ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

PLC riadenie softvérového modelu
technologického procesu

Praha, 2011

Autor: Bc. Jozef Fetterik

Vyhlásenie

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil som iba podklady (literatúru, projekty, SW atď.) uvedené v priloženom zozname.

V Prahe, dňa 4. 1. 2011

podpis

Poďakovanie

Na tomto mieste by som sa rád poďakoval všetkým, ktorí sa podieľali na tejto diplomovej práci, predovšetkým vedúcim práce Ing. Pavlovi Burgetovi, Ph.D. a Ing. Michalovi Kutilovi, Ph.D., bez ich pomoci, rád a odborných pripomienok by nemohla táto práca vzniknúť. Ďalej by som chcel poďakovať kolegom Bc. Michalovi Zvolánkovi, Ing. Pavlovi Švarcovi a Ing. Janovi Švecovi za dobrú spoluprácu pri riešení tímového projektu, z ktorého vzišla aj táto diplomová práca, Ing. Martinovi Samkovi za odborné konzultácie, Ladislavovi Čmelíkovi za pomoc pri konštrukcii modelu a všetkým, predovšetkým rodine, ktorí ma po celú dobu štúdia podporujú.

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom Processor-in-the-loop simulácie prostredníctvom OPC komunikácie. Riadenie bolo navrhnuté pre asi 4 m vysoký systém spojených nádob s uzavretým cyklom vody predstavujúci model prečerpávacej vodnej elektrárne. Súčasťou diplomovej práce je fyzikálny popis tohto systému a kompletný nelineárny model v Matlabe-Simulinku.

Na prepojenie Matlabu a programovateľného automatu (PLC) regulujúceho model elektrárne bol zvolený OPC server od spoločnosti Siemens s názvom OPC.SimaticNET. Ako klient na strane Matlabu bol použitý OPC Toolbox. Práca detailne popisuje DCOM konfiguráciu nutnú na spoľahlivú komunikáciu medzi OPC serverom a OPC klientom. Okrem ovládania modelu z dotykového panelu a priamej regulácie z PLC, je možné riadiť model z Matlabu, prípadne spustiť simuláciu Processor-in-the-loop, kedy regulátor v PLC reguluje nelineárny model v Matlabe-Simulinku.

Abstract

The thesis refers to the design of the Processor-in-the-loop simulation via the OPC communication. The controls have been designed for about 4-metre high system of coupled tanks with self-contained cycle of water representing a model of pumped-storage hydroelectric power plant. The work contains a physical description of the system and the complete non-linear model in Matlab-Simulink.

For the connection between Matlab and programmable controller (PLC), which controls the model, an OPC server from Siemens company, called OPC.SimaticNET, has been chosen. As a client the OPC Toolbox in Matlab has been used. The thesis describes in detail the DCOM configuration necessary for the reliable communication between OPC server and OPC client. Except the manual control from the touch panel and the direct PLC control it is possible to control the model from Matlab and to start the Processor-in-the-loop simulation, when the non-linear model in Matlab-Simulink is being controlled by PLC regulator.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jozef Fetterik**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **PLC řízení softwarového modelu technologického procesu**

Pokyny pro vypracování:

1 Dokončete hardwarovou a softwarovou část modelu přečerpávací vodní elektrárny.
2. Sestrojte jeho softwarový model v simulačním programu.
3. Navrhněte řízení tohoto systému a otestujte ho na softwarovém modelu metodou Procesor In the Loop (PIL) a Hardware In the Loop (HIL).
4 Ověřte vhodnost OPC pro komunikaci mezi moduly v rámci PIL a HIL simulace.

Seznam odborné literatury:

Firemní materiály - Siemens

Vedoucí: Ing. Pavel Burget, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2010/2011 (změna 1. 12. 2010)

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 1 12. 2010

Obsah

Zoznam obrázkov ..... **vii**

Zoznam tabuliek ..... **ix**

1 Úvod **1**

2 Konštrukcia výukového modelu **3**

2.1 Fyzická konštrukcia modelu 3

2.1.1 Akčné členy 4

2.1.2 Senzory 5

2.1.3 Turbína a generátor 5

2.2 Riadiaci systém modelu 6

2.2.1 Režimy riadenia modelu a simulácie PIL a HIL 7

2.2.2 Organizačná štruktúra programu v PLC 12

2.2.2.1 Štruktúra dátových blokov v PLC 14

2.2.2.2 Dátové bloky dostupné cez OPC Server 14

2.2.2.3 Riadenie modelu z dotykového panelu 15

2.2.2.4 Riadenie modelu metódou Processor-in-the-loop 15

2.2.2.5 Riadenie modelu z Matlabu 15

2.2.3 Popis programu v PLC Simatic S7-300 16

2.2.3.1 Členenie hlavného programu v PLC 16

2.2.3.2 Čítanie dát zo senzorov a zápis akčných zásahov 16

2.2.3.3 Prepínanie režimov činnosti modelu 17

3 Konfigurácia OPC komunikácie **18**

3.1 Konfigurácia OPC servera 18

3.2 Konfigurácia OPC klienta 24

3.3 Konfigurácia DCOM nastavení 26

3.3.1 COM a DCOM 26

3.3.2 OPC Tunneling 26

3.3.3 DCOM konfigurácia 27

3.3.3.1 Odstránenie zabezpečenia Windowsu 27
3.3.3.2 Nastavenie vzájomného rozpoznávania užívateľských účtov 27
3.3.3.3 Konfigurácia systémových DCOM nastavení 28
3.3.3.4 Konfigurácia DCOM nastavení serveru 31
3.3.3.5 Obnovenie zabezpečenia Windowsu 33
4 Analýza a riadenie reálneho modelu 34
4.1 Fyzikálny popis systému 34
4.2 Identifikácia 41
4.2.1 Identifikácia proporcionálneho ventilu 41
4.2.2 Identifikácia čerpadla 42
4.2.3 Dynamika nábehu hladiny 43
4.2.4 Porovnanie nelineárneho softvérového modelu so skutočnosťou 47
4.2.5 Dynamika prenastavovania polohy proporcionálneho ventilu 50
4.2.6 Dynamika rozbehu čerpadla 50
4.2.7 Simulácia pomalého ultrazvukového senzoru 51
4.3 Návrh regulátorov 51
4.3.1 Návrh regulátoru pre Matlab 52
4.3.2 Návrh regulátoru pre PLC 53
4.3.3 Oneskorenie signálu pri OPC komunikácii 58
Záver 59
Literatúra 61
Použitý software 63
A Hardvérová konfigurácia PLC I
B Popis blokov v PLC II

Zoznam obrázkov

Obr. 2.1.1 – Umiestnenie komponentov na modeli vodnej elektrárne 3
Obr. 2.1.2 – Odstredivé čerpadlo a frekvenčný menič Micromaster 440 4
Obr. 2.1.3 – Turbína a generátor 6
Obr. 2.2.1 – PLC Simatic S7-400 6
Obr. 2.2.2 – PLC Simatic S7-300 7
Obr. 2.2.3 – Model-in-the-loop (MIL) simulácia 7
Obr. 2.2.4 – Processor-in-the-loop (PIL) simulácia 8
Obr. 2.2.5 – Hardware-in-the-loop (HIL) simulácia 9
Obr. 2.2.6 – Schéma vzájomného prepojenia staníc podieľajúcich sa na OPC komunikácii 11
Obr. 2.2.7 – Schéma OPC komunikácie a dátová štruktúra PLC 13
Obr. 3.1.1 – Vloženie IE General modulu do hardvérovej konfigurácie 19
Obr. 3.1.2 – Nastavenie IP adresy počítačovej stanice 20
Obr. 3.1.3 – Vloženie OPC Servera do hardvérovej konfigurácie 20
Obr. 3.1.4 – Uloženie, preloženie projektu a spustenie aplikácie NetPro 21
Obr. 3.1.5 – Blok počítačovej stanice v aplikácii NetPro 21
Obr. 3.1.6 – Nastavenie IP adresy PLC ako OPC partnera 21
Obr. 3.1.7 – Nastavenie slotu, v ktorom sa nachádza procesor PLC 22
Obr. 3.1.8 – Obrazovka aplikácie NetPro po úspešnom pridaní S7 Connection 22
Obr. 3.1.9 – Station Configurator Editor pred a po spustení OPC serveru 23
Obr. 3.1.10 – Vytvorenie novej skupiny položiek v programe OPC Scout 23
Obr. 3.1.11 – Definovanie tagov dátových blokov PLC v programe OPC Scout 24
Obr. 3.3.1 – OPC komunikácia pomocou tunnelingu 27
Obr. 3.3.2 – Nastavenie OPC bezpečnosti, ktoré povoľuje lokálnym užívateľom overovať sa ako oni sami, čo je bezpečnejšie oproti autentifikovaniu ako hosť. 28
Obr. 3.3.3 – Cesta k východzím DCOM nastaveniam počítača 29

Obr. 3.3.4 – Nastavenie východzích vlastností DCOM 29
Obr. 3.3.5 – Záložka zabezpečenia umožňujúca nastaviť zoznam užívateľov využívajúcich COM 30
Obr. 3.3.6 – Nastavenia zabezpečenia COM 31
Obr. 3.3.7 – DCOM nastavenia OPC serveru 32
Obr. 3.3.8 – DCOM nastavenia OPC serveru 33
Obr. 4.1.1 – Schematický náčrtok modelu s popisom výšok a prietokov 35
Obr. 4.2.1 – Priebeh miery strát v proporcionálnom ventile vzhľadom na stupeň jeho otvorenia. 42
Obr. 4.2.2 – Zlom v dynamike nábehu výšky vody v horných nádržiach pri uzatvorenom výpustnom ventile a konštantných otáčkach čerpadla 44
Obr. 4.2.3 – Závislosť ustálenej výšky hladiny a výšky, pri ktorej dochádza ku zlomu na prechodovej charakteristike od rýchlosti čerpadla. 45
Obr. 4.2.4 – Priebeh funkcie K_L 47
Obr. 4.2.5 – Porovnanie nelineárneho modelu so skutočnosťou (uzatvorené ventily) 48
Obr. 4.2.6 – Porovnanie nelineárneho modelu so skutočnosťou (otvorené ventily) 48
Obr. 4.2.7 – Dynamika prenastavovania polohy prop. ventilu (schéma v Simulinku) 50
Obr. 4.2.8 – Porovnanie výstupu tlakového (h_L) a ultrazvukového (h_R) senzoru. 51
Obr. 4.3.1 – Schéma P regulátora v Simulinku na zabránenie pretekaniu vody cez prepad 53
Obr. 4.3.2 – Porovnanie filtrácie signálu z ultrazvukového senzoru pomocou analógového a jemu prislúchajúcemu digitálneho Butterworthovho filtra 56
Obr. 4.3.3 – Priebeh regulácie z Matlabu 57
Obr. 4.3.4 – Priebeh regulácie v PIL simulácii 57
Obr. 4.3.5 – Priebeh regulácie PLC 57
Obr. 4.3.6 – Oneskorenie signálu pri OPC komunikácii 58

