

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Laboratorní úloha pro ohřev TUV

Liberec 2007

Jan Jonášek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: M2301 Strojní inženýrství

Obor: 3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojirenství

Zaměření: Automatizace inženýrských prací

Katedra aplikované kybernetiky

Labolatorní úloha pro ohřev TUV

Laboratory Exercise: Heating of Hot Service Water

Jan Jonášek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Moučka, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Miloš Hejzlar

Rozsah diplomové práce

Počet stran: 45

Počet příloh: 3

ANOTACE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra aplikované kybernetiky

Studijní program: M2301 Strojní inženýrství
Obor: 3902T021 Automatizované systémy řízení ve stojírenství
Zaměření: Automatizace inženýrských prací
Diplomant: Jan Jonášek
Téma práce: Laboratorní úloha pro ohřev TUV
Theme of work: Laboratory Exercise: Heating of Hot Service Water
Rok obhajoby DP: 2007
Vedoucí DP: Ing. Michal Moučka, Ph.D.
Konzultant: Miloš Hejzlar

Anotace:

Cílem diplomové práce je navrhnout a vytvořit desktopovou aplikaci pro spojitou regulaci ohřevu teplé užitkové vody. Aplikace má sloužit jako učební pomůcka pro studenty předmětu Základy aplikované kybernetiky při práci s laboratorní úlohou tepelného hospodářství. Aplikace je rozdělena do několika funkčních celků. Každá část je otestována na laboratorní úloze, získané výsledky jsou zpracovány a použity k ověření správné funkce všech částí aplikace.

Annotation:

This thesis proposes the design and creation of a desktop application for continuous control of the heating process for hot service water. The application is supposed to serve as a teaching aid for the laboratory measurement of heat economy in the Basics of Applied Cybernetics course. The application is divided into a number of functional units. Each part is verified by laboratory measurement, and the acquired results are processed for use in the verification of the correct functionality of all parts of the application.

Prohlášení

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

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

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

V Liberci 25.5.2007

Jan Jonášek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Moučkovi, Ph.D. a konzultantovi Miloši Hejzlarovi za odborné vedení, velkou dávku trpělivosti, velmi cenné rady, informace a pomoc při zpracování diplomové práce.

Upřímný dík patří také Bc. Janu Kadaníkovi, Bc. Tomáši Hroudovi a všem, kteří mne během studia podporovali

Obsah

1 Úvod.....	7
2 Soustava tepelného hospodářství.....	8
2.1 Tepelné hospodářství v domácnosti.....	8
2.2 Model soustavy tepelného hospodářství v laboratoři ASŘ.....	9
3 Vývojové prostředí LabVIEW.....	14
4 Kalibrace převodníku a měřicí karty.....	16
5 Identifikace regulačního ventilu.....	18
5.1 Identifikace a matematický model systému.....	18
5.2 Program identifikace.vi.....	18
5.3 Pomocný program odpouštění.vi.....	21
5.4 Vyhodnocení přechodové charakteristiky.....	22
5.5 Analýza získaných dat.....	26
6 Regulace soustavy.....	30
6.1 Regulační obvod.....	30
6.2 PID regulátor.....	31
6.3 Program regulace.vi.....	33
6.4 Parametry regulátoru a průběh regulace.....	37
7 Závěr.....	41
Seznam zkratk a symbolů.....	42
Seznam literatury.....	44
Přílohy.....	45

1 Úvod

Regulace teploty vzduchu a ohřev teplé užitkové vody je proces, který je běžně řešen ve většině domácností. Na termostatu v pokoji nebo na bojleru si nastavíme požadovanou teplotu a více již není třeba se o problém starat, vše se dále děje automaticky. Přitom si už ale málokdo uvědomuje, že je třeba nejdříve regulátory správně nastavit. V ideálním případě by se toto seřízení mělo udělat pro každou domácnost (regulovanou soustavu) zvlášť.

Cílem této diplomové práce je proto navrhnout aplikaci, pomocí které by si studenti předmětu Základy aplikované kybernetiky takové seřízení mohli vyzkoušet a otestovat přímo na reálném modelu tepelného hospodářství, jenž je nainstalované v laboratoři ASŘ.

Celý proces nastavení se skládá ze dvou oddělených, zdánlivě samostatných úkolů. První je správně identifikovat soustavu a změřit odezvy pro různá nastavení. Na základě získaných dat a s využitím metody, kterou si student může sám zvolit, je určen matematický model regulované soustavy. Druhou částí úkolu je s pomocí získaného modelu správně určit parametry regulátoru a především prakticky ověřit, zda-li byla identifikace a výpočet parametrů správný.

2 Soustava tepelného hospodářství

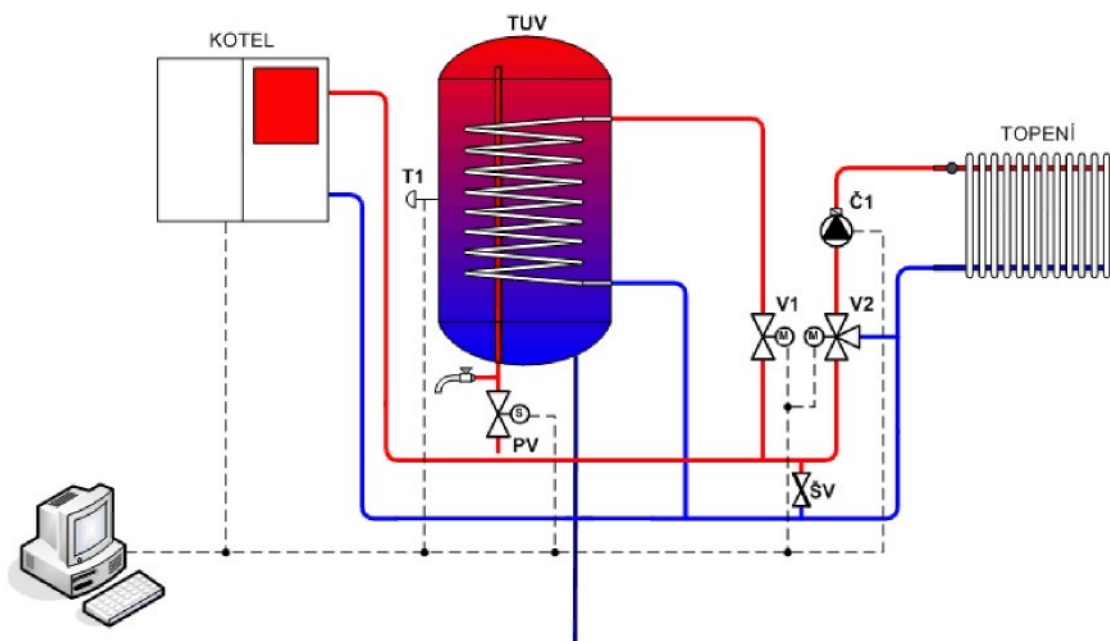
2.1 Tepelné hospodářství v domácnosti

Soustava, která je umístěna v prostorách laboratoře ASŘ (obr. 2.1), má představovat obvyklé tepelné hospodářství, se kterým se můžeme setkat ve velkém množství domácností. Jde o zapojení, kde kotlem, který může být elektrický, plynový, na tuhá paliva nebo jiný, ohříváme médium (v domácnosti je to zpravidla voda), pomocí něž provádíme ohřev teplé užitkové vody (TUV) v bojleru. Zároveň kotel slouží k vytápění jednotlivých místností bytové jednotky či obytného domu prostřednictvím radiátorů nebo podlahového topení. Součástí zmiňované soustavy je zpravidla regulátor teploty TUV, regulátor teploty vzduchu v pokojích, v domácnosti obvykle realizovaný programovatelným termostatem. Dále pak soustava obsahuje zařízení nezbytná k činnosti celého tepelného hospodářství, jako jsou čerpadla vody v okruhu, regulační ventily (dvou a třicestné), škrtky, pojistné a odvzdušňovací ventily, teploměry atd.



Obr. 2.1 - Tepelné hospodářství v laboratoři ASŘ

2.2 Model soustavy tepelného hospodářství v laboratoři ASŘ



Obr. 2.2 – Model soustavy tepelného hospodářství

Celý model soustavy tepelného hospodářství, která se nachází v prostorách laboratoře ASŘ (obr. 2.2), lze rozdělit do dvou částí. Jedna část je zaměřena na regulaci deskového radiátoru. Druhá část, které se věnuje tato diplomová práce, se zabývá regulací teploty teplé užitkové vody v bojleru. Obě části, ať již samostatně nebo dohromady jako jeden celek, mají být realizovány jako laboratorní úloha pro posluchače předmětu Základy aplikované kybernetiky vyučovaném ve třetím ročníku na Fakultě strojní, případně dalších navazujících předmětů zaměření ASŘ.

Základem celého tepelného hospodářství je elektrický kotel (na obr. 2.2 označen jako KOTEL). Elektrokotel dodává do soustavy energii prostřednictvím ohřevu vody, kterou se následně ohřívá teplá užitková voda v bojleru (TUV) a zároveň také slouží k vytápění deskového radiátoru (TOPENÍ). Dalšími prvky jsou ventily, které jsou v soustavě čtyři, dva regulační (V1, V2), jeden škrťací (ŠV) a jeden odpouštěcí ventil TUV z bojleru (PV). Čerpadlo (Č1) zajišťuje nucený oběh v části soustavy s deskovým radiátorem. Důležitou součástí je pak odporový snímač teploty Pt100 (T1), kterým je měřena teplota teplé užitkové vody v bojleru. Součástí je i počítač vybavený měřicí kartou PCL – 812PG, na kterou je přes I/U převodník přiveden výstup z odporového teploměru a přes kterou je řízena činnost kotle, odpouštěcího a regulačních ventilů a čerpadla.

Elektrický kotel

K vytápění je použit kotel DAKON DALINE PTE-S 4M (obr. 2.3) od firmy DAKON spol. s r.o. Topný výkon kotle je 4kW, vnitřní vybavení je kotlové těleso, elektroskříň, ovládací panel, čerpadlo, filtr, snímač tlaku vody, expanzní nádrž a pojišťovací ventil. Provoz kotle v modelu soustavy tepelného hospodářství je automaticky řízen aplikací pro spojitou regulaci ohřevu TUV v bojleru, případně dalšími pomocnými aplikacemi, a nastavením teploty vytápěcí vody na kotlovém termostatu.



Obr. 2.3 – Elektrický kotel

Bojler

Pro akumulaci teplé užitkové vody (TUV) je použitý upravený kombinovaný akumulční tlakový ohřívač vody TATRAMAT OVK 81 s trubkovým výměníkem vyráběný firmou TATRAMAT – ohřívače vody, spol. s r.o. o jmenovitém objemu 75 litů. Úprava bojleru spočívá v odebrání součástí přímého ohřevu elektrickým proudem. Zůstává tak pouze nepřímý ohřev TUV teplou vodou ze systému. Bojler je doplněn odporovým snímačem teploty Pt100, jehož výstup je vyveden přes převodník na měřicí kartu.

Regulační ventil

Akčním členem řešené soustavy, to znamená části, kde se ohřívá teplá užitková voda v bojleru, je dvoucestný regulační ventil (obr. 2.4) s typovým označením RV 122 P

od výrobce LDM, spol. s r.o. Jde o ventil s omezovačem průtoku. Omezovač umožňuje nastavit různý jmenovitý průtok ventilem a tím tak i pozměnit charakter regulované soustavy, aby nedocházelo k opětovnému řešení stále stejné úlohy studnety.

Ventil je osazen elektrickým pohonem ANT 11.10 od téhož výrobce. Pohon je vybaven samoadaptivní funkcí, která přesně vymezuje rozsah zdvihu pohonu podle krajních poloh zdvihu ventilu. Pro spolupráci s nadřazeným regulačním systémem je elektrický pohon vybaven třibodovým řízením. Díky tomu lze nastavovat velikost otevření regulačního ventilu spojitě, regulovat průtok a následně tím i teplotu teplé užitkové vody v bojleru. Důležitým parametrem pohonu je přestavná doba. Na tuto dobu a samoadaptivní funkci se musí brát ohled při návrhu řídicí aplikace, jelikož se po zapnutí pohon nastaví do výchozí polohy, s využitím samoadaptivní funkce najede do druhé krajní polohy a opět se nastaví do výchozí polohy. Maximální možný čas pro celou tuto operaci, tzn. doba rovnající se trojnásobku času nutného k překonání maximálního zdvihu ventilu, je nutno započítat do doby inicializace soustavy po zapnutí. Ovládací napětí regulačního ventilu je 0..24 V.



Obr. 2.4 – Regulační ventil s pohonem

Škrtící ventil

Ventil slouží k přepouštění vody kolující v systému mezi výstupní a vstupní trubicí z kotle v případě, jsou-li oba regulační ventily zcela uzavřeny a kotel je zapnutý. Otevření ventilu umožní oběh vody v okruhu, čerpadlo v kotli se nepřetěžuje a v důsledku se nesnižuje jeho životnost. V případě, který je řešen v této diplomové práci, je třicestný regulační ventil (V2) v části s radiátorem trvale uzavřen, tudíž se použití škrtícího ventilu redukuje na případ, kdy se uzavře doucestný regulační ventil (V1).

Odpouštěcí ventil

Dvoucestný, nepřímo řízený magnetický ventil, vyráběný firmou STASTO Automation spol. s r.o. pod označením 21W, je připojen přímo na výtokové trubce a slouží k rychlému odpouštění teplé užitkové vody z bojleru. K odpouštění vody může dojít na základě povelu z aplikace při překročení stanovené maximální teploty TUV v bojleru nebo při potřebě zchladit vodu z jiného důvodu. Ventil je dvoupolohový a po odpojení od ovládacího napětí 24 V zůstane uzavřen.



Obr. 2.5 – Odpouštěcí ventil

Snímač teploty

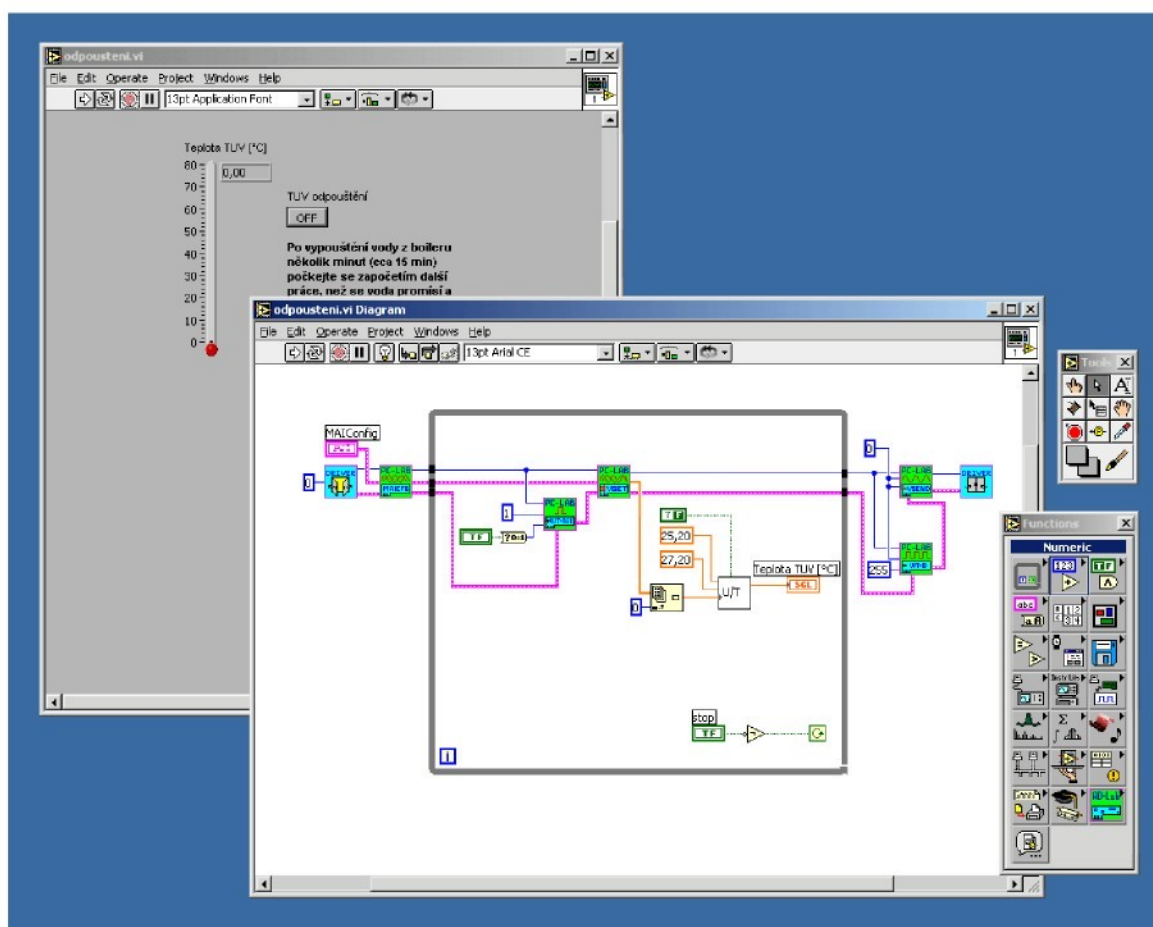
Na měření teploty teplé užitkové vody v bojleru je použit odporový snímač teploty Pt100 vyrobený firmou JSP spol.s r.o. Sonda je umístěna v šachtě v ose bojleru, přibližně uprostřed. Teploměr pracuje na principu změny odporu při změně teploty v prostředí, kde je teplota měřena. Změna odporu se při konstantním napájecím napětí projeví změnou proudu. Před začátkem práce je nutné zkalibrovat převodník proudu na napětí, které je snímáno na měřící kartě. Kalibrace se dělá z důvodu možnosti přesně určit okamžitou teplotu TUV v bojleru.

Měřící karta

Pro řízení soustavy a zpracování snímaného signálu z teploměru je v počítači

zapojena multifunkční měřicí karta PCL – 812PG od společnosti ADVANTECH. Karta obsahuje 16 12-bitových analogových vstupů, 2 12-bitové analogové výstupy, 16 digitálních vstupů a 16 digitálních výstupů. Na analogový vstup je připojen teploměr (T1), jedním analogovým výstupem je ovládán regulační ventil (V1). Na digitální výstupy je připojeno ovládání kotle a odpouštěcího ventilu (PV). Dále je na digitální výstupy připojeno čerpadlo (Č1) a třicestný regulační ventil (V2).

3 Vývojové prostředí LabVIEW



Obr. 3.1 – Vývojové prostředí LabVIEW

Čelní panel – interaktivní uživatelské rozhraní, které simuluje panel skutečných přístrojů. Může obsahovat tlačítka, přepínače, displeje pro zobrazování grafů a jiné ovládací a zobrazovací prvky.

