené v kapitole Systémový úvod pro teorii automatického řízení koncepce systému se zabývá právě těmito nejčastěji se vyskytujícími systémy.

Časové konstanty systémů z průmyslové praxe se obvykle pohybují v řádech minut, desítek minut i hodin. Jelikož se ale jedná o laboratorní platformu určenou pro výuku, jsou časové konstanty omezeny na jednotky sekund.

V blokovém schématu na obrázku 8 jsou zobrazeny jednotlivé členy návrhu platformy.

- PT1 člen – simulující například dynamiku čidla
- Pásmo necitlivosti – například vůle v převodech
- PT1 člen – simulující dynamiky systémů prvních řádů s nastavitelnými parametry a simulací poruchy
- PT2 člen – simulující dynamiky systémů druhých řádů s nastavitelnými parametry
- I člen – simulující systém bez samoregulace s nastavitelnými parametry
- P člen – s nastavitelným zesílením
- Rozdílový člen – pro simulaci poruchy působící na výstupu systému



Obrázek 8: Blokový diagram návrhu koncepce systému

Jednotlivé členy uvedené v blokovém schématu bude možné jednoduše pomocí přepínačů nebo jumperů přepínat do různých kombinací, čímž bude možno na výstupu získat mnoho zajímavých průběhů s různými časovými konstantami. Zvyšuje se tak multifunkčnost zařízení. Podrobnější popis viz kapitolu Návrh obvodového řešení.

Jednotlivé bloky návrhu budou realizovány převážně pomocí operačních zesilovačů, jejichž napěťový ubytek je zanedbatelný, proto budou vstupy/výstupy systému napěťové.

Výsledná platforma by měla být připojitelná k již používaným zařízením v laboratořích na UAMT jako jsou PLC nebo přes DataLab IO k PC. Jelikož s přípravkem přijde do styku množství uživatelů, mělo by výsledné zařízení být také odolné vůči mechanickému namáhání.

## 4 NÁVRH OBVODOVÉHO ŘEŠENÍ

Tato kapitola se zabývá rozбором jednotlivých bloků navrženého modelu. Obsahuje pár slov o použitém programu pro návrh obvodového řešení a dále popis a ukázkou programu použitého při simulaci průběhů signálů jednotlivými bloky. Poslední podkapitolou této kapitoly je realizaci modelu a jeho popis.

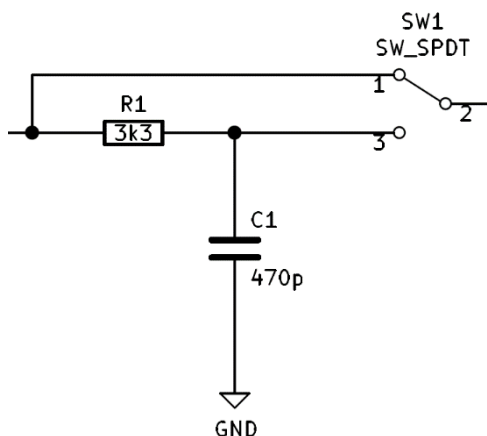
### 4.1 Návrh a popis jednotlivých bloků

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, výsledná platforma bude sestávat ze 7 samostatných bloků (členů), které jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.

#### 4.1.1 PT1 člen (simulace krátké dynamiky)

Prvním blokem je setrvačný článek prvního řádu viz obrázek 9, který má pevně danou malou časovou konstantu.

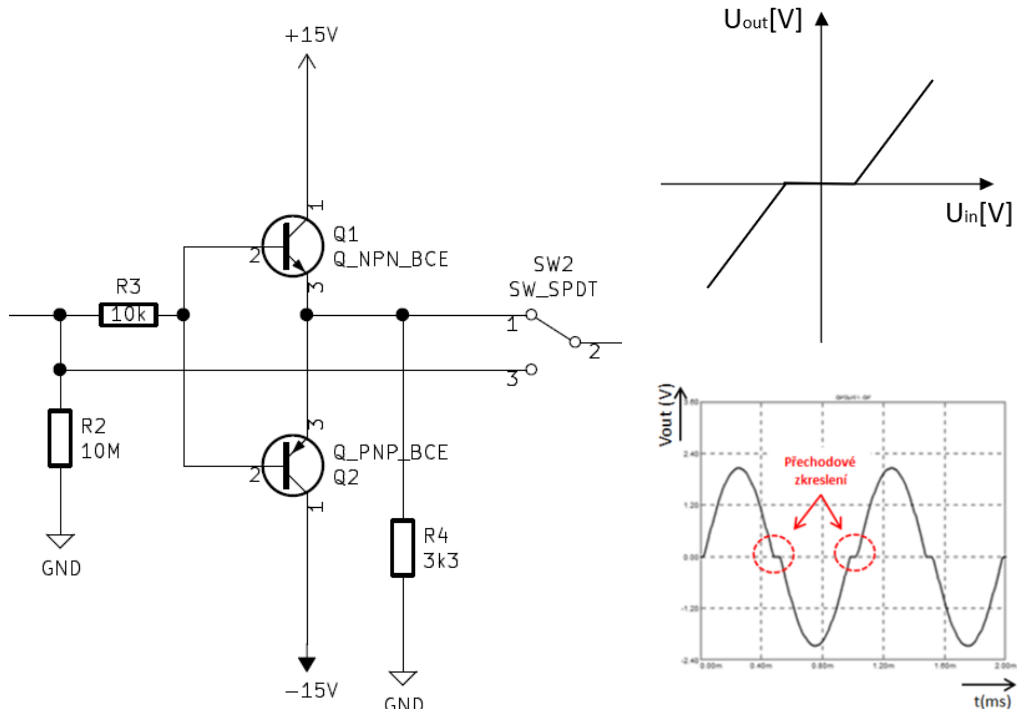
Tento článek má představovat dynamiku obvykle zanedbatelného členu regulované soustavy například měřícího čidla, nebo nádoby (při ohřevu kapaliny), apod.



Obrázek 9: Setrvačný článek prvního řádu [8]

## 4.1.2 Pásmo necitlivosti

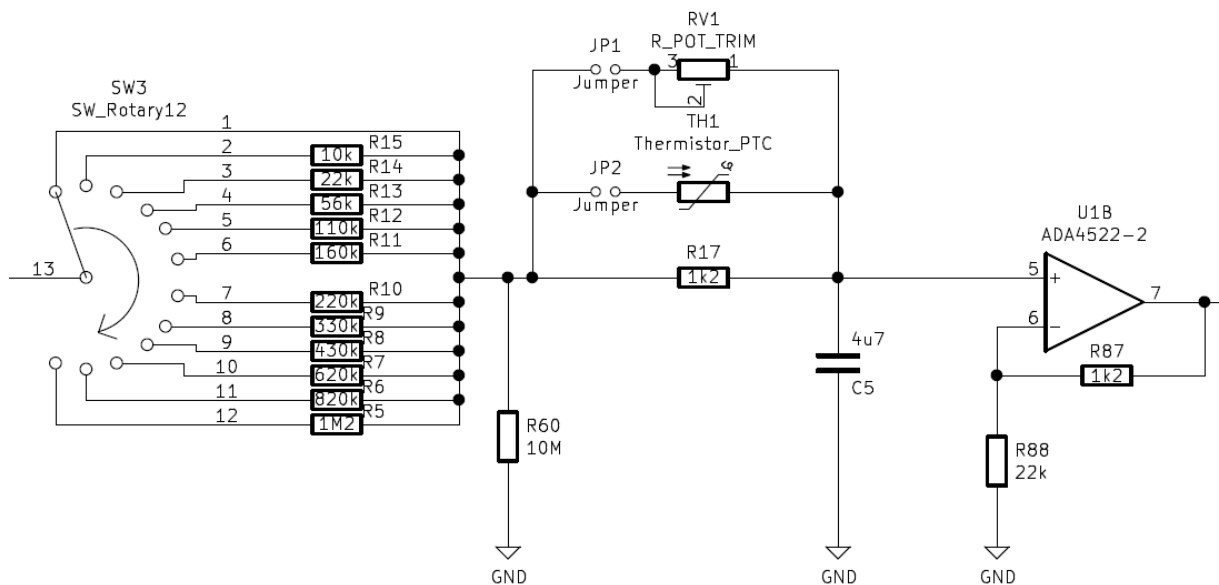
Dalším blokem schématu je pásmo necitlivosti, symetrický emitorový sledovač, který zavádí do systému přechodové zkreslení pro malé signály. Umožňuje simulaci například vůle v převodech.



Obrázek 10: Komplementární sledovače [8], [9]

## 4.1.3 PT1 člen (třetí blok systému)

Třetí blok, stejně jako první blok, je setrvačný článek prvního řádu ovšem s nastavitelnou časovou konstantou viz obrázek 11. Časovou konstantu lze nastavit pomocí dvanácti polohového přepínače na hodnoty od  $\tau = 5,6 ms$  do  $\tau = 5,65 s$ . Paralelně k rezistoru v RC článku je přes jumper připojitelný termistor, nebo trimer, toto paralelní zapojení má simulovat působení různých nelinearit. Například nerovnoměrné oteplení vody v nádrži.



Obrázek 11: Setrvačný člen prvního řádu s nastavitelnou časovou konstantou a nelinearitou [8]

#### 4.1.4 PT2 člen (čtvrtý blok návrhu)

Čtvrtým blokem schématu je zapojení se třemi OZ pro realizaci přenosových funkcí druhého řádu s nastavitelnými parametry.

Přenosu tohoto členu odpovídá následující přenosová rovnice

$$F_S = -\frac{\omega_p^2}{p^2 + p\omega_p(2 + m)d + \omega_p^2} \quad (5)$$

Kde

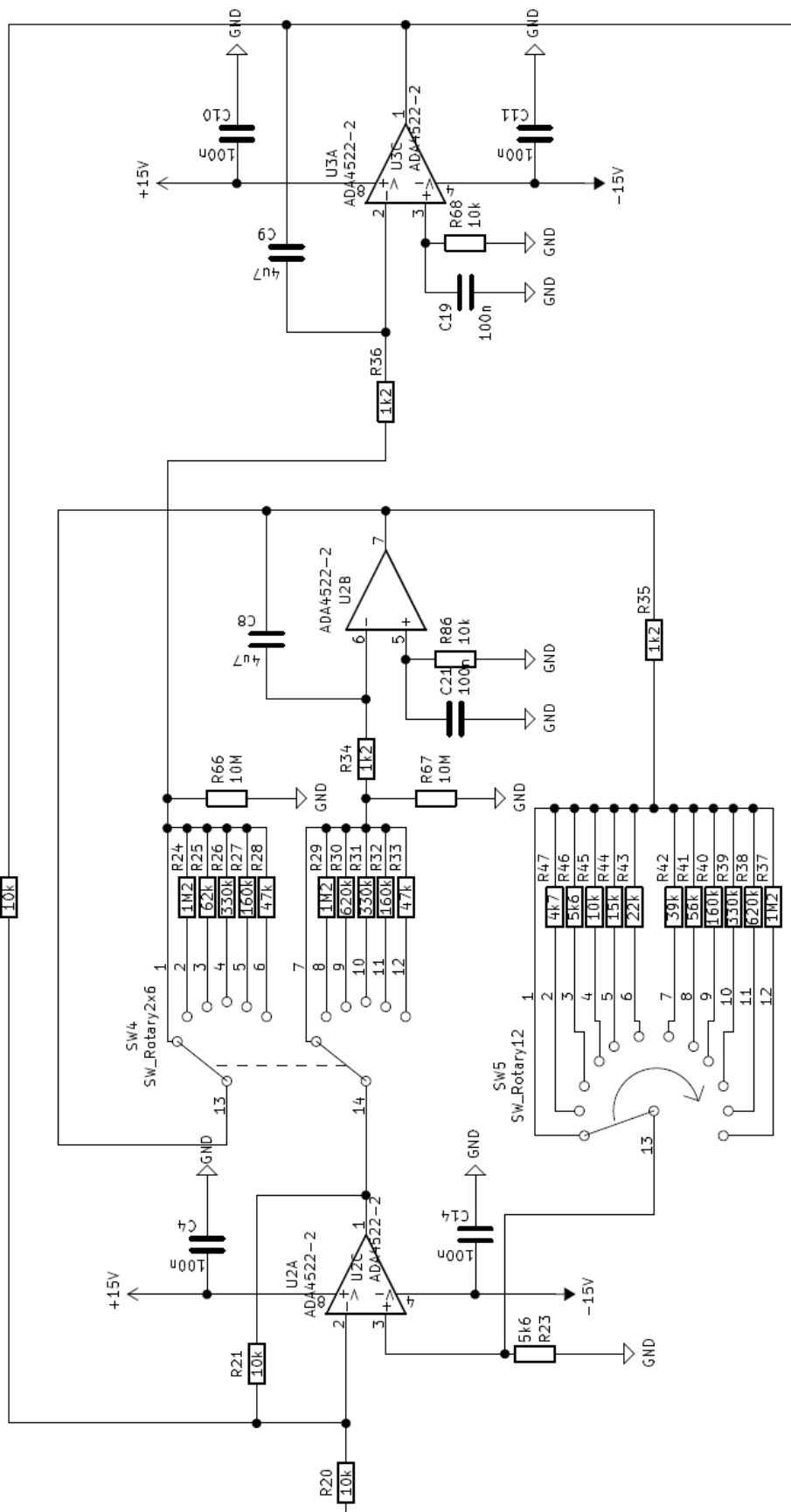
$$d = \frac{R_{23}}{R_{23} + \Delta R_1} \quad (6)$$

$$\omega_p^2 = \frac{1}{C \cdot \Delta R_2} \quad (7)$$

Kde  $\Delta R$  je nastavitelný odpor pomocí rotačních přepínačů.

$\Delta R_1$ -nastavován pomocí přepínače SW5

$\Delta R_2$ -nastavován pomocí přepínače SW4



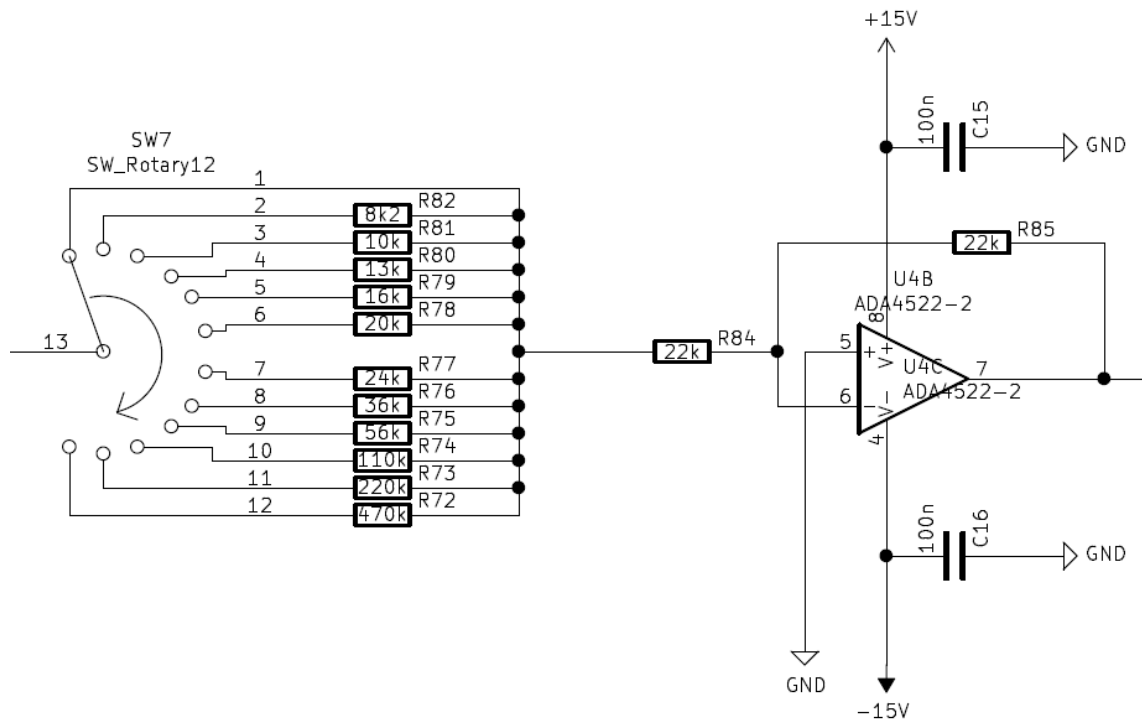
Obrázek 12: Realizace přenosových funkcí druhého řádu [8]

### 4.1.5 Rozdílový člen

Pátým blokem schématu je rozdílový člen, který slouží jako simulace poruchy působící na výstupu soustavy. Je tvořen jednoduše jako dělič pomocí trimru. Otáčením trimru se mění poměr děliče a lze tak snižovat výstupní napětí.

### 4.1.6 P člen (pátý blok návrhu)

Invertující zapojení operačního zesilovače s nastavitelnými parametry zesílení. Slouží pro simulaci proporcionálních řízených systémů, nebo také díky možnosti nastavení zesílení na hodnotu  $K \cong 1$ , jako invertor signálu, což se hodí v případě zapojení lichého počtu invertujících zesilovačů, protože výstupní signál by byl invertovaný.

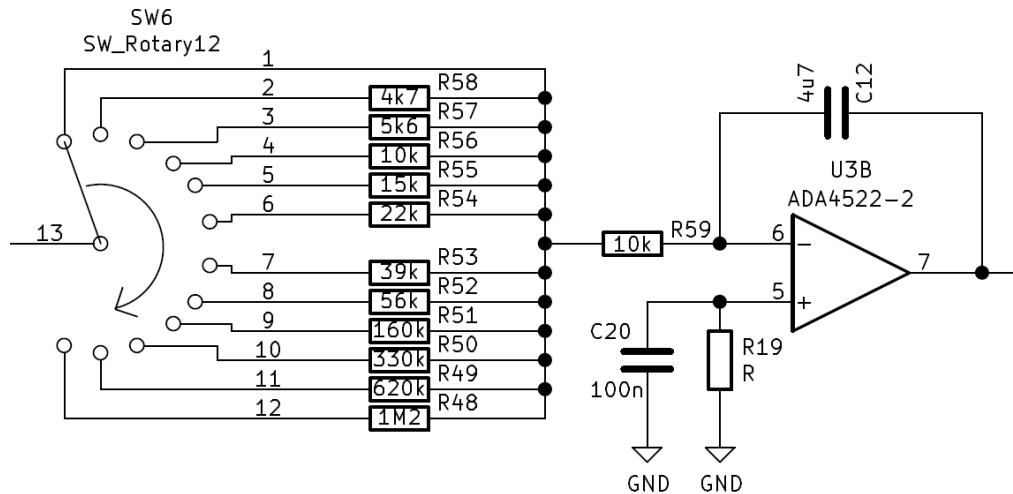


Obrázek 13: Invertující zapojení OZ s nastavitelným zesílením [8]



### 4.1.7 I člen (simulace systému bez samoregulace)

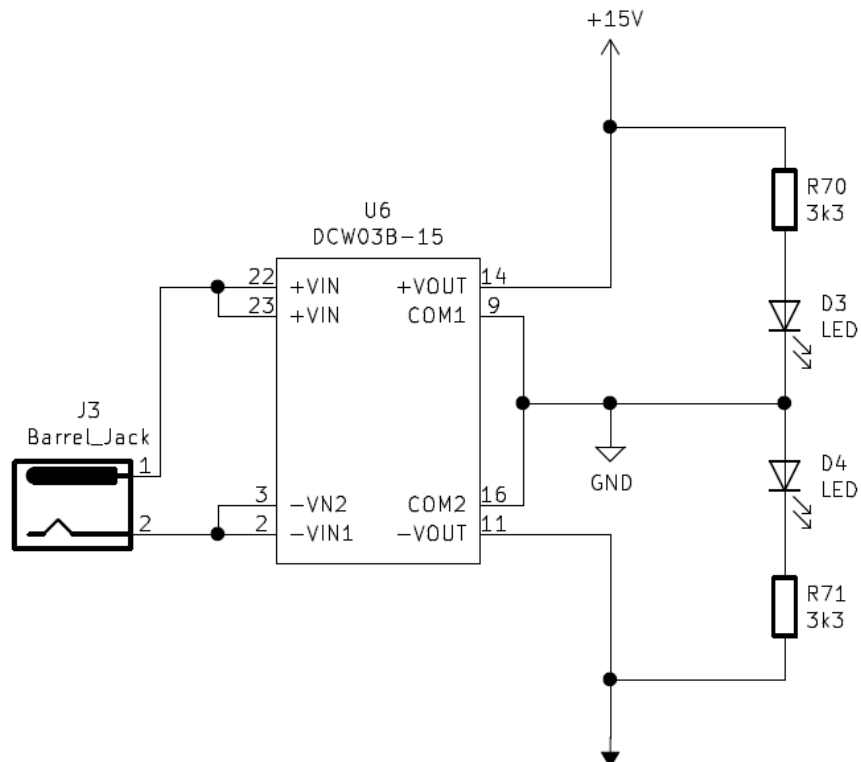
Dalším blokem schématu je integrátor s OZ a nastavitelnou časovou konstantou. Toto zapojení simuluje systémy bez samoregulace.