Zoznam tabuliek

Tabuľka 4.1 – Konštanty PID regulátoru výšky hladiny 52
Tabuľka 4.2 – Konštanty PI regulátoru prietoku 53
Tabuľka 4.3 – Konštanty PID regulátoru výšky hladiny v PLC..... 54
Tabuľka 4.4 – Konštanty PID regulátoru prietoku v PLC 55
Tabuľka 4.5 – Konštanty diskrétneho Butterworthovho filtra..... 56

1 Úvod

V automatizačnej praxi sa môžeme často stretnúť s požiadavkou otestovať riadiaci systém ešte predtým, ako bude implementovaný priamo do riadenej sústavy, a to hlavne z hľadiska spoľahlivosti, ceny a doby jeho vývoja. Ako prvým krokom býva väčšinou vytvorenie modelu riadenej sústavy vrátane riadiaceho systému v simulačnom programe, akým je napríklad Simulink od spoločnosti The MathWorks, Inc. Táto simulácia nazývaná Model-in-the-loop (MIL) slúži na overenie správnosti doterajšieho návrhu uzavretej slučky sústavy a regulátoru. Samotné fungovanie takéhoto modelu nie je ale zárukou správneho chovania reálneho riadiaceho systému v spojení s reálnym technologickým zariadením. V praxi je preto potrebné mať možnosť vyskúšať riadiaci systém implementovaný na hardvéri, ktorý bude v budúcnosti riadiť reálnu sústavu. K tomu sú určené metódy simulácie označované ako Processor-in-the-loop (PIL) a Hardware-in-the-loop (HIL), ktoré umožňujú prevádzať simulácie bližšie k reálnemu systému a otestovať tak aj stavy, ktoré by v reálnom systéme nebolo možné pripustiť.

Vyššie spomenuté metódy boli odskúšané v rámci tejto diplomovej práce na modeli vodnej elektrárne, ktorý sa nachádza na katedre riadiacej techniky Fakulty elektrotechnickej ČVUT v Prahe a má slúžiť na skvalitnenie výučby priemyselných systémov a riadenia. S myšlienkou vytvoriť takýto model ma pred dvoma rokmi oslovili moji kolegovia Jan Švec a Pavel Švarc. Vzhľadom k veľkému rozsahu prác a časovej náročnosti projektu pristúpil do tímu podporovaného našimi učiteľmi Ing. Michalom Kutilom, Ph.D. a Ing. Pavlom Burgetom, Ph.D. aj kolega Michal Zvolánek.

Pri návrhu modelu bol kladený dôraz na to, aby boli použité výlučne priemyslové snímače a akčné členy a na komunikáciu priemyselné zbernice (Profibus, Profinet). Tým sa model viac približuje systémom používaným v reálnej praxi. Realizácia projektu prebiehala od samotných základov. Jedna z úloh na ktorej som sa z väčšej časti podieľal, bol návrh mechanickej konštrukcie modelu, kde bolo treba optimalizovať rozmery nádrží a prierezy prietokových trubíc, aby sa zaručila rýchla dynamika systému vzhľadom na časové možnosti pri výučbe. Tento problém bol riešený vytvorením

fyzikálneho modelu systému a následným odladením jednotlivých konštánt simuláciami v Matlabe. Nasledovalo vytvorenie strojárskych výkresov pre firmu, ktorá nám vyrobila nádrže z plexiskla na zákazku. Kolegovia sa venovali výberu vhodných senzorov, akčných členov, spojovacích komponentov, držiakov, vhodného potrubia a turbíny. Súčasťou modelu je aj riadiaci systém a dotyková obrazovka s vizualizáciou. Po zmontovaní všetkých komponentov prišlo na rad naprogramovanie frekvenčného meniča a nakonfigurovanie všetkých senzorov. Po mechanickej stránke bol tak vytvorený funkčný a pre výučbu použiteľný model vrátene demonštračného programu do PLC a technickej dokumentácie.

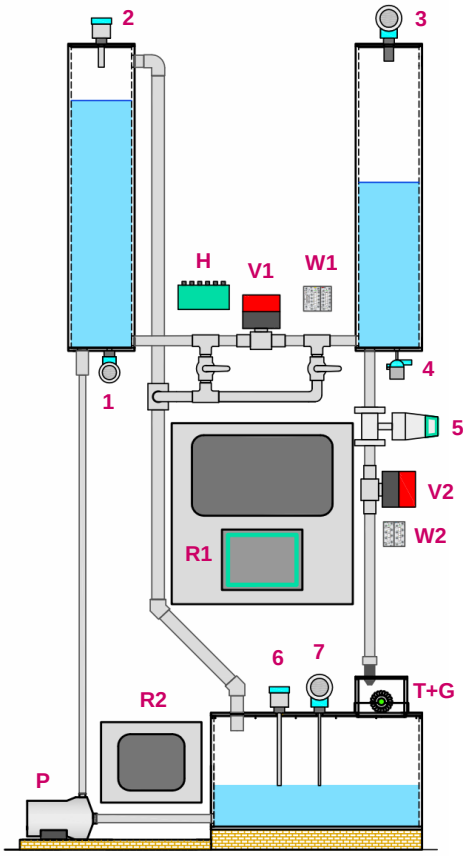
V rámci v úvode spomínaných simulácií ako prostriedok na prepojenie cieľového riadiaceho systému, ktorým je automat Simatic S7-300, a počítača so simulačným softvérom, na ktorom je model celého systému, bol vybraný OPC server OPC.SimaticNET. Je tak umožnený zápis a čítanie z vybraných dátových blokov v PLC a po úprave programu v PLC umožňuje riadenie modelu na diaľku, čo bolo aj odskúšané v rámci tejto diplomovej práce a v súčasnosti sa už využíva vo výučbe na katedre.

Diplomová práca je rozdelená do troch hlavných častí. V druhej kapitole je čitateľ bližšie oboznámený s modelom prečerpávacej vodnej elektrárne a nachádza sa tu aj popis riadiaceho systému, ktorý umožňuje prepínanie rôznych režimov riadenia. V tretej kapitole je uvedený popis nastavení, ktoré je nutné uskutočniť pre bezproblémový chod OPC komunikácie a teda aj simulačných režimov. Štvrtá kapitola sa zaoberá identifikáciou systému, vytvorením počítačového modelu v Simulinku a návrhom regulátorov pre tento systém.

2 Konštrukcia výukového modelu

2.1 Fyzická konštrukcia modelu

Model predstavuje systém spojených nádob s uzavretým cyklom vody. Pozostáva z troch nádrží, ktoré sú navzájom prepojené potrubiami a ventilmi. Spodná nádrž slúži ako zásobáreň a vojde do nej asi 200 l vody. Odstredivým čerpadlom s výkonom 0,55 kW je voda čerpaná do ľavej hornej nádrže. Odtiaľ môže pretekať cez ventil V1 do pravej hornej nádrže. Z nej po otvorení proporcionálneho ventilu V2 vyteká na turbínu a vracia sa späť do spodnej nádrže. Celková výška modelu je asi 4 m.



P – čerpadlo
1 – tlakový senzor
2 – kapacitný senzor (limitný)
3 – ultrazvukový senzor
4 – teplotný senzor
5 – indukčný prietokomer
6 – kapacitný senzor (limitný)
7 – mikrovlnný senzor
V1 – ventil (ON/OFF)
V2 – proporcionálny ventil
W1 – vzdialené digitálne vstupy a výstupy (Wago)
W2 – vzdialené analógové vstupy a výstupy (Wago)
R1 – rozvádzač na napätie 24 V s riadiacim systémom a dotykovým panelom
R2 – rozvádzač na napätie 230 V s frekvenčným meničom
T+G – turbína a generátor
H – Profibus Hub

Obr. 2.1.1 – Umiestnenie komponentov na modeli vodnej elektrárne

2.1.1 Akčné členy

Na čerpanie vody zo spodnej do ľavej hornej nádrže bolo použité odstredivé čerpadlo EBARA CD 120/07 s max. prietokom 180 l/min pri dopravnej výške 12,5 m. Je vyhotovené kompletne z nerezu a poháňa ho dvojpólový asynchrónny motor (výkon 0,55 kW) napájaný trojfázovým napätím z frekvenčného meniča

Otáčky čerpadla riadi frekvenčný menič Micromaster 440 od firmy Siemens. Frekvenčný menič je napájaný jednofázovým sieťovým napätím 230 V, výstup na motor je trojfázový. Motor je kvôli získaniu vyššieho výkonu zapojený do trojuholníka. Frekvenčný menič komunikuje s PLC pomocou Profibus DP.

Obr. 2.1.2 – Odstredivé čerpadlo a frekvenčný menič Micromaster 440

Model elektrárne je osadený dvoma ventilmi. Medzi ľavou hornou a pravou hornou nádržou je ventil, ktorý sa môže nachádzať iba v dvoch stavoch (otvorený/uzavretý). Jeho stav sa mení prepólovaním napájacieho napätia 24 V pomocou relé. Ventil je poháňaný elektropohonom VALPES série ER, obsahuje jednosmerný motorček s prevodovkou. Podobne je riešený pohon aj proporcionálneho ventilu, ktorý sa nachádza na potrubí privádzajúcom vodu z pravej hornej nádrže na turbínu. Obsahuje navyše aj elektroniku riadenia ventilu na polohu. Referencia polohy ventilu sa zadáva analógovo buď 0 – 10 V alebo 4 – 20 mA a rovnakým spôsobom je dostupná aj spätná väzba aktuálnej polohy ventilu. Na našom modeli sa využíva napäťové rozhranie 0 – 10 V.

Aby bolo možné ventily ovládať z PLC, boli ku každému z nich umiestnené vstupno-výstupné moduly 767 Speedway od firmy Wago, ktoré s PLC komunikujú po Profinete. Digitálne vstupy a výstupy sú umiestnené pri ventile V1, pri proporcionálnom ventile V2 naopak analógové. V budúcnosti je plánované pripojenie generátoru k analógovému modulu, aby bolo tak umožnené meranie výkonu generátora.