Blokový diagram – vlastní zdrojový kód programu, vytvořený pomocí jednotlivých funkčních bloků, které reprezentují matematické funkce, funkce pro práci s daty, funkce pro práci s měřicí kartou atd. Bloky jsou vzájemně propojeny vodiči.

subVI – podprogram VI. Blok samostatného programu VI, který je vložen do jiného VI. Toto řešení umožňuje hierarchismus a modularitu programů vytvořených v prostředí LabVIEW, jelikož lze vložit libovolný počet subVI do VI na nejvyšší úrovni. Subprogramy jsou volány postupně od subVI na nejvyšší úrovni až po subVI na nejnižší úrovni.

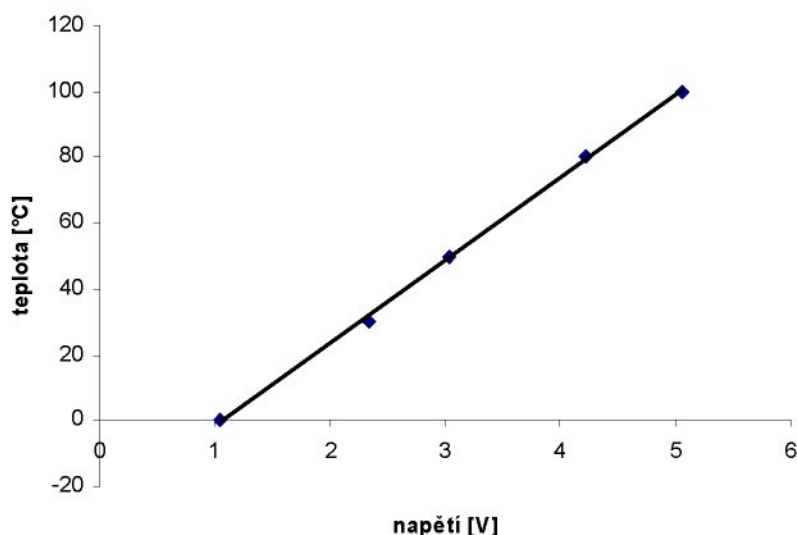
4 Kalibrace převodníku a měřící karty

Jak již bylo zmíněno, před začátkem práce je nutné zkalibrovat převodník měřícího proudu na napětí, které je následně snímáno na měřící kartě. Kalibrace je nutná z důvodu určení teploty, která odpovídá zaznamenanému napětí na kartě. Jelikož je závislost platinového měřícího odporu Pt100 na teplotě dána normou ČSN IEC 751, lze pomocí nastavení přesně definovaného odporu R na vstupu do I/U převodníku odečíst na měřící kartě příslušné napětí U a z tabulky v normě následně získat odpovídající teplotu.

Pro kalibraci byla použita kaskáda METRA XL6, na které byl postupně nastavován odpor příslušející zvoleným teplotám a na kartě odečítáno napětí (tab. 4.1).

Odpor [Ω]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Napětí [V]
100,000	0	1,05
111,673	30	2,23
119,397	50	3,03
130,897	80	4,22
138,506	100	5,05

Tab. 4.1 – Kalibrace převodníku



Obr. 4.1 – Závislost teploty na napětí na měřící kartě

Ze změřených hodnot napětí a z daných teplot lze vytvořit lineární závislost teploty na napětí a určit směrnici a posun přímky (obr. 4.1).

Přímku lze popsat rovnicí

$$y = 25,2x - 27,2 \quad . \quad (4.1)$$

Hodnoty směrnice 25,2 a posun 27,2 jsou použity v programech, které zprostředkovávají komunikaci se soustavou a slouží k přepočtu zaznamenaného napětí na zobrazovanou hodnotu teploty na panelu aplikace.

5 Identifikace regulačního ventilu

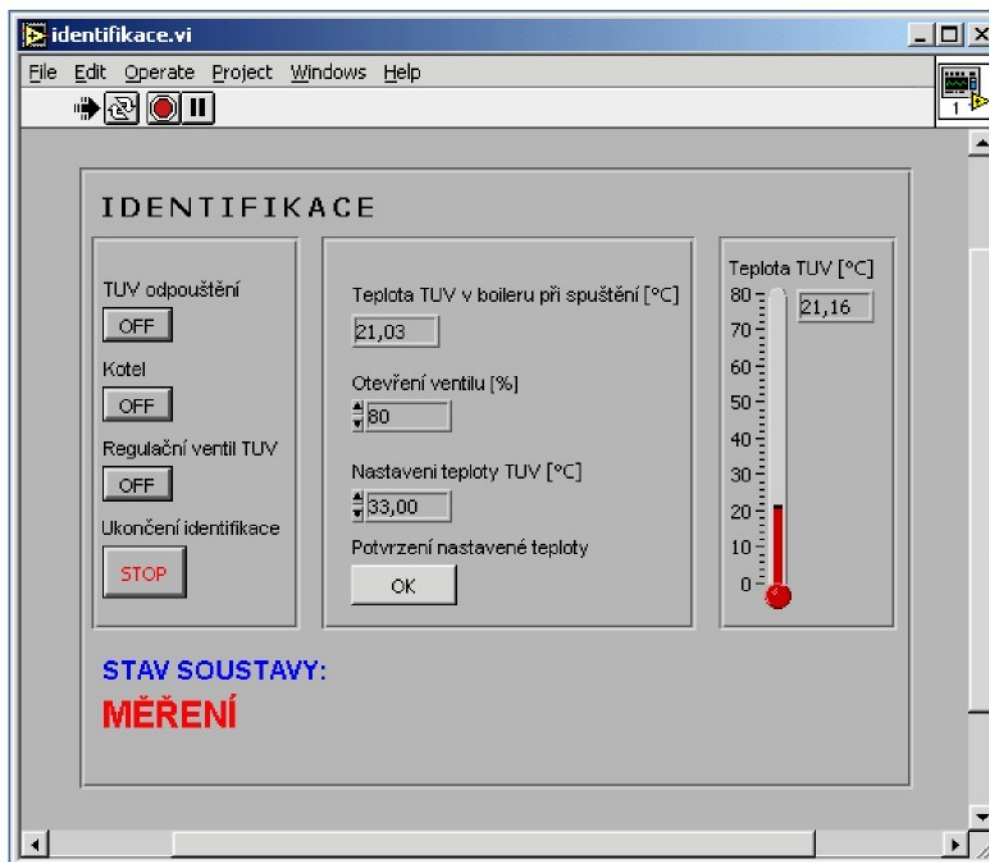
5.1 Identifikace a matematický model systému

Identifikaci systému lze chápat jako nalezení matematického modelu daného procesu pro daný účel. Identifikace, která vychází z matematicko-fyzikální analýzy se označuje jako *analytická identifikace*. Při této analýze sestavujeme rovnice vyjadřující vztahy mezi vstupními, stavovými a výstupními signály. Rovnice vycházejí z látkové nebo energetické rovnováhy, z rovnic fyzikálních, chemických a jiných procesů probíhajících v soustavě. Identifikace vycházející z experimentu, měření na systému, nazýváme *experimentální identifikací*. Předpokládá se, že vstupní a výstupní signály jsou měřitelné. Výsledek experimentální identifikace je funkční závislost mezi vstupním a výstupním signálem anebo průběh dynamické charakteristiky. Dalším výsledkem mohou být parametry (koeficienty) modelu zvolené struktury, za předpokladu, že tato struktura je možná odhadnout. [4]

Matematický model je matematické vyjádření *podstatných vlastností* existujícího nebo konstruovaného systému, který popisuje znalosti o systému v použitelné formě. Matematický model se proto vždy vyznačuje jistou mírou zjednodušení a abstrakcí reality, která je popisována. Z tohoto hlediska lze mluvit o *parametrických* a *neparametrických* modelech. Parametrické modely mají danou strukturu, tzn. řád a zvolený typ diferenciální nebo diferenční rovnice nebo soustav takových rovnic, obrazový nebo diskrétní přenos se zvolenými stupni polynomů v čitateli a jmenovateli atd. Neparametrické modely jsou vyjádřeny funkční závislostí mezi zvoleným vstupním a odpovídajícím výstupním signálem. [4]

5.2 Program *identifikace.vi*

Správné nastavení parametrů PID regulátoru vyžaduje znalost dynamického chování ventilu. Proto je nutné identifikovat ventil a získat obrazový přenos systému. Ze známého přenosu je již pomocí některé z mnoha metod možné určit parametry regulátoru. Pro účely měření odezev byl vytvořen program *identifikace.vi*, zdrojový kód je v Příloze 1.

Obr. 5.1 – Čelní panel aplikace *identifikace.vi*

Program *identifikace.vi* slouží k získání dat potřebných pro identifikaci. Na čelním panelu aplikace (obr. 5.1) se nastavují dva parametry:

Otevření ventilu [%] – nastavení otevření regulačního ventilu V1 (obr. 2.2), hodnotu lze zadat v rozsahu 20-100%. Výchozí hodnota je 80%. Během měření nelze měnit.

Nastavení teploty TUV [°C] – teplota, při které se ukončí identifikace. Během měření nelze měnit.

Tlačítka na čelním panelu:

TUV odpouštění – umožňuje rychlé vypuštění TUV z boileru.

Kotel – zapíná a vypíná kotel.

Regulační ventil TUV – zapíná a vypíná regulační ventil.

Ukončení identifikace – ukončí identifikaci před dosažením zadané teploty v poli **Nastavení teploty TUV [°C]**.

Potvrzení nastavené teploty - potvrzení zadaných hodnot v polích *Nastavení teploty TUV [°C]* a *Otevření ventilu [%]*.

Na čelním panelu se dále nacházejí indikátory:

Teplota TUV v bojleru při spuštění [°C] – zobrazuje po celou dobu běhu aplikace teplotu, která byla v bojleru při spuštění. Slouží jako orientační údaj, podle kterého se nastavuje hodnota v poli *Nastavení teploty TUV [°C]* a je také výchozí hodnotou v tohoto pole.

Teplota TUV [°C] – zobrazuje aktuální teplotu v bojleru.

STAV SOUSTAVY – vypisuje aktuální stav, ve kterém se soustava nachází. Běh programu je sekvenční, proto i tento indikátor zobrazuje stavy, kterými soustava prochází (není-li běh programu přerušen zásahem uživatele).

Stavy soustavy při řízení programem identifikace.vi:

- **INICIALIZACE** – první fáze, kdy se celá soustava spouští a je plně řízena pouze z programu, žádná tlačítka na čelním panelu nelze stisknout, protože jsou programově nastavena jako neaktivní. Ve zdrojovém kódu je stav řešen od sekvence č.0 až do sekvence č.3 (viz. Příloha 1). Doba inicializace je dána samoadaptivní funkcí pohonu regulačního ventilu V1 (obr. 2.2). V sekvenci č.1 je čas inicializace nastaven dle dokumentace k pohonu na 90s, což je doba potřebná k přesunutí pohonu z krajní (úplné uzavření ventilu) do výchozí polohy a spuštění samoadaptivní funkce, kdy pohon najede do krajní polohy a zpět do výchozí polohy pohonu. Dalším časem v inicializaci je čas úplného uzavření ventilu (sekvence č.3 v Příloze 1), jelikož regulační ventil je ve výchozí poloze, pokud je uzavřen. Maximální doba této akce je 30s. Ve všech případech je počítáno s malou časovou rezervou.
- **ZADÁVÁNÍ TEPLoty A OTEVŘENÍ VENTILU** – druhá fáze běhu programu, sekvence č.4, kdy se do polí *Otevření ventilu [%]* a *Nastavení teploty TUV [°C]* zadávají parametry pro následnou identifikaci. Program čeká na potvrzení zadaných hodnot tlačítkem OK. Ostatní tlačítka z čelního panelu není možné stisknout. Teplota nastavená v *Nastavení teploty TUV [°C]* je teplota, po jejímž dosažení se identifikace ukončí. Hodnota zadané teploty by měla dostatečně lišit od teploty TUV v bojleru při spuštění, aby počet změřených hodnot byl postačující pro identifikaci a sestavení přechodové charakteristiky. Jelikož se jedná o integrační soustavu (viz. dále

vyhodnocení změřených dat), doporučuji zadat teplotu minimálně o 10°C vyšší než je teplota TUV při spuštění. Při tomto rozdílu teplot se plně projeví integrační charakter soustavy.

- **NASTAVENÍ VENTILU** – třetí fáze, reprezentovaná sekvencemi č. 5 a 6. V sekvenci č. 5 je programem nastavena hodnota otevření ventilu dle zadání v předchozím kroku. V sekvenci č. 6 je prodleva nutná k přesunutí regulačního ventilu do požadované polohy. Žádná tlačítka z čelního panelu nelze stisknout, program probíhá bez nutnosti zasahování uživatele.
- **MĚŘENÍ** – čtvrtá, hlavní fáze programu popsána sekvencí č. 7. Na začátku této fáze je uživatel vyzván k zadání cesty a jména textového souboru, do kterého se ukládají měřená data. Data se ukládají každých 5 sekund. Do souboru je ukládán čas a teplota teplé užitkové vody v daný okamžik. Teplota je ukládána s přesností na 6 desetinných míst. V souboru tak vznikne matice $N \times 2$, kde N je počet změřených hodnot. Měření se ukončí automaticky po dosažení zadané hodnoty v poli *Nastavení teploty TUV [°C]* nebo po stisku tlačítka STOP. Všechna další jsou neaktivní, s výjimkou tlačítka TUV odpouštění. Tlačítko je aktivní z důvodu vzniku náhlé potřeby rychlého vypuštění vody z bojleru. V takovém případě jsou ale měřená data nepoužitelná a identifikace se musí opakovat.
- **SEBĚH** – závěrečná fáze běhu programu, která je bez zásahu uživatele. Proto jsou všechna tlačítka neaktivní. Po vypnutí kotle a nastavení hodnoty pro zavření ventilu do výchozí polohy v sekvenci č. 8 je v sekvenci č. 9 časová prodleva, která zajistí dostatečný čas potřebný k dosažení výchozí polohy regulačního ventilu. V sekvenci č. 10 jsou pak všechna zařízení vypnuta a program se ukončí.

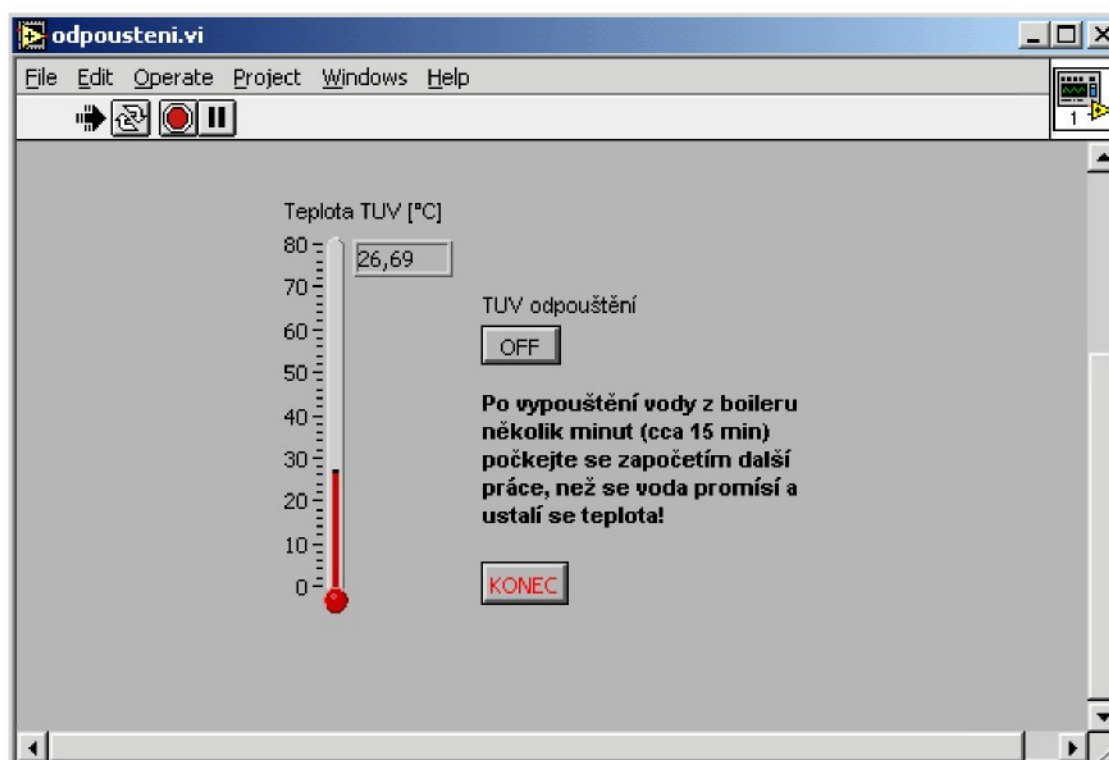
5.3 Pomocný program *odpousteni.vi*

Pomocný program *odpousteni.vi* byl vytvořen, aby šlo opakovat identifikaci několikrát po sebou. Identifikace se provádí pro různá otevření regulačního ventilu. Po provedení měření se zvýší teplota TUV a pokud bychom ji část z bojleru neodpustili, může se při dalším měření stát, že narazíme na technologické omezení soustavy. Změřená data by pak byla nepoužitelná.

Technologickým omezením soustavy se v případě tepelného hospodářství

v laboratoři ASŘ rozumí maximální teplota, kterou lze dosáhnout při ohřevu TUV. Maximální dosažitelná teplota TUV se pro dostatečně dlouho probíhající děj bude rovnat teplotě nastavené regulátorem na ovládacím panelu elektrického kotle.

Čelní panel aplikace je na obr. 5.2, zdrojový kód pak v Příloze 2.



Obr. 5.2 – Čelní panel aplikace *odpouštění.vi*

Na čelním panelu je indikátor aktuální teploty TUV – *Teplota TUV [%]*, tlačítko, kterým se ovládá odpouštěcí ventil PV (obr. 2.2) a umožňuje vypuštění teplé užitkové vody. Podlejší tlačítko *KONEC* ukončí celou aplikaci.

Panel pak obsahuje také důležité upozornění na nutnost počkat se započítím dalšího měření na ustálení teploty TUV. Minimální čas potřebný k promísení vody v boileru po odpouštění a tím i ustálení teploty je přibližně 15 min.

5.4 Vyhodnocení přechodové charakteristiky

Možných metod k vyhodnocení získaných dat programem *identifikace.vi* je několik. Jednou z nich je využití regresní metody. Nejříve z odezvy systému na skok získáme přechodovou charakteristiku, kterou využijeme k nalezení přenosu systému. Metoda vychází z kritéria minimálního součtu kvadrátu odchylky mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou z hledaného přenosu a lze ji popsat rovnicí [5]

$$J = \sum_{k=1}^n e^2(k) = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{Mi})^2, \quad (5.1)$$

kde $e^2(k)$ je kvadrát odchylky,

N je počet změřených hodnot,

y_i je změřená hodnota přechodové charakteristiky,

y_{Mi} je vypočítaná hodnota přechodové charakteristiky.