Obrázek 14: Integrojící zapojení OZ s nastavitelnou časovou konstantou [8]

### 4.1.8 Napájení OZ

Napájení operačních zesilovačů ADA4522-2 rail to rail je řešeno symetricky  $\pm 15V$  pomocí DC/DC měniče, který je možno napájet  $18 \div 36V$ . Na měnič je tedy přivedeno 24V přímo z PLC. Schéma zapojení měniče viz obrázek 15.



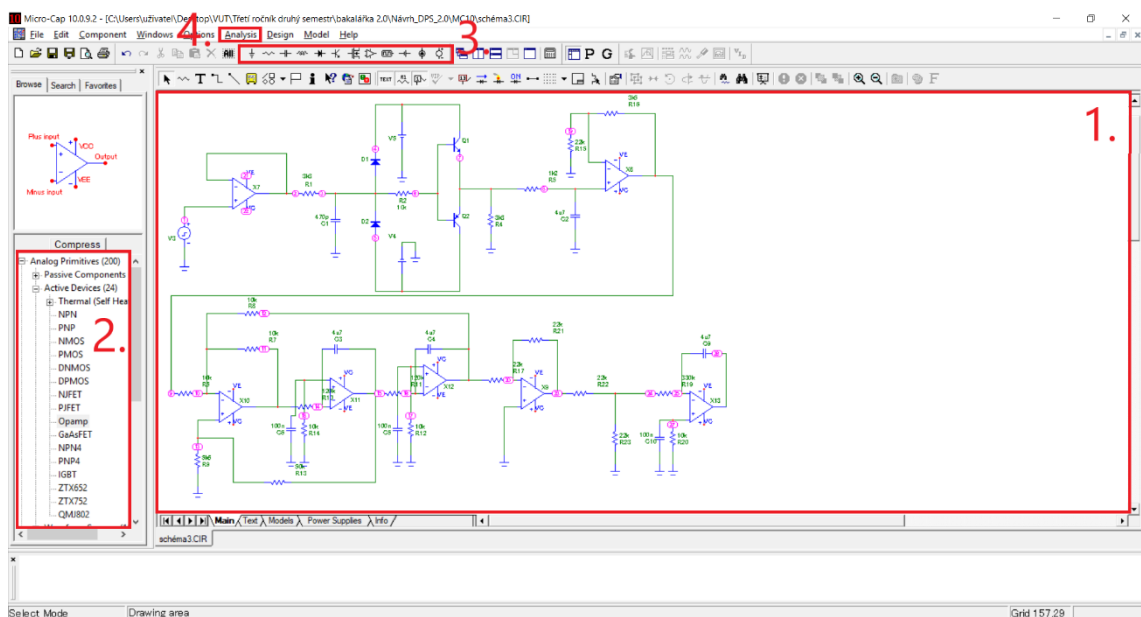
Obrázek 15: Zapojení DC/DC měniče

## 4.2 Simulace v Micro-Cap 10.0.9.2

K ověření funkčnosti schématu byl využit nástroj Micro-Cap 10.0.9.2. Celé simulační schéma je uvedeno v příloze 2. Porovnání simulací a naměřených průběhů reálného modelu jsou uvedeny v kapitole Měření základních charakteristik realizovaného modelu.

Micro-Cap je program, který umožňuje analýzu lineárních a nelineárních elektrických obvodů v časové oblasti. Zadání obvodu se provádí zakreslením schématu na obrazovku a následně je možné provést analýzu, jejíž výsledky se zobrazují graficky [10].

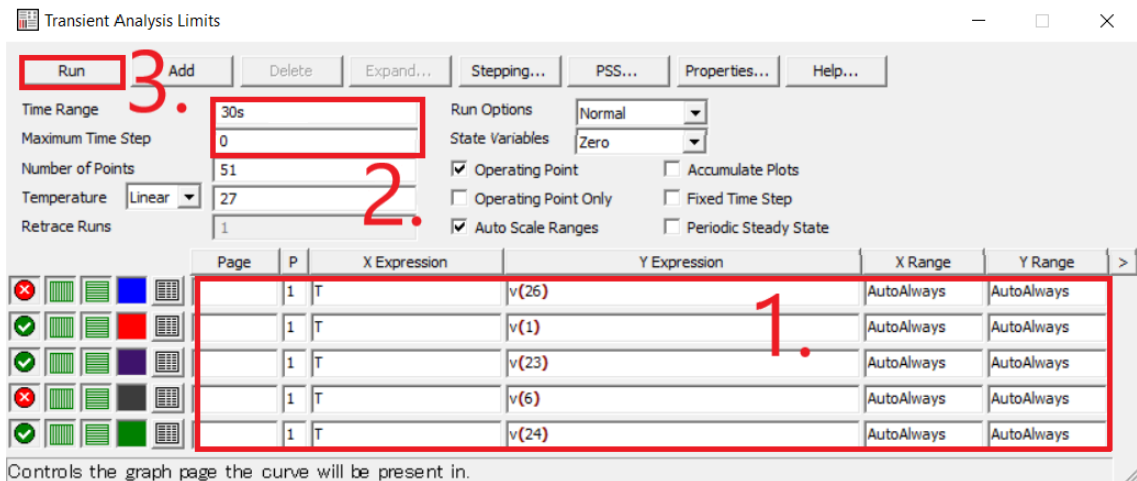
Ukázka nástroje Micro-Cap:



Obrázek 16: Ukázka nástroje MicroCap, okno 1

1. Plocha pro kreslení schématu. Nad levým horním rohem této plochy jsou umístěny ikonky čar pro spojování jednotlivých součástek.
2. Sada knihoven součástek
3. Nejčastěji používané součástky umístěné na horním panelu.
4. Tlačítko *Analysis* umístěné na horní liště, kde lze zvolit analýzu přechodové charakteristiky výběrem možnosti *Transient Analysis*.

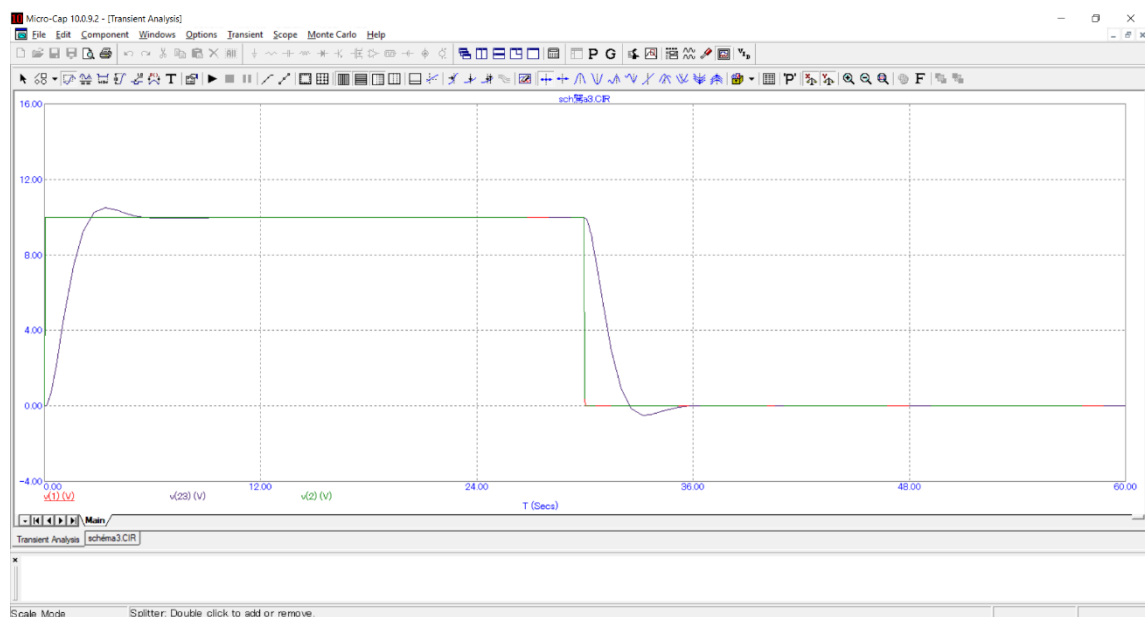
Po výběru možnosti měření přechodové charakteristiky *Transient Analysis* se objeví následující okno.



Obrázek 17: Ukázka nástroje MicroCap, okno 2

1. Okno sloužící k zadání jednotlivých měřících podů ze schématu.
2. Nastavení délky simulace a maximálního kroku vzorkování.
3. Spuštění simulace.

Po spuštění se zobrazí měřený průběh v následujícím okně. Na horním panelu nad zobrazeným grafem jsou ikonky pro měření různých vlastností signálu, jako například rise time, peak, apod.



Obrázek 18: Ukázka nástroje MicroCap, okno 3

### 4.3 Obvodové řešení a návrh DPS

Schéma zapojení viz příloha 1 se skládá ze sedmi bloků, které lze, jak už bylo řečeno na začátku kapitoly Návrh koncepce systému, přepínat nebo odepínat pomocí přepínačů a propojek.

Na vstupu zapojení je umístěn sledovač kvůli vysoké vstupní impedanci, za rozdílovým členem je umístěný také sledovač, ovšem z opačného důvodu, a to, aby na výstupu byla nízká impedance, jelikož PLC má také nízkou vstupní impedanci a nedošlo tak k úbytku napětí.

Vstup každého bloku je přes odpor  $10M\Omega$  připojen ke GND z důvodu odstranění případného indukovaného rušení.

### **4.3.1 Program KiCad**

Návrh obvodového řešení je vytvořen v programu KiCad verze 5.0.1. KiCad je open source nástroj pro tvorbu schémat a plošných spojů. Umožňuje vytváření vlastních knihoven, zobrazení výsledné DPS ve 3D a pomocí externích programů import a export pro jiné systémy [7].

- Tvorba schématu

Pro návrh schématu slouží program Eeschema, který umožňuje běžné operace, za zmínku stojí funkce ERC (elektrická kontrola schémat), která hlásí chyby při spojení různých typů vývodů apod. [7].

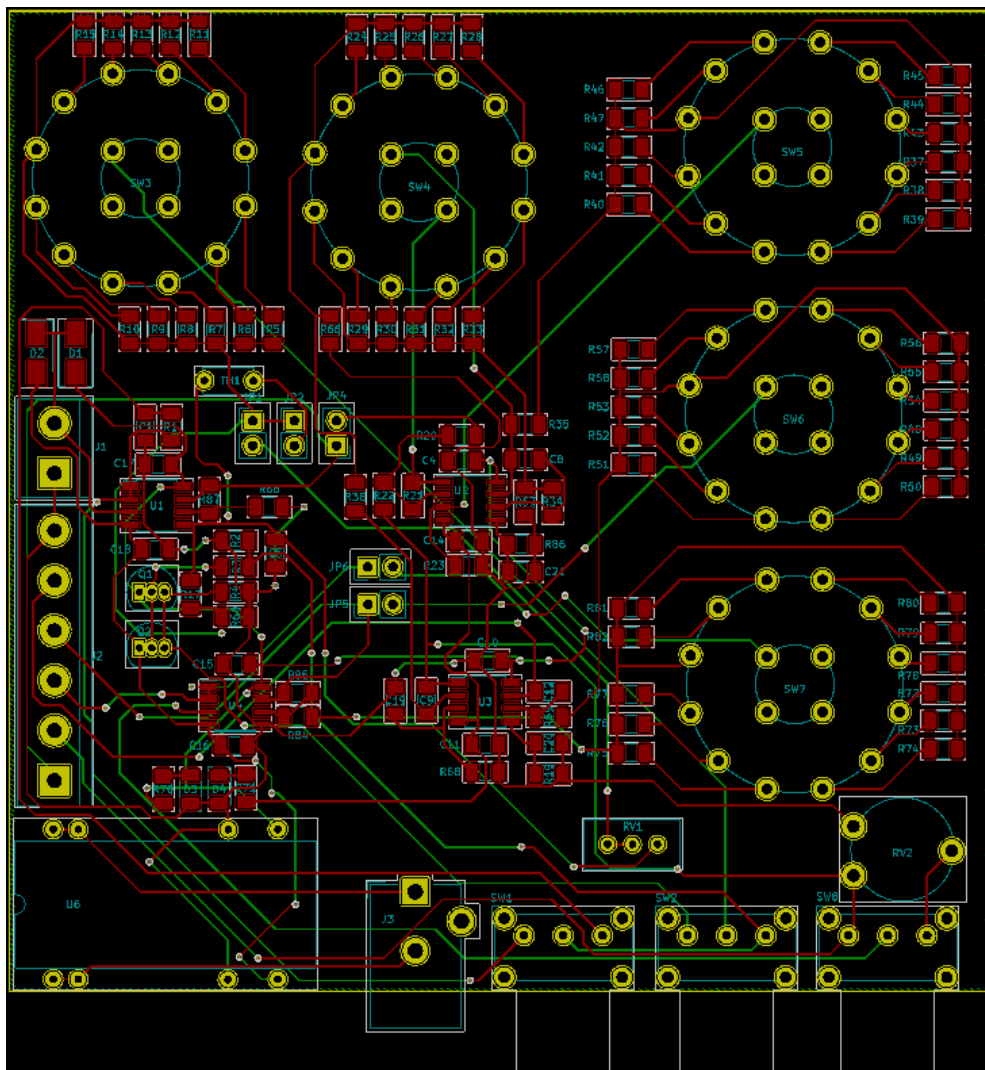
- Realizace DPS

Pro návrh DPS slouží program Pcbnew, který dovoluje vytvořit neomezeně velkou desku a lze v něm použít až 32 vrstev mědi. Obsahuje také možnost elektrické simulace obvodů [7].

### 4.3.2 Návrh DPS

Na DPS je umístěno celkem 125 součástek a její rozměry jsou 10x10 cm. Návrh DPS je zobrazen na následujícím obrázku. Součástky jsou na desce rozmístěny tak, aby s nimi byla snadná manipulace, tzn. rotační přepínače, konektory a páčkové přepínače jsou umístěny na okrajích desky.

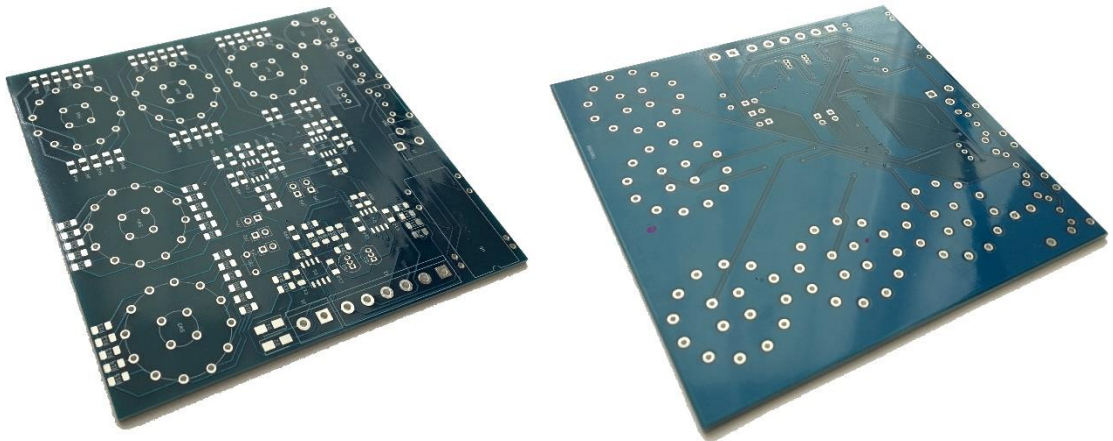
Při návrhu desky byla většina pouzder součástek volena jako SMD a to zejména kvůli malým rozměrům. Ostatní vývodové součástky byly použity především kvůli své mechanické odolnosti.



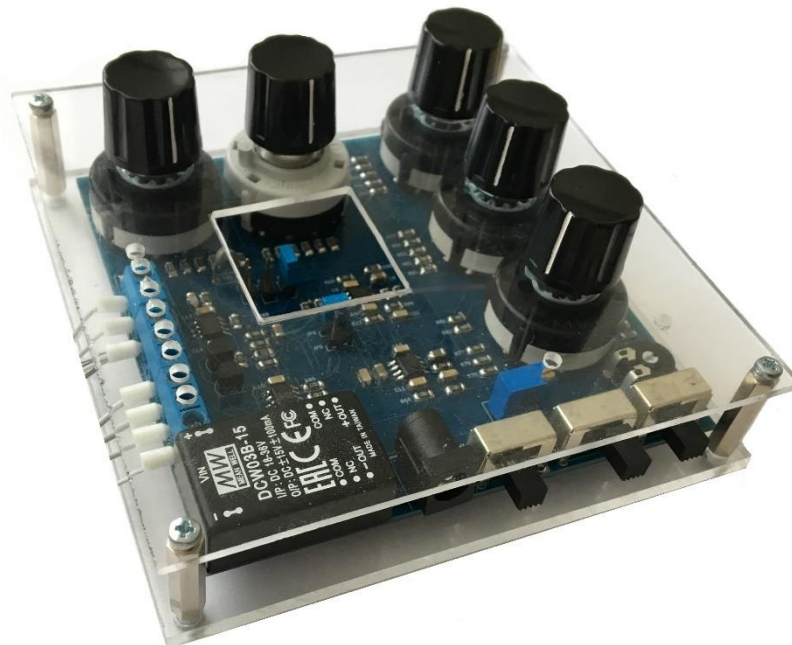
Obrázek 19: Návrh DPS

### 4.3.3 Realizace laboratorního modelu a oživení

DPS navržená v předchozí kapitole byla na zakázku vyrobena v Číně. Samotné osazení desky bylo provedeno ručně v domácích podmínkách. Jelikož se jedná o laboratorní model, se kterým přijde do styku spousta uživatelů, je celá deska umístěna mezi dvěma plastovými destičkami spojenými distančními sloupky, kvůli mechanické odolnosti.