2.1.2 Senzory

Na modeli je nainštalovaných celkom sedem senzorov od dvoch rôznych dodávateľov. Štyri senzory sú od firmy Endress+Hauser a tri od firmy Siemens. Ich rozmiestnenie je znázornené na obrázku 2.1.1. Nasleduje ich veľmi stručný prehľad. Podrobnejší popis k jednotlivým senzorom, princípy na akých pracujú a postupy na nastavenie ich komponentov sú uvedené v diplomovej práci kolegu Ing. Jana Šveca [1] alebo v dokumentácii k modelu [2].

Na meranie výšky hladiny bol použitý tlakomer Cerabar S PMC71 od firmy E+H. Aby nedošlo k pretekaniu vody cez hornú nádrž, bol na jej kryt nainštalovaný limitný snímač Pointek CLS 200 od firmy Siemens pracujúci na kapacitnom princípe. Prietoku vody cez okraj nádrže mal zabrániť aj nainštalovaný prepad. Zistilo sa však, že pri väčších prítokoch čerpadlom najmä po uzavretí ventilu V1 (obrázok 2.1.1) nestačí odvádzať vodu a teda neplní svoj účel. Z tohto dôvodu je prítomnosť limitného senzoru nevyhnutná. Senzor rovnakého typu, ale s dlhšou tyčou bol nainštalovaný na spodnú nádrž a kontroluje naopak minimálnu hladinu, aby nedošlo k zavzdušneniu čerpadla prípadne chodu na sucho. Oba limitné snímače sú zapojené v sérii v prúdovej slučke a pripojené priamo na frekvenčný menič. V prípade, že hladina vody v ľavej hornej nádrži je príliš vysoká alebo naopak, hladina vody v spodnej nádrži je príliš nízka, dôjde k rozpojeniu tejto prúdovej slučky a frekvenčný menič okamžite vypne motor čerpadla.

Meranie hladiny v pravej hornej nádrži sa uskutočňuje ultrazvukovým senzorom Prosonic M FMU 40 od firmy E+H. Výšku hladiny v spodnej nádrži meria mikrovlnný senzor Levelflex M FMP40 rovnako od firmy E+H.

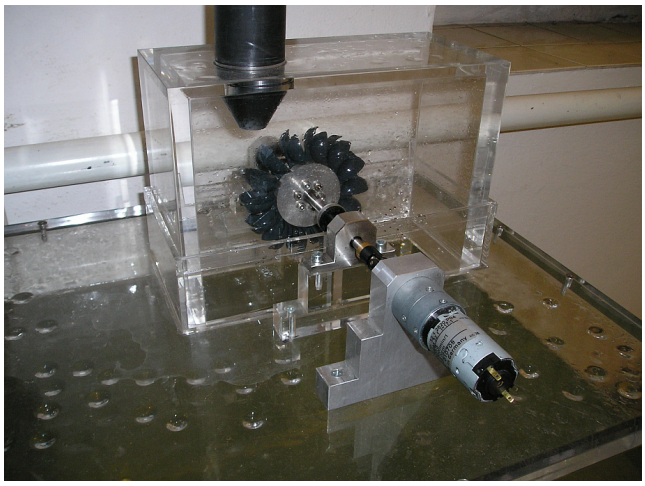
Okrem toho sú na modeli umiestnené ešte teplomer Omnigrad M TR10 od E+H používajúci platinový senzor Pt100 a prietokomer Sintrans MAG 5100W od firmy Siemens, ktorý pracuje na indukčnom princípe. Všetkých sedem senzorov nainštalovaných na modeli je napojených na Profibus PA, pomocou ktorého komunikujú s PLC a posielajú mu aktuálne namerané hodnoty.

2.1.3 Turbína a generátor

Voda z pravej hornej nádrže preteká prietokomerom a proporcionálnym ventilom a pomocou dýzy bez regulácie prietoku je nasmerovaná na turbínu. Turbína je typu

Pelton s vonkajším priemerom lopatiek 108 mm a vzdialenosťou stredu turbíny a dna lopatky 43 mm. Turbína bola vyrobená na zákazku u talianskeho malovýrobcu.

Ako generátor bol použitý jednosmerný motor s permanentnými magnetmi a prevodovkou (prevod do rýchla 17x) s označením Performax 32 od nemeckej firmy Zeitlauf. Maximálny výkon, ktorý sa podarilo dosiahnuť pri najväčšom prietoku a záťaži generátoru 500 Ω bol 3,5 W.



Obr. 2.1.3 – Turbína a generátor

2.2 Riadiaci systém modelu

Súčasťou modelu sú dva programovateľné automaty (PLC – Programmable Logic Controller), a to Simatic S7-400H a Simatic S7-300. Riadenie je zatiaľ vykonávané stále iba z jedného automatu, teda nebeží z oboch súčasne, a vybraný automat je potrebné pred spustením modelu správne zapojiť. Súčasné riadenie z oboch automatov by mohlo byť dobrým námetom na diplomovú prácu pre študentov v budúcnosti.

Simatic S7-400 je automatom s dvoma CPU rovnakého typu prepojených optickými káblami a umožňujúcimi redundantné riadenie. V prípade poruchy jedného z CPU sa prevedie rýchle a beznárazové prepnutie z master systému na záložnú stanicu. Operačný systém v PLC zaistí, aby sa všetky príkazy vykonávali synchrónne.

Obr. 2.2.1 – PLC Simatic S7-400

Redundantné riadenie prostredníctvom automatu Simatic S7-400H je súčasťou diplomovej práce Ing. Jana Šveca [1].

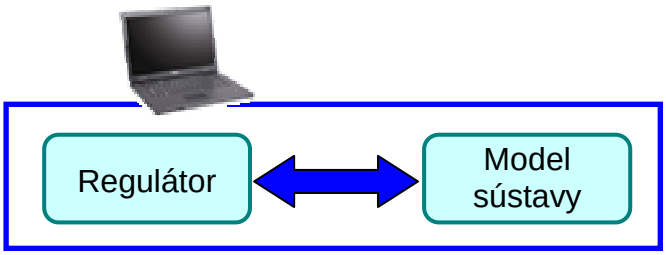
V rámci tejto diplomovej práce bol používaný výlučne automat Simatic S7-300, v ktorom bol vytvorený program na riadenie celého systému a k nemu bola nakonfigurovaná aj OPC komunikácia. Použitý bol model zo štandardného radu s označením S7-315-2 PN/DP. Ako už vyplýva z označenia, v tomto PLC sú integrované dve komunikačné rozhrania – Profibus DP a Profinet.

Obr. 2.2.2 – PLC Simatic S7-300

2.2.1 Režimy riadenia modelu a simulácie PIL a HIL

Ako bolo spomenuté v úvode, model elektrárne má okrem bežného riadenia umožňovať aj simulácie Processor-in-the-loop a Hardware-in-the-loop. V nasledujúcich odsekoch sú vysvetlené rozdiely medzi týmito typmi simulácií a simuláciou Model-in-the-loop, ktorá sa veľmi často používa na začiatku vývoja riadiaceho systému.

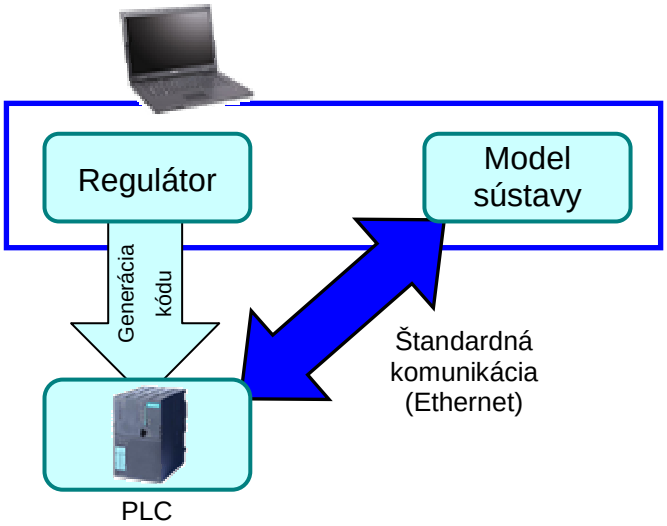
Model-in-the-loop (MIL) simulácia sa používa pred implementáciou riadiaceho algoritmu na cieľový hardvér. MIL simulácia umožňuje študovať sústavu v interakcii s regulátorom. Regulátor aj model sústavy sú simulované v simulačnom programe a regulácia neprebieha v reálnom čase. Aj keď simulácia vedie k dobrým výsledkom, miera idealizácie je veľmi veľká. Takýto model nezachycuje mnoho ďalších vplyvov, ako sú napríklad rôzne nelinearity, výpočtový výkon reálneho riadiaceho hardvéru, prenosové rýchlosti komunikačných liniek a pod. [3, 4]



Obr. 2.2.3 – Model-in-the-loop (MIL) simulácia

Processor-in-the-loop (PIL) simulácia využíva zapojenie procesoru v uzavretej slučke so simulačným softvérom (simulátorom). Procesor je pritom cieľovým hardvérom, pre ktorý je riadiaci algoritmus vyvíjaný a na ktorom bude jeho konečná podoba implementovaná. Z výsledkov predchádzajúcej simulácie MIL je možné vygenerovať kód riadiaceho algoritmu a importovať ho do procesoru, ktorý potom komunikuje s modelom sústavy prostredníctvom štandardnej komunikácie, napr. RS232, Ethernet, CAN. V tomto prípade nie sú využívané vstupno-výstupné zariadenia a komunikácia väčšinou neprebieha v reálnom čase.