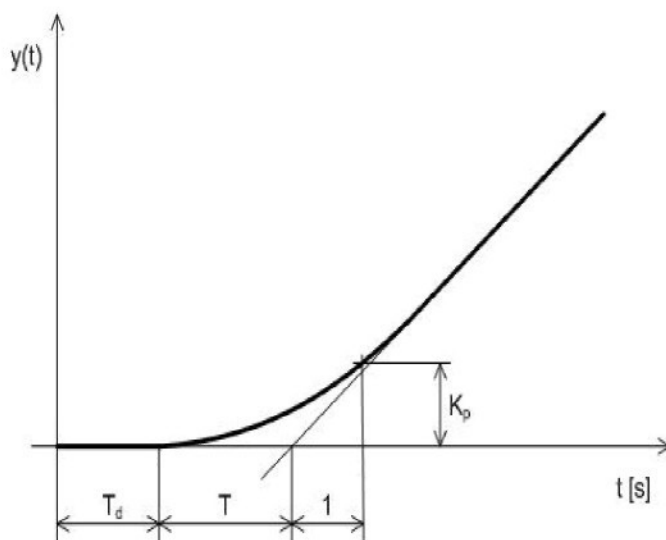
Velice důležitým krokem je správně odhadnout typ analyzované soustavy. V případě řešené soustavy byla zvolena integrační soustava 1.řádu se setrvačností 1.řádu, řádem astatismu $r = 1$ a dopravním zpožděním (obr. 5.3) vyjádřená přenosem (tříparametrový integrační model) [6]

$$G(s) = \frac{K_p}{s(Ts+1)} e^{-sT_d}, \quad (5.2)$$

kde K_p je zesílení procesu,

T je časová konstanta,

T_d je dopravní zpoždění.



Obr. 5.3 – Přechodová charakteristika integrační soustavy 1.řádu se setrvačností 1.řádu a dopravním zpožděním

Integrační soustava byla volena na základě průběhu odezvy na skok. Po otevření regulačního ventilu na zvolenou hodnotu se nejprve projeví dopravní zpoždění soustavy a

teplota se nezvyšuje. Po nějaké době teplota začne růst, až se nakonec přírůstek teploty ustálí na konstantní hodnotě za časovou jednotku. Teplota v takovém případě roste až na hodnotu danou technologickým omezením soustavy s integračním procesem.

Popsaný postup lze řešit např. pomocí softwaru MATLAB, v němž je možné zapsat program, pomocí kterého se zpracují výsledky měření, získá se hledaný přenos a zároveň se na závěr porovnají změřená data s vypočítanými. Z jednoho grafu se tedy lehce získá informace, zda-li byla identifikace programem úspěšná a není-li třeba ji opakovat pro jiné vstupní parametry.

K identifikaci byl použit program (M-file):

```
clear all; close all; clc;
global Y T YF YP;           % definice globálních proměnných
a = 1;                      % filtr
u = 6;                      % otevření ventilu, ve [V] (0V-zavřeno, 10V-plně otevřeno)
D = 12;                     % počet hodnot plus jedna, které tvoří dopravní zpoždění
load('id.dat');             % načtení souboru se změřenými daty
id;
T = id(:,1);                % uložení naměřených dat do proměnných
Y = id(:,2);
YF = id(:,2);
YP = id(:,2);
N = length(Y);              % počet změřených hodnot
% filtrování dat
for i=2:1:N
    YF(i) = (1-a)*YF(i-1)+a*Y(i);
end
plot(T,Y,'-',T,YF);         % vykreslení změřených a filtrovaných dat
grid on
title('Zmerena a filtrovana teplota');
xlabel('t [s]'); legend('Zmerena teplota [st. C]','Filtrovana teplota [st. C]');
pause
% přechodová charakteristika
for i=1:1:N
    YP(i) = (YF(i)-YF(1))/u;
end
plot(T,YP,'-');             % vykreslení přechodové charakteristiky
grid on
```

```

title('Prechodova charakteristika'); xlabel('t [s]'); ylabel('h(t)');
pause
clear id;
% odečtení hodnot tvořících dopravní zpoždění
for k=D+1:length(YP)
    YD(k-D+1) = YP(k);
end
YP = YD';
T = T(1:length(T) - D + 1);
plot(T,YP,'-'); % vykreslení přechodové charakteristiky bez dopravního zpoždění
grid on
title('Prechodova charakteristika bez dopravního zpozdění'); xlabel('t [s]'); ylabel('h(t)');
pause
% získání přenosu
vys = fminsearch( 'krit_up', [0.01, 0.01], OPTIMSET('ToIX', 1e-6) ) % kritérium min. součtu
                                % [0.01, 0.01] - vektor počátečních parametrů
                                % OPTIMSET - vektor optimalizačních parametrů

b0 = vys(1);
a1 = vys(2);
Ye = step( b0, [a1 1 0], T ); % výpočet bodů přechodové charakteristiky získaného přenosu
plot(T,Ye,'-', T, YP); % porovnání původní a získané přechodové char
grid on
title('Porovnani zmerene a spocitane prechodove charakteristiky');
xlabel('t [s]'); ylabel('h(t)'); legend('Spocitana','Zmerena');

```

Volaná funkce **krit_up**:

```

function out = krit_up(X)
global YP T; % načtení globálních proměnných
e = YP - step( X(1), [X(2) 1 0], T ); % rozdíl změřené a hledané přechodové char
out = sum( e.*e );

```

Jádrem programu je funkce **fminsearch** (do verze MATLAB 6.0 **fmins**), která podle počátečních a optimalizačních parametrů aplikuje regresní metodu a minimalizuje součet kvadrátu odchylek. Výpočet se opakuje tak dlouho, dokud není dosaženo shody odpovídající zadaným parametrům. Výsledkem jsou pak parametry K_p a T hledaného přenosu. Dopravní zpoždění T_d určíme přímo z získaných dat. Pro samotný výpočet se musejí použít data bez dopravního zpoždění.

Součástí programu je i *algoritmus lineárního diskrétního filtru 1. řádu* odstraňují šumy ze signálu [5]

$$y_f(kT) = (1-a)y_f[(k-1)T] + ay(kT), \quad (5.3)$$

kde y_f je filtrovaná výstupní veličina v diskrétním časovém okamžiku kT ,

y je výstupní veličina v diskrétním časovém okamžiku kT ,

a je koeficient filtarce, $0 < a \leq 1$.

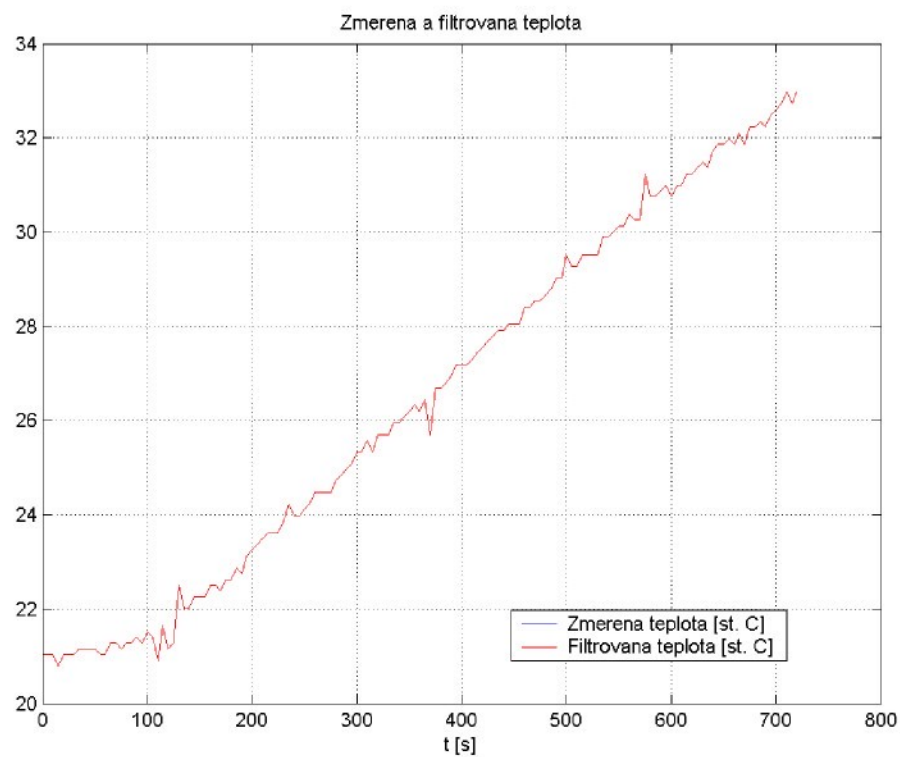
Při nastavení hodnoty koeficientu $a = 1$ se filtr vypne.

5.5 Analýza získaných dat

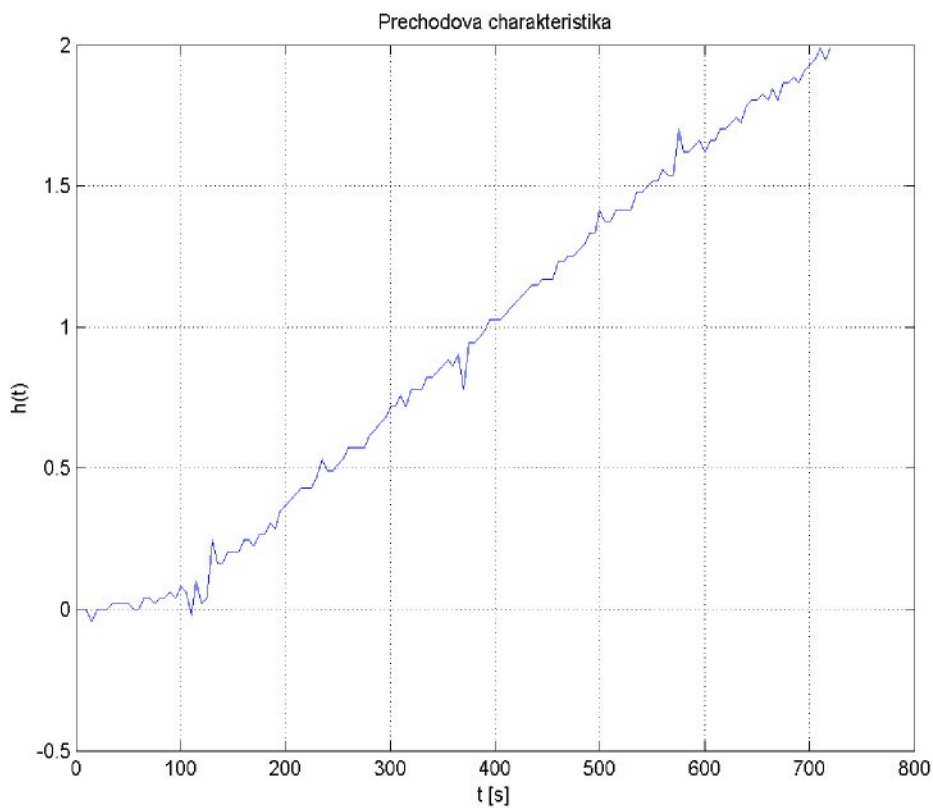
K tomu, abychom správně určili přenos soustavy je potřeba udělat několik identifikačních měření pro různý skok vstupní veličiny, kterým je velikost otevření regulačního ventilu. Vlastní identifikace pak byla provedena pro otevření ventilu na 60%. Data byla zpracována bez nutnosti použití filtru ($a = 1$).

Odezva soustavy na otevření ventilu na 60% je na obr. 5.4. Z grafu je patrné dopravní zpoždění a především integrační charakter soustavy. Jelikož data nejsou filtrována, křivka změřené a filtrované teploty se překrývá.

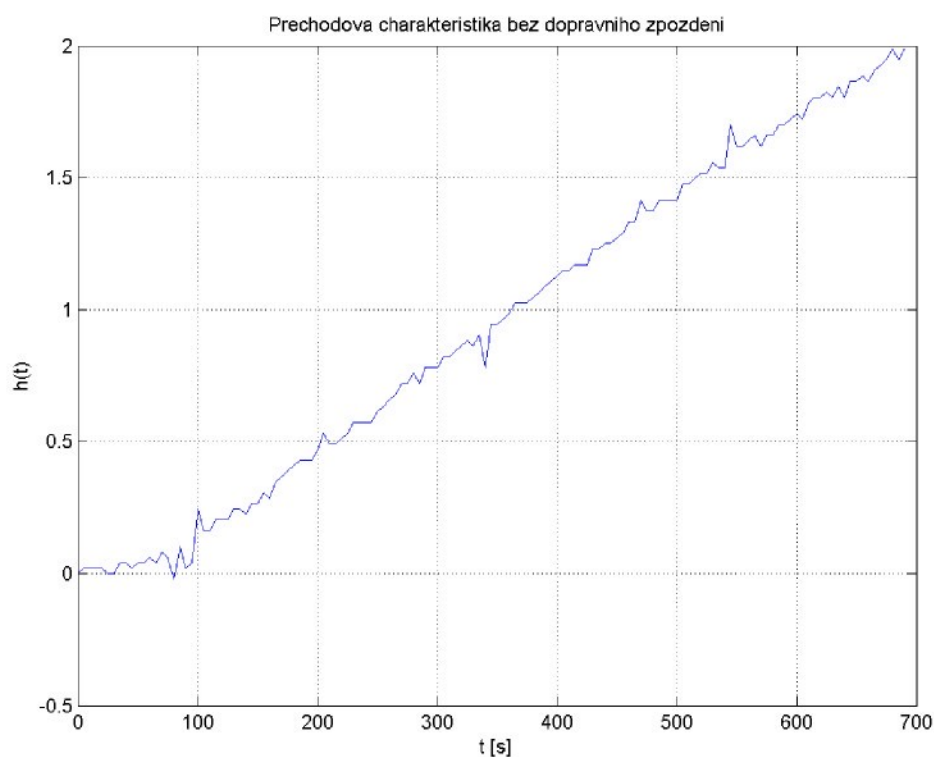
Ze změřených (nebo případně i filtrovaných) dat pak získáme přechodovou charakteristiku, která je na obr. 5.5. Pro zpracování dat funkcí *fminsearch* v MATLABu je potřeba z těchto dat vyloučit hodnoty, jenž byly zaznamenány během doby odpovídající dopravnímu zpoždění. Takto upravená přechodová charakteristika je na obr. 5.6.



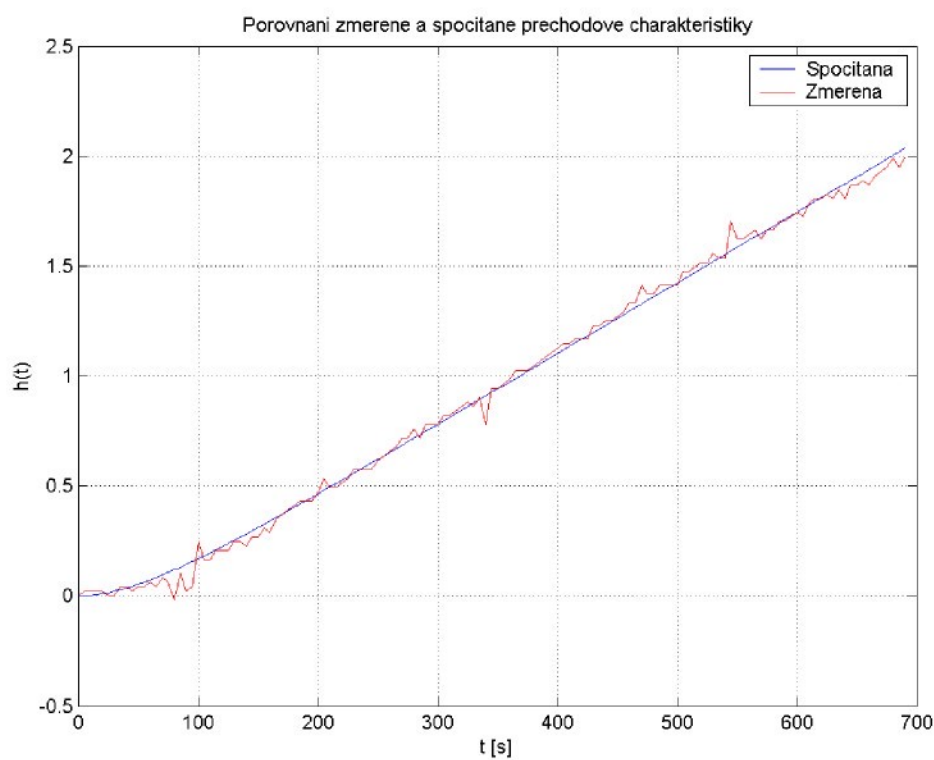
Obr. 5.4 - Odezva soustavy na otevření regulačního ventilu



Obr. 5.5 - Přechodová charakteristika



Obr. 5.6 - Přebodová charakteristika bez dopravního zpoždění



Obr. 5.7 - Porovnání změřené a spočítané přechodové charakteristiky

Přechodová charakteristika odpovídající zjištěnému přenosu je na obr. 5.7 porovnána s přechodovou charakteristikou získanou ze změřených dat.

Jelikož se křivky přibližně překrývají, můžeme brát identifikaci programem jako úspěšnou. Výsledek jsou parametry přenosu soustavy, v programu označené jako b_0 a a_1 . Hodnota b_0 je v souladu se vzorcem (5.2) zesílení procesu K_p , a_1 pak časová konstanta T . Dopravní zpoždění T_d bylo nutno určit už pro potřeby zpracování.