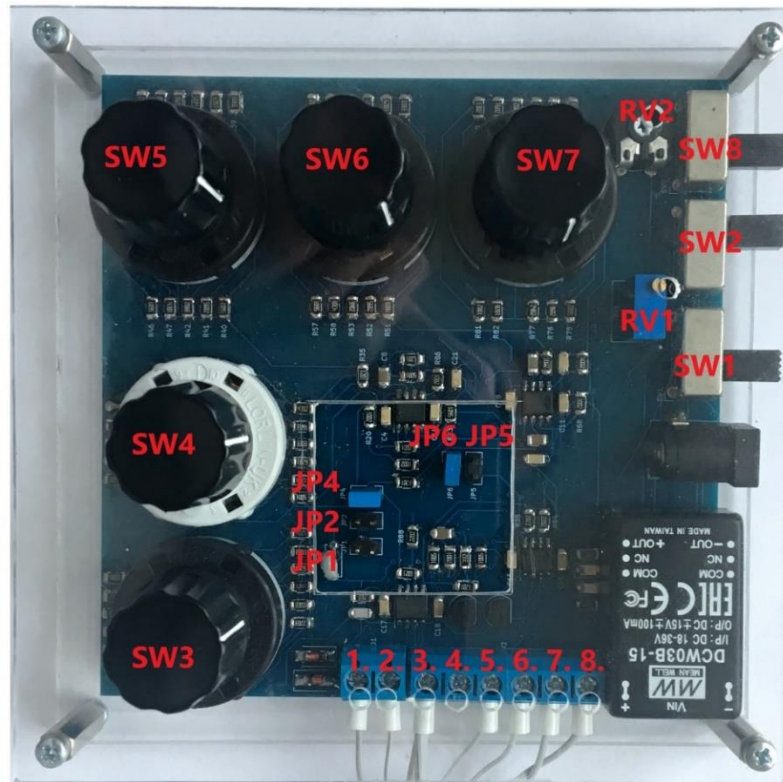


Obrázek 20: Horní a spodní strana DPS



Obrázek 21: Výsledný laboratorní model

Jak už bylo napsáno v předchozích kapitolách, parametry jednotlivých bloků se nastavují pomocí rotačních přepínačů, páčkových přepínačů a jumperů. Rozmístění těchto součástek je znázorněno na následujícím obrázku a možnosti jejich nastavení jsou poté popsány v Tabulka 2 a Tabulka 3.



Obrázek 22: Popis laboratorního modelu

Značení	Popis
1.	Signálový vstup (max +/-15 V)
2.	GND
3.	GND
4.	Výstup za prvním PT1 členem
5.	Výstup za PT2 členem
6.	Výstup za rozdílovým členem
7.	Výstup za proporčním členem
8.	Výstup za integrátorem
SW1	Rychlá dynamika
SW2	Pásmo necitlivosti
SW8	Rozdílový člen
JP1	Připojení trimru paralelně kPT1 členu
JP2	Připojení termistoru paralelně k PT1 členu
JP4	Odpojení všech členů za druhým PT1 členem
JP5	Odpojení posledního členu, integrátoru
JP6	Odpojení proporčního a integračního členu

Tabulka 2: Popis laboratorního modelu

Počáteční poloha přepínače vpravo	SW3 [kΩ]	SW4 [kΩ]	SW5 [kΩ]	SW6 [kΩ]	SW7 [kΩ]
0.	220	0	39	39	24
1.	330	1200	56	56	36
2.	430	620	160	160	56
3.	620	330	330	330	110
4.	820	160	620	620	220
5.	1200	47	1200	1200	470
6.	160	-	22	22	20
7.	110	-	15	15	16
8.	56	-	10	10	13
9.	22	-	5,6	5,6	10
10.	10	-	4,7	4,7	8,2
11.	0	-	0	0	0

Tabulka 3: Popis laboratorního modelu

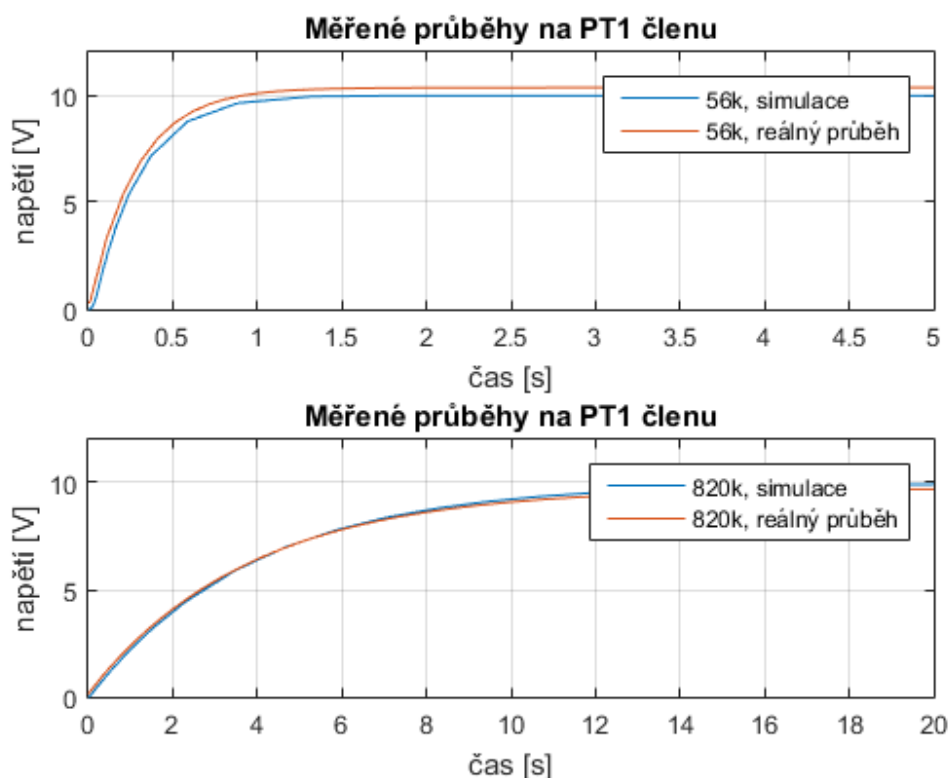


# 5 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK REALIZOVANÉHO MODELU

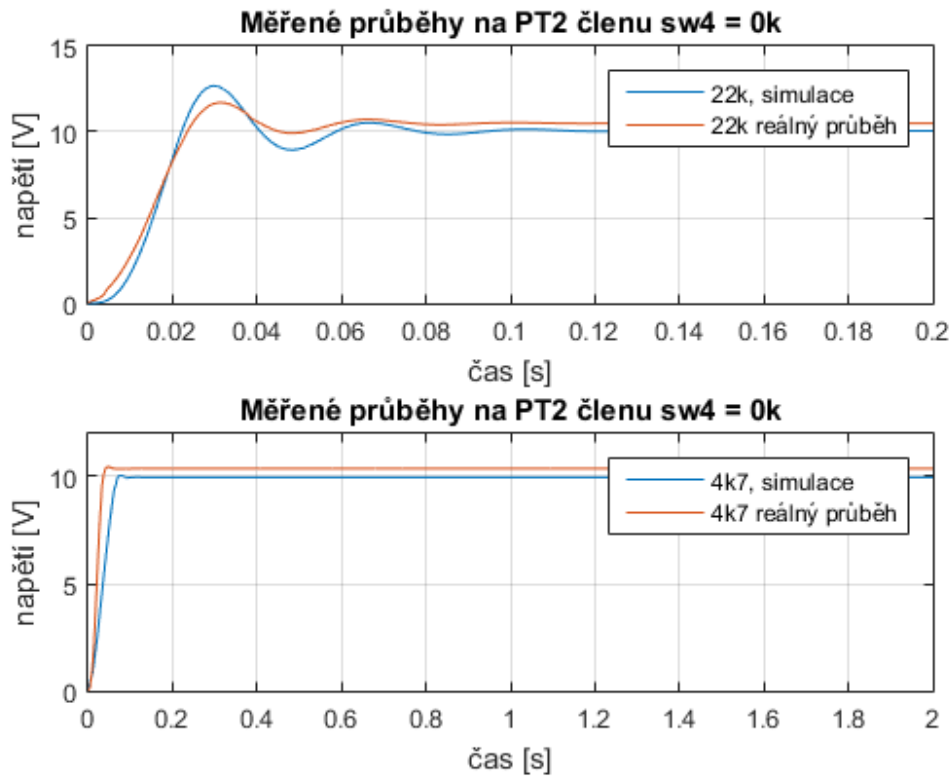
Výsledky měření základních charakteristik jednotlivých bloků laboratorního modelu jsou uvedeny v příloze 1. V následujících grafech jsou zobrazeny vybrané průběhy a porovnány s průběhy získanými ze simulací.

Z grafů na obrázku 23 až 29 je patrné, že výsledky simulací téměř odpovídají naměřeným průběhům na reálném modelu. Průběhy zobrazené v grafech jsou odezvy na skokovou změnu vstupní veličiny, tedy 10V. Pro některé kmitavé průběhy byla vstupní skoková změna jenom 5V a to z toho důvodu, aby nedošlo k omezení výstupního napětí na 15V, což je napájecí napětí rail to rail operačních zesilovačů.

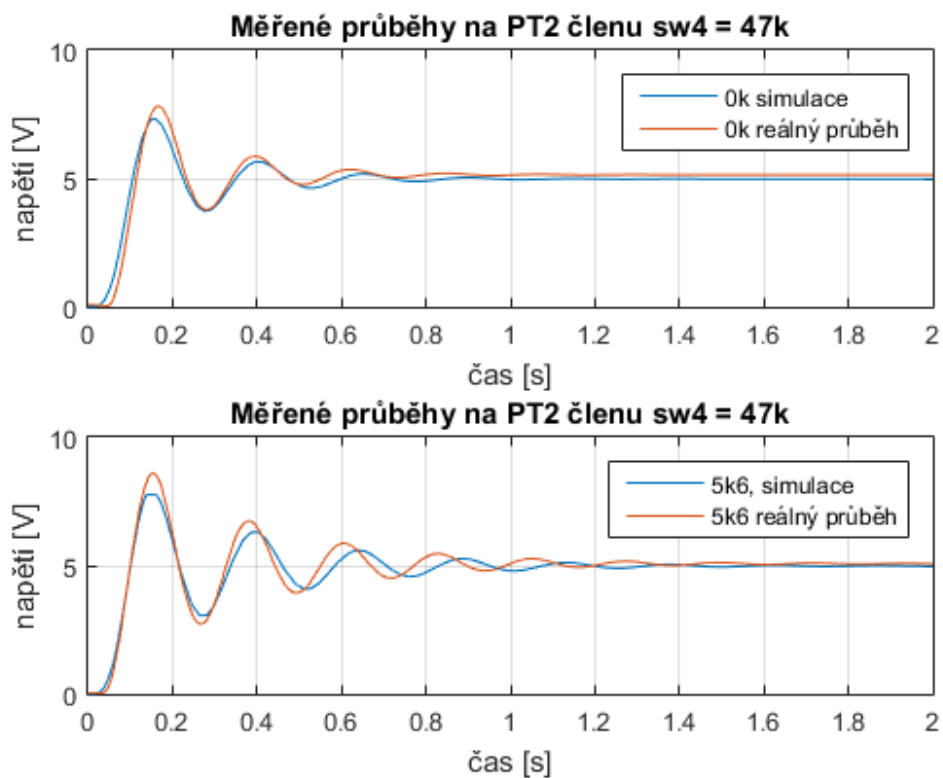
Rozdíly v ustálených hodnotách porovnaných průběhů jsou způsobeny jednak operačním zesilovačem u PT1 členu, který má zesílení  $K = 1,05$  jak je například vidět v průběhu grafu na obrázku 23, a za druhé za každým rotačním přepínačem je umístěn proti zemi odpor  $10M\Omega$ , tím pádem čím větší odpor na přepínači zvolíme, tím větší ubytek napětí na tomto děliči (viz příloha 1 graf (PT1 člen)). Tyto odpory nejsou v simulaci zapojeny.



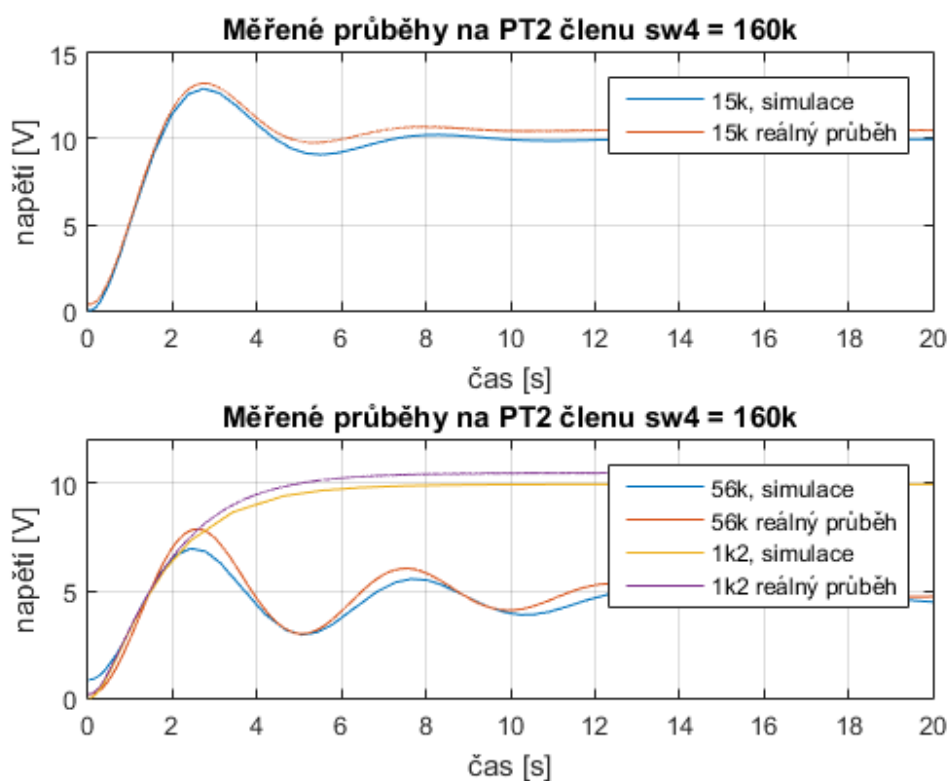
Obrázek 23: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT1 člen



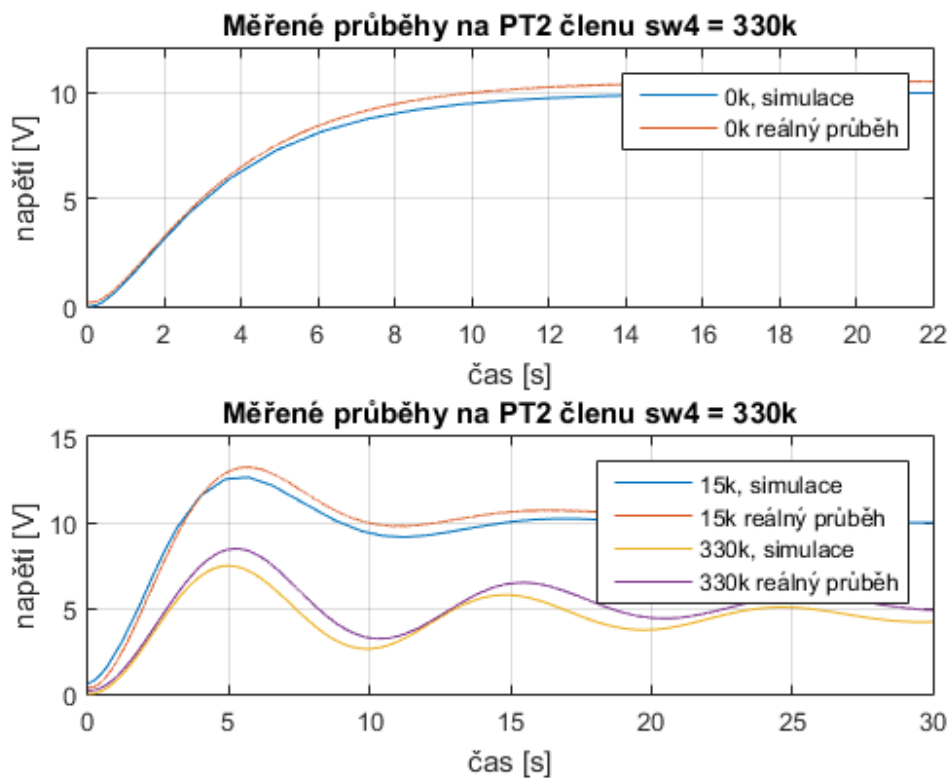
Obrázek 24: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen sw4 = 0k



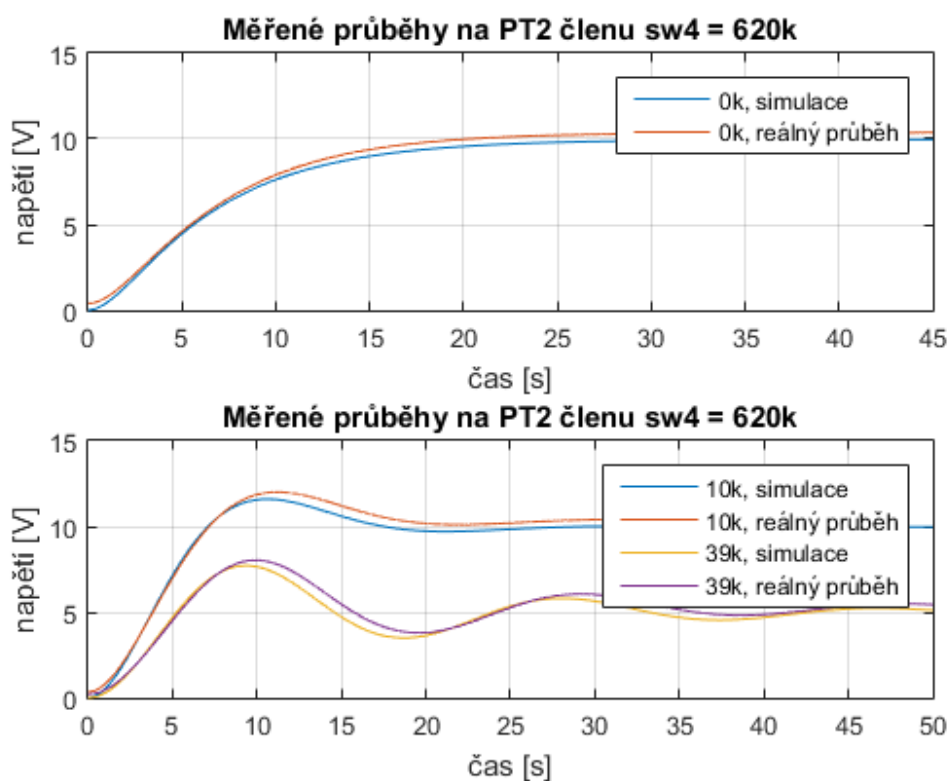
Obrázek 25: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen sw4 = 47k