Pri simulácii PIL je možné na rozdiel od MIL overiť, či výkon hardvéru postačuje na riadenie daného procesu, stanoviť najkratšiu možnú periódu riadiaceho cyklu a zhodnotiť kvalitu regulácie. [3, 4, 5]

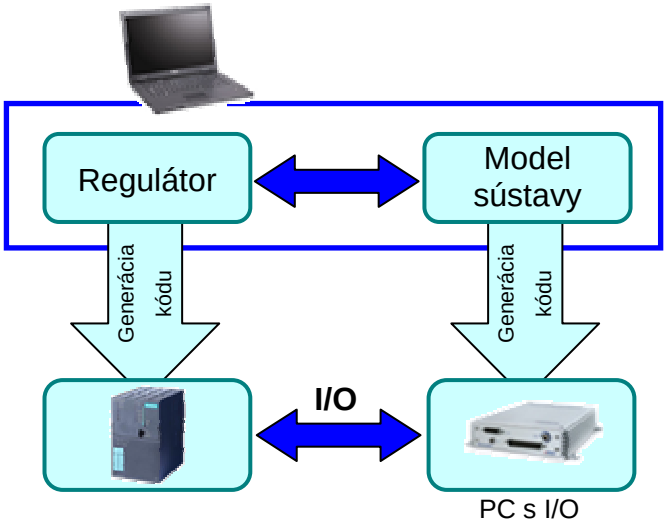


Obr. 2.2.4 – Processor-in-the-loop (PIL) simulácia

Hardware-in-the-loop (HIL) simulácia je podobná PIL simulácii s rozdielom, že sa už využíva komunikačné rozhranie, ktoré bude použité na reálnom systéme, a komunikácia prebieha v reálnom čase. HIL simulácia sa využíva u zložitých úloh s drahou technológiou a vážnymi dopadmi v prípade neúspešného riadenia. Preto sa aspoň zo začiatku riadiaci systém neodlaďuje na riadenej sústave, ale použije sa špecializovaný hardvér, ktorý priamo simuluje fyzikálne veličiny a s riadiacim systémom je prepojený pomocou vhodného rozhrania. Väčšinou to bývajú D/A a A/D prevodníky, prúdové slučky a pod.

Simuláciou HIL je možné čo najviac sa priblížiť k reálnemu svetu, pretože riadiaci systém a jeho akčné zásahy sú so simulovanou sústavou prepojené tak, ako to bude

v skutočnosti. Týmto spôsobom sa dajú na modeli systému simulovať aj také poruchy, ktoré by v reáli nebolo možné pripustiť. Po odladení riadiaceho systému môže byť simulačný hardvér nahradený reálnou sústavou. [3]



Obr. 2.2.5 – Hardware-in-the-loop (HIL) simulácia

Na našom modeli vodnej elektrárne sú použité priemyselné senzory, ktoré nemajú analógový výstup, ale komunikujú s PLC priamo po Profibuse alebo Profinete. Aby bola na našom modeli možná simulácia HIL, je k tomu potrebný špeciálny hardvér, ktorý by na základe fyzikálneho modelu systému simuloval na sieti Profibus a Profinet dáta posielané jednotlivými senzormi. Vzhľadom na obtiažnosť riešenia tejto simulácie, skutočnosť, že škola takýto špeciálny hardvér nemá a v budúcnosti ho ani nepotrebuje, bolo po dohode s vedúcim práce rozhodnuté nerealizovať simuláciu HIL. Namiesto nej bolo na základe požiadaviek vedúcich predmetov, kde sa bude model elektrárne v budúcnosti využívať, navrhnuté riadenie modelu priamo z Matlabu. Zároveň Matlab-Simulink je výborný nástroj na vytváranie modelov dynamických systémov a simuláciu ich chovania, čo je ideálne pri realizovaní PIL simulácie.

Riadiaci systém musí teda vedieť pracovať v nasledujúcich režimoch, ktoré je možné prepínať na základe priority:

- Riadenie modelu z dotykového panelu – ručný režim
- Riadenie modelu z dotykového panelu – automatická regulácia (zadávanie referencií z panelu, algoritmus riadenia je v PLC)

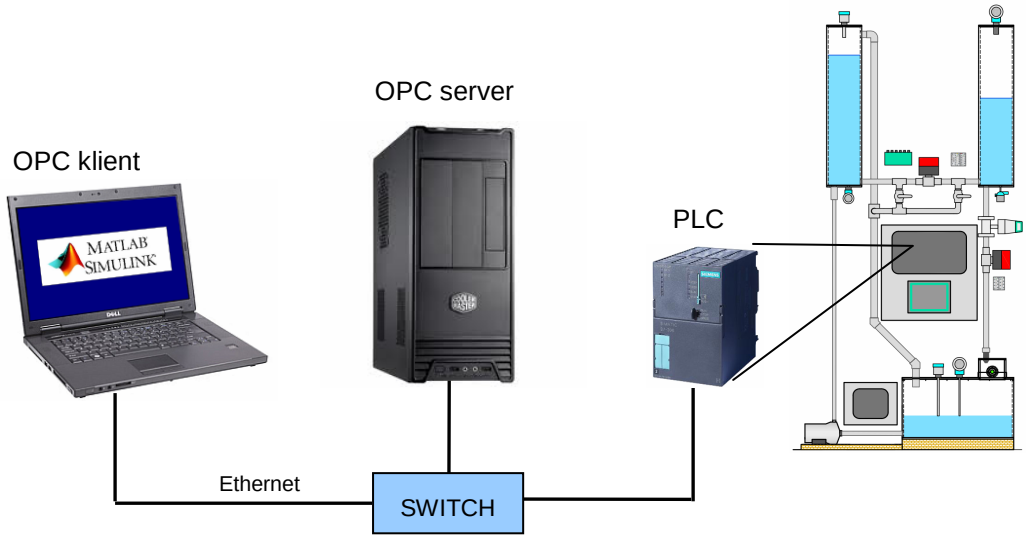
- Riadenie softvérového modelu v Matlabe regulátorom v PLC (metóda Processor-in-the-loop – PIL)
- Riadenie modelu z Matlabu (zadávanie referencií a algoritmus riadenia je v Matlabe, regulátor v PLC sa vynecháva)

Ako prostriedok na prepojenie PLC a Matlabu bol zvolený OPC server OPC.SimaticNET od spoločnosti Siemens a OPC Toolbox ako OPC klient, ktorý je súčasťou Matlabu (Simulinku).

OPC je priemyselným komunikačným štandardom, ktorý umožňuje prenos dát v oblasti automatizácie medzi softvérom a hardvérom rôznych výrobcov. OPC Foundation (www.opcfoundation.org) je organizácia, ktorá je zodpovedná za definovanie a udržiavanie všetkých špecifikácií OPC. Aj keď názov OPC vznikol pôvodne zo spojenia „OLE for Process Control“ (OLE = Object Linking and Embedding), oficiálne stanovisko OPC Foundation hovorí, že OPC už nie je akronym a technológia je známa jednoducho ako „OPC“.

Cieľom OPC je umožniť prístup softvérovým aplikáciám k automatizačným dátam z ľubovoľného riadiaceho alebo monitorovacieho systému nezávisle na jeho výrobcovi. OPC rieši tento problém pridaním strednej vrstvy nazývanej OPC Server medzi aplikáciu a zdroj dát. OPC komunikácia je teda založená na systéme klient-server. Úlohou servera je preložiť požiadavky aplikácie na dáta tak, aby tomu zdroj dát porozumel. Pokiaľ je pre určité zariadenie (napr. PLC) vytvorený OPC Server, môže byť využívaný ľubovoľnou aplikáciou, ktorá vie komunikovať ako OPC klient. OPC servery dovoľujú aplikácii dáta nielen čítať, ale aj zapisovať. OPC servery využívajú na komunikáciu s klientmi OLE technológiu od spoločnosti Microsoft (tiež známu ako Component Object Model alebo COM). [7, 8]

Na nasledujúcom obrázku je znázornená schéma prepojenia jednotlivých staníc podieľajúcich sa na OPC komunikácii. OPC server beží na stolnom počítači a poskytuje vybrané dáta nachádzajúce sa v dátových blokoch v PLC. OPC Toolbox ako OPC klient môže, ale nemusí pracovať na rovnakom počítači ako server. Vzájomná komunikácia medzi serverom a PLC a medzi serverom a klientom prebieha po Ethernete.



Obr. 2.2.6 – Schéma vzájomného prepojenia staníc podieľajúcich sa na OPC komunikácii

V prípade, že sa k serveru pripoja dvaja a viacerí klienti a budú zapisovať do dátového bloku v PLC, dôjde ku kolízii a vzájomnému prepisovaniu dát. Kým pri čítaní dát zo servera tento problém nenastáva, pri zápise je nutné pre správnu činnosť zabezpečiť, aby mal na server prístup v rovnakom čase iba jeden klient. V budúcnosti je plánované riešiť tento problém systémom Lablink, ktorý zabezpečí, že s modelom bude v čase pracovať iba jeden užívateľ.

Lablink je vzdialené laboratórium slúžiace na prístup k jednotlivým modelom cez virtuálnu plochu. Zaisťuje, aby v danom čase pracoval s modelom iba jeden užívateľ. Na plánovanie prístupu slúži rezervačný systém. Zároveň užívateľ s vyššími právami (napr. učiteľ) má oprávnenie odobrať prístup užívateľovi s nižšími právami (napr. študent). Výhodou systému je časovo neobmedzený prístup do laboratória a efektívne využívanie reálnych i virtuálnych modelov.

2.2.2 Organizačná štruktúra programu v PLC

Riadiaci program do automatu bol vytvorený v prostredí Step7 Proffesional a skladá sa z:

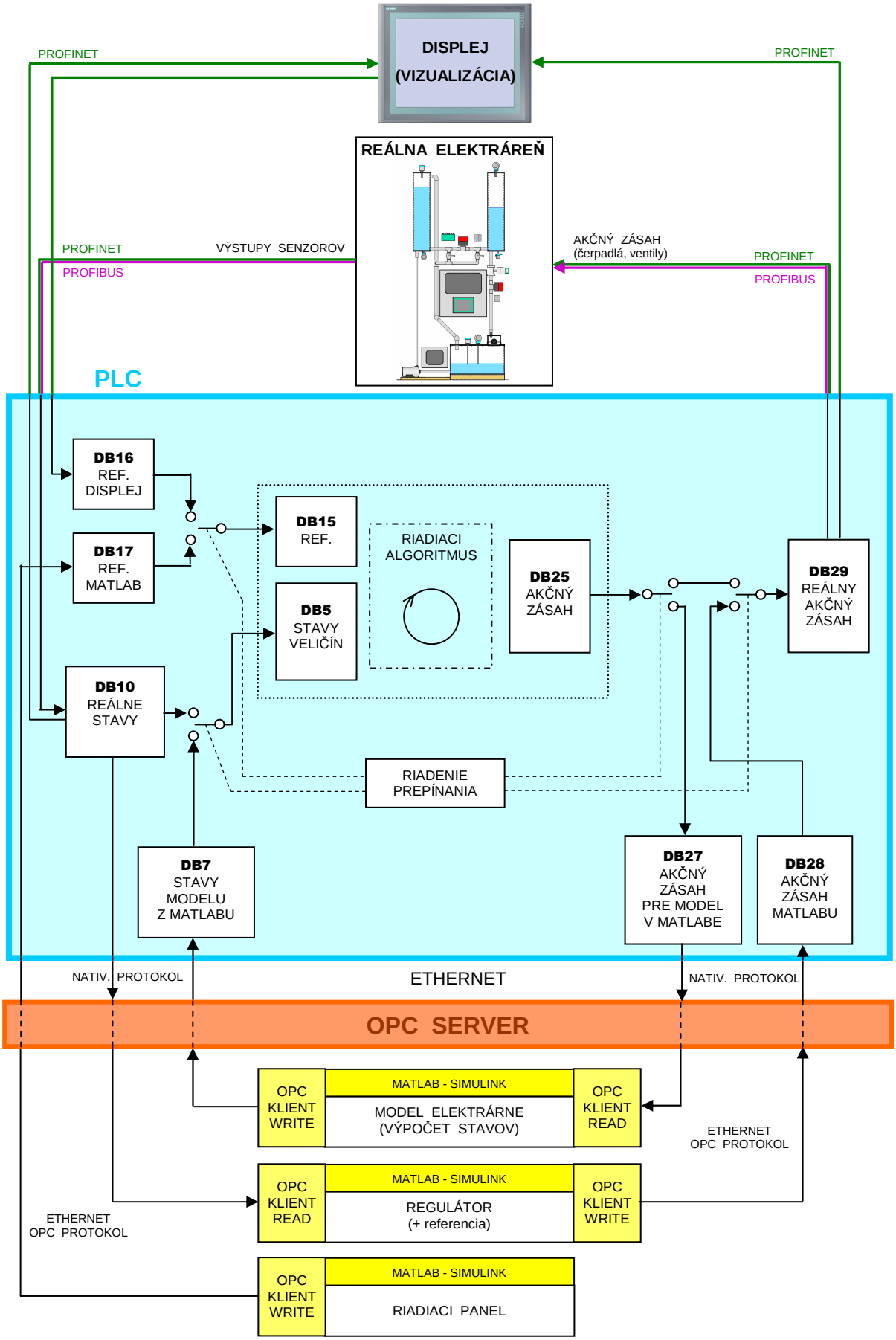
- organizačných blokov (OB)
- funkčných blokov (FB)
- funkcií (FC)
- dátových blokov (DB)
- systémových funkcií (SFC) a systémových blokov (SFB)

Pôvodný program oproti DP Jana Šveca [1] bolo nevyhnutné kompletne prepracovať. Došlo k roztriedeniu jednotlivých častí programu do funkčných blokov a k zhrnutiu dôležitých dát do samostatných dátových blokov. Tým sa stal celý kód prehľadnejší a zrozumiteľnejší. Hardvérová konfigurácia zostala bez výraznejšej zmeny a je opísaná v spomínanej diplomovej práci [1]. Jej schéma je zároveň aj v prílohe A.

Aby riadiaci systém umožňoval funkciu rôznych režimov spomínaných v predchádzajúcej kapitole, bolo nutné vytvoriť niekoľko dátových blokov prislúchajúcich týmto režimom, do ktorých má právo zapisovať OPC server. Podľa aktuálneho režimu riadenia dochádza ku kopírovaniu dát medzi jednotlivými blokmi. Schéma celej OPC komunikácie a dátová štruktúra PLC sú na obrázku 2.2.7.

Obrázok 2.2.7 schematicky popisuje zapojenie modelu vodnej elektrárne z hľadiska komunikácie modelu s okolím, jeho riadenia, vizualizácie a ukladania nameraných dát do databáze. Schéma pozostáva z niekoľkých celkov:

- Riadiaci automat (PLC)
- Dotykový displej s vizualizáciou
- Fyzický model elektrárne so senzormi a akčnými členmi (PLC a dotykový panel sú fyzicky súčasťou modelu, v tejto schéme sú však nakreslené oddelene)
- OPC server
- Matlab-Simulink s OPC Toolboxom (OPC klient)



Obr. 2.2.7 – Schéma OPC komunikácie a dátová štruktúra PLC

2.2.2.1 Štruktúra dátových blokov v PLC

Ústrednou časťou programu v PLC je riadiaca slučka, kde na začiatku cyklu dôjde k načítaniu vstupných premenných uložených v dátovom bloku (DB) v schéme nazvanom ako „DB5 STAVY VELIČÍN“ a požadovaných hodnôt (referencií) uložených v „DB15 REF.“. Vypočítaný akčný zásah sa uloží do „DB25 AKČNÝ ZÁSAH“. Obsah tohto DB sa skopíruje podľa vybraného režimu buď do „DB29 REÁLNY AKČNÝ ZÁSAH“, ktorým sa cez Profibus a Profinet ovláda priamo čerpadlo a ventily, alebo do „DB27 AKČNÝ ZÁSAH PRE MODEL V MATLABE“ pri simulácii PIL. Do bloku s reálnym akčným zásahom je možné skopírovať aj hodnoty vypočítané Matlabom a uložené do „DB28 AKČNÝ ZÁSAH MATLABU“.

Údaje načítané cez Profibus a Profinet zo senzorov elektrárne sa ukladajú do „DB10 REÁLNE STAVY“. Do bloku „DB5 STAVY VELIČÍN“, z ktorého sa počíta akčný zásah, sa kopírujú dáta buď z reálneho stavu elektrárne alebo vypočítané stavy z fyz. modelu v Matlabe uložené v „DB7 STAVY MODELU Z MATLABU“.

Zadávanie referencií riadenia je možné z dvoch zdrojov, a to z dotykového panelu a z aplikácie v Matlabe-Simulinku. Požadované hodnoty sa ukladajú do dátových blokov „DB16 REF. DISPLEJ“ a „DB17 REF. MATLAB“. Obsah jedného z týchto blokov (podľa zvoleného režimu) sa skopíruje do „DB15 REF.“, ktorý slúži ako zdroj vstupných dát pre riadiaci algoritmus.

Súčasťou programu v PLC je aj riadenie „prepínačov“, teda kopírovanie medzi jednotlivými dátovými blokmi na základe rôznej priority jednotlivých spôsobov riadenia.

2.2.2.2 Dátové bloky dostupné cez OPC Server

OPC server poskytuje prístup k dátovým blokom uloženým v PLC iným aplikáciám s OPC klientom a zároveň im umožňuje zápis do týchto blokov.

Dátové bloky, ktoré sú určené na čítanie z PLC:

- DB10 REÁLNE STAVY
- DB27 AKČNÝ ZÁSAH PRE MODEL V MATLABE

Dátové bloky, ktoré sú určené na zápis do PLC:

- DB17 REF. MATLAB
- DB7 STAVY MODELU Z MATLABU
- DB28 AKČNÝ ZÁSAH MATLABU

V rámci Matlabu-Simulinku sú ako OPC klient použité bloky OPC Toolboxu, ktoré umožňujú čítanie dát zo servera (v schéme označené ako OPC KLIENT READ) a samozrejme aj zápis na server (OPC KLIENT WRITE).

2.2.2.3 Riadenie modelu z dotykového panelu

V dotykovom paneli, ktorý je umiestnený v stene rozvádzača elektrárne, je nahraná vizualizácia celého systému spolu s tlačidlami na priame ovládanie jednotlivých akčných členov. Je možné zadať aj požiadavky na automatické riadenie výšky hladiny a prietoku. V prípade automatického riadenia sú požadované hodnoty nahrané do „DB16 REF. DISPLEJ“ a odtiaľ skopírované do „DB15 REF.“. Stavy senzorov sú nahrané v „DB10 REÁLNE STAVY“ a odtiaľ skopírované do „DB5 STAVY VELIČÍN“. Akčný zásah vypočítaný v PLC a uložený do „DB25 AKČNÝ ZÁSAH“ je skopírovaný do „DB29 REÁLNY AKČNÝ ZÁSAH“ a odtiaľ pomocou Profibusu a Profinetu sú ovládané akčné členy.

2.2.2.4 Riadenie modelu metódou Processor-in-the-loop

Slúži na kontrolu a otestovanie algoritmu riadenia v PLC aplikovaním na fyzikálny model elektrárne v Matlabe. Reálny fyzický model elektrárne v tomto prípade nie je v činnosti, zastupuje ho fyzikálny model v Matlabe, ktorý je riadený programom v PLC.

Vypočítané stavy veličín elektrárne sa cez OPC server nahrajú do „DB7 STAVY MODELU Z MATLABU“, odkiaľ sa skopírujú do „DB5 STAVY VELIČÍN“. Vypočítaný akčný zásah sa z „DB25 AKČNÝ ZÁSAH“ skopíruje do „DB27 AKČNÝ ZÁSAH PRE MODEL V MATLABE“ a odtiaľ sa pomocou OPC servera a OPC klienta dostane až do fyzikálneho modelu v Simulinku.

Kvôli jednoduchšej obsluhe tejto metódy môžu byť žiadané hodnoty zadávané priamo zo Simulinku, kde je vytvorený jednoduchý riadiaci panel. Žiadané hodnoty sa cez OPC klient a OPC server zapíšu do „DB17 REF. MATLAB“ a odtiaľ sa skopírujú do „DB15 REF.“.

2.2.2.5 Riadenie modelu z Matlabu

Stavy veličín reálnej elektrárne uložené v „DB10 REÁLNE STAVY“ sa cez OPC server a matlabovský OPC klient načítajú v Simulinku, kde sa v regulátore vypočíta

akčný zásah. Ten sa znovu pomocou OPC klienta a OPC servera uloží do „DB28 AKČNÝ ZÁSAH MATLABU“ a z neho sa skopíruje do „DB29 REÁLNY AKČNÝ ZÁSAH“. Odtiaľ sú cez Profibus a Profinet ovládané akčné členy.

2.2.3 Popis programu v PLC Simatic S7-300

2.2.3.1 Členenie hlavného programu v PLC

Hlavný program je uložený v organizačnom bloku OB1, ktorý sa vykonáva periodicky. Po ukončení tohto bloku operačný systém PLC zabezpečí jeho opätovné spustenie. Doba vykonávania jedného cyklu nie je stanovená pevne a závisí na dĺžke programu. Nesmie však prekročiť maximálny povolený čas, ktorý je prednastavený na 150 ms. Z bloku OB1 je možné volať funkčné bloky a funkcie (FB, SFB, FC, SFC).