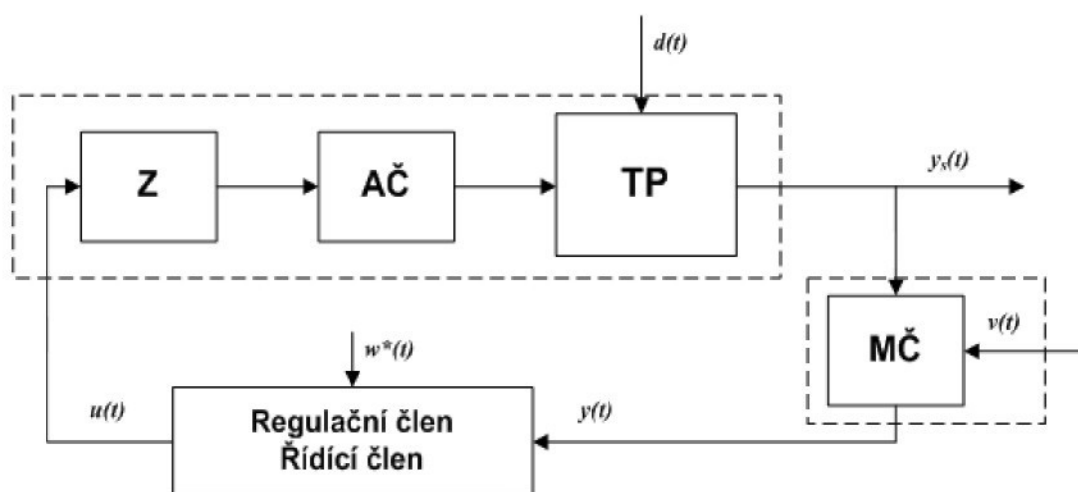
Výsledný obrazový přenos dle (5.2) je

$$G(s) = \frac{0,0032}{s(57,84s + 1)} e^{-30s}. \quad (5.4)$$

6 Regulace soustavy

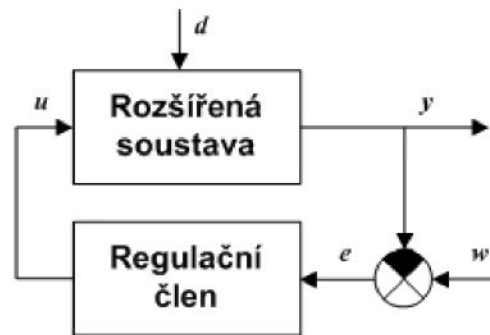
6.1 Regulační obvod

Regulační obvod je zpravidla tvořen několika základními prvky. Mezi ně počítáme zesilovače a převodníky **Z**, akční člen **AČ**, vlastní technologie **TP** a měřící člen **MČ** (obr. 6.1). Měřící členy obsahují senzory nebo čidla a převodníky. Výstupem z *regulátoru-řídícího systému* je akční veličina $u(t)$. Vstupem do *regulátoru* je měřená veličina $y(t)$ a řídicí veličina $w^*(t)$. Z řídicí veličiny se určuje okamžitá hodnota *žádané hodnoty* $w(t)$ a následně pak *regulační odchylka* $e(t) = w(t) - y(t)$. Na řízený proces **TP** působí *neměřená poruchová veličina* $d(t)$. Výstupem je *výstupní veličina* $y_s(t)$ měřená pomocí měřícího členu **MČ**. Výstupní signál z měřícího členu $y(t)$ je zaveden jako *vstup* do *řídícího systému - regulátoru*. Během měření může vznikat v měřících členech parazitní šumový signál $v(t)$.



Obr. 6.1 – Bloková struktura regulačního obvodu

Pro modelování je možné použít zjednodušeného modelu regulačního obvodu, který je na obr. 6.2. Zjednodušení spočívá v práci modelu s *rozšířenou soustavou*. Rozšířená soustava pak zahrnuje zesilovače a převodníky, akční člen, vlastní technologii a měřící členy. Vstupem je akční veličina $u(t)$ a výstupem měřená *regulovaná (výstupní) veličina* $y(t)$. [4]



Obr. 6.2 – Zjednodušený model regulačního obvodu

6.2 PID regulátor

Velice často používaným regulátorem je regulátor typu PID (proporcionálně integračně derivační regulátor), jehož vstupem je regulační odchylka $e(t)$ a výstup tvoří vážený součet z regulační odchylky, jejího integrálu a derivace. Výstup v čase je poté roven [3]

$$u(t) = K_R \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (6.1)$$

kde K_R je proporcionální zesílení všech složek procesu,

T_I je integrační časová konstanta,

T_D je derivační časová konstanta.

Obrazový přenos regulátoru lze vyjádřit ve tvaru

$$R(s) = K_R \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] = r_0 + \frac{r_1}{s} + r_2 s, \quad (6.2)$$

kde $r_0 = K_R$ je proporcionální zesílení,

$r_1 = \frac{K_R}{T_I}$ je proporcionální zesílení integrační složky,

$r_2 = K_R T_D$ je proporcionální zesílení derivační složky.

Jelikož je ale regulátor realizován aplikací běžící na počítači, je nutné přejít od spojitého k diskrétnímu popisu regulátoru. Přejít uskutečníme diskretizací integrační

složky a derivační složky regulátoru z rovnice (6.1) pro diskrétní časové okamžiky $t = kT$ (pro $k = 0, 1, 2, \dots$) a kde T je perioda vzorkování. Perioda vzorkování se volí co nejmenší, aby bylo dosaženo dobré shody mezi spojitým a diskretizovaným signálem.

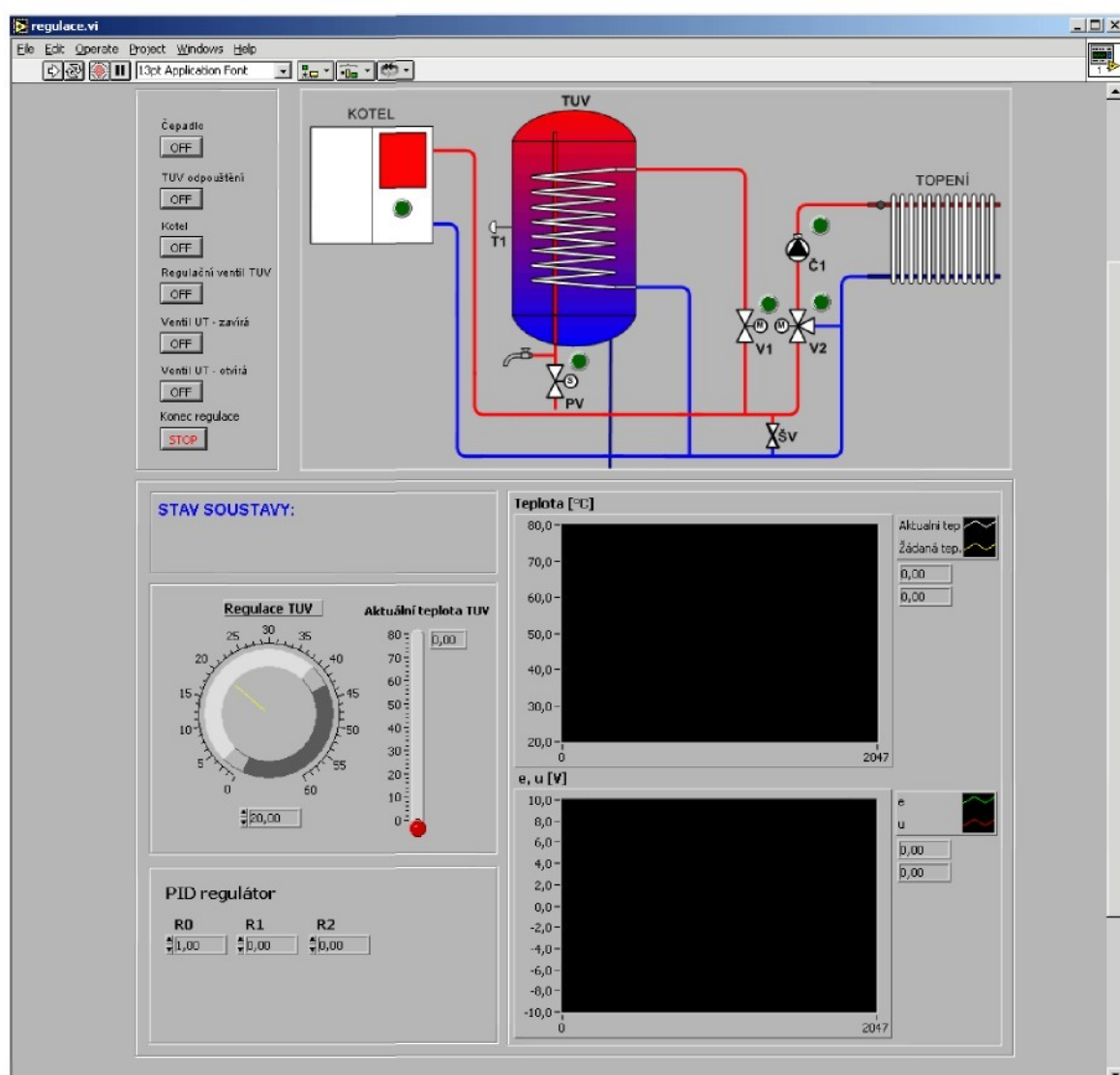
Diskrétní náhradou integrační složky je použití obdélníkové metody numerické integrace, derivační složku nahradíme zpětnou diferencí 1.řádu. PSD (proporcionálně sumačně diferenční) regulátor je tak vyjádřen ve tvaru [5]

$$u(kT) = K_R \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(iT) + T_D \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \right\}. \quad (6.3)$$

6.3 Program *regulace.vi*

V programu *regulace.vi*, který je určen k regulaci soustavy, je nastavena perioda vzorkování $T = 0,05s$. S přihlédnutím k dynamice celé soustavy a velikosti nastavené periody vzorkování je možné přistupovat k regulaci systému jako ke spojitě regulaci. Proto i nadále bude v textu pro regulátor používáno označení PID místo formálně správného označení PSD.

Čelní panel hlavní aplikace je rozdělen do několika logických celků. Celkové rozložení je na obrázku 6.3. Zdrojový kód je v Příloze 3.



Obr. 6.3 – Čelní panel aplikace *regulace.vi*

V levé horní části (detail – obr. 6.4) čelního panelu se nacházejí ovládací tlačítka

celé regulované soustavy. Součástí jsou také tlačítka ovládající část soustavy, regulaci které se nezabývá tato diplomová práce. Na panelu jsou umístěna z důvodu možnosti pozdějšího rozšíření aplikace o ovládání čerpadla Č1 (obr. 2.2) a třicestného ventilu V2 (obr. 2.2) části soustavy s radiátorem.



Obr. 6.4 – Ovládací tlačítka

Čerpadlo – zapíná a vypíná čerpadlo, neaktivní.

TUV odpouštění – umožňuje rychlé vypuštění TUV z bojleru.

Kotel – zapíná a vypíná kotel.

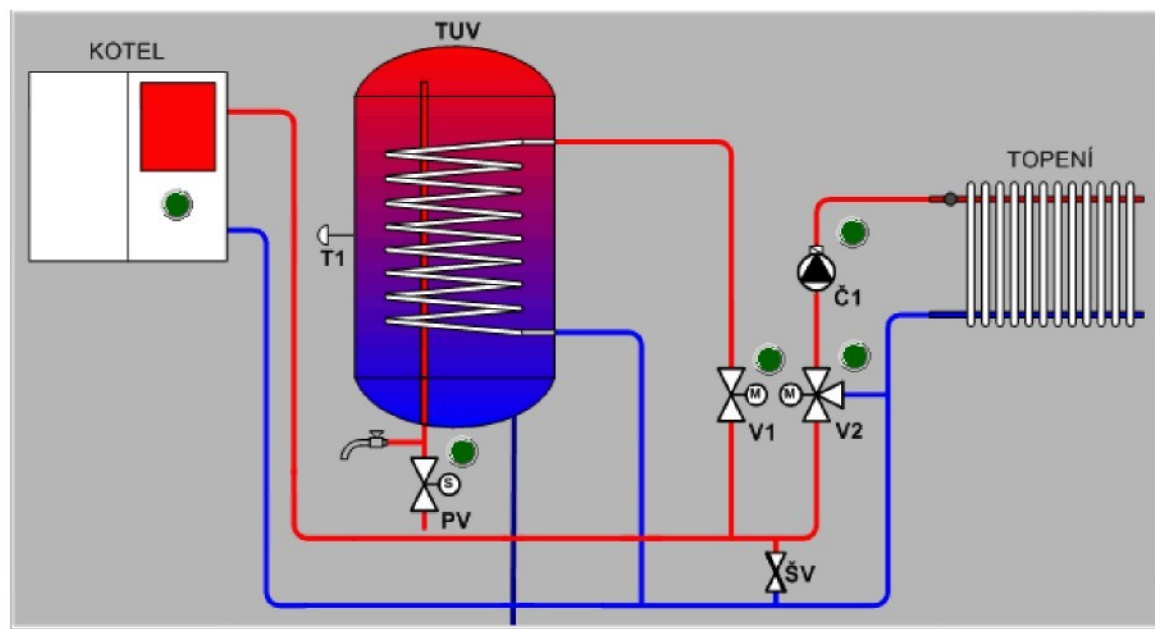
Regulační ventil TUV – zapíná a vypíná regulační ventil.

Ventil UT – zavírá – zavře ventil v okruhu radiátoru, neaktivní.

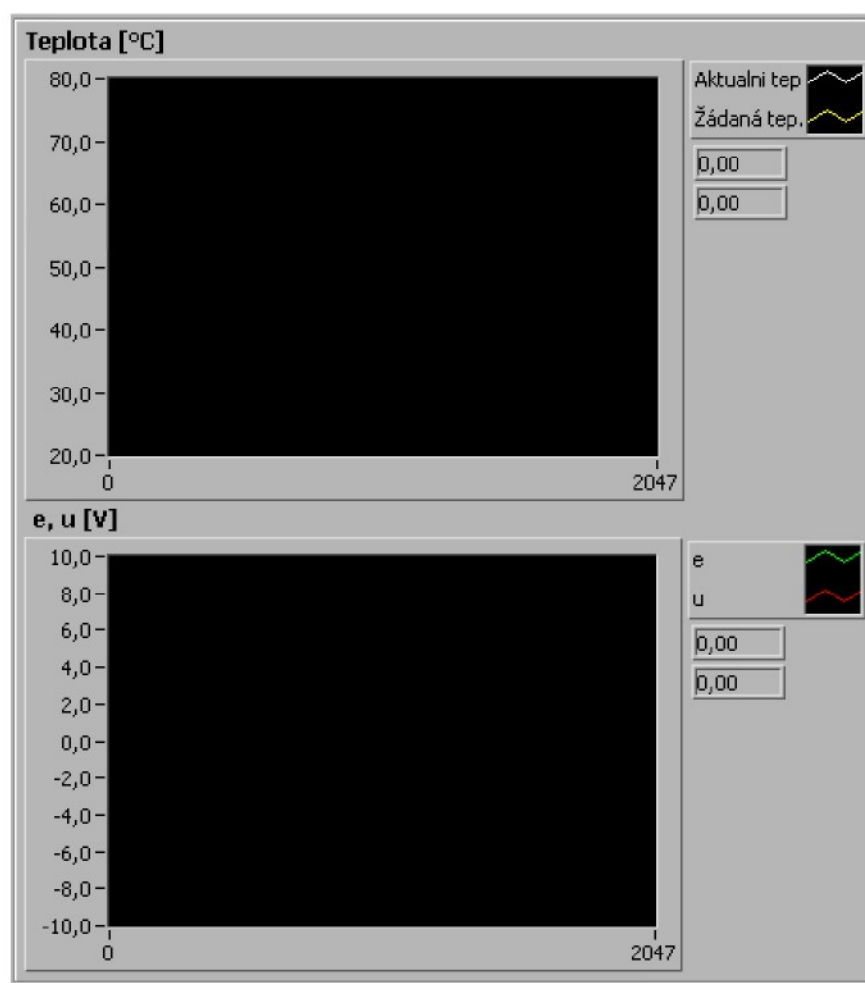
Ventil UT – otevírá – otevře ventil v okruhu radiátoru, neaktivní.

Konec regulace – ukončí aplikaci *regulace.vi*.

V pravé horní části (detail – obr. 6.5) je schématicky zobrazená celá soustava. Na schématu jsou umístěny indikátory (LED), které svým rozsvícením signalizují činnost jednotlivých zařízení.

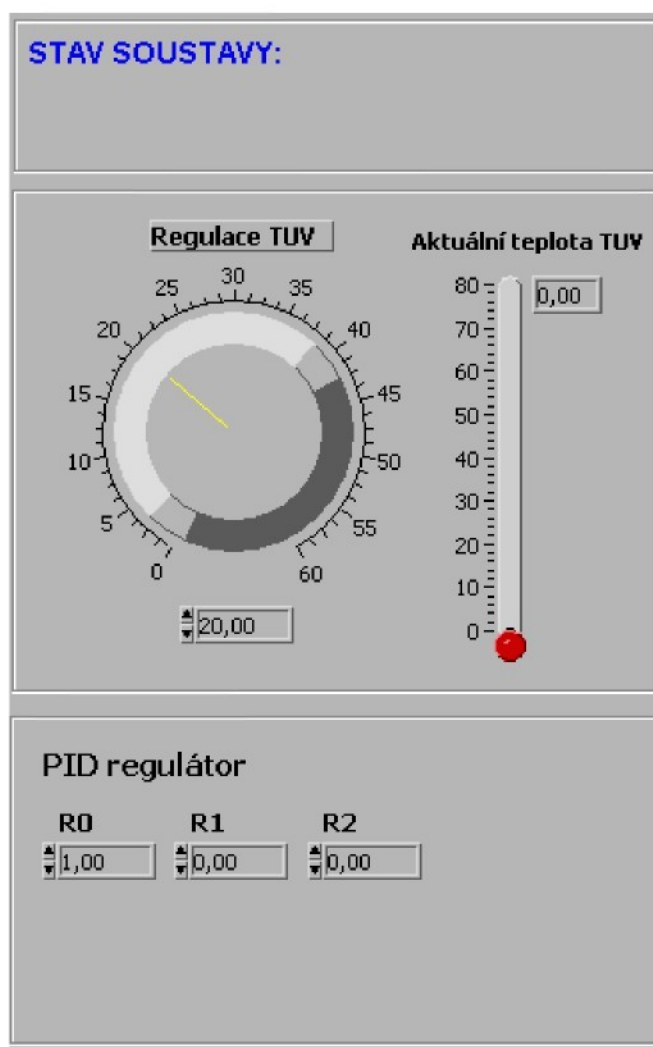


Obr. 6.5 – Schématické zobrazení soustavy s indikátory činnosti jednotlivých zařízení



Obr. 6.6 – Grafy na čelním panelu

Ve spodní pravé části čelního panelu (detail – obr. 6.6) jsou umístěny dva grafy. Na prvním grafu se zobrazují dvě hodnoty teploty. První je žádaná hodnota teploty, které chceme v bojleru s TUV dosáhnout regulací. Druhá zobrazovaná teplota je aktuální teplota TUV v bojleru. Na druhém grafu se zobrazuje velikost akční veličiny u a regulační odchylka e . Regulační ventil je plně otevřen při hodnotě akční veličiny $u = 10V$ a uzavřen při $u = 0V$.



Obr. 6.7 – Indikátor a ovladače

Na poslední části, umístěné vlevo dole na čelním panelu (detail – obr. 6.7), se zadává hodnota žádané teploty teplé užitkové vody v bojleru. Vedle ovladače pro zadávání je indikátor aktuální teploty TUV graficky reprezentovaný teploměrem. Pod těmito prvky je prostor pro zadání proporcionálního zesílení r_0 , proporcionálního zesílení integrační složky r_1 a proporcionálního zesílení derivační složky r_2 . Významným prvkem je indikátor **STAV SOUSTAVY**, který zobrazuje, stejně jako u programu *identifikace.vi*,

aktuální stav soustavy. Běh programu *regulace.vi* je také sekvenční.