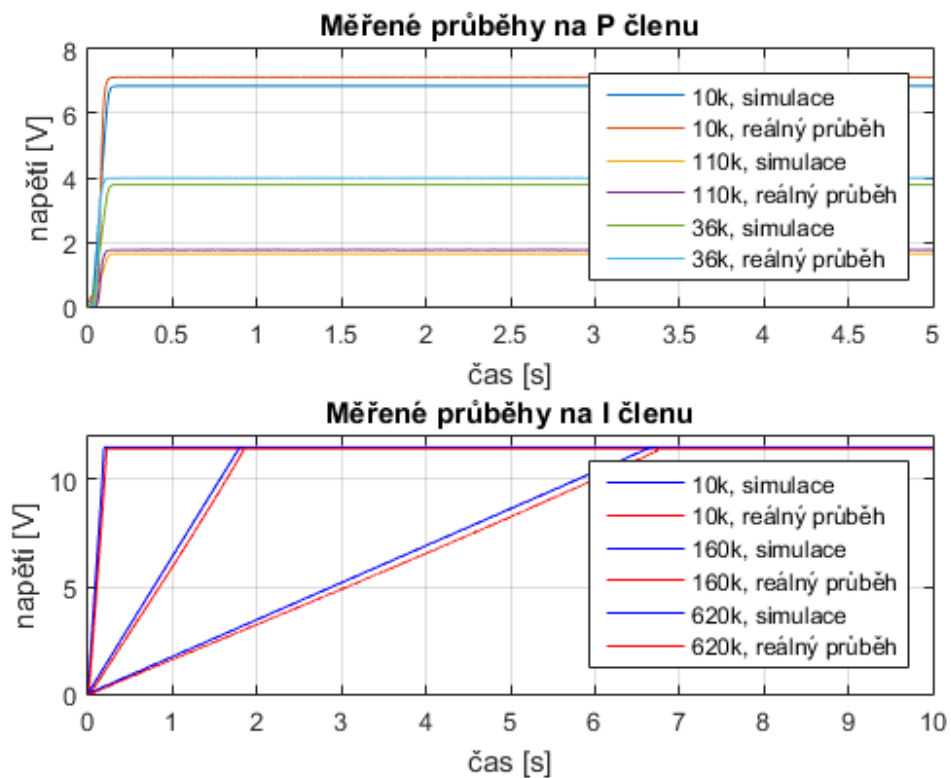
Obrázek 26: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen sw4 = 160k



Obrázek 27: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen sw4 = 330k



Obrázek 28: Porovnání měřených průběhů se simulací, PT2 člen sw4 = 620k



Obrázek 29: Porovnání měřených průběhů se simulací, P člen a I člen

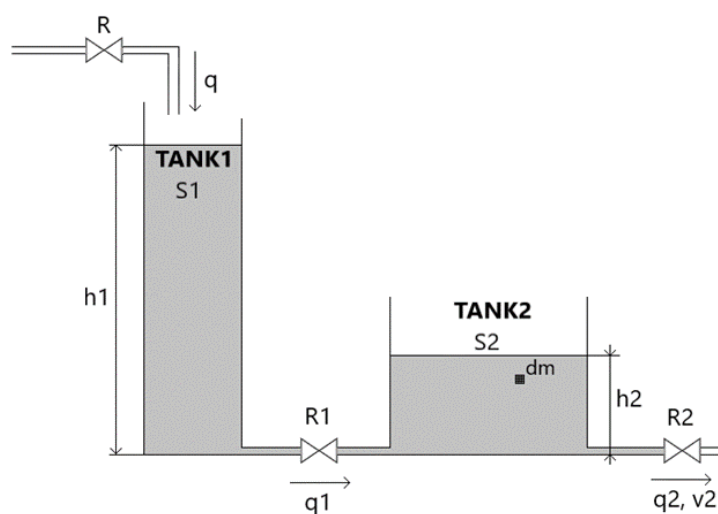
## 6 NÁVRH VZOROVÉ LABORATORNÍ ÚLOHY

Cílem laboratorní úlohy je navrhnout regulátor pro řízení výšky hladiny druhé nádrže systému dvou nádrží zobrazených na obrázku 30. Přítokem neboli vstupem tohoto systému je  $q$ , výšky hladiny první a druhé nádrže jsou  $h_1$  a  $h_2$ . Plochy nádrží 1 a 2 jsou  $S_1$  a  $S_2$ . Odpor ventilu mezi nádržemi je  $R_1$  a odpor výstupního ventilu je  $R_2$ .

Po spuštění procesu se nejdříve otevřou ventily odtoku  $R_2$  a propojení nádrží  $R_1$ . Poté se otevře ventil přítoku  $R$  a nádrže se začnou postupně napouštět. Po dosažení požadované výšky hladiny se rozsvítí kontrolka dosažení požadované výšky hladiny a po ustálení hladiny dojde s časovou prodlevou 15 s k vypuštění nádrží.

### 6.1 Popis regulované soustavy

Za předpokladu že  $q$  je vstup a  $h_2$  je výstup, odvodí se přenosová funkce systému následovně.



Obrázek 30: Schéma systému dvou nádrží

Odvození rychlosti výtoku

$$\frac{1}{2} dm \cdot v_2(t)^2 = dm \cdot g \cdot h_2(t) \quad (10)$$

A tedy

$$v_2(t) = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2(t)} \text{ [m/s]} \quad (11)$$

V našem případě tuto nelinearitu zanedbáváme a pro jednoduchost bereme v potaz pouze odtok  $q_2$  závislý na výšce hladiny v druhé nádrži a odporu ventilu  $R_2$ .

Další nelinearita, kterou zanedbáváme, je omezena pracovní oblastí a to přetečení nádrže, saturace.

Pro první nádrž platí následující vztahy, jak je uvedeno v [11]

$$q_1 = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \quad (12)$$

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \quad (13)$$

Dosazením rovnice (12) do rovnice (13) dostaneme

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - \frac{h_1 - h_2}{R_1} \quad (14)$$

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} + \frac{h_1}{R_1} = q + \frac{h_2}{R_1} \quad (15)$$

Na obě strany rovnice (15) aplikujeme Laplaceovu transformaci

$$C_1 s \cdot H_1(s) + \frac{1}{R_1} H_1(s) = Q(s) + \frac{1}{R_1} H_2(s) \quad (16)$$

Z rovnice (16) vyjádříme  $H_1(s)$

$$H_1(s) = \frac{R_1 \cdot Q(s) + H_2(s)}{R_1 \cdot C_1 s + 1} \quad (17)$$

Pro druhou nádrž platí, jak je uvedeno v [11]

$$q_2 = \frac{h_2}{R_2} \quad (18)$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \quad (19)$$

Dosazením rovnice (1) a (7) do rovnice (8) získáme

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1 - h_2}{R_1} - \frac{h_2}{R_2} \quad (20)$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} + \frac{h_2}{R_2} + \frac{h_2}{R_1} = \frac{h_1}{R_1} \quad (21)$$

Po aplikaci Laplaceovy transformace na obě strany rovnice (21) dostaneme

$$C_2 s \cdot H_2(s) + \frac{1}{R_2} H_2(s) + \frac{1}{R_1} H_2(s) = \frac{1}{R_1} H_1(s) \quad (22)$$

$$H_2(s) \cdot \left( C_2 s + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{1}{R_1} H_1(s) \quad (23)$$

Dosazením rovnice (17) do rovnice (23)

$$H_2(s) \cdot \left( C_2 s + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_1 \cdot Q(s) + H_2(s)}{R_1 \cdot C_1 s + 1} \quad (24)$$

Přenos systému získáme vyjádřením podílu výstupu soustavy  $H_2(s)$  a jejího vstupu  $Q(s)$

$$F_s(s) = \frac{H_2(s)}{Q(s)} \quad (25)$$

$$F_s(s) = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot s^2 + R_2 \cdot C_2 \cdot s + R_1 \cdot C_1 \cdot s + R_2 \cdot C_1 \cdot s + 1} \quad (26)$$

Uvažujme:

$$R_1 = 2,48 \text{ [s/m}^2\text{]} \quad \text{– odpor ventilu mezi nádržemi}$$

$$R_2 = 0,94 \text{ [s/m}^2\text{]} \quad \text{– odpor ventilu odtoku}$$

$$S_1 = 1,2 \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{– velikost první nádrže}$$

$$S_2 = 3,85 \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{– velikost druhé nádrže}$$

$$q = 1 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad \text{– přítok}$$

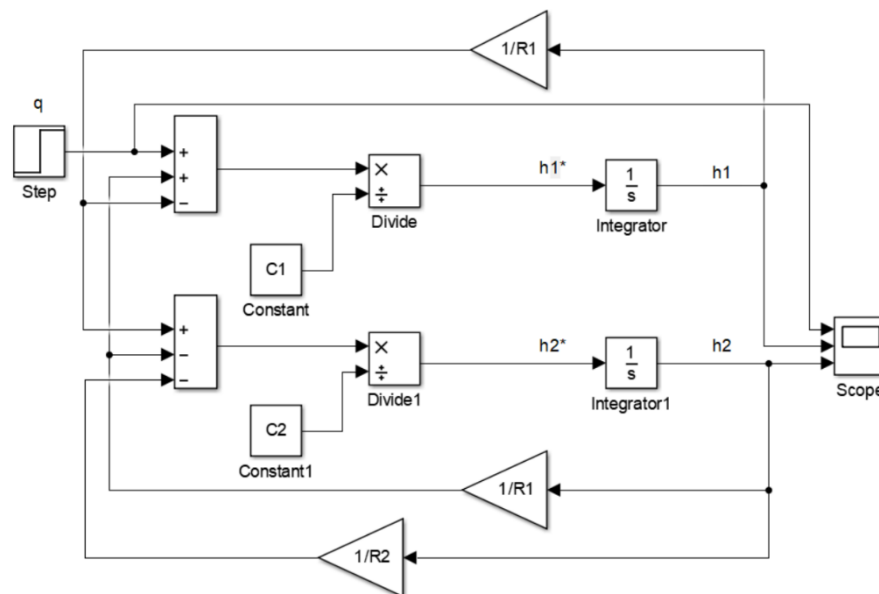
$$h_1(0) = h_2(0) = 0 \text{ [m]} \quad \text{– počáteční výška hladiny}$$

Vyčíslením přenosu soustavy dostaneme následující vztah

$$F_s(s) = \frac{0,94}{10,77s^2 + 7,723s + 1} \quad (27)$$

## 6.2 Simulace navržené soustavy

Simulace systému navrženého v předchozí kapitole je vytvořena v nástroji Simulink programu Matlab.



Obrázek 31: Schéma simulace vzorové úlohy

Odezva systému na skokovou změnu žádané hodnoty je zobrazena v následujícím grafu, kde modrý průběh představuje napouštění první nádrže, zelený průběh značí napouštění druhé nádrže a červený je jednotkový skok na vstupu soustavy.



Obrázek 32: Odezva navržené soustavy na skokovou změnu žádané hodnoty

### 6.3 Návrh regulátoru

Pro vyregulování uvedeného systému na nulovou regulační odchylku se nejlépe hodí použití PI regulátoru, který byl navržen metodou optimálního modulu.

Pro návrh tedy použijeme PI regulátor

$$F_R(s) = \frac{K_R \cdot (T \cdot s + 1)}{s} \quad (35)$$

Vypočteme přenos otevřené smyčky

$$F_o(s) = F_s(s) \cdot F_R(s) = \frac{0,94 \cdot K_R \cdot (T \cdot s + 1)}{s \cdot (10,77 \cdot s^2 + 7,723 \cdot s + 1)} \quad (36)$$

Dále vypočteme přenos řízení

$$F_w(s) = \frac{F_o(s)}{1 + F_o(s)} \quad (37)$$



$$F_w(s) = \frac{\frac{0,94K_R(Ts + 1)}{s(10,77s^2 + 7,723s + 1)}}{\frac{s(10,77s^2 + 7,723s + 1) + 0,94K_R(Ts + 1)}{s(10,77s^2 + 7,723s + 1)}} \quad (38)$$

$$F_w(s) = \frac{0,94K_R(Ts + 1)}{s(10,77s^2 + 7,723s + 1) + 0,94K_R(Ts + 1)} \quad (39)$$

$$F_w(s) = \frac{0,94K_R Ts + 0,94K_R}{10,77s^3 + 7,723s^2 + s \cdot (0,94K_R Ts + 1) + 0,94K_R} \quad (40)$$

Koeficienty charakteristické rovnice jsou

$$a_0 = 0,94K_R \quad b_0 = 0,94K_R$$

$$a_1 = 0,94K_R T + 1 \quad b_1 = 0,94K_R T$$

$$a_2 = 7,723 \quad b_2 = 0$$

$$a_3 = 10,77 \quad b_3 = 0$$

$$A_0 = 0,94^2 K_R^2 \quad B_0 = 0,94^2 K_R^2$$

$$A_1 = (0,94K_R T + 1)^2 - 14,52K_R \quad B_1 = 0,94^2 K_R^2 T^2$$

$$A_2 = 7,723^2 - 21,54(1 + 0,94K_R T) \quad B_2 = 0$$

Pro PI regulátor máme dvě podmínkové rovnice

$$\frac{B_0}{A_0} = \frac{B_1}{A_1} \quad (35)$$

$$\frac{B_0}{A_0} = \frac{B_2}{A_2} \quad (36)$$

Druhá podmínková rovnice

$$B_2 = \frac{B_0}{A_0} A_2 \quad (37)$$

$$0 = 7,723^2 - 21,54(1 + 0,94K_R T) \quad (38)$$

$$K_R T = 1,88 \quad (39)$$

První podmínková rovnice

$$1 = \frac{0,94K_R^2 T^2}{(0,94K_R T + 1)^2 - 14,52K_R} \quad (40)$$

Dosadíme  $K_R T$  z rovnice (39)

$$1 = \frac{3,12}{7,66 - 14,52K_R} \quad (40)$$

$$7,66 - 14,52K_R = 3,12 \quad (41)$$

$$K_R = 0,312 \quad (42)$$

Dosažením  $K_R$  do rovnice (39) dostaneme

$$T = 6,02 \text{ s} \quad (43)$$

Výsledný přenos regulátoru je

$$F_R(s) = \frac{0,312 \cdot (6,02s + 1)}{s} \quad (44)$$

Ověření stability zpětnovazebního obvodu s navrženým regulátorem pomocí Hurwitzova kriteriia stability

$$F_o(s) = \frac{1,767s + 0,294}{10,77s^3 + 7,723s^2 + s} \quad (45)$$

Charakteristická rovnice má tvar

$$1 + \frac{1,767s + 0,294}{10,77s^3 + 7,723s^2 + s} = 0 \quad (46)$$

Po úpravě dostaneme

$$10,77s^3 + 7,723s^2 + 2,767s + 0,2936 = 0 \quad (47)$$

$$a_3 \quad a_2 \quad a_1 \quad a_0$$

Dosadíme do Hurwitzovy matice

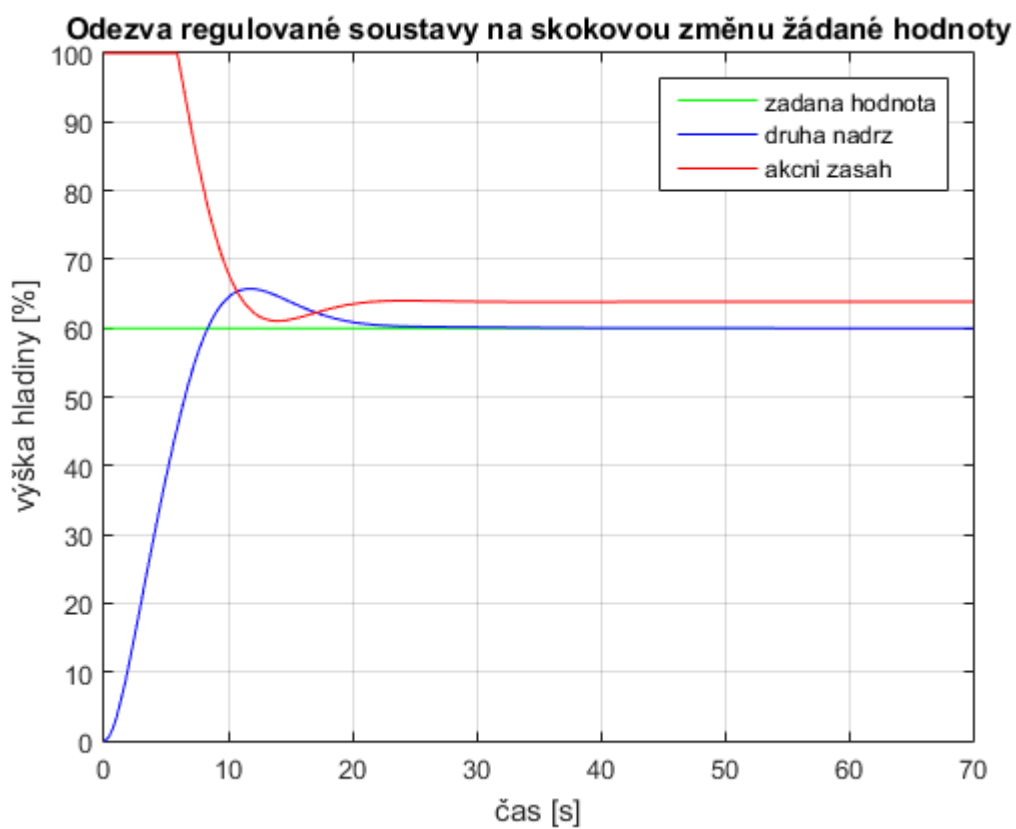
$$\begin{vmatrix} 7,723 & 10,77 \\ 0,294 & 2,767 \end{vmatrix} > 0 \quad (48)$$

Vyčíslením determinantu dostaneme

$$18,21 > 0 \quad (49)$$

Z rovnic (47) a (49) je patrné, že regulovaná soustava je stabilní.

Odezva regulované soustavy na skokovou změnu vstupní žádané hodnoty o 60% (viz obrázek 33) má překmit zhruba 6% a ustálí se přibližně za 22 sekund.



Obrázek 33: Odezva regulované soustavy na skokovou změnu žádané hodnoty

## 7 REALIZACE VZOROVÉ LABORATORNÍ ÚLOHY

Realizace navržené úlohy byla provedena na školním PLC Simatic S7-1500. Úloha byla řešena podle zadání uvedeného v příloze 6.

Část programu je vytvořena v jazyce LADDER DIAGRAM a to standardizace, destandardizace a blok PID regulátoru. Tato část je umístěna v bloku cyclic interrupt (OB30) a je volána každých 100ms.

Řídicí program je napsaný v jazyce SCL a je umístěn ve funkčním bloku (FC1) viz příloha 5.

### 7.1 Propojení laboratorního modelu s PLC

K propojení laboratorního modelu s PLC je použit dvacet žilový plochý kabel, jeho zapojení odpovídá Tabulka 4. Nevyužité piny konektoru jsou v Tabulka 4 vyznačeny šedě.