Hlavný program pre model elektrárne je rozdelený na tri časti, každá časť je zahrnutá v rámci funkčného bloku alebo funkcie:

1. Čítanie aktuálnych dát zo senzorov, ich prepočet a uloženie do dátových blokov
2. Riadenie prepínania medzi dátovými blokmi podľa aktuálneho režimu
3. Zápis akčných zásahov do akčných členov

Podrobnejší popis jednotlivých funkcií, funkčných blokov a im patriacim dátovým blokom je uvedený v prílohe B.

2.2.3.2 Čítanie dát zo senzorov a zápis akčných zásahov

Na čítanie dát z frekvenčného meniča a zo senzorov, ktoré sú na Profibuse, sa používa systémová funkcia SFC14, ktorá uloží dáta do príslušného dátového bloku. Následne prebieha dekódovanie významu stavového slova (u frekvenčného meniča) a prevod odmeraných hodnôt na jednotky používané vo vizualizácii (pri výškach hladín sú to centimetre, pri rýchlosti čerpadla alebo polohe prop. ventilu sú to percentá). Stavy veličín, ktoré sú zaujímavé z hľadiska regulácie, sú prekopírované do jediného dátového bloku DB10.

Po vypočítaní akčného zásahu a jeho uložení do DB29 dôjde k vytvoreniu riadiaceho slova určeného pre frekvenčný menič a prepočtu žiadanej hodnoty v percentách do tvaru, aký požaduje daný akčný člen. Súčasťou prípravy dát je aj kontrola a prípadná korekcia, či daný akčný zásah je v rozmedzí 0 – 100 % (v prípade záporných hodnôt by sa napríklad mohlo čerpadlo otáčať opačným smerom, čo nie je

žiaduce). Akčný zásah v správnej podobe je potom pomocou funkcie SFC15 odoslaný po Profibuse frekvenčnému meniču.

2.2.3.3 Prepínanie režimov činnosti modelu

Jednotlivé módy alebo režimy činnosti modelu vodnej elektrárne majú odstupňované priority od najnižšej po najvyššiu:

1. Riadenie modelu z dotykového panelu (v programe označené ako „panel-mode“)
2. Riadenie modelu z Matlabu (tento režim sa bude používať hlavne vo výučbe predmetov Systémy a modely a Systémy a řízení, odtiaľ označenie „SAM-SRI-mode“)
3. Riadenie softvérového modelu v Matlabe regulátorom v PLC („PIL-mode“)

Poradie priorít je možné jednoducho zmeniť v programe PLC v bloku FB20. Model sa bude využívať hlavne v režimoch vzdialeného riadenia, preto je nutné zabezpečiť, aby náhodný okoloidúci neprevzal pomocou dotykového panelu kontrolu nad modelom v čase prebiehajúceho merania vzdialeného užívateľa. Z tohto dôvodu majú režimy „SAM-SRI-mode“ a „PIL-mode“ vyššiu prioritu ako „panel-mode“. V prípade nutnosti je však možné po zadaní administrátorského hesla na paneli získať maximálnu prioritu a ovládať model z panelu. Počas režimov „SAM-SRI-mode“ a „PIL-mode“ dôjde na paneli k prepnutiu na obrazovku, ktorá neobsahuje tlačidlá na ovládanie modelu. Administrátorské heslo je samozrejme možné zadať.

Aby došlo k prepnutiu režimu z „panel-mode“ do „SAM-SRI-mode“ alebo „PIL-mode“, je potrebné v príslušnom dátovom bloku (pre „SAM-SRI-mode“ je to DB28, pre „PIL-mode“ DB17, viď obrázok 2.2.7) nastaviť bit „enable“ do logickej jednotky. Tým sa vytvorí v programe PLC požiadavka na prepnutie do daného režimu. Aby sa zabránilo zablokovaniu modelu tým, že nebude možné sa vrátiť na nižšiu prioritu riadenia v prípade, že bit „enable“ nezmení pri ukončení práce v danom režime svoju hodnotu na logickú nulu, sú v každom cykle PLC tieto bity nulované. Požiadavka na prácu v danom režime zostáva aktívna ešte jednu sekundu. Počas tejto doby musí aplikácia znovu nastaviť daný bit, inak dôjde k vynulovaniu požiadavky. Podľa zadaných požiadaviek a hierarchie priorít sa zvolí príslušný režim ovládania. Na základe aktívneho módu potom prebieha kopírovanie medzi príslušnými dátovými blokmi, ktoré je popísané v kapitole 2.2.2.

3 Konfigurácia OPC komunikácie

Nasledujúca kapitola popisuje spôsob vytvorenia a spustenia OPC servera, konfiguráciu OPC klienta a nastavenia DCOM komunikácie v prípade, ak server a klient bežia na rozličných počítačoch.

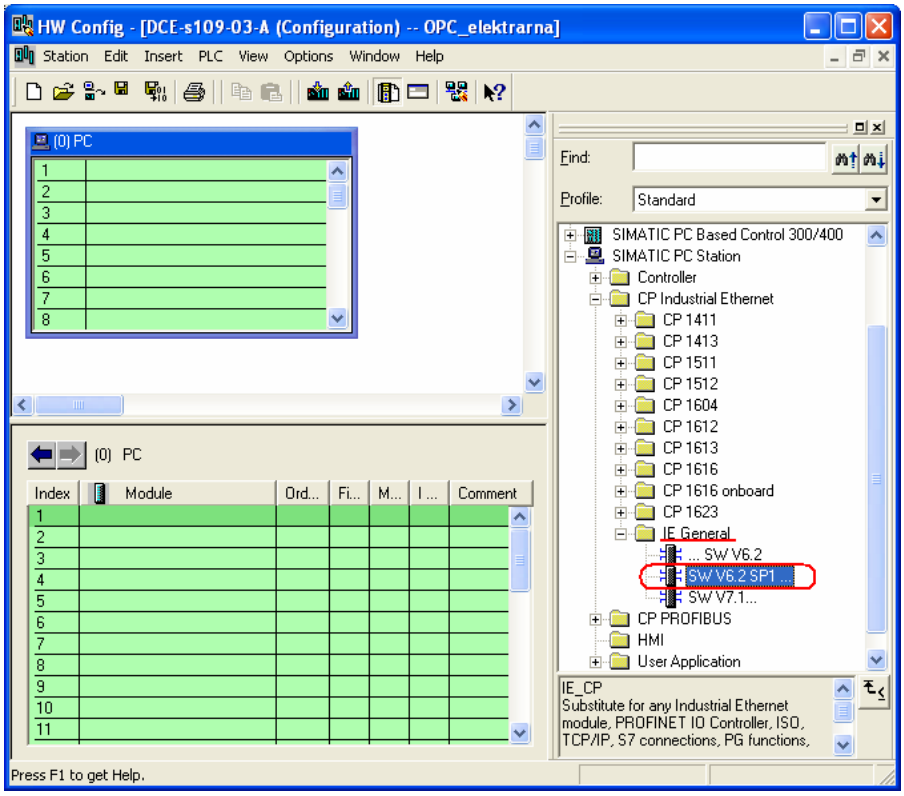
3.1 Konfigurácia OPC servera

Ako server bol použitý SIMATIC NET[1] OPC Server od Siemensu, ktorý je súčasťou softvérového balíčka STEP 7, slúžiaceho na vytváranie projektov pre automaty S7-300 a S7-400. OPC server bol založený ako samostatný projekt pridružený k projektu pre SIMATIC S7-300, ktorý riadi celý model elektrárne. Výhodou tohto riešenia je, že nie je nutné zasahovať do projektu pre automat s riadiacim systémom. S tým je spojená možnosť otestovať jeho program v pôvodnom stave. Dokonca ani nie je nutné mať pri sebe zdrojové kódy tohto projektu, postačuje iba poznať základné hardvérové zapojenie vrátane adresy PLC a rozpis a umiestnenie veličín v dátových blokoch. OPC server bol založený na jednom z počítačov v učebni, kde sa nachádza model elektrárne, a komunikuje s automatom po ethernete. V budúcnosti sa uvažuje o presunutí tohto servera na počítač, ktorý bude trvalo v činnosti a nebude na ňom prebiehať výučba iných predmetov. V nasledujúcich odsekoch bude opísaný postup založenia a konfigurácie OPC servera a komunikácie S7 Connection cez Ethernet. Postup je inšpirovaný návodom od spoločnosti Siemens [9] a navyše je doplnený o chýbajúce kroky a postrehy, ktoré pomôžu predísť prípadným problémom.

---

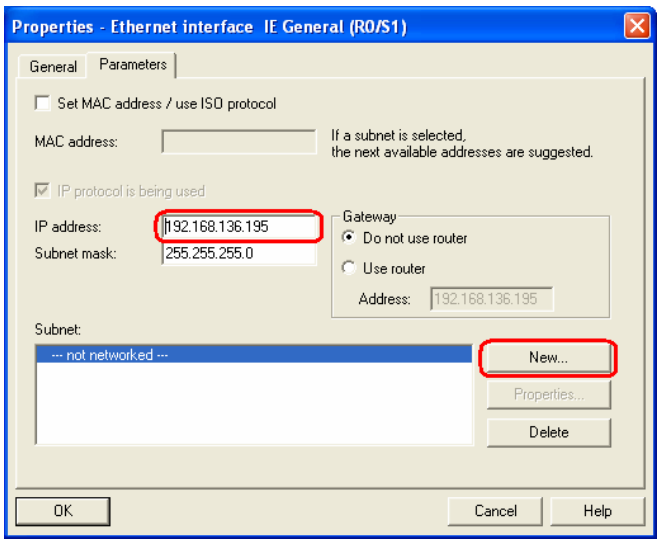
[1] SIMATIC NET – Siemens Network and Communication. Produktové meno pre siete a sieťové komponenty spoločnosti Siemens

V Simatic Manageri založíme nový projekt pomocou „File -> New“, pomenujeme ho a potvrdíme tlačidlom OK. Do projektu vložíme počítačovú stanicu, na ktorej bude bežať server: „Insert -> Station -> SIMATIC PC Station“. Práve vloženú počítačovú stanicu je nutné premenovať. Musí mať rovnaké meno, ako je názov počítača, na ktorom bude pracovať server (v našom prípade názov lokálneho počítača). Kliknutím na počítačovú stanicu pravým tlačidlom myši a výberom položky „Open Object“ otvoríme hardvérovú konfiguráciu. Z hardvérového katalógu pretiahneme do racku na ľubovoľné miesto IE General modul. Konfigurácia bola vyskúšaná a funguje s modulom SW V6.2 SP1.