Stavy soustavy při řízení programem regulace.vi:

- **INICIALIZACE** – první fáze běhu aplikace popsána sekvencemi č. 0 až 3 (viz. Příloha 3). Průběh je totožný s programem *identifikace.vi* při uplatnění samoadaptivní funkce pohonu regulačního ventilu.
- **REGULACE** – hlavní část programu, při níž je možné provádět samotnou regulaci soustavy. Zdrojový kód je v sekvenci č. 4 nacházející se v Příloze č. 3. Výpočet akční veličiny u zajišťuje *subVI PSDWI.vi*, ve zdrojovém kódu blok **PSD**, vytvořená pro účely regulace Ing. Michalem Moučkou, Ph.D. Na začátku této fáze je vyžadováno jméno a cesta k souborům, kam se uloží data po spuštění regulace. Data (čas, teplota teplé užitkové vody, regulační odchylka a akční veličina) jsou ukládána v intervalu 5 sekund. Na čelním panelu se zadá žádaná hodnota teploty TUV a parametry regulátoru určené výpočtem. Metoda výpočtu záleží na volbě uživatele. Regulace samotná se spustí po zapnutí regulačního ventilu V1 (obr. 2.2). Na grafech lze sledovat vývoj teploty teplé užitkové vody v bojleru vůči žádané hodnotě teploty T_w a velikost regulační odchylky e a hodnotu akční veličiny u v průběhu procesu. Parametry regulátoru, stejně tak jako žádanou hodnotu teploty TUV, lze měnit kdykoliv v průběhu regulace. Regulace se ukončí vypnutím regulačního ventilu V1 (obr. 2.2). Tlačítkem *Konec regulace* se pak přejde z fáze regulace do fáze seběhu soustavy.
- **SEBĚH** – poslední fáze běhu programu. Její průběh je stejně jako u inicializace stejný s průběhem seběhu programu *identifikace.vi*. Ve zdrojovém kódu sekvence č. 5 až 7 (viz. Příloha 3).

6.4 Parametry regulátoru a průběh regulace

Z dat získanými programem *identifikace.vi* byl spočítán přenos soustavy

$$G(s) = \frac{0,0032}{s(57,84s+1)} e^{-30s} \quad (6.4)$$

Pro ověření funkčnosti programu *regulace.vi* byl zvolen PI regulátor. Další vhodný regulátor integrační soustavy, PID regulátor, nelze v tomto případě použít, protože výstupní signál je zasumělý a D složka by jen šum zesilovala. P a PD regulátory jsou

vyloučeny, jelikož neodstraní trvalou regulační odchylku, která může vzniknout v regulačním obvodu. [6]

K určení parametrů regulátoru pro tříparametrový integrační model z rovnice (6.4) použijeme pravidlo [6]

$$K_R = \frac{0,41}{K_p(T_d + T)} e^{-0,23\tau + 0,0019\tau^2}, \quad (6.5)$$

$$T_I = 5,7(T_d + T) e^{1,7\tau - 0,69\tau^2}, \quad (6.6)$$

$$\tau = \frac{T_d}{T_d + T}, \quad (6.7)$$

kde τ je relativní dopravní zpoždění.

Pro soustavu danou přenosem (6.4) a s využitím vztahů (6.5), (6.6) a (6.7) dostaneme

$$K_R = 1,3,$$

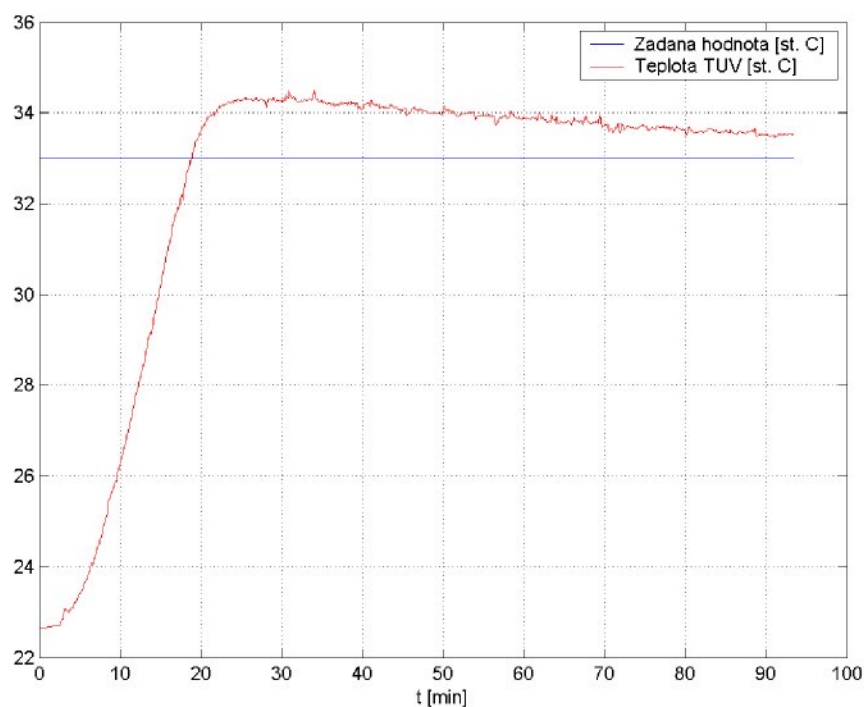
$$T_I = 825,6.$$

Přepočtem podle (6.2) je pak

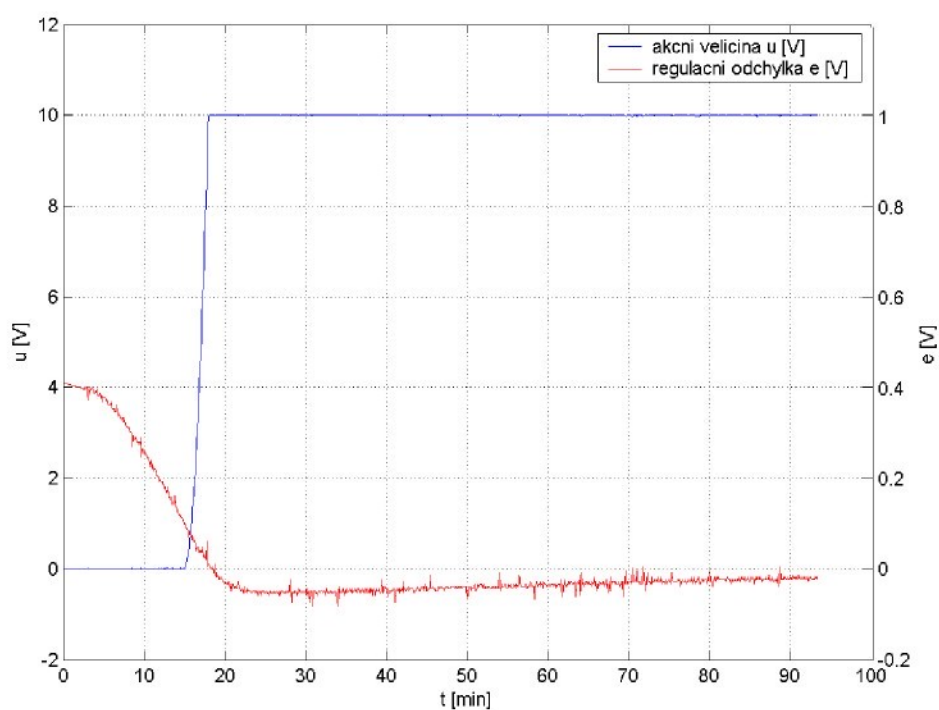
$$r_0 = 1,3,$$

$$r_1 = 0,0016.$$

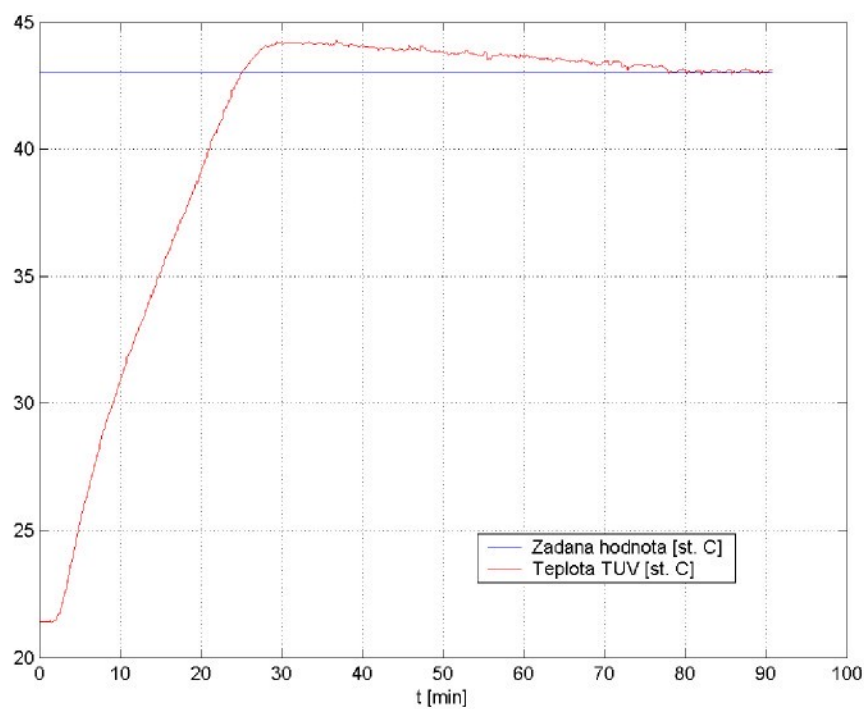
S vypočítanými parametry byla odzkoušena funkčnost navržené aplikace. Regulační pochod pro žádanou hodnotu teploty $T_w = 33^\circ\text{C}$ je na obr. 6.8, na obr. 6.9 je průběh regulační odchylky e a akční veličiny u . Obdobně pro žádanou hodnotu $T_w = 43^\circ\text{C}$ je regulační pochod na obr. 6.10 a na obr. 6.11 je průběh e a u . Z grafů je patrné, že teplota TUV v bojleru stoupala ještě nějaký čas po uzavření regulačního ventilu a překročila vlivem setrvačnosti žádanou hodnotu regulované soustavy. Po krátké době se růst zastaví a dochází k ustálování teploty TUV v bojleru a jejímu poklesu zpět k žádané hodnotě. Teplota se ustálí až po dokonalém promísení TUV, což trvá více než hodinu.



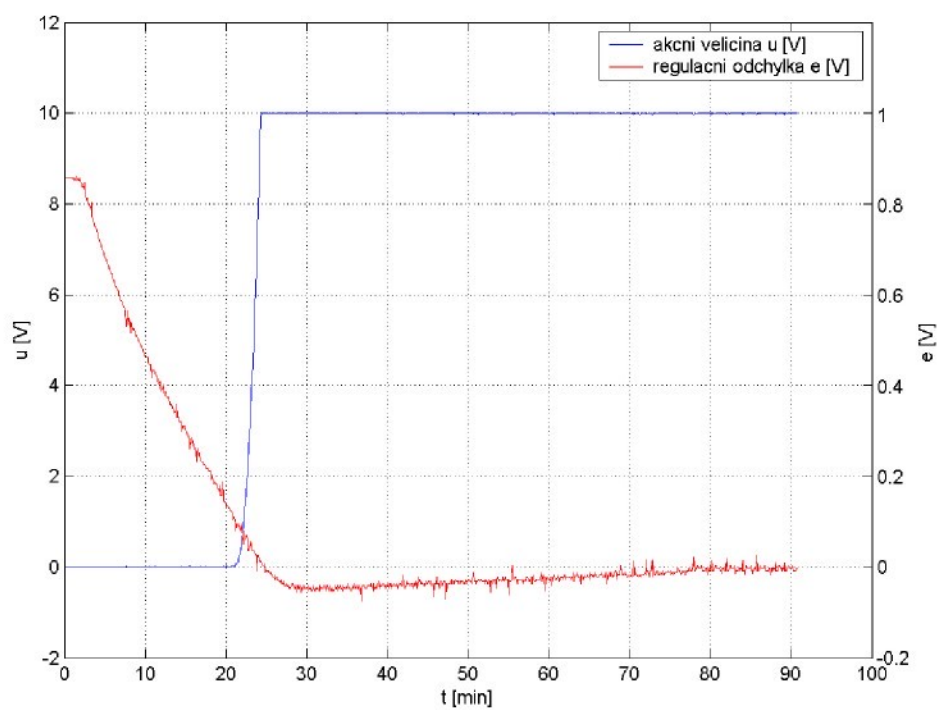
Obr. 6.8 - Regulační pochod pro $T_w = 33^\circ\text{C}$



Obr. 6.9 – Průběh akční veličiny a regulační odchylky pro $T_w = 33^\circ\text{C}$



Obr. 6.10 - Regulační pochod pro $T_w = 43^\circ\text{C}$



Obr. 6.11 - Průběh akční veličiny a regulační odchylky $T_w = 43^\circ\text{C}$

7 Závěr

Zadání práce, navrhnout a realizovat desktopovou aplikaci pro spojitou regulaci ohřevu TUV v bojleru, bylo přirozeně rozděleno do dvou samostatných úkolů.

Jedním je identifikace soustavy použité pro ohřev TUV. Účelům identifikace slouží program *identifikace.vi* a pomocný program *odpousteni.vi*. První z nich slouží k získání dat potřebných k vyjádření matematickému modelu regulované soustavy. Při ověření funkce programu a po vyhodnocení změřených dat bylo zjištěno, že se jedná o soustavu integragrační, s dopravním zpožděním a velkou setrvačností. Tyto skutečnosti, především pak setrvačnost, výrazně ztěžují samotný proces regulace.

Regulace soustavy je řízena programem *regulace.vi*. Program pracuje s diskrétním PSD regulátorem, na který je ale možné nahlížet jako spojitý PID regulátor. K tomuto závěru lze dojít při vzájemném posouzení dynamiky soustavy a nastavené periody vzorkování. Perioda vzorkování je 50ms, kdežto odezvy na změnu vstupní veličiny je v řádu desítek minut. Je nutné také počítat s dopravním zpožděním, které se pohybuje okolo jedné minuty. Velikost závisí na vnitřím stavu soustavy, především pak na teplotě vody v potrubním vedení, která je odvislá z doby od posledního ohřevu TUV. Setrvačnost se projevuje tak, že i v čase po skončení akčního zásahu a tedy úplném uzavření regulačního ventilu stále ještě několik minut roste teplota TUV. Příčinou je teplá voda, která zůstane v potrubí ohřívající TUV v bojleru. Po nějaké době ale začne teplota klesat. Pokles způsobuje promísení vody v bojleru a vyrovnání teploty TUV v celém objemu. Z expedimentální zkušenosti lze říci, že se nakonec teplota ustálí na požadované hodnotě. Čas nutný k ustálení je více než jedna hodina.

Zkvalitnění regulace soustavy by bylo možné provést dvěma způsoby. První možností je zajistit aktivním prvkem promíchávání vody v bojleru. Druhé řešení vychází ze skutečnosti, že se soustava neochladí při zmenšení akčního zásahu. Ochlazení lze řešit odpouštěním TUV z bojleru. U obou návrhů je ale nasnadě ekonomická stránka a účelnost při řešení ohřevu TUV pro domácnost. Ve druhém případě by se dalo dokonce mluvit o plýtvání energií a vodou.

Seznam zkratk a symbolů

a	koeficient filtrace
AČ	akční člen
e(t)	regulační odchylka
G(s)	přenos soustavy
I	proud [A]
K _p	zesílení procesu
K _R	proporcionální zesílení regulátoru
MČ	měřicí člen
PID	proporcionálně integračně derivační regulátor
PSD	proporcionálně sumačně diferenční regulátor
r	řád astatismu
r ₀	proporcionální zesílení
r ₁	proporcionální zesílení integrační složky
r ₂	proporcionální zesílení derivační složky
R	odpor [Ω]
R(s)	obrazový přenos regulátoru
subVI	podprogram virtual instruments
T	časová konstanta, perioda vzorkování [s]
T _d	dopravní zpoždění [s]
T _D	derivační časová konstanta [s]
T _I	integrační časová konstanta [s]
T _w	žádaná hodnota teploty [°C]
TP	technologická soustava
TUV	teplá užitková voda
u(t)	akční veličina
U	napětí [V]
UT	ústřední topení
v(t)	parazitní šumový signál
VI	virtual instruments
w(t)	žádaná hodnota

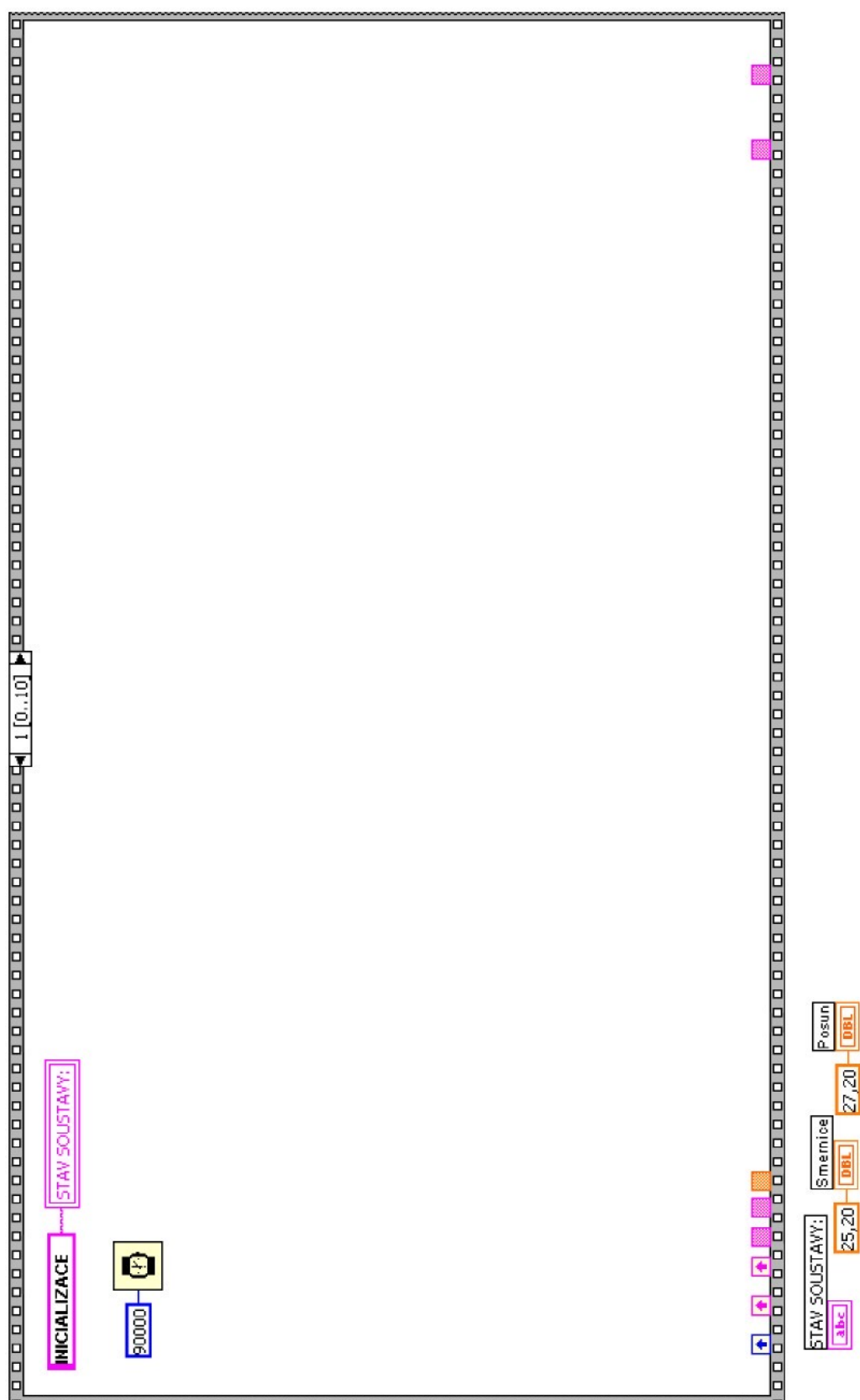
$w^*(t)$	řídící veličina
$y(t)$	regulovaná (výstupní) veličina
$y_s(t)$	výstupní veličina
y_f	filtrovaná výstupní veličina
Z	zesilovače a převodníky