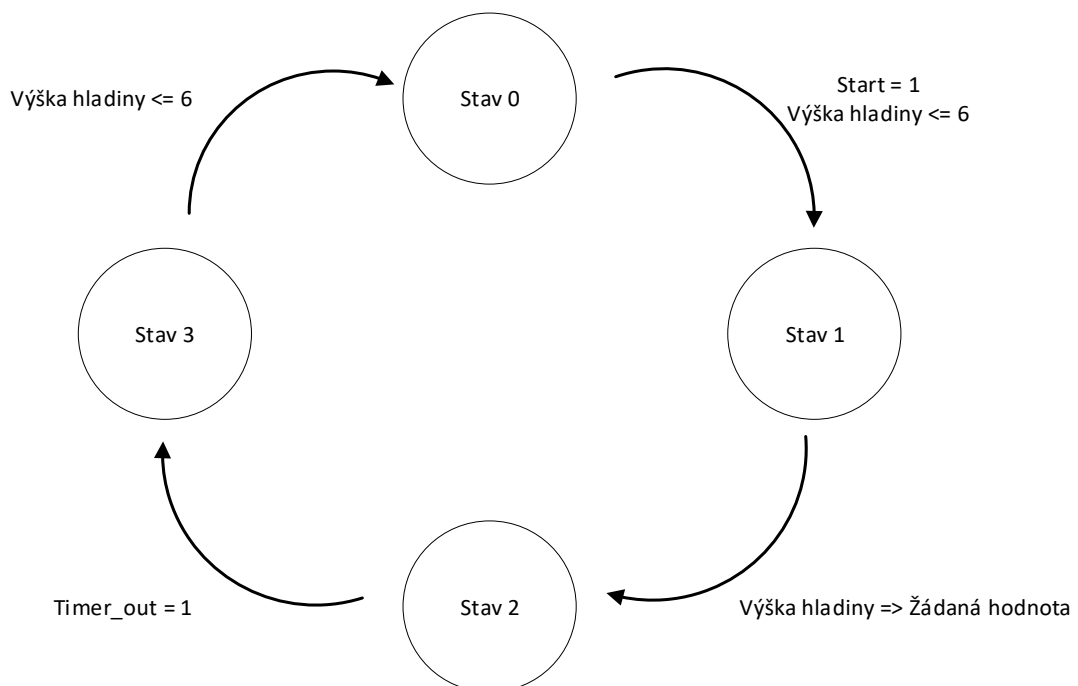
PIN	Značení	Popis
1	U <sub>0+</sub>	Analogový vstup PLC
2		
3	U <sub>0-</sub>	Analogový vstup PLC
4	U <sub>1+</sub>	Analogový vstup PLC
5		
6	U <sub>1-</sub>	Analogový vstup PLC
7	U <sub>2+</sub>	Analogový vstup PLC
8		
9	U <sub>2-</sub>	Analogový vstup PLC
10	U <sub>3+</sub>	Analogový vstup PLC
11		
12	U <sub>3-</sub>	Analogový vstup PLC
13		
14		
15		
16	QV <sub>0</sub>	Analogový výstup PLC
17		
18		
19		
20	MANA	Analogový výstup PLC

Tabulka 4: Zapojení plochého propojovacího kabelu k PLC

## 7.2 Popis stavového automatu

Celý proces je řízen stavovým automatem složeným ze čtyř stavů, které jsou popsány v následujících bodech.

- 1) Ve stavu 0 všechny kontrolky svítí červeně, regulátor je vypnutý a čeká se na vyprázdnění nádrží a spuštění procesu pomocí stačítka start. Po spuštění procesu se přejde do stavu 1.
- 2) Ve stavu 1 dojde k přepsání nastavené žádané hodnoty do regulátoru a dále ke spuštění regulátoru. Hladina v nádrži začne stoupat, po dosažení žádané hodnoty následuje stav 2.
- 3) Ve stavu 2 dojde ke spuštění timeru a po patnácti sekundách se přechází do stavu 3
- 4) Ve stavu 3 se vypíná regulátor a output(přítok) a po vyprázdnění nádrží se přechází opět do stavu 0.



Obrázek 34: Stavový automat

## 7.3 Implementace regulátoru

Regulátor je v PLC implementován pomocí bloku PID Compact, jehož vstupní hodnota je standardizovaná výšky hladiny. Standardizace je provedena podle následující rovnice.

$$y = \frac{x}{25739} \cdot 95 + 5 [\%] \quad (50)$$

Kde  $y$  – standardizovaná hodnota výšky hladiny

$x$  – měřená hodnota vstupní proměnné

Výstupní hodnotou je akční zásah, který je potřeba před přivedením na výstup PLC destandardizovat pomocí následující rovnice.

$$y = \frac{x}{100} \cdot 25739 \quad (51)$$

Kde  $y$  – destandardizovaný akční zásah

$x$  – akční zásah (výstup PLC)

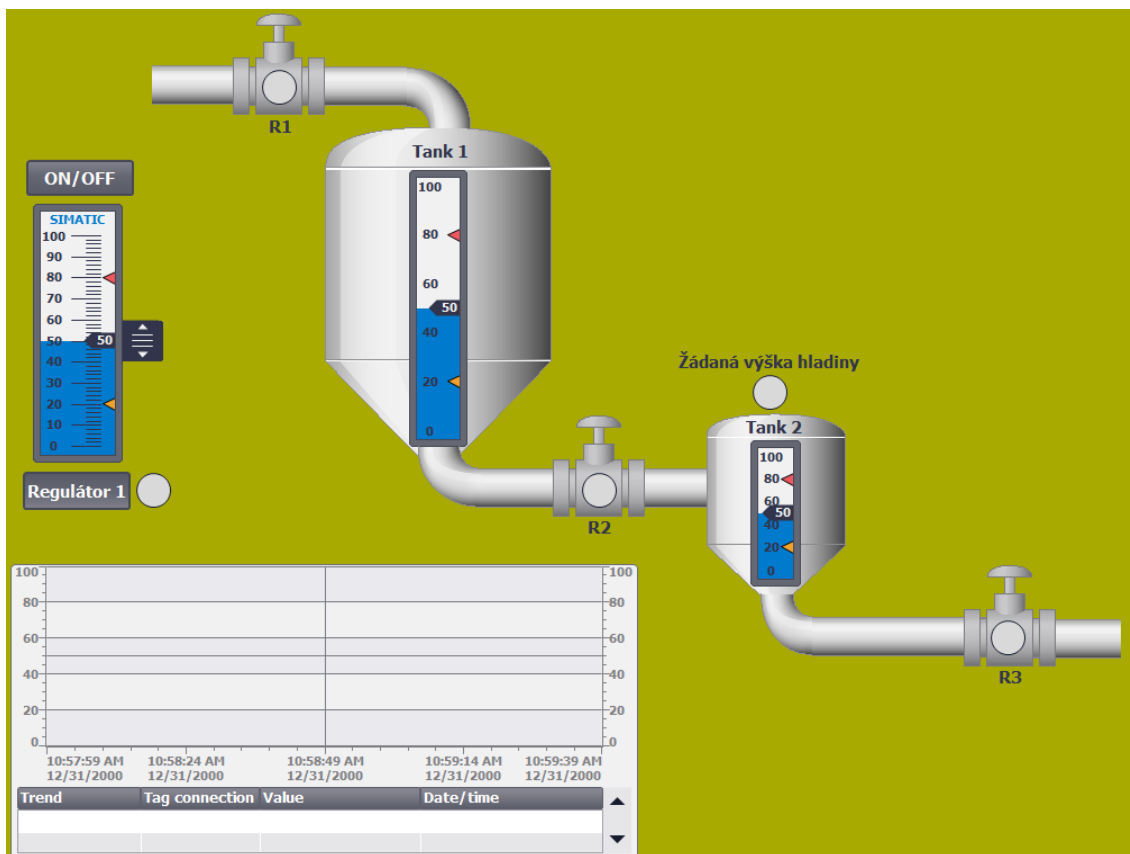
Samotné konstanty PI regulátoru v bloku PID Compact upraveny do odpovídajícího tvaru algoritmu přenosu, se kterým tento regulátor pracuje jsou.

$$K_p = 1,88$$

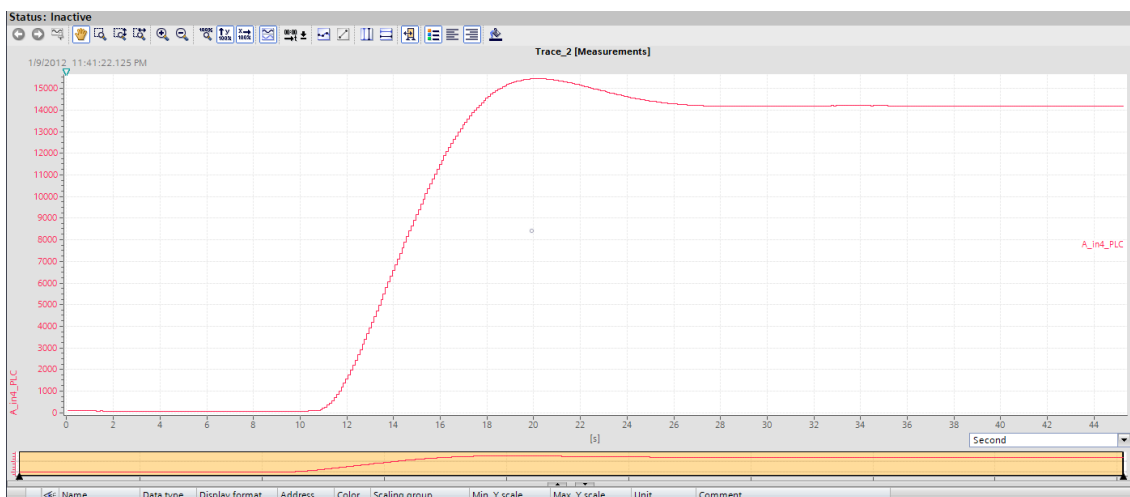
$$T_i = 6,02s$$

## 7.4 Vizualizace

Vizualizace provedená pomocí WinCC zobrazuje soustavu nádrží s ventily, kde každý ventil má svoji kontrolku (zelená barva = otevřený ventil, červená barva = zavřený ventil). Výška hladiny je zobrazena pomocí BAR GRAFŮ umístěných na nádržích. Výška hladiny se nastavuje pomocí SCROL BARU umístěného v levé části obrazovky. Celá vizualizace se po spuštění regulátoru spouští tlačítkem ON/OFF. Po dosažení požadované výšky hladiny se rozsvítí kontrolka dosažení požadované výšky hladiny umístěná nad druhou nádrží. Průběh hladiny v jednotlivých nádržích je zaznamenán v grafu pod nádržemi. Zobrazované křivky v grafu jsou v rozsahu 0-100% výšky hladiny nádrží.



Obrázek 35: Vizualizace technologického procesu



Obrázek 36: Výsledek regulace pomocí PLC

## 8 ZÁVĚR

Výsledkem bakalářské práce je funkční přípravek simulující dynamiky technologických procesů vyšších řádů. Tento přípravek je připojitelný na vstupy a výstupy PLC, pro které je navržena a realizována laboratorní úloha sloužící k procvičení návrhu a implementace regulátorů.

První kapitola této práce je z převážné části věnována vyčlenění nejčastěji se v praxi vyskytujících aproximovaných systémů. Další kapitola se zabývá návrhem koncepce později realizovaného modelu. Návrh obvodového řešení byl proveden v Programu KiCad, dále byla provedena simulace návrhu obvodového řešení v programu MicroCap10.0.9.2. Následné osazení desky a výroba krytu byla realizováno ručně v domácích podmínkách. Oživení desky a měření jejích základních parametrů proběhlo ve školních laboratořích na UAMT.

Poslední kapitoly práce se zabývají návrhem a realizací vzorové laboratorní úlohy, jejíž vzorové zadání je uvedeno v příloze 6.



# Literatura

- [1] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení. 2.*, přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004. ISBN 9788073001483.
- [2] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení. Vyd. 2.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [3] P BLAHA, P VAVŘÍN -: *Řízení a regulace I.* Skriptum VUT Brno, 2005
- [4] P.VAVŘÍN-: *Teorie automatického řízení I.* Skriptum VUT, Brno, 1988
- [5] *SIMATIC, S7-1200, S71500 PID control: Function Manual* [online]. 12/2017, 18-21s [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att\\_916450/v1/s71500\\_pid\\_control\\_function\\_manual\\_enUS\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916450/v1/s71500_pid_control_function_manual_enUS_en-US.pdf)
- [6] *Controllers and Controlled systems: Technical information. SAMSON AG* [online]. 1999, 7-17s [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.samson.de/document/l102en.pdf>
- [7] *A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite. KiCad EDA* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://kicad-pcb.org/about/kicad/>
- [8] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice. 5.* vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0059-8.
- [9] ROZKOPAL, [Tomáš. *Řešení komplementárního sledovače v pracovní třídě B* a. [online]. In: *Vliv topologie operačních zesilovačů na kvalitu audio signálu.* Brno 2017, 30s [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=147298](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147298)
- [10] HERINGOVÁ, Blanka a Petr HORA. *Matlab pro Windows: Díl I, Práce s programem* [online]. Praha: H-S, 1995 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/mvs/tutorial.pdf>
- [11] OGATA, Katsuhiko. *System dynamics* [online]. 4th edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004, 331s [cit. 2019-05-17]. ISBN 0131424629. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/alika1-2/katsuhiko-ogata-systemdynamics4theditionbookzzorg>

[12] JIRGL, Miroslav. *Laboratorní cvičení BPGA: Cvičení se systémy SIEMENS*. Brno, 2018 [cit. 2019-05-17]. Skripta. VUT Brno.

# Seznam symbolů, veličin a zkratk

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně
PT1	-	Proporcionální člen se zpožděním prvního řádu
PT2	-	Proporcionální člen se zpožděním druhého řádu
I člen	-	Integrační člen
P člen	-	Proporcionální člen
DPS	-	Deska plošných spojů
PLC	-	Programovatelný logický automat
OZ	-	Operační zesilovač
UAMT		Ústav automatizace a měřicí techniky

# Seznam příloh

Příloha 1. Výsledky měření na laboratorním modulu

Příloha 2. Schéma zapojení

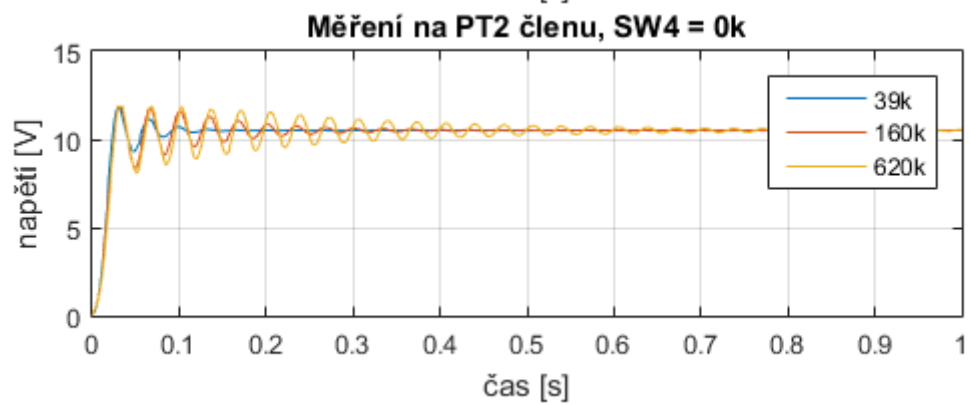
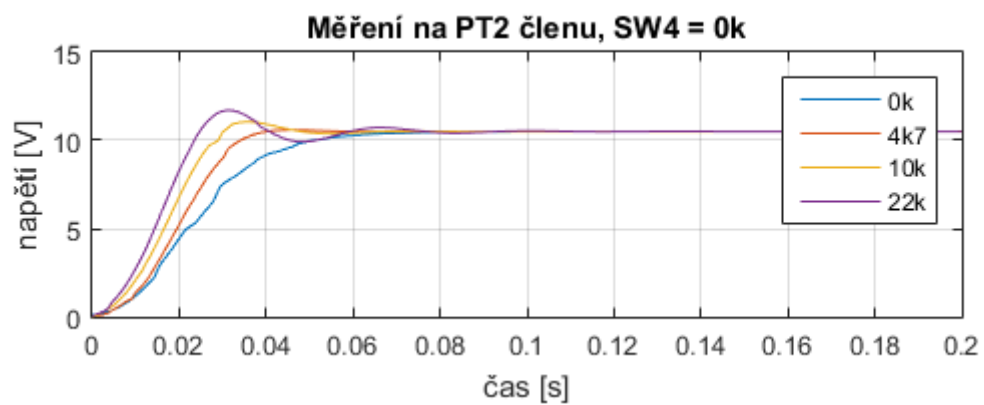
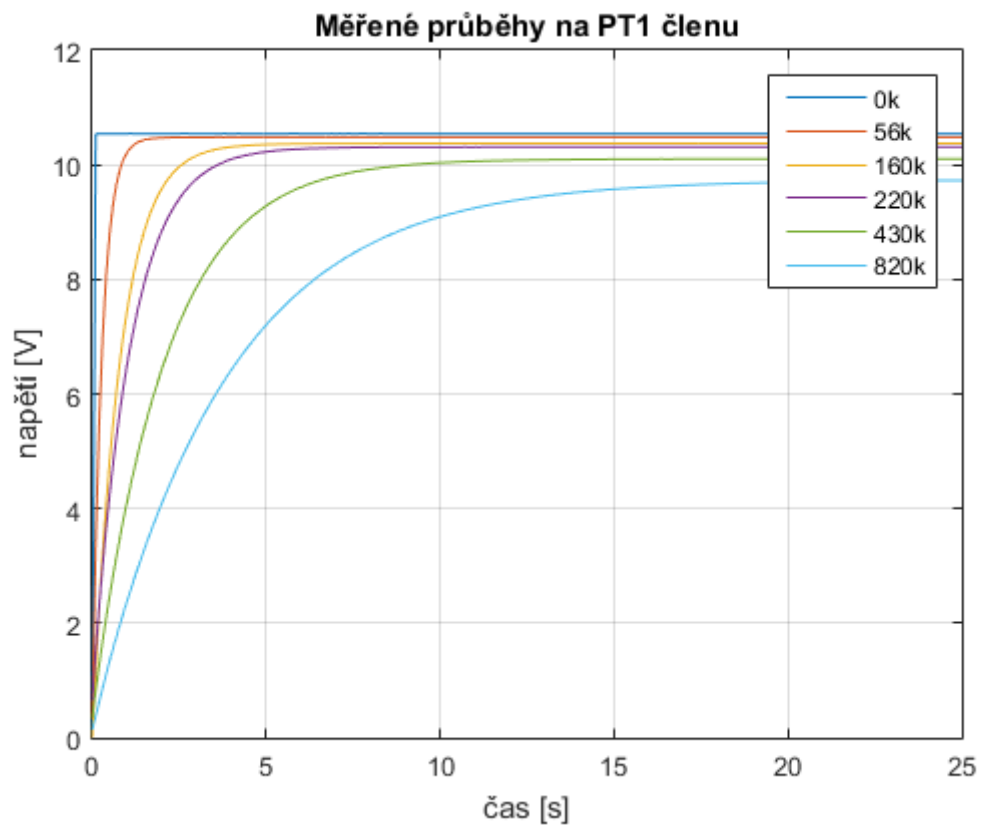
Příloha 3. Schéma simulace MicroCap