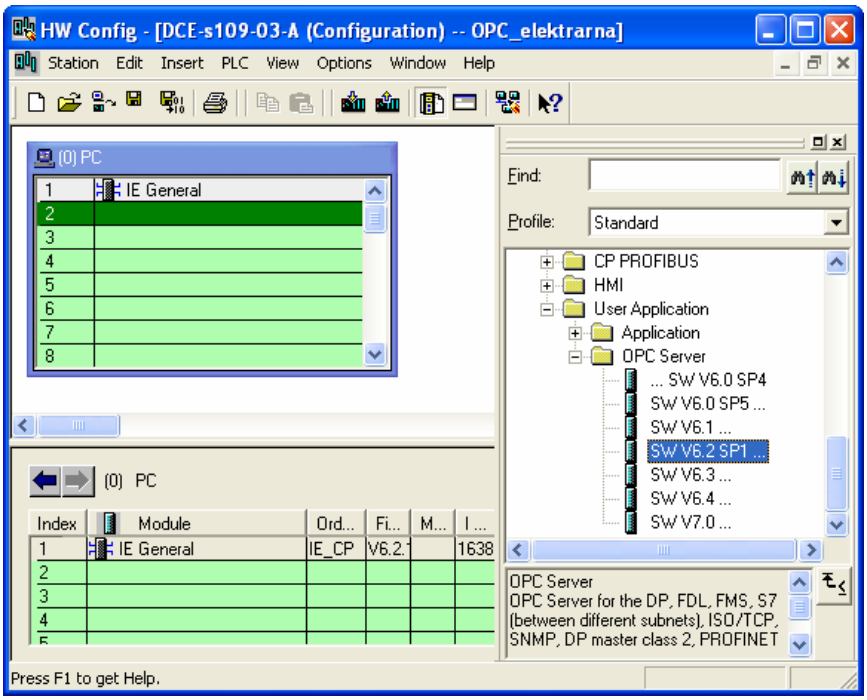
Obr. 3.1.1 – Vloženie IE General modulu do hardvérovej konfigurácie

Po vložení modulu do počítačovej stanice sa zobrazí nasledujúci dialóg, v ktorom zadáme IP adresu počítača, na ktorom pobeží server (teda IP adresu počítačovej stanice). Stlačením tlačidla „New“ a následne „OK“ vytvoríme novú sieť Ethernet. Celý dialóg uzavrieme tlačidlom „OK“.



Obr. 3.1.2 – Nastavenie IP adresy počítačovej stanice

Z hardvérového katalógu vložíme do počítačovej stanice OPC server. V našom prípade bola vyskúšaná verzia SW V6.2 SP1. Novšie verzie síce katalóg ponúkal, v počítači však neboli nainštalované.

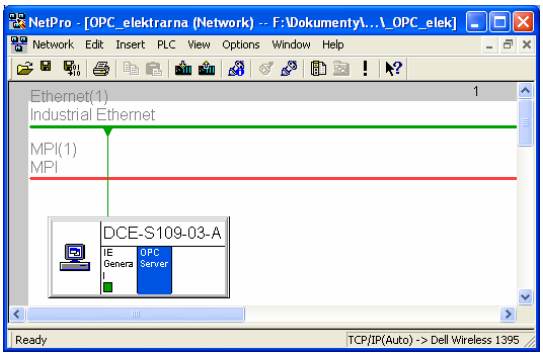


Obr. 3.1.3 – Vloženie OPC Servera do hardvérovej konfigurácie

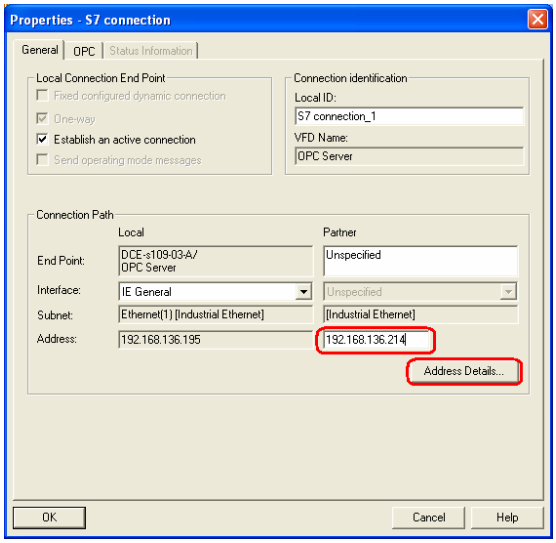
V tomto okamihu je potrebné projekt uložiť a preložiť a následne spustiť NetPro. K tomu je možné použiť napríklad aj ikonky podľa obrázku 3.1.4.

Obr. 3.1.4 – Uloženie, preloženie projektu a spustenie aplikácie NetPro

Zobrazí sa nasledujúca obrazovka, kde sa nachádza blok počítačovej stanice s OPC serverom pripojený na Ethernet. V rámci bloku je nutné kliknutím vyznačiť obdĺžnik „OPC Server“, podobne ako je to na nasledujúcom obrázku, a cez horné menu vložiť nové spojenie: „Insert -> New Connection“. Z ponuky typu spojení vyberieme „S7 connection“, partnera na pripojenie necháme nešpecifikovaného (Unspecified) a potvrdíme tlačidlom „OK“. Automaticky sa zobrazí dialóg na obrázku 3.1.6, v ktorom sa nastavujú údaje o pripojenom partnerovi, teda PLC. Je potrebné vyplniť IP adresu automatu.

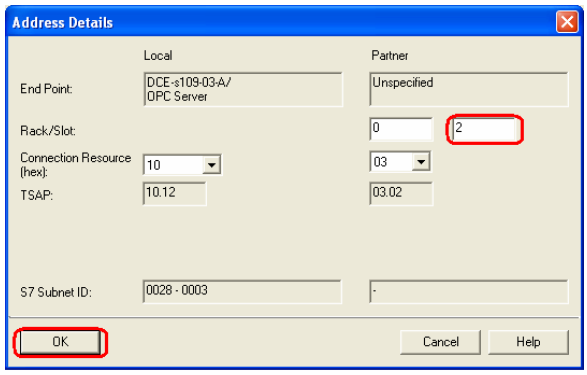


Obr. 3.1.5 – Blok počítačovej stanice v aplikácii NetPro



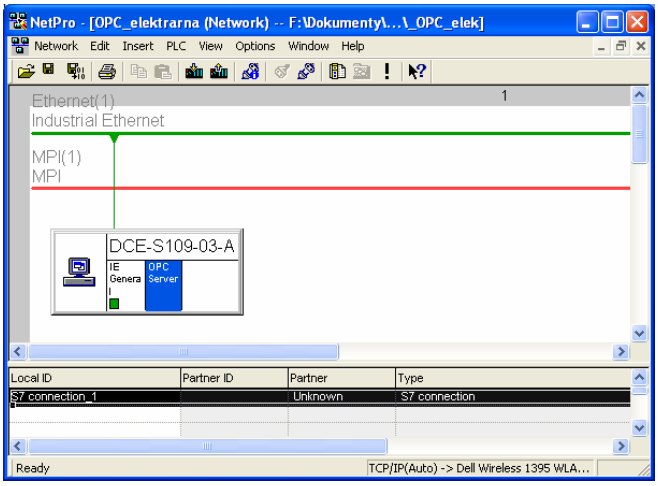
Obr. 3.1.6 – Nastavenie IP adresy PLC ako OPC partnera

Kliknutím na tlačidlo „Address Details...“ sa objaví dialóg podobný obrázku 3.1.7. Do vyznačeného políčka je potrebné uviesť slot, v ktorom sa nachádza procesor automatu. Ten je možné nájsť v hardvérovej konfigurácii projektu, väčšinou to býva druhý slot.



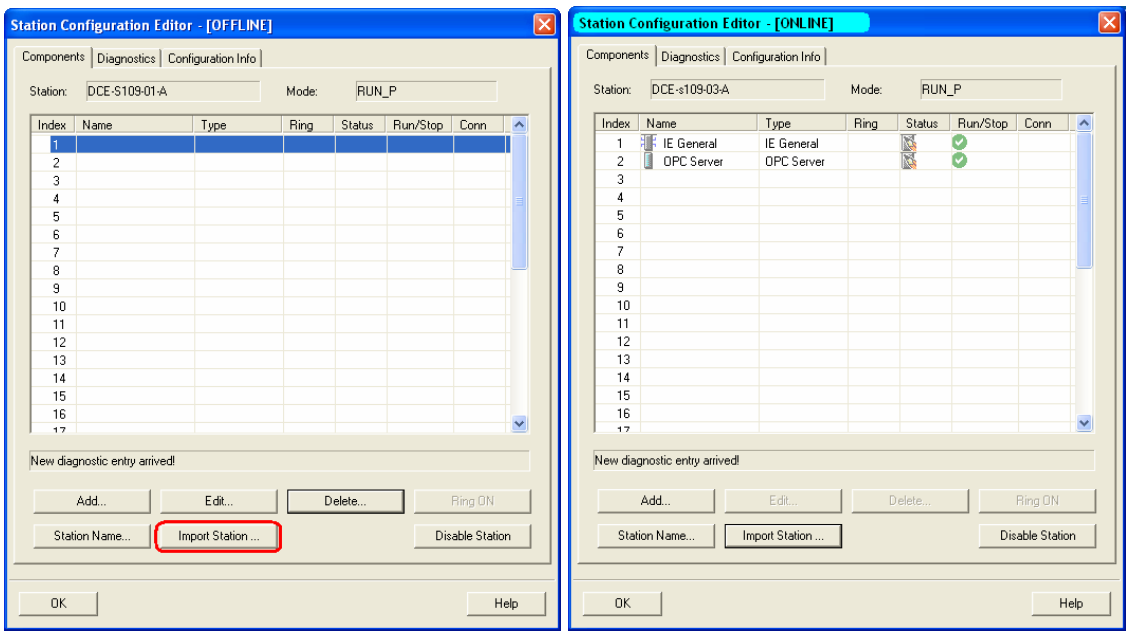
Obr. 3.1.7 – Nastavenie slotu, v ktorom sa nachádza procesor PLC

Po potvrdení oboch okien a ukončení dialógu sa S7 Connection objaví v tabuľke spojení pod blokom počítačovej stanice. Uložíme a preložíme projekt.