Seznam literatury

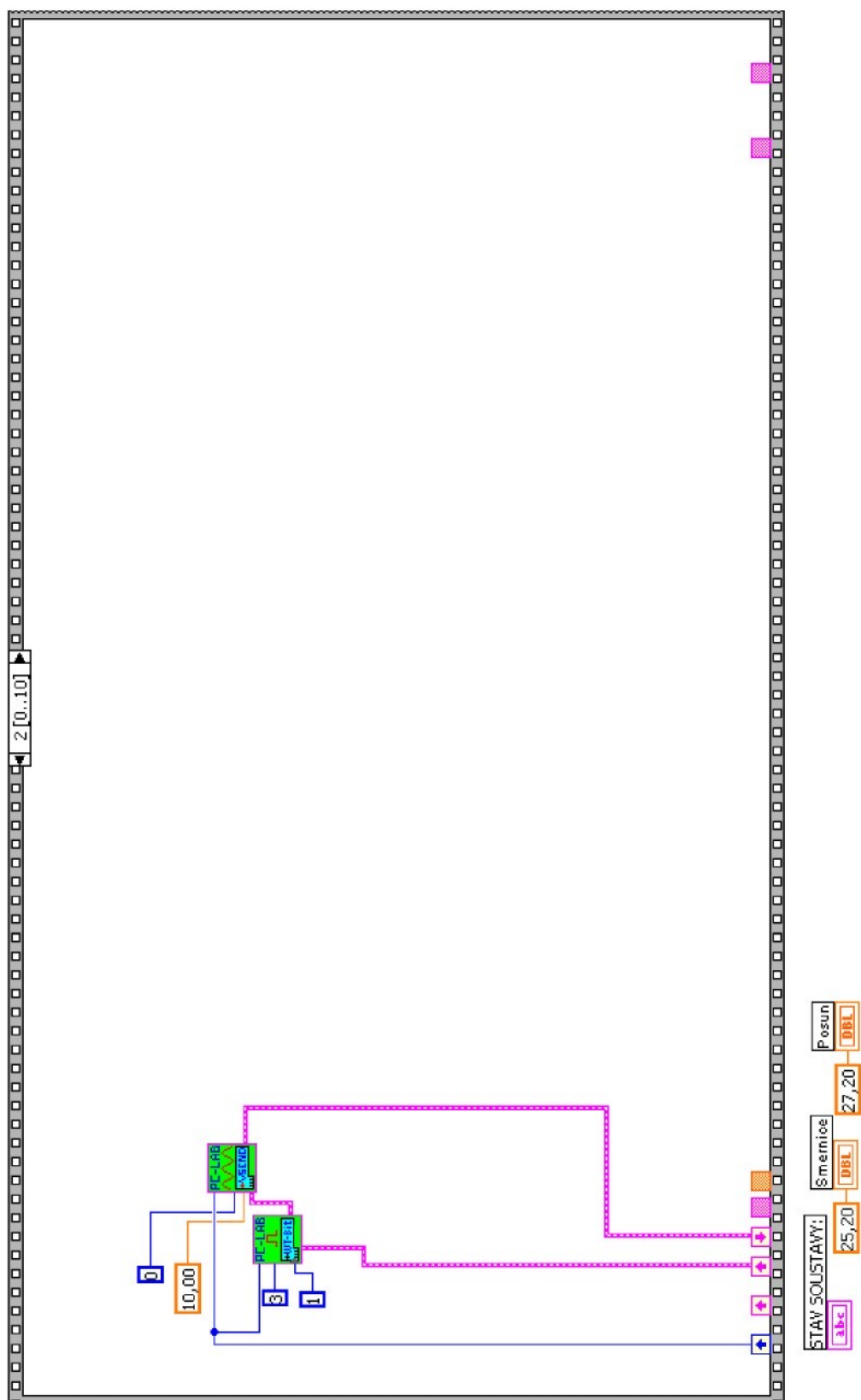
- [1] OLEHLA, M. - NĚMEČEK, S.: Základy aplikované kybernetiky. Liberec, TUL 2002
- [2] MODRLÁK, O.: Analýza dynamických systémů. Liberec, TUL 2004
- [3] MODRLÁK, O.: Syntéza regulačních obvodů. Liberec, TUL 2004
- [4] MODRLÁK, O.: Úvod do identifikace. Liberec, TUL 2004
- [5] BALÁTEŠ, J: Vybrané statě z automatického řízení. Brno, VUT 1996
- [6] KLÁN, P.: Moderní metody nastavení PID regulátoru. Část II – Integrační procesy. Časopis Automa 1/2001, FCC PUBLIC Praha
- [7] National Instruments: LabVIEW for Windows – Tutorial
- [8] Advantech: PCL – 812PG – User's manual
- [9] LDM: Technická dokumentace k ventilům COMARLINE
- [10] DAKON: Technická dokumentace k elektrickému kotli DAKON PTE-S M
- [11] TATRAMAT: Technická dokumentace k bojleru TATRAMAT OVK

Přílohy

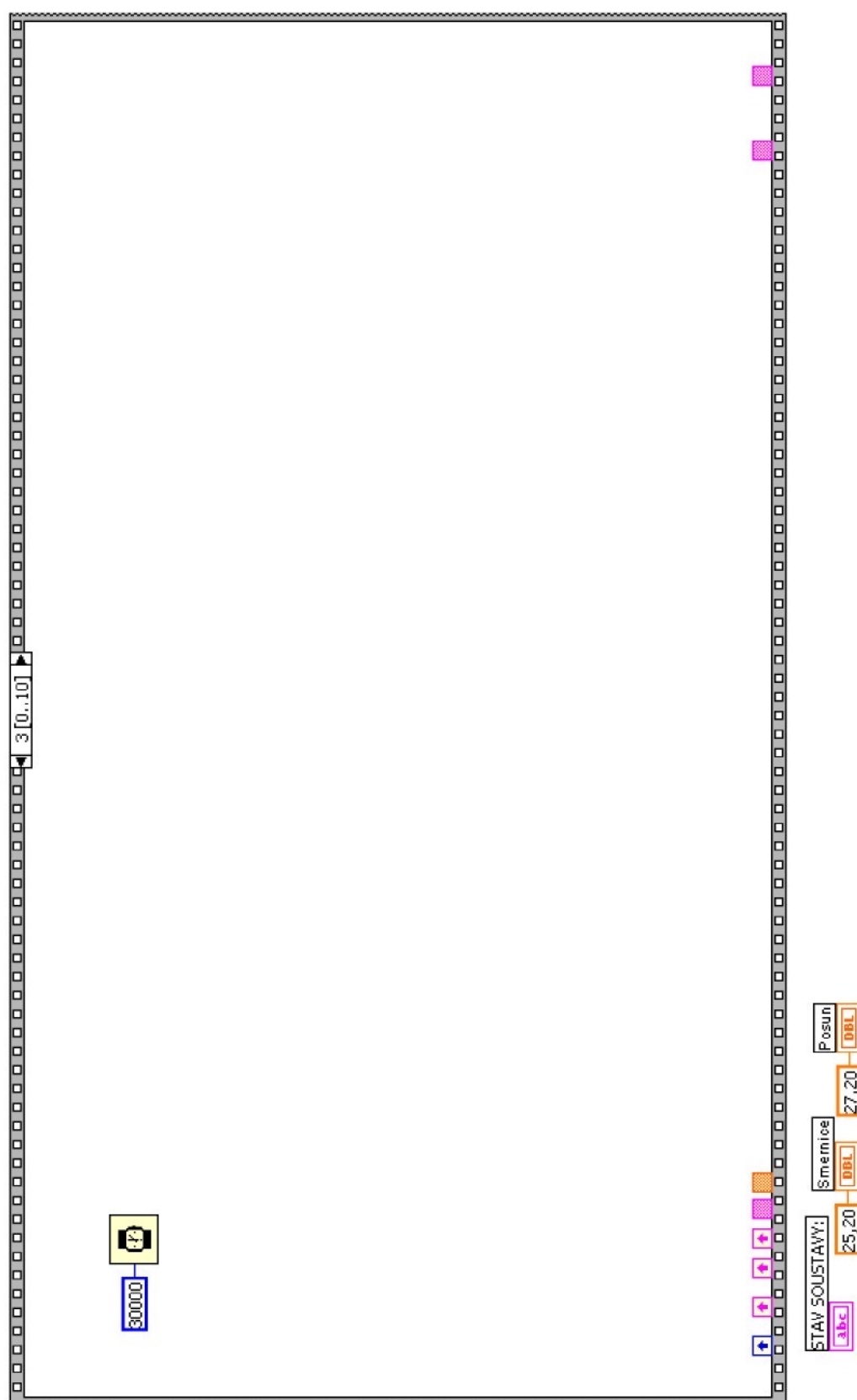
- PŘÍLOHA 1: Zdrojový kód programu *identifikace.vi*
- PŘÍLOHA 2: Zdrojový kód programu *odpousteni.vi*
- PŘÍLOHA 3: Zdrojový kód programu *regulace.vi*