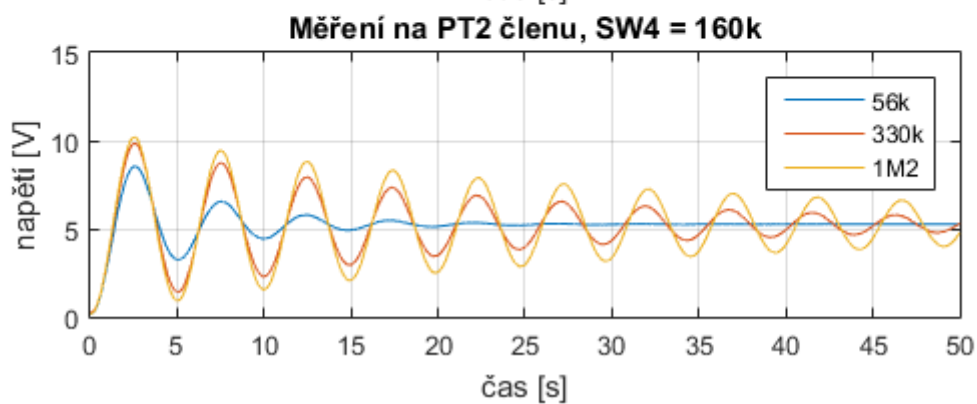
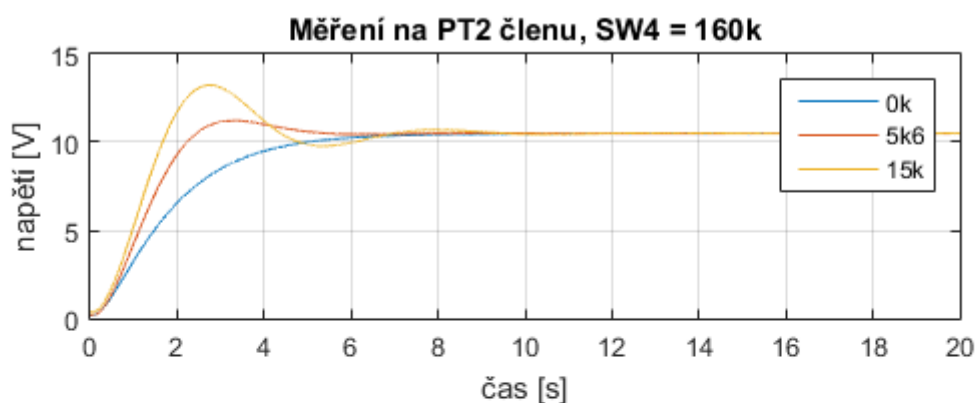
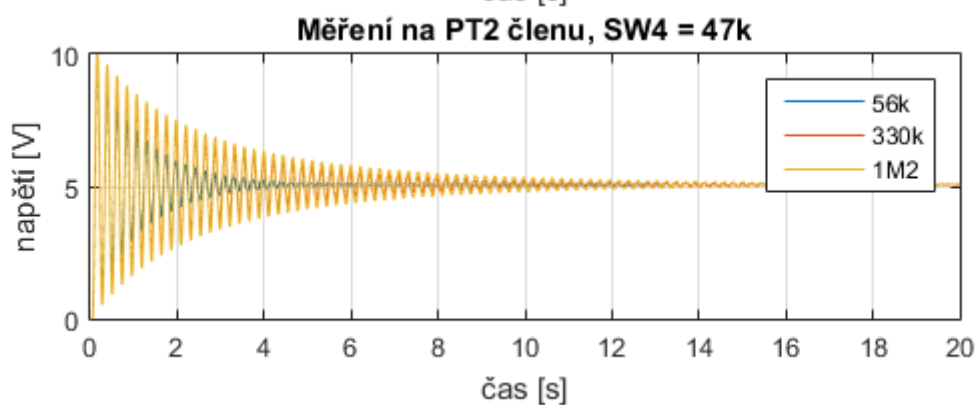
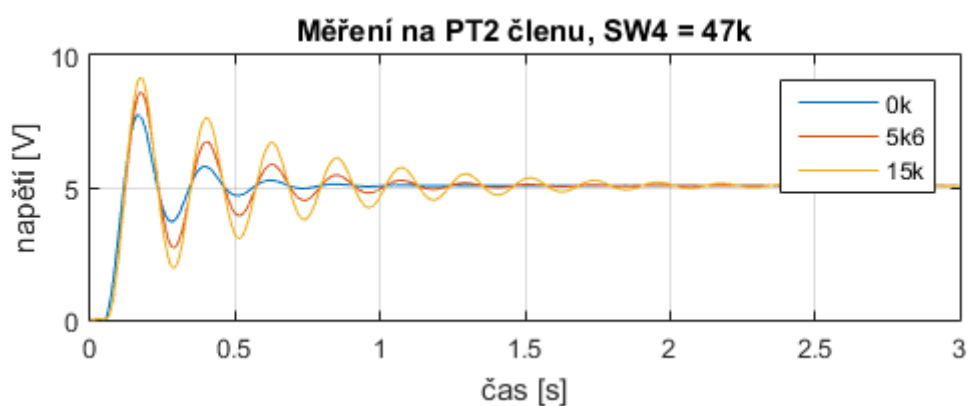
Příloha 4. Výsledky simulací v MicroCap

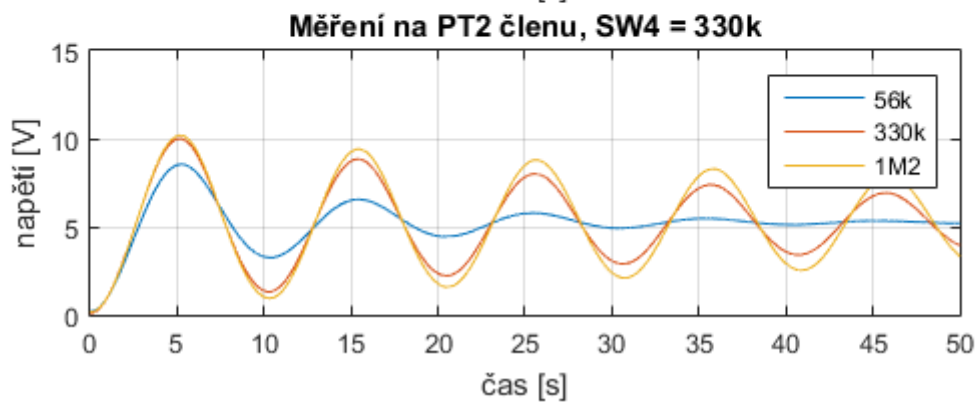
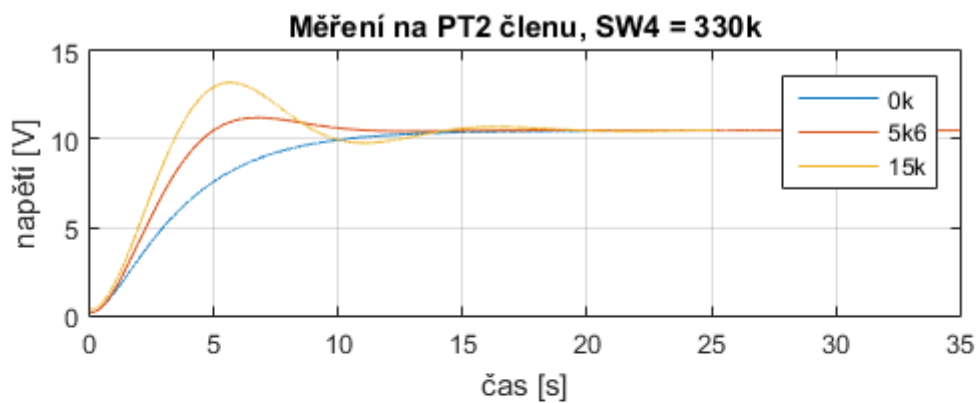
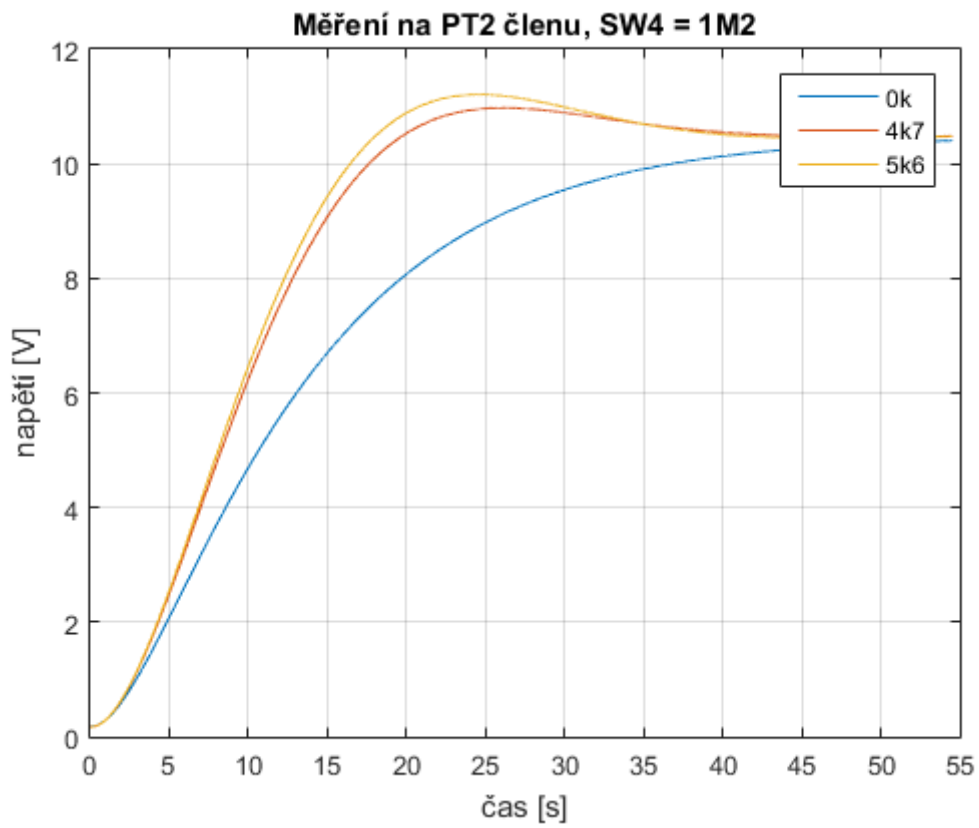
Příloha 5. Program pro PLC vytvořený v Tia Portal

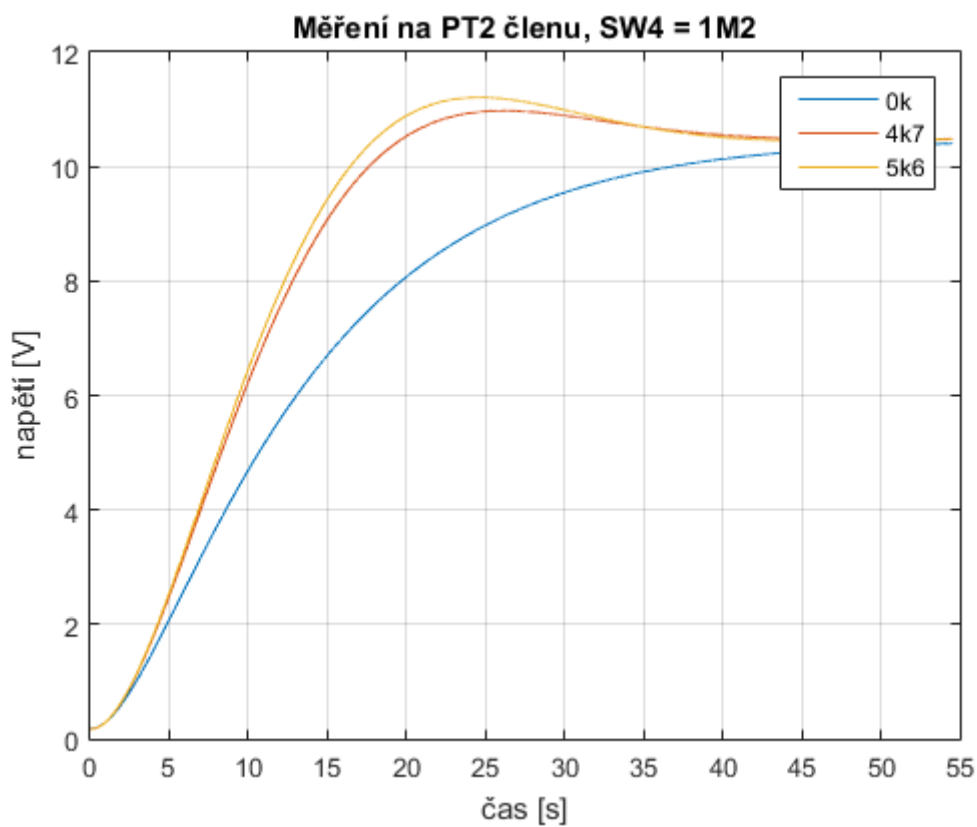
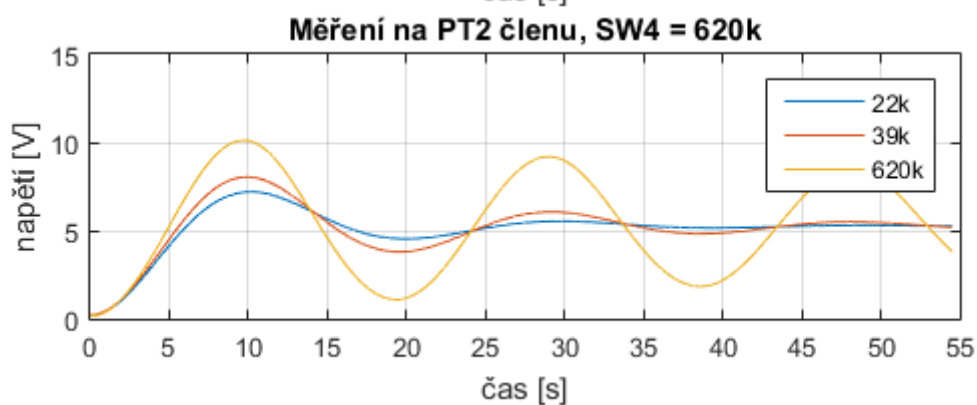
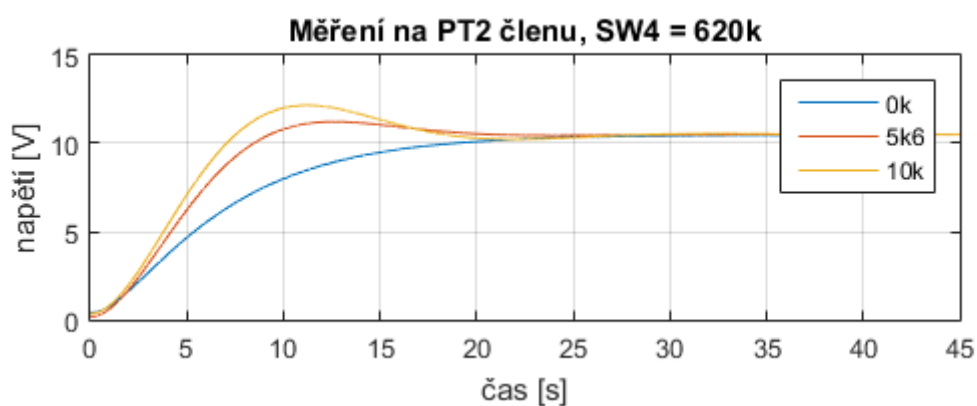
Příloha 6. Zadání laboratorní úlohy

## Příloha 1: Výsledky měření na laboratorním modulu



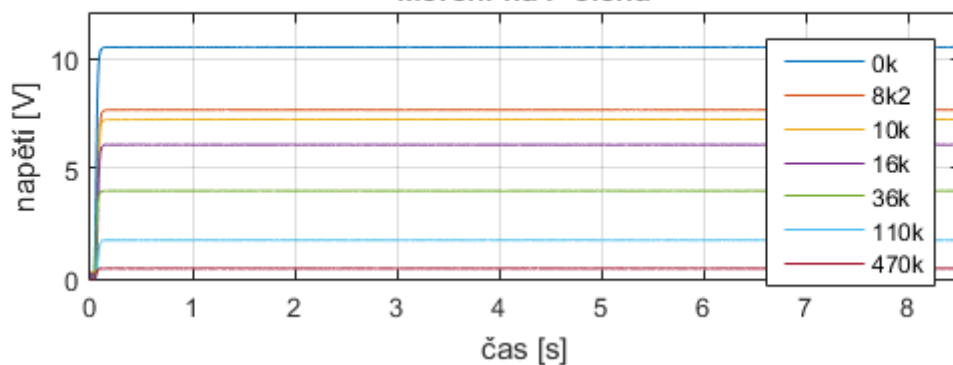




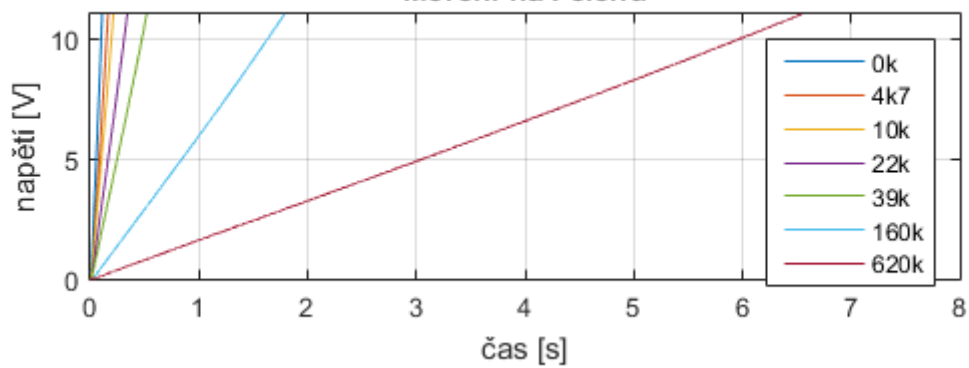




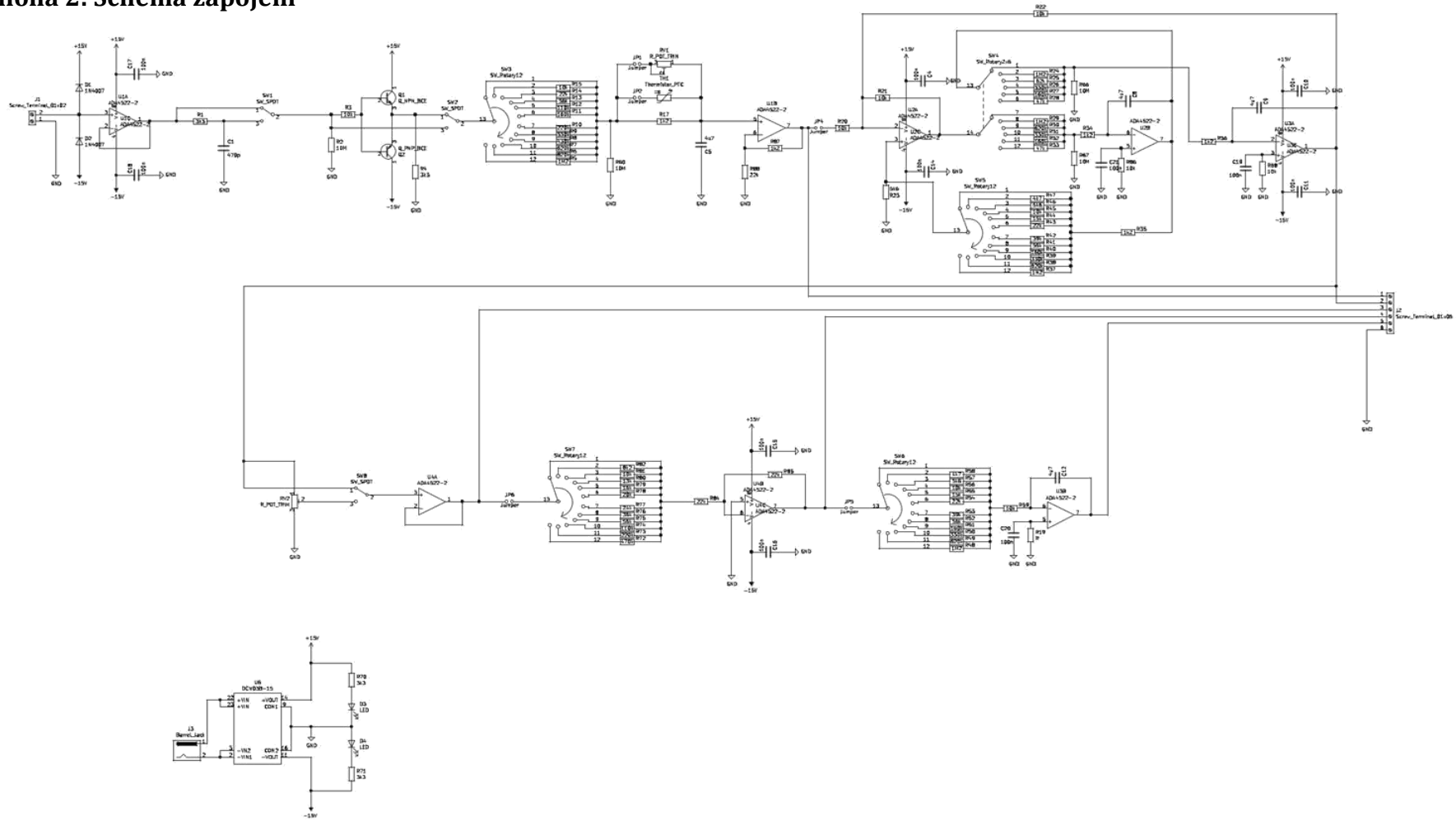
Měření na P členu



Měření na I členu

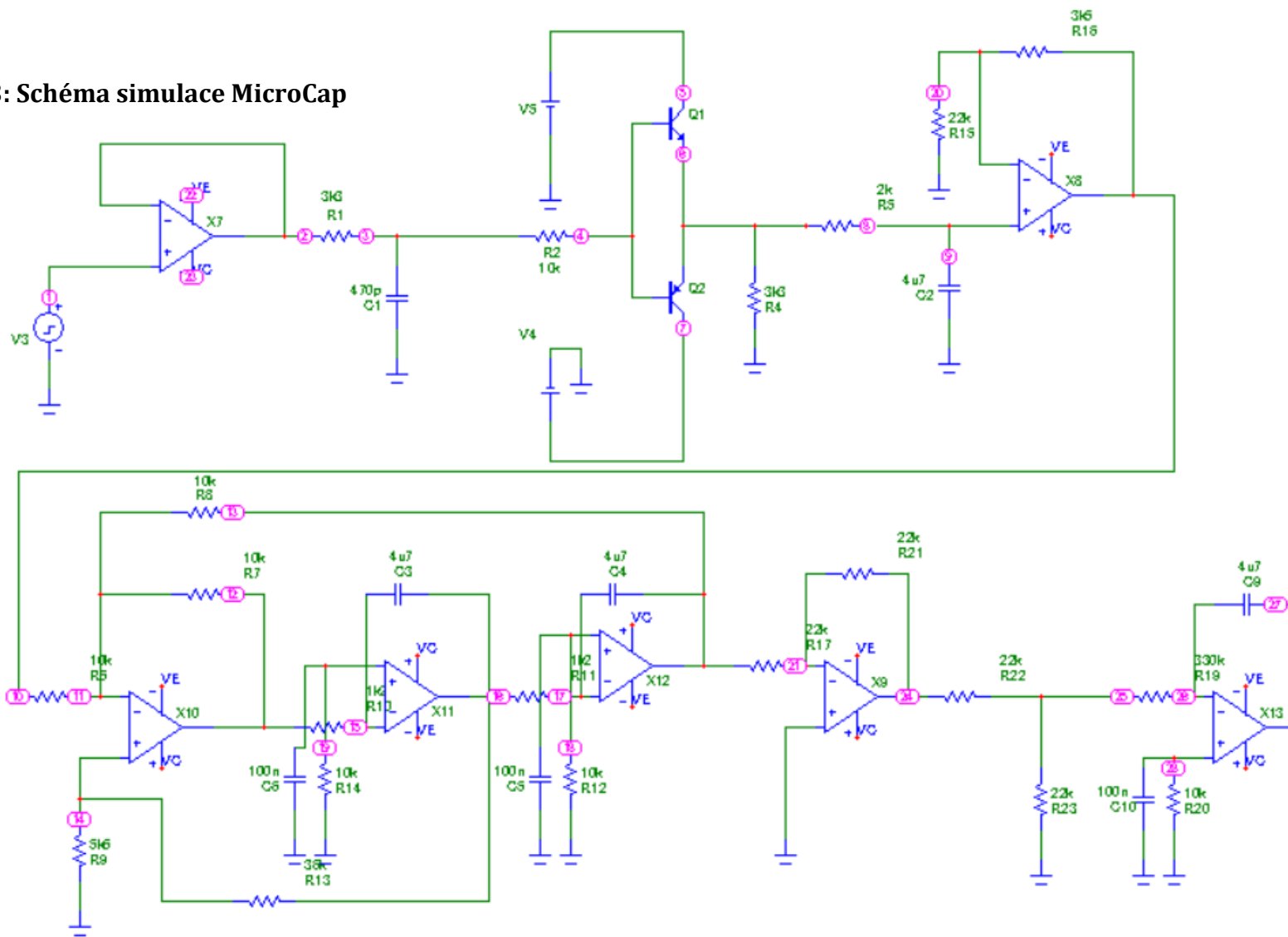


## Příloha 2: Schéma zapojení

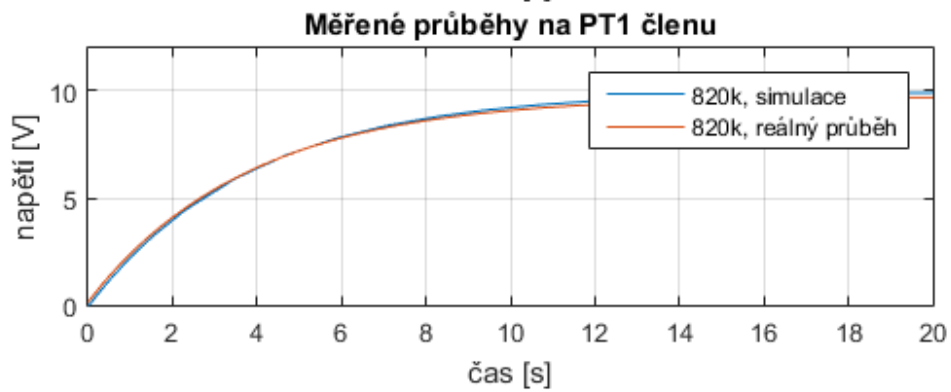
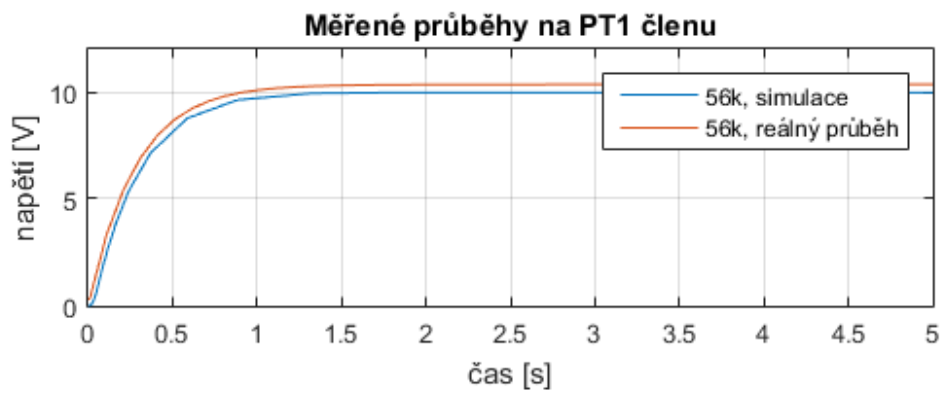
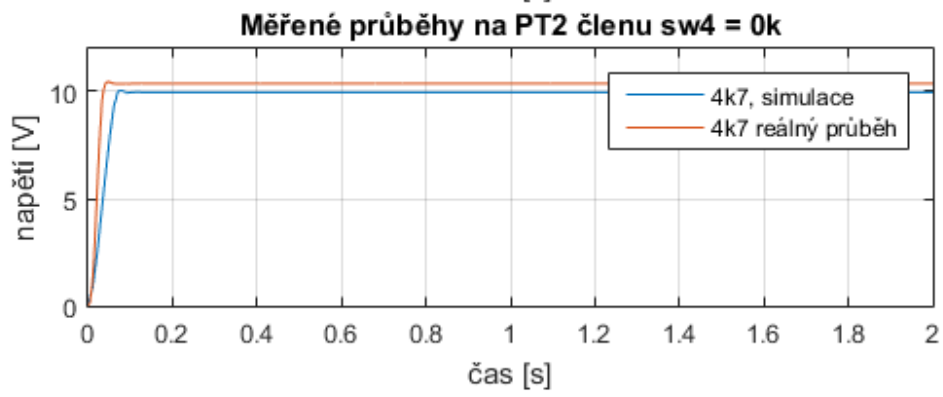
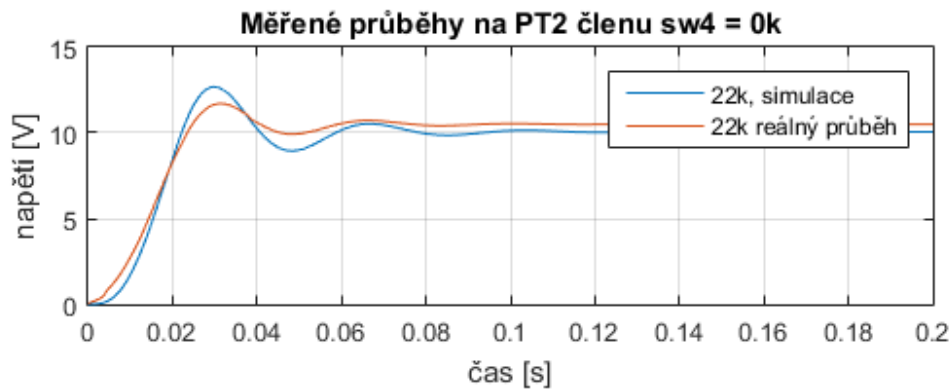


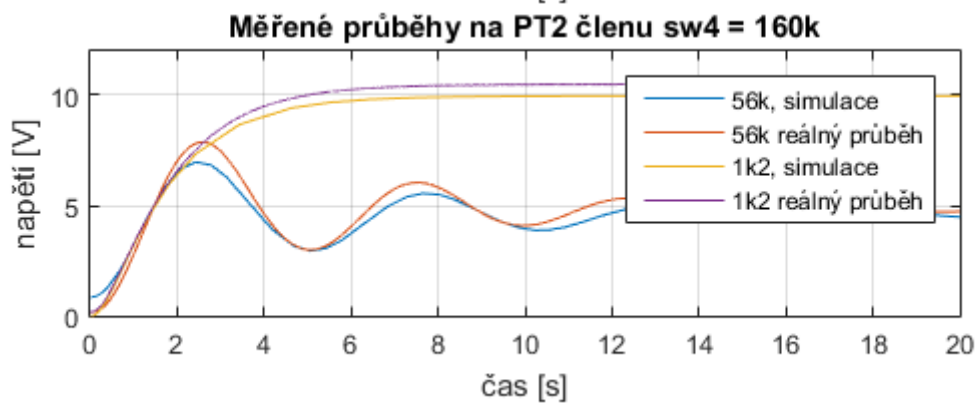
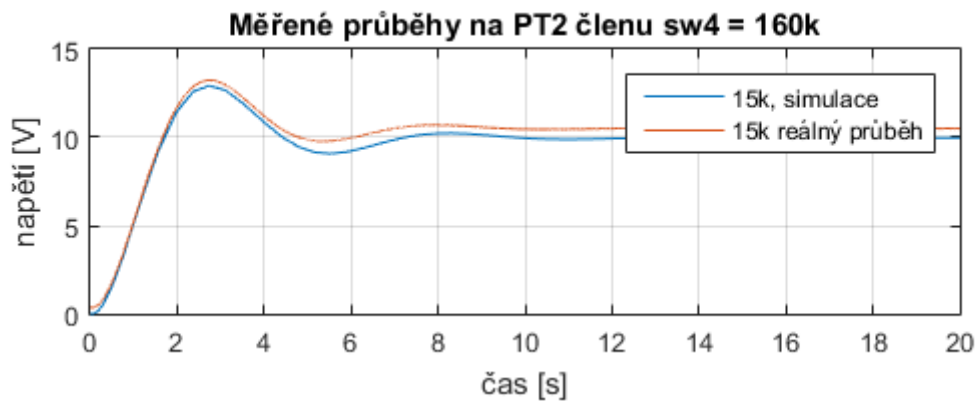
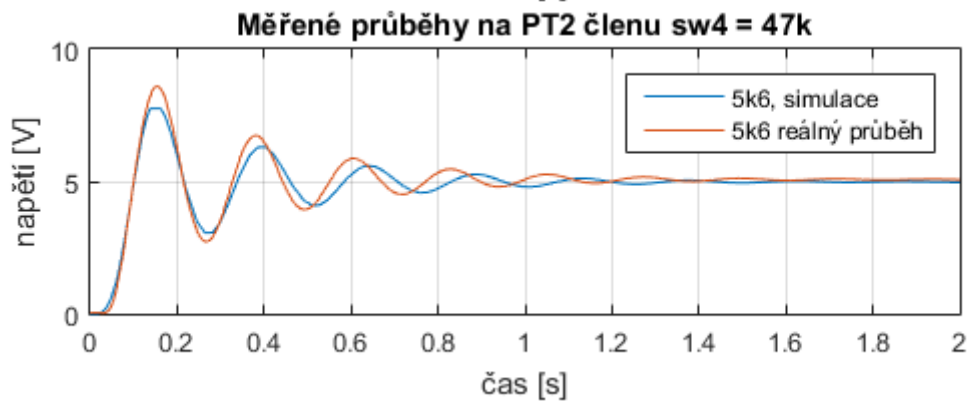
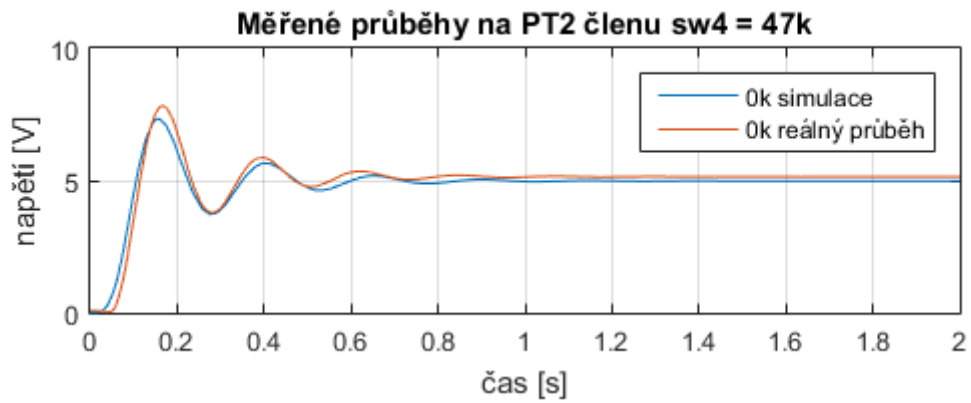
Sheet 7		File: bnf04P1a.net	
<b>Title:</b>			
Sheet: 02	Date:	Rev:	
©Gert J. B.A. Nieuw (0.0.1)-3		1 of 1/1	

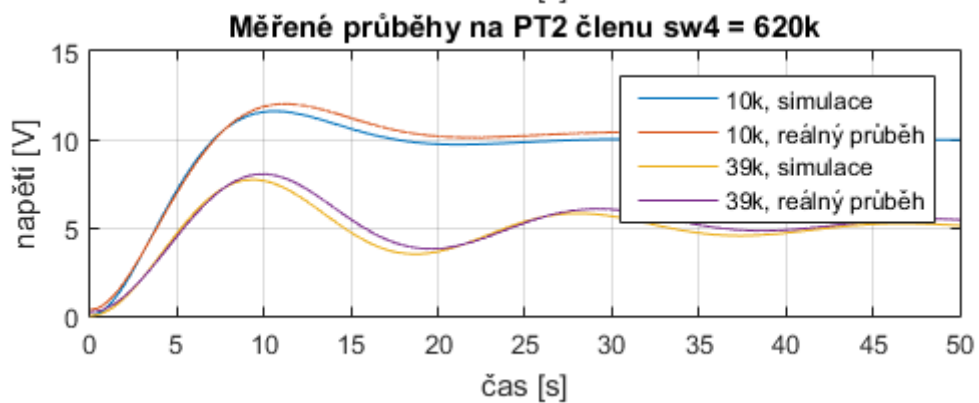
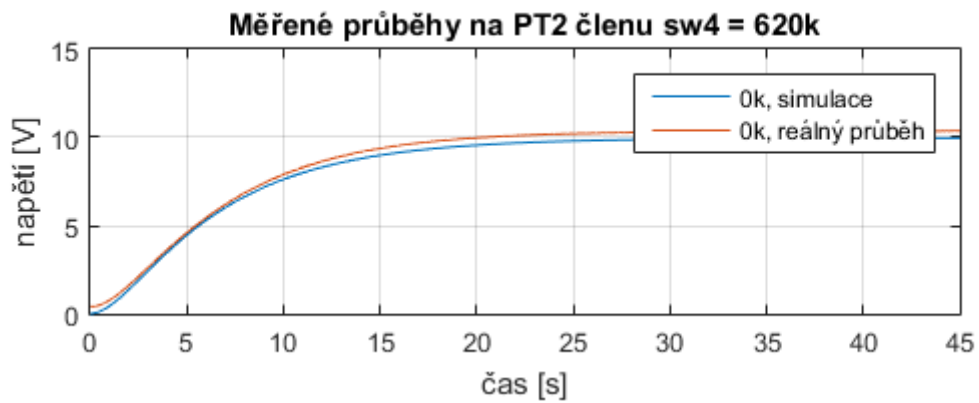
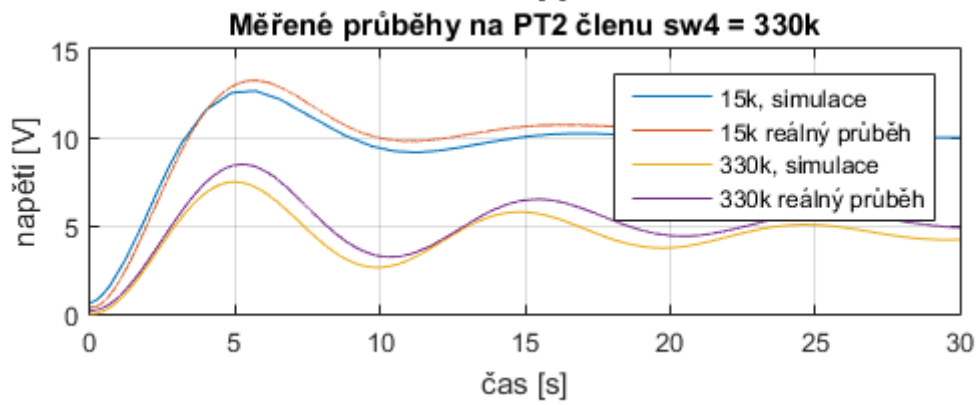
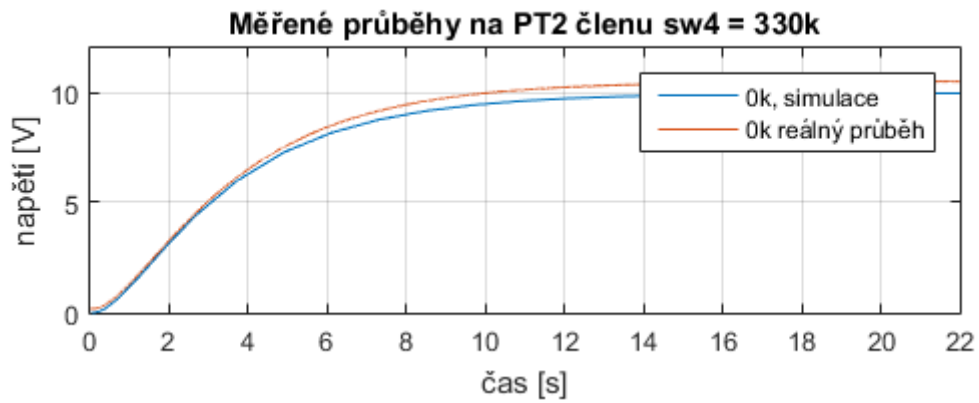
### Příloha 3: Schéma simulace MicroCap