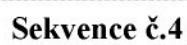
Sekvence č.1

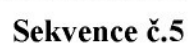


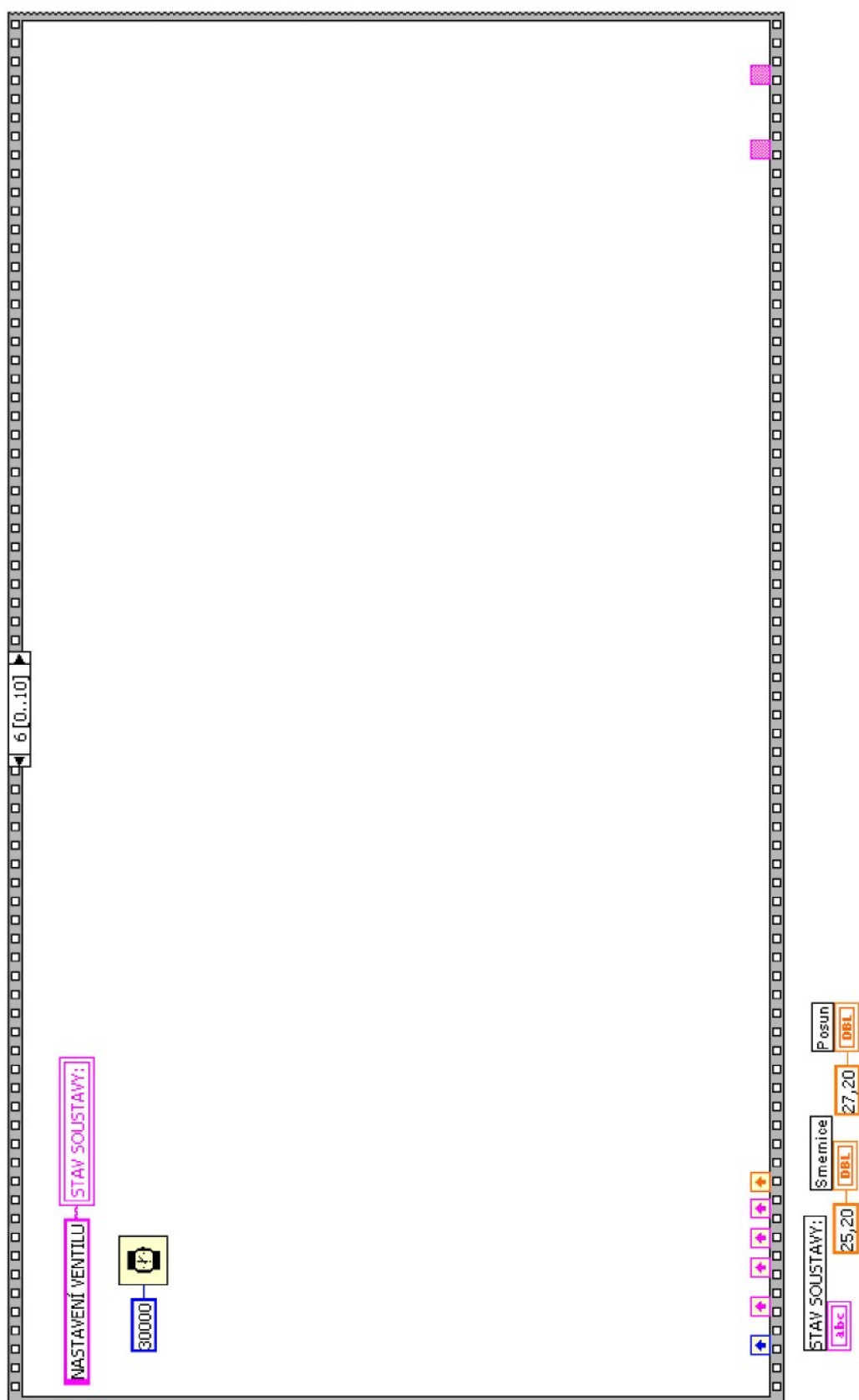
Sekvence č.2



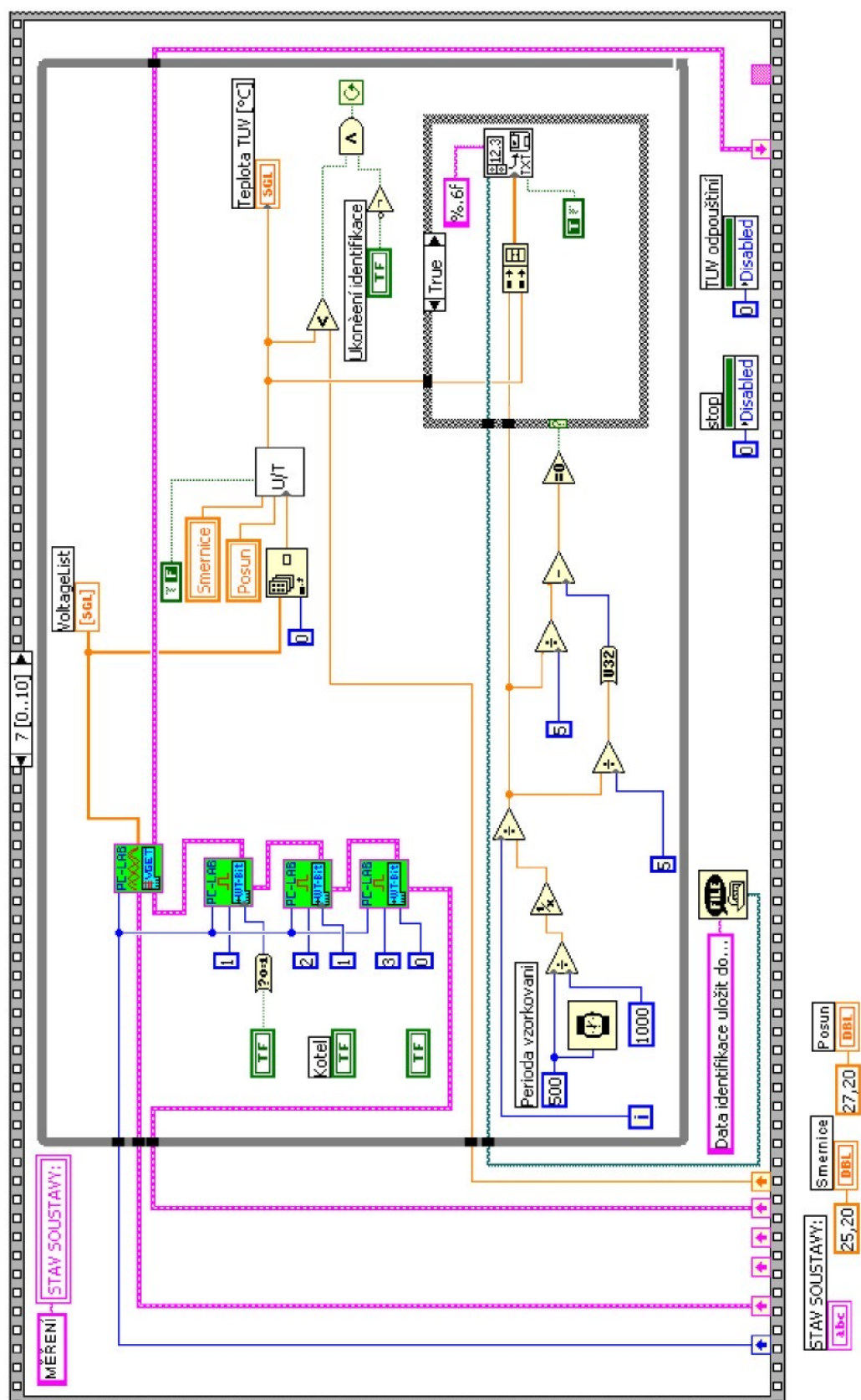
Sekvence č.3



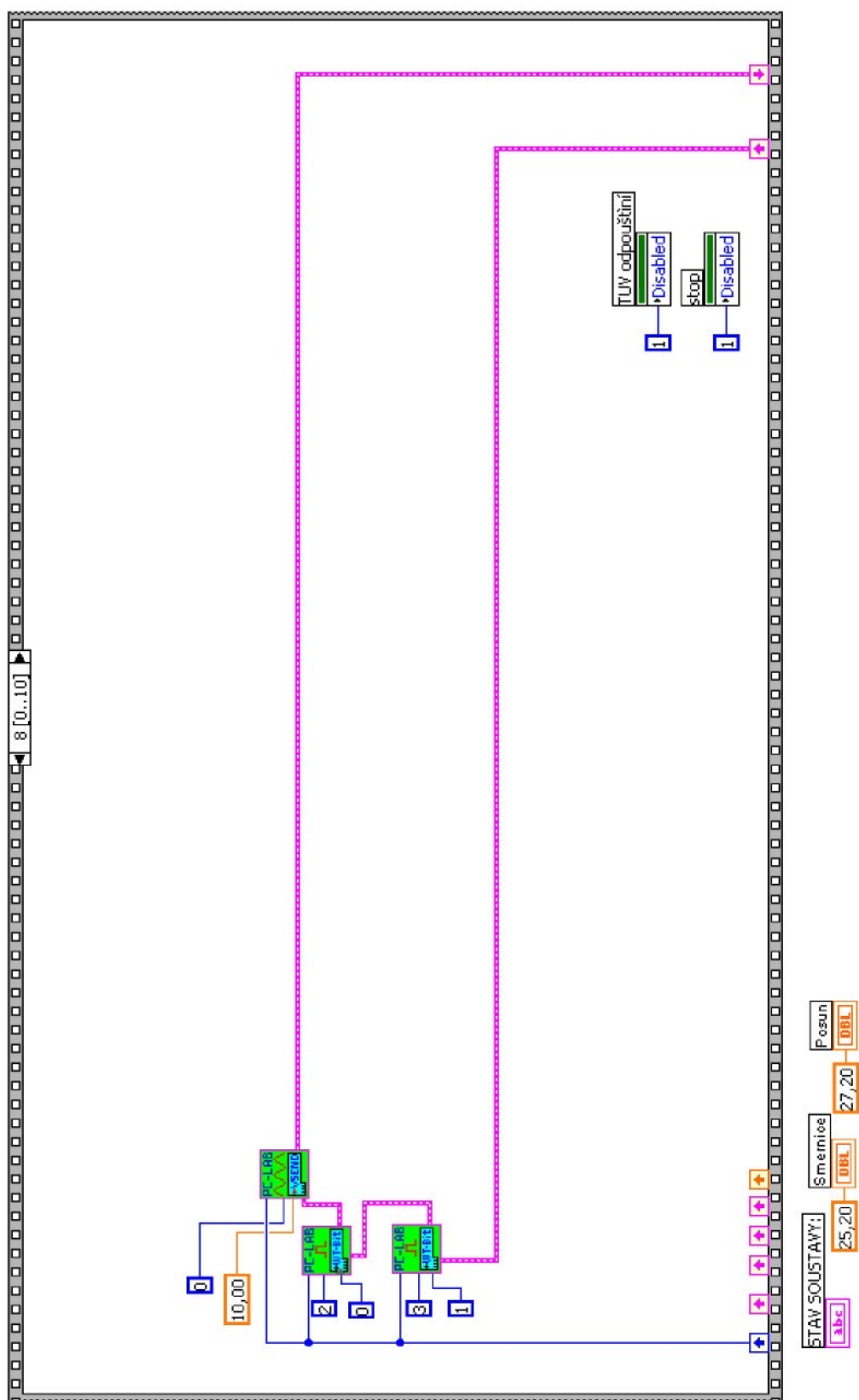




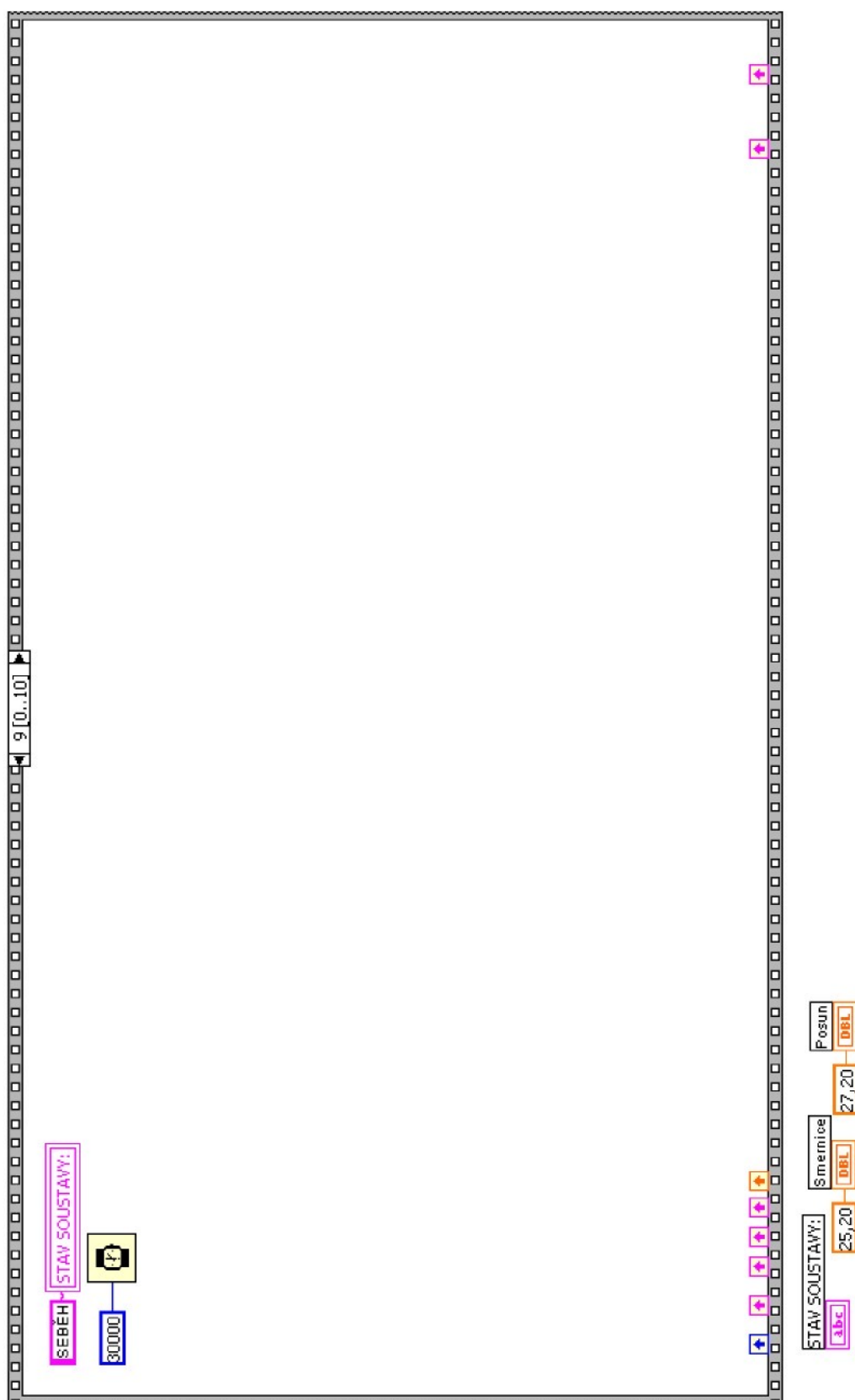
Sekvence č.6



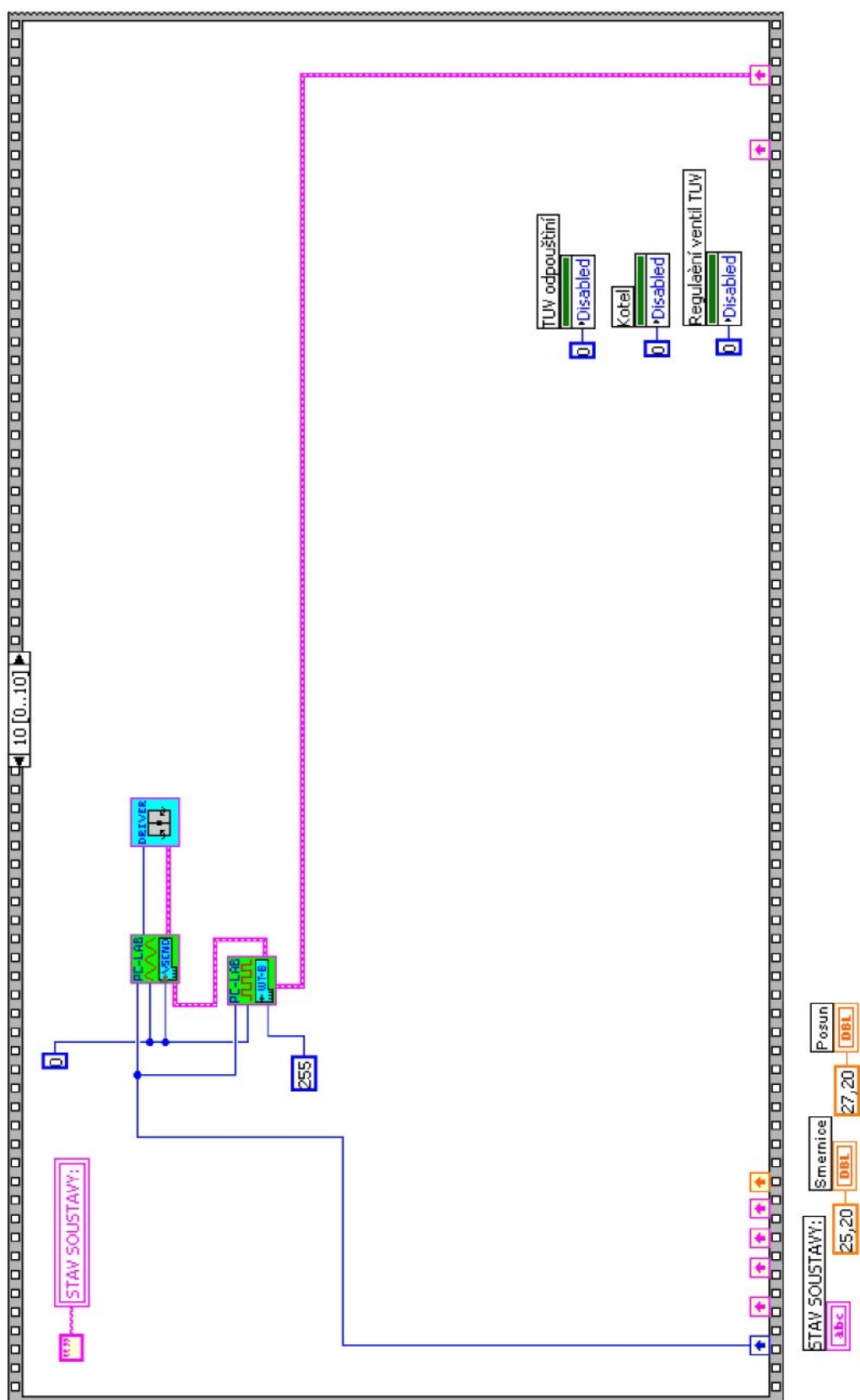
Sekvence č.7



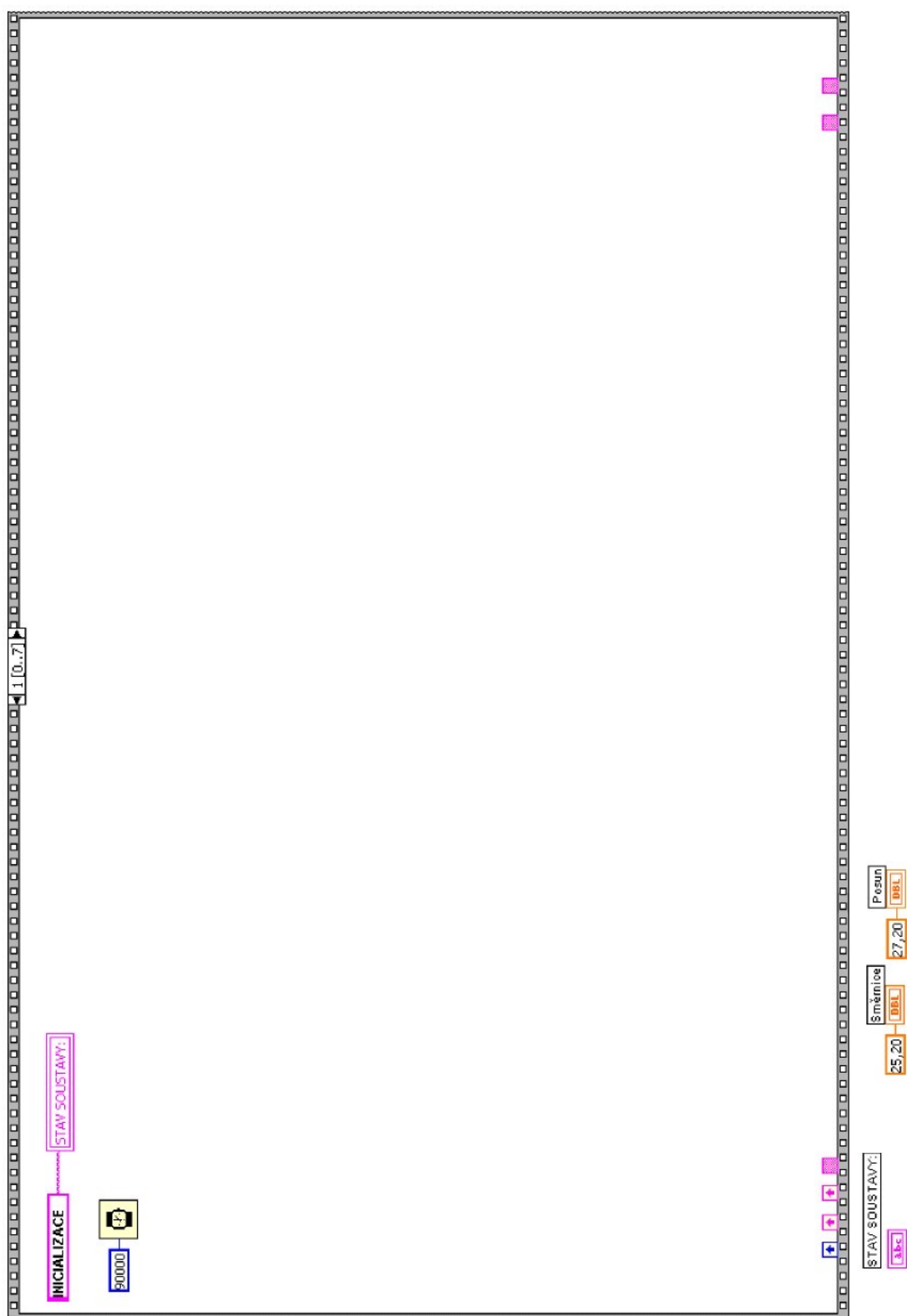