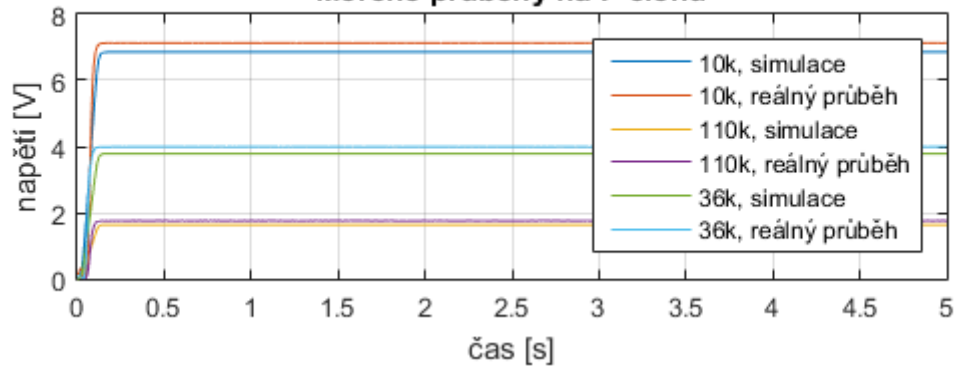
#### Příloha 4: Výsledky simulace v MicroCap



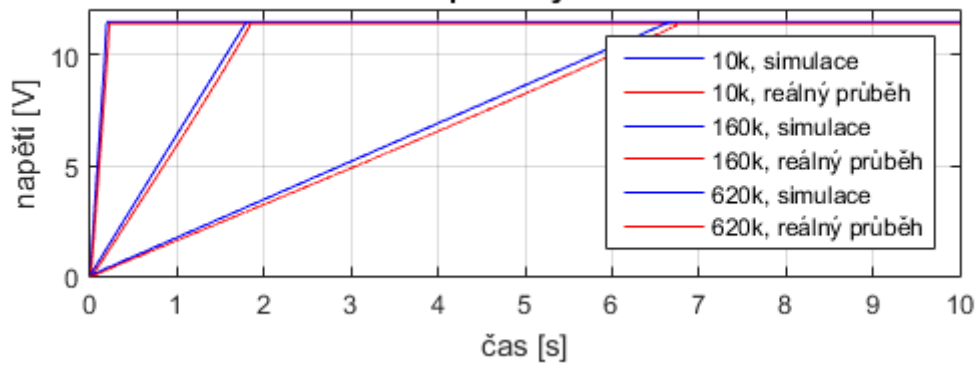




**Měřené průběhy na P členu**



**Měřené průběhy na I členu**



## Příloha 5: Program pro PLC vytvořený v Tia Portal

Totally Integrated Automation Portal									
<p><b>PLC_6 [CPU 1512C-1 PN] / Program blocks</b></p> <p><b>Block_1 [FB1]</b></p>									
<b>Block_1 Properties</b>									
<b>General</b>									
<b>Name</b>	Block_1	<b>Number</b>	1	<b>Type</b>	FB				
<b>Language</b>	SCL	<b>Numbering</b>	Automatic						
<b>Information</b>									
<b>Title</b>		<b>Author</b>		<b>Comment</b>					
<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>					
<b>Name</b>	<b>Data type</b>	<b>Default value</b>	<b>Retain</b>	<b>Access- sible from HMI/OP C UA</b>	<b>Wri- ta- ble in HMI eng- neer- ing HM I/O PC UA</b>	<b>Visible</b>	<b>Set- point</b>	<b>Super- vision</b>	<b>Comment</b>
Input									
Output									
InOut									
Static									
Temp									
Constant									
<pre> 0001 "Trojka" := 3; 0002 0003 CASE "STAV" OF 0004   0: 0005     "LED_1" := 0; 0006     "LED_2" := 0; 0007     "Output" := 0; 0008     RESET_TIMER("IEC_Timer_0_DB"); 0009     IF "Vyska_hladiny" &lt;= 6 THEN 0010       "LED_3" := 0; 0011       "LED_4" := 0; 0012     ELSE 0013       "LED_3" := 1; 0014       "LED_4" := 1; 0015     END_IF; 0016     IF "Start" = 1 AND "Vyska_hladiny" &lt;= 6 THEN 0017       "STAV" := 1; 0018     END_IF; 0019   1: 0020     "Start" := 0; 0021     "Setpoint" := INT_TO_REAL("Zadana_hodnota"); 0022     IF "Regulator_1" = 1 THEN 0023       "LED_1" := 1; 0024     END_IF; 0025     IF "Vyska_hladiny" &lt;= 6 THEN 0026       "LED_3" := 0; 0027       "LED_4" := 0; 0028     ELSE 0029       "LED_3" := 1; </pre>									



Totally Integrated Automation Portal		
<pre> 0030     "LED_4" := 1; 0031     END_IF; 0032     IF "Vyska_hladiny" &gt;= "Zadana_hodnota" - 1 THEN 0033         "STAV" := 2; 0034     END_IF; 0035     2: 0036         "LED_2" := 1; 0037         IF "Vyska_hladiny" &gt;= "Zadana_hodnota" - 1 THEN 0038             "Timer" := 1; 0039         END_IF; 0040         "IEC_Timer_0_DB".TON(IN := "Timer", 0041             PT := T#50s, 0042             Q =&gt; "Timer_out"); 0043         IF "Timer_out" THEN 0044             "STAV" := 3; 0045         END_IF; 0046     3: 0047         "LED_1" := 0; 0048         "LED_2" := 0; 0049         "Output" := 0; 0050         "Regulator_1" := 0; 0051         IF "Vyska_hladiny" &lt;= 6 THEN 0052             "LED_3" := 0; 0053             "LED_4" := 0; 0054             "STAV" := 0; 0055         ELSE 0056             "LED_3" := 1; 0057             "LED_4" := 1; 0058         END_IF; 0059     END_CASE; 0060 0061 0062 0063 0064 0065 0066 0067 0068 </pre>		

## **Příloha 6: Zadání laboratorní úlohy**

Cílem laboratorní úlohy je navrhnout řídicí systém pro řízení technologického procesu. Nedílnou součástí je návrh a implementace regulátoru pro řízení výšky hladiny druhé nádrže systému dvou nádrží zobrazených na obrázku 37. Přítokem neboli vstupem tohoto systému je  $q$ , výšky hladiny první a druhé nádrže jsou  $h_1$  a  $h_2$ . Plochy nádrží 1 a 2 jsou  $S_1$  a  $S_2$ . Hydraulický odpor ventilu mezi nádržemi je  $R_1$  a odpor výstupního ventilu je  $R_2$ .

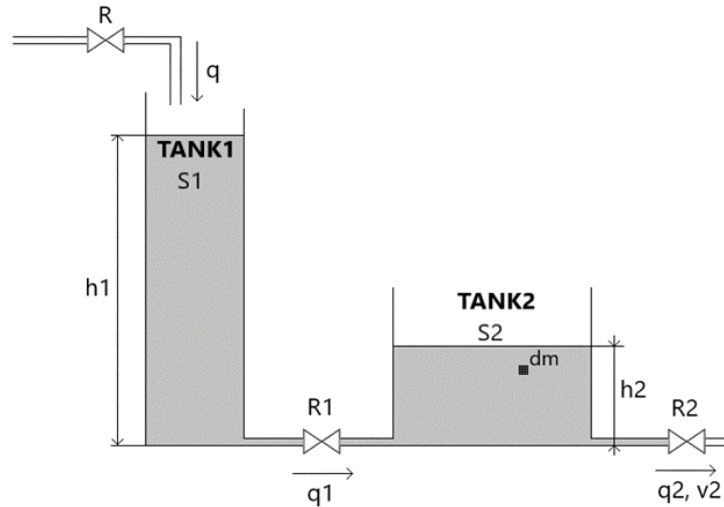
### **Popis procesu**

Jedná se o dva propojené zásobníky na vodu s hlídáním výšky hladiny v druhé nádrži. Po spuštění procesu se nejdříve otevřou ventily odtoku a propojení nádrží. Poté se otevře ventil přítoku a nádrže se začnou postupně napouštět. Po dosažení požadované výšky hladiny se rozsvítí kontrolka a po ustálení hladiny dojde s časovou prodlevou 15 s k vypuštění nádrží.

### **Funkční popis**

1. Start programu. Podmínkou startu programu jsou prázdné obě nádrže.
2. Po stisknutí tlačítka start a spuštění regulátoru dojde k otevření ventilů  $R_2$ ,  $R_1$  a ventilu přítoku  $R$ , nádrže se postupně začnou napouštět.
3. Jakmile nádrž dosáhne požadované výšky hladiny rozsvítí se kontrolka dosažení požadované výšky hladiny.
4. Po časové prodlevě (15 vteřiny) dojde k vypuštění nádrží. Tím pádem se zavře ventil přítoku  $R$  a po vyprázdnění se zavřou i ventily  $R_1$  a  $R_2$ .
5. **DOPORUČENÍ:** Do vizualizace vložte graf zobrazující průběhy napouštění/vypouštění první a druhé nádrže současně. (Je zapotřebí provést standardizaci analogového vstupu PLC, který odpovídá první nádrži(výstup 1 ze simulátoru)).

## Funkční schéma



Obrázek 37: Schéma systému dvou nádrží

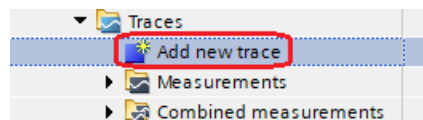
### Pokyny a upřesnění zadání

Hlavním cílem této úlohy je návrh regulátoru a jeho implementace do bloku PID Compact. Reálná soustava, systém dvou nádrží, je realizována pomocí zařízení připojeného na analogové vstupy a výstupy automatu. **Vstup do soustavy (akční zásah)  $-u(t)$  neboli výstup z PLC** je vyveden z analogové výstupní karty **AO-Channel 0**, **výstup ze soustavy (procesní hodnota)  $-y(t)$  neboli vstup PLC** je připojen na analogovou vstupní kartu **AI-Channel 0 až 3**.

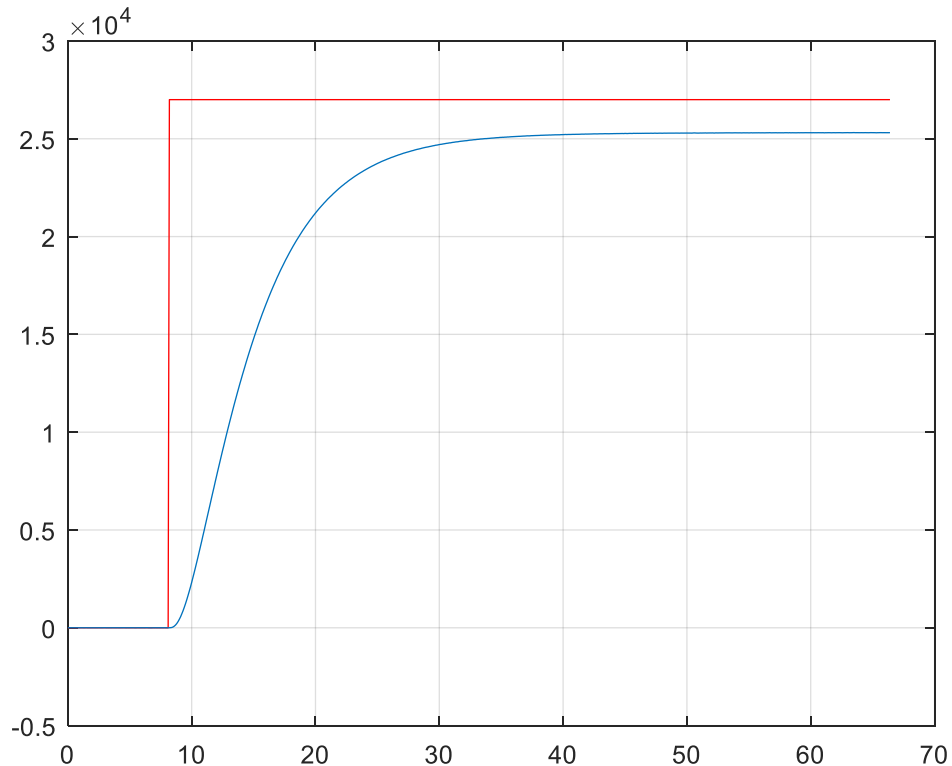
Standardizace vstupní hodnoty PLC by měla odpovídat výšce hladiny v nádrži, v rozsahu (5 – 100)%. Destandardizace výstupní hodnoty z PLC bude vyjádřena jako (0 – 100)% přítoku do první nádrže.

- Postup návrhu regulátoru pomocí metody optimálního modulu

Nejdříve potřebujeme zobrazit přechodovou charakteristiku systému, kterou získáme jako odezvu na skokovou změnu vstupní veličiny. K tomu lze využít nástroje **Traces** (viz pokyny vyučujícího).



Pomocí nástroje Traces byla změřena následující charakteristika:



**Obrázek 38: Přejchodová charakteristiky systému nastaveného na laboratorním modulu**

Tato změřená charakteristika odpovídá následujícímu přenosu systému druhého řádu, který můžete využít pro návrh parametrů regulátoru.

$$F_s(s) = \frac{0,94}{(1 + 4,94s) \cdot (1 + 2,21s)}$$

Metoda optimálního modulu vychází z přenosu řízení uzavřeného regulačního obvodu  $F_w(s)$ . Ideálně by měl přenos být  $F_w(s) = 1$ . To lze vyjádřit ve frekvenční oblasti ve tvaru

$$F_w(j\omega) = 1 \rightarrow |F_w(j\omega)| = A_w(\omega) = 1$$

Tato podmínka je reálně nesplnitelná a platí proto spíše  $A_w(\omega) \rightarrow 1$ , kde  $A_w(\omega)$  je amplituda frekvenčního přenosu a optimálně klesá s roustoucím  $\omega$ .

Pro snadnější výpočet se používá druhá mocnina tohoto vzathu

$$A_w(\omega) \rightarrow 1 \Rightarrow A_w^2(\omega) \rightarrow 1$$

Předpokládáme-li přenos řízení ve tvaru

$$F_w(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad n \geq m$$

Poté druhá mocnina přenosu řízení, ve která jsou pouze sudé mocniny  $\omega$ , má tvar

$$A_w^2(\omega) = |F_w(j\omega)|^2 = \frac{B_m\omega^{2m} + B_{m-1}\omega^{2(m-1)} + \dots + B_1\omega^2 + B_0}{A_n\omega^{2n} + A_{n-1}\omega^{2(n-1)} + \dots + A_1\omega^2 + A_0}$$

kde

$$\begin{array}{ll} B_0 = b_0^2 & A_0 = a_0^2 \\ B_1 = b_1^2 - 2b_0b_2 & A_1 = a_1^2 - 2a_0a_2 \\ B_2 = b_2^2 - 2b_1b_3 + 2b_0b_4 & A_2 = a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ B_{m-1} = b_{m-1}^2 - 2b_{m-2}b_m & A_{n-1} = a_{n-1}^2 - 2a_{n-2}a_n \\ B_m = b_m^2 & A_n = a_n^2 \end{array}$$

Pro vyhovující průběh regulace stačí, aby byla splněna následující podmínka.

$$\frac{B_0}{A_0} \geq \frac{B_i}{A_i} \Rightarrow A_i B_0 = A_0 B_i,$$

Kde  $i$  může nabývat hodnot  $i = 1, 2, \dots, \alpha$ ;  $\alpha$  - počet nastavitelných parametrů regulátoru.

Protože pro návrh PI regulátoru hledáme dva parametry  $K_R$  a  $T_i$ , potřebujeme dvě podmínkové rovnice.

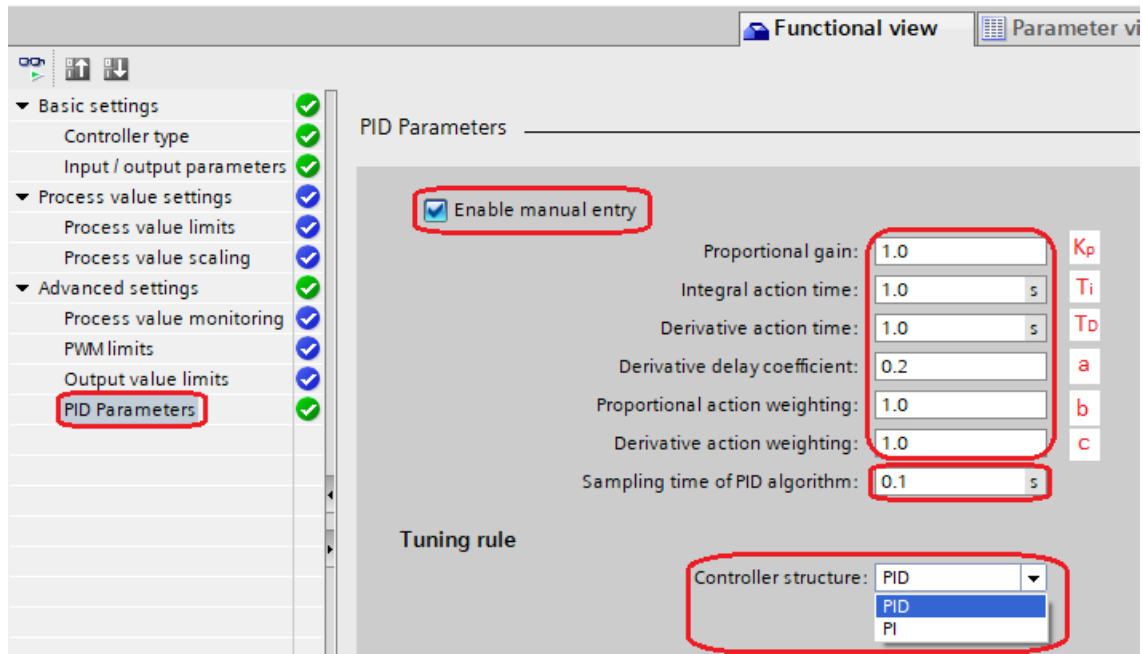
$$\begin{array}{l} \frac{B_0}{A_0} = \frac{B_1}{A_1} \rightarrow \frac{B_1}{A_1} = 1 \\ \frac{B_0}{A_0} = \frac{B_2}{A_2} \rightarrow A_2 = 0 \end{array}$$

Vypočtené konstanty  $K_r$  a  $T_i$  jsou v přenosu regulátoru ve tvaru (pozn. pro výpočet přenosu řízení uvažujte regulátor v tomto tvaru).

$$F_r = \frac{K_R \cdot (T_i s + 1)}{s}$$

Jelikož ale integrovaný univerzální PID regulátor v PLC pracuje s jiným algoritmem přenosu, musíme regulátor vypočítaný v kapitole 6 převést na následující tvar [12].

$$F_r = K \left( 1 + \frac{1}{T \cdot s} \right)$$



$$y = K_p \left[ (b \cdot w - x) + \frac{1}{T_i \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]$$

Obrázek 39: PID\_Compact – výběr struktury a nastavení parametrů [12]