Sekvence č.8



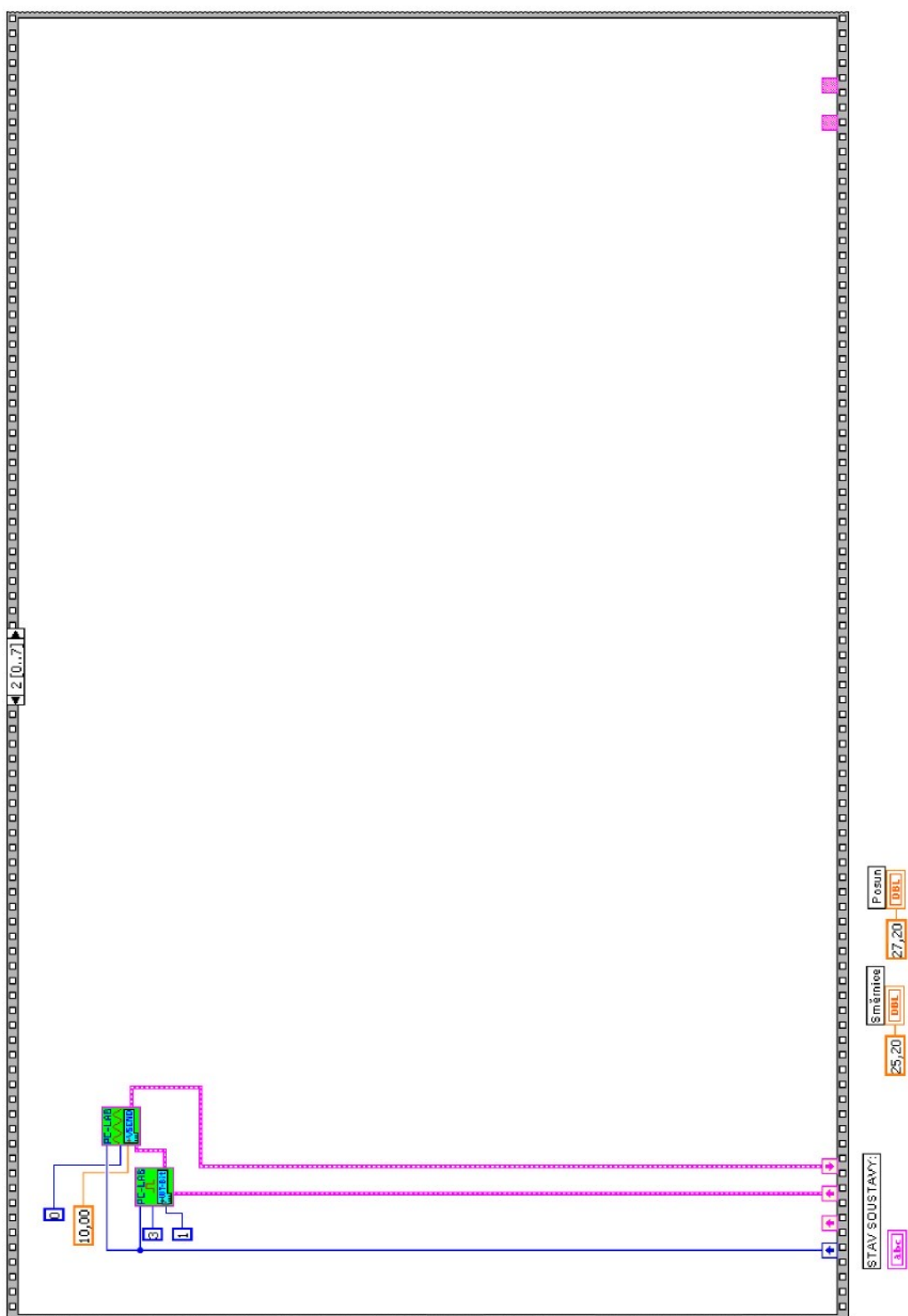
Sekvence č.9



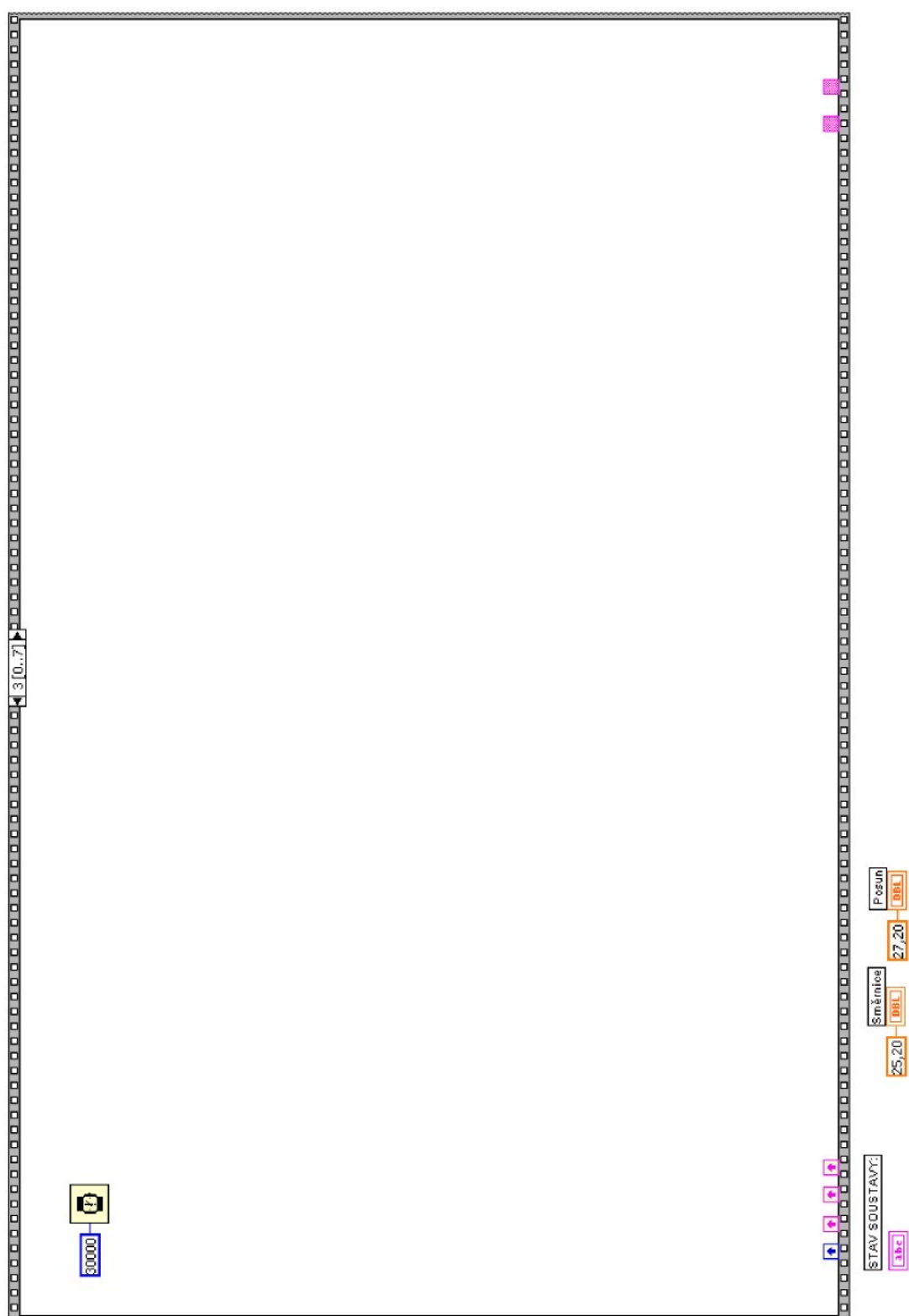
Sekvence č.10



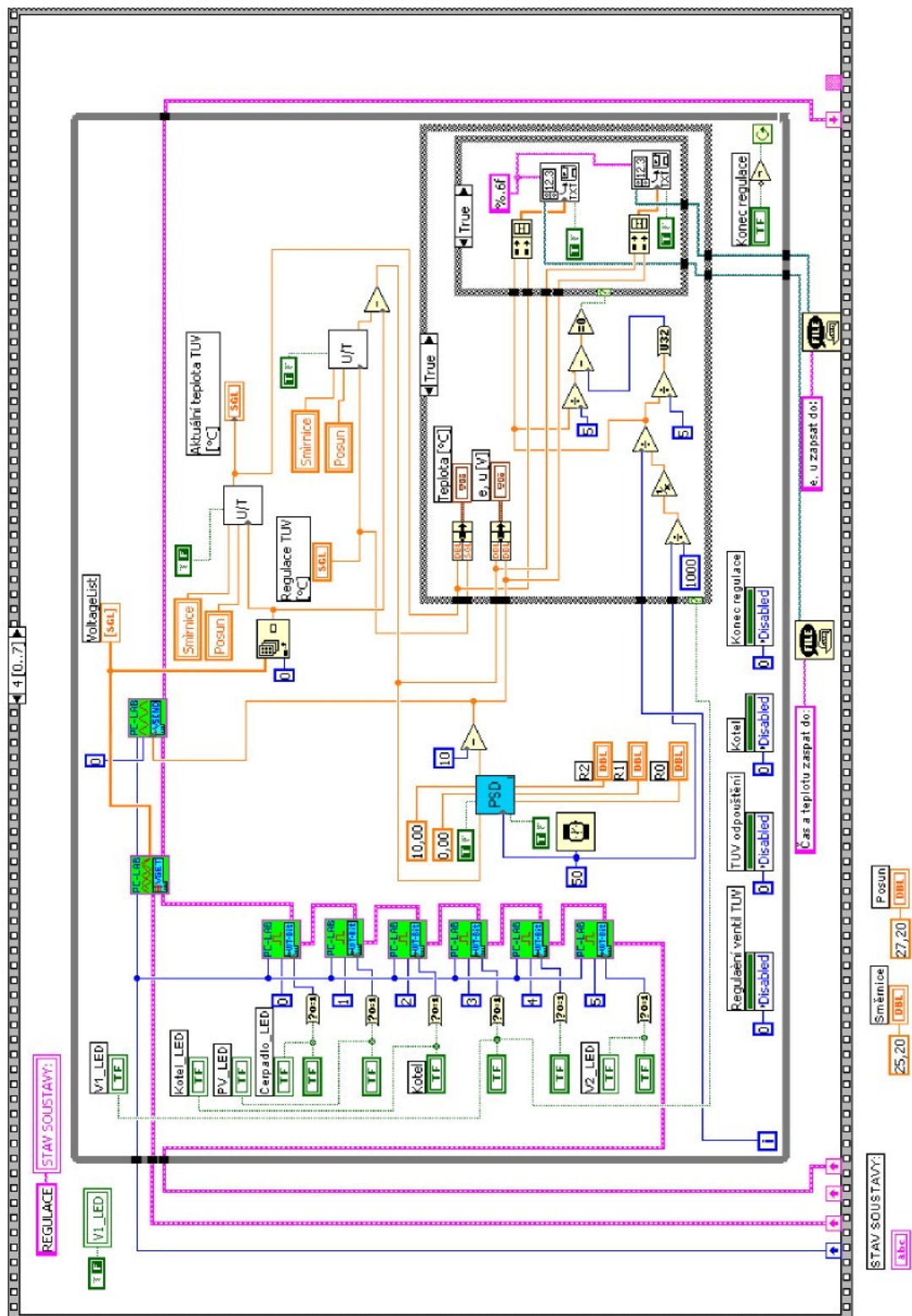
Sekvence č.1



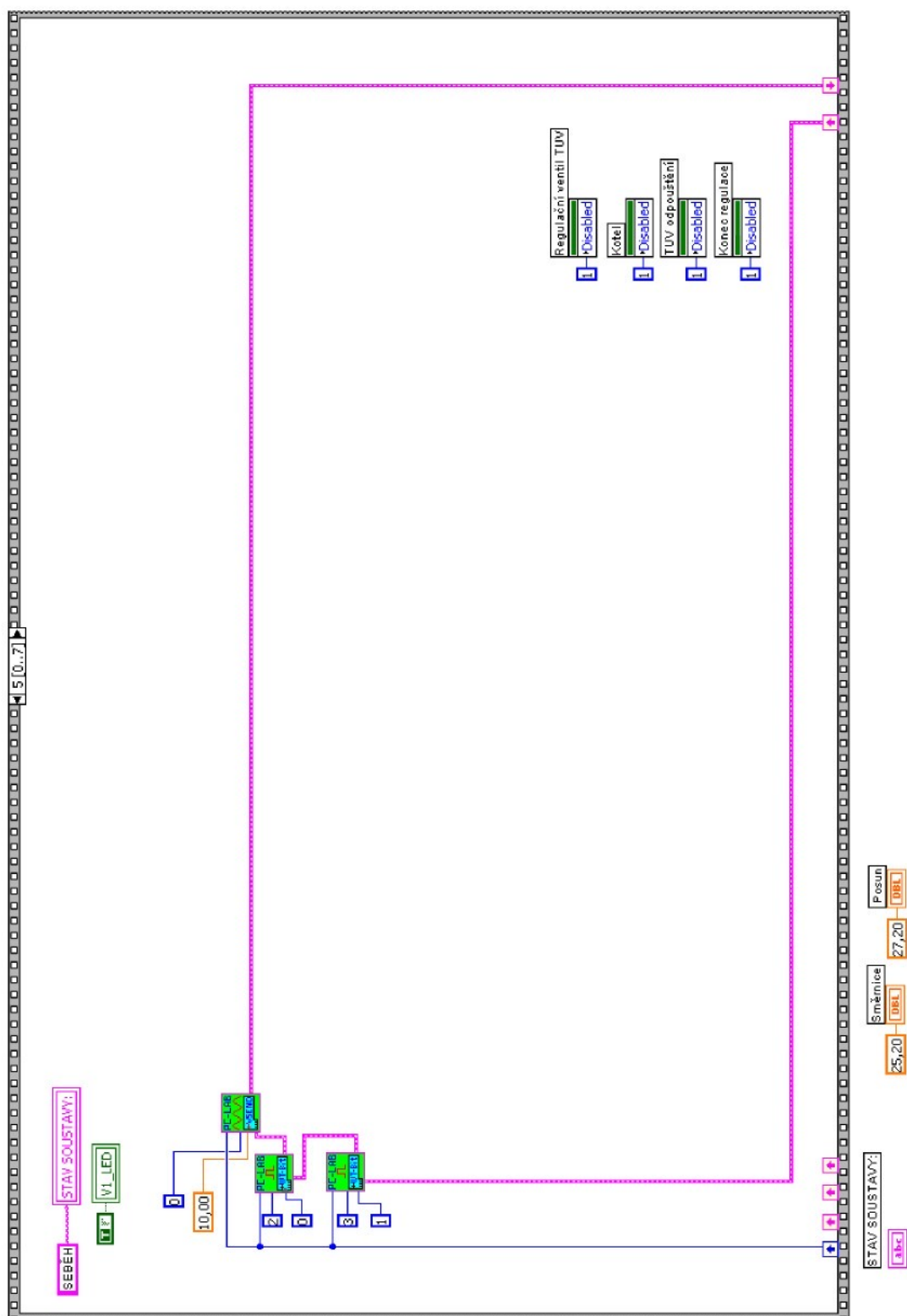
Sekvence č.2



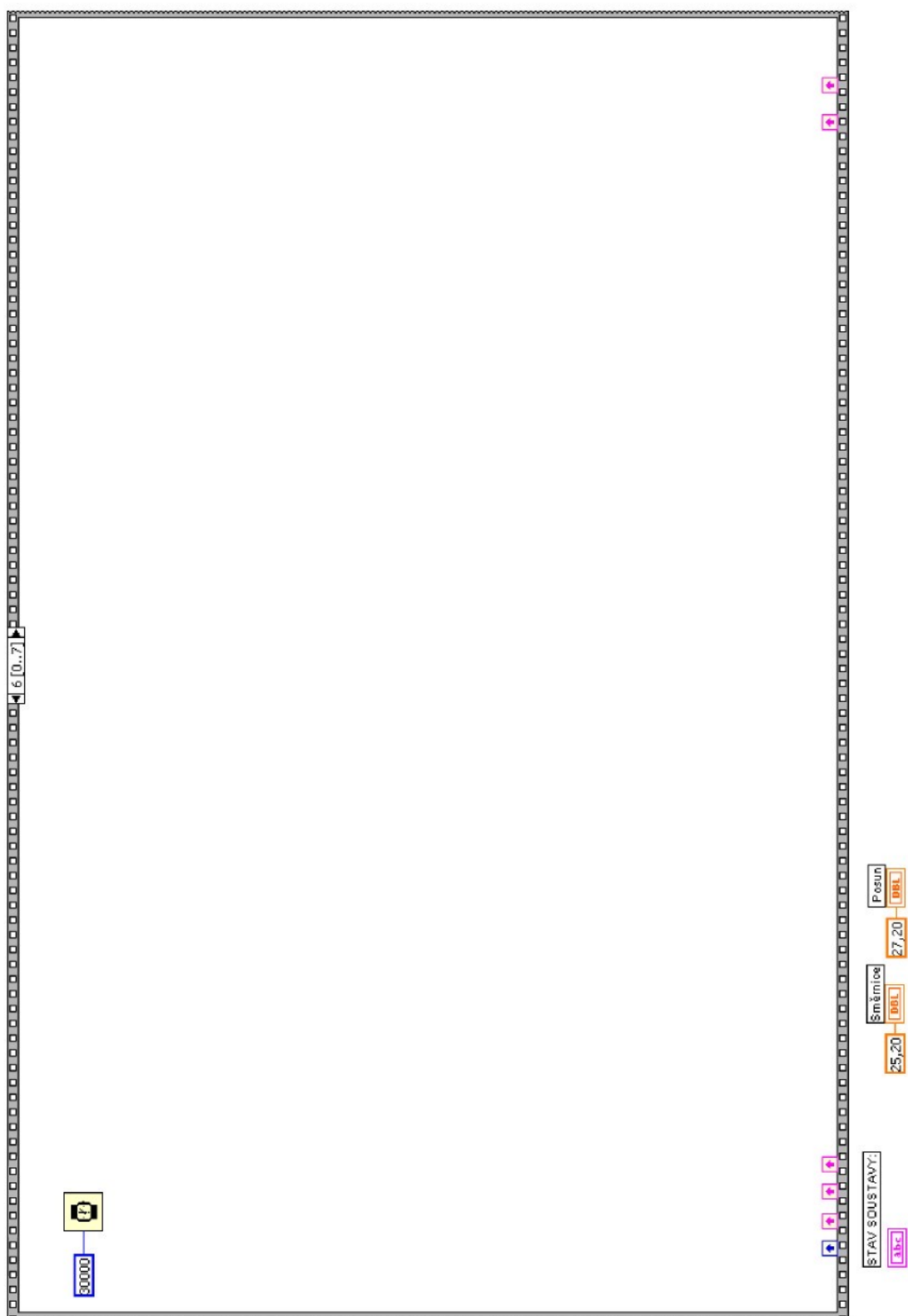
Sekvence č.3



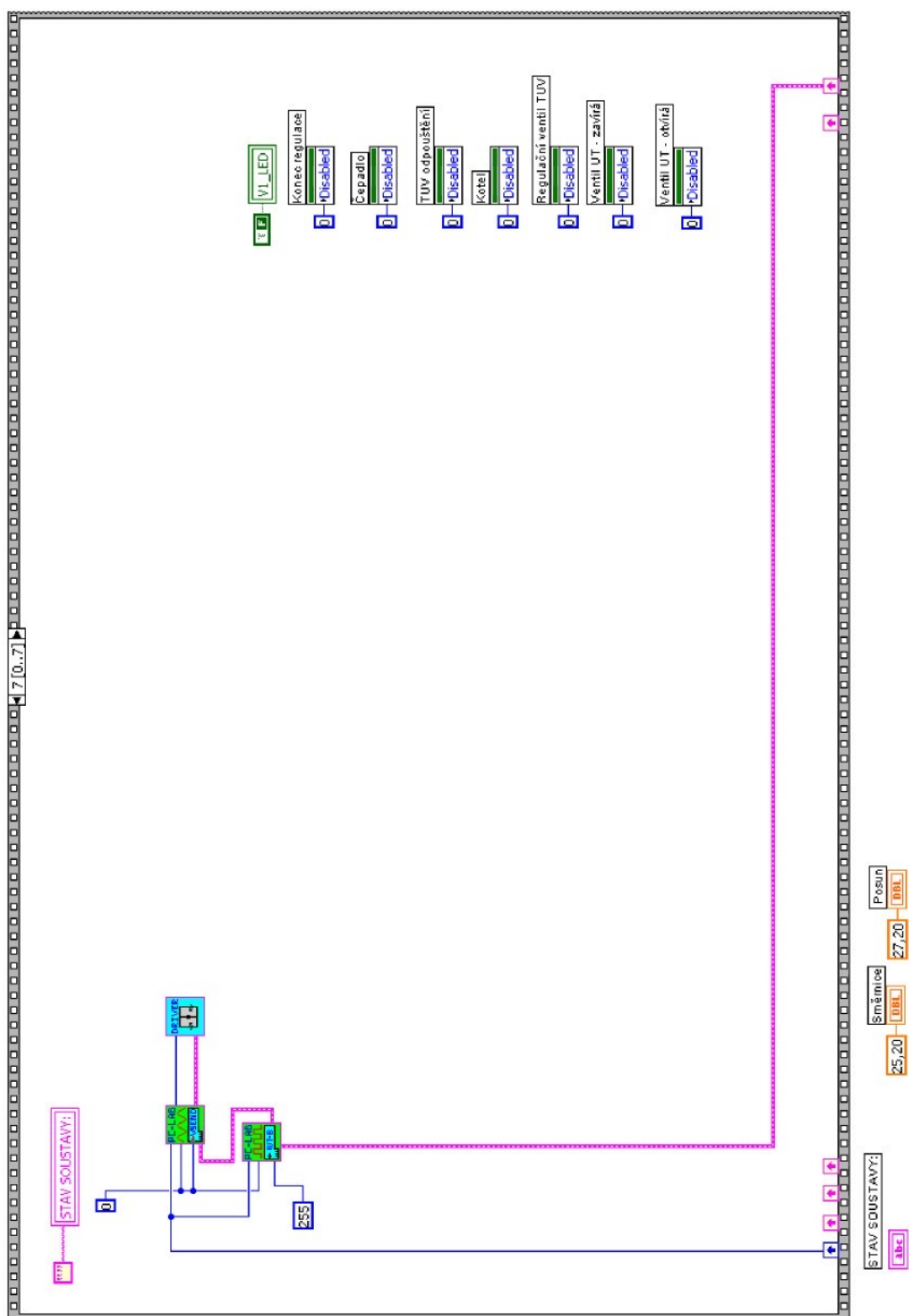
Sekvence č.4



Sekvence č.5



Sekvence č.6



Sekvence č.7