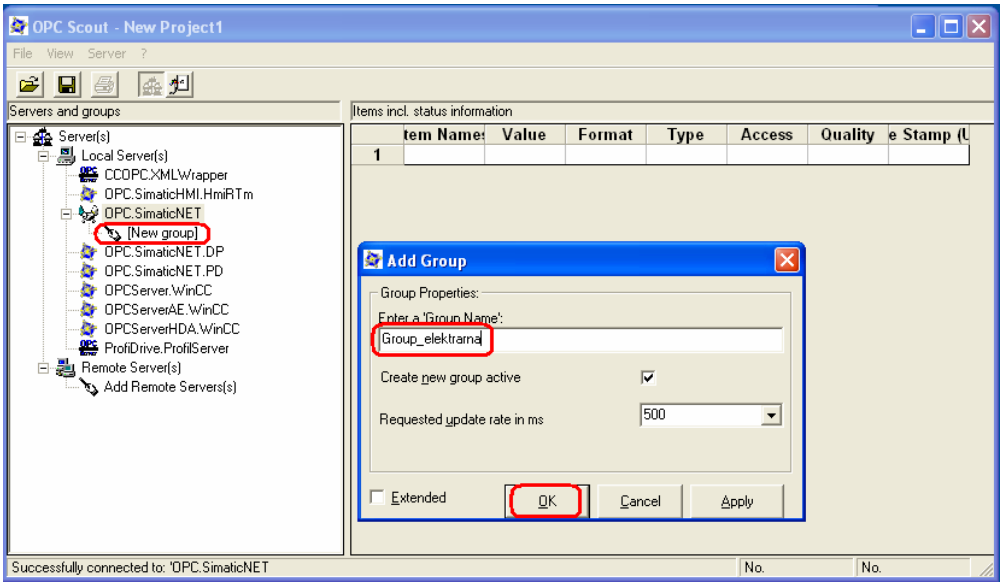
Obr. 3.1.8 – Obrazovka aplikácie NetPro po úspešnom pridaní S7 Connection

Nasleduje vlastné spustenie OPC serveru. Otvoríme „Station Configurator Editor“. Kliknutím na tlačidlo „Import Station...“ a následným potvrdením „Yes“ výstražného hlásenia vyhľadáme v projektovom adresári v zložke XDBs súbor pcst_1.xdb. Po nahraní konfigurácie a ukončení dialógu sa môžeme presvedčiť, že OPC server je spustený (zelené značky v stĺpci Run/Stop podobne ako na obrázku 3.1.9 vpravo).

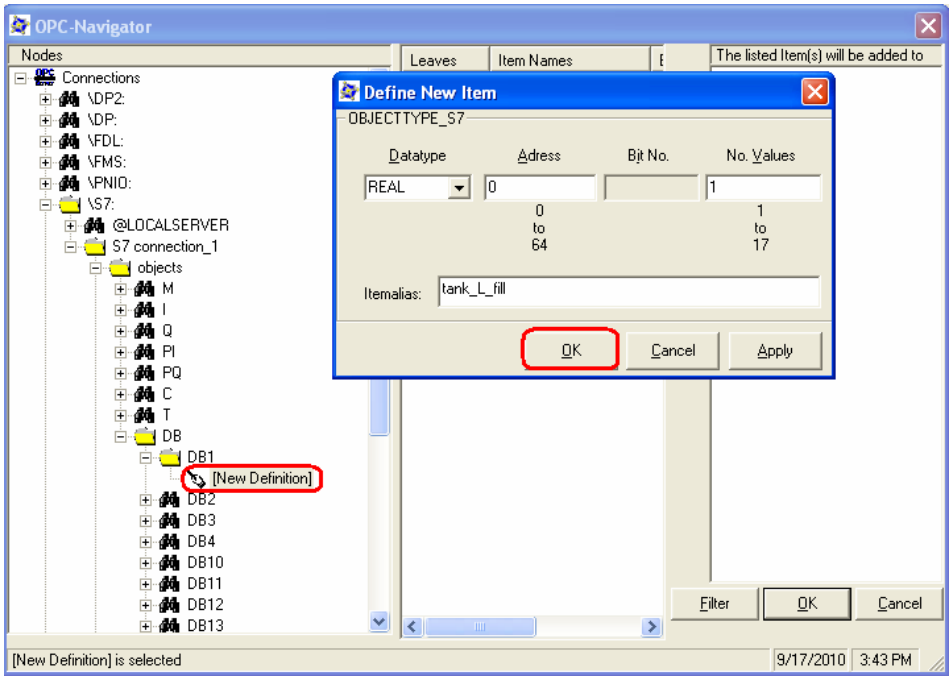


Obr. 3.1.9 – Station Configurator Editor pred (vľavo) a po (vpravo) spustení OPC serveru

Ďalej je potrebné nakonfigurovať, ktoré dátové položky v PLC bude server poskytovať svojim klientom. Slúži na to aplikácia OPC Scout (Start -> SIMATIC -> SIMATIC NET -> OPC Scout). V zozname OPC serverov, ktoré môže podporovať aplikácia, vyhľadáme náš, s názvom OPC.SimaticNET. Po vytvorení a pomenovaní novej skupiny (obrázok 3.1.10) môžeme pokračovať definovaním položiek poskytovaných serverom. Ako nájdeme položky z dátových blokov automatu, ukazuje obrázok 3.1.11.



Obr. 3.1.10 – Vytvorenie novej skupiny položiek v programe OPC Scout



Obr. 3.1.11 – Definovanie tagov dátových blokov PLC v programe OPC Scout

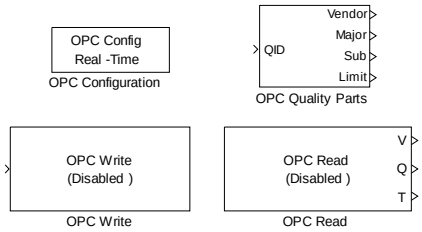
3.2 Konfigurácia OPC klienta

Ako OPC klient bol použitý OPC Toolbox, ktorý je súčasťou Matlabu (použitá verzia: Matlab R2007b Full Release). Je to súbor funkcií rozširujúcich možností prostredia Matlab a blokov rozširujúcich Simulink. Pomocou OPC Toolboxu možno prenášať OPC dáta v reálnom čase priamo do Matlabu a Simulinku a naopak, zapisovať dáta priamo z Matlabu alebo Simulinku na OPC server.

V rámci Simulinku obsahuje OPC Toolbox iba 4 bločky, a to:

- OPC Configuration (nastavenie serveru a tagov)
- OPC Read (čítanie dát zo serveru)
- OPC Write (zápis na server)
- OPC Quality Parts (kvalita pripojenia)

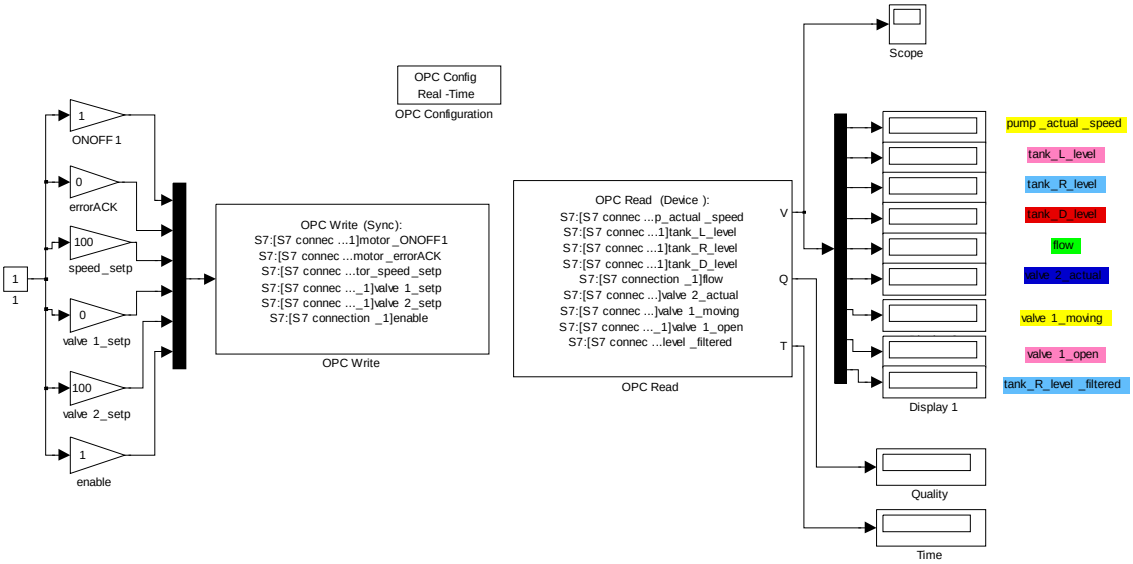
Pomocou prvých troch bločkov možno teda prostredníctvom OPC servera získavať aktuálne hodnoty z PLC a zároveň zapisovať dáta do dátových blokov a tým ovládať model elektrárne.



Obr. 3.2.1 – Bloky OPC Toolboxu v Simulinku

Konfigurácia OPC klienta je jednoduchá a intuitívna. V bloku OPC Configuration nastavíme IP adresu počítača, na ktorom beží server (v prípade, že server beží na rovnakom počítači ako klient, je možné zadať aj slovo „localhost“). Zo zoznamu OPC serverov vyberieme „OPC.SimaticNET“. Pokiaľ server funguje správne a nachádza sa na rovnakom počítači ako klient, predchádzajúci postup prebehne bez problémov. V prípade, že server a klient sú na rôznych počítačoch, vo väčšine prípadov dôjde k chybovému hláseniu „Error using ==> opcmex“ a spojenie nie je nadviazané. Riešením je správne nastaviť DCOM konfiguráciu počítača, na ktorom pracuje server a zladiť užívateľské mená a heslá na oboch počítačoch. Konfiguráciou DCOM sa zaoberá nasledujúca kapitola.

V bločkoch OPC Write a OPC Read najprv vyberieme správny OPC server (pravdepodobne už bude prednastavený vďaka úspešnej konfigurácii v bloku OPC Configuration) a kliknutím na tlačidlo „Add Items...“ pridáme zo zoznamu všetky položky, s ktorými budeme pracovať v rámci Simulinku.



Obr. 3.2.2 – Schéma v Simulinku komunikujúca s modelom elektrárne pomocou OPC

3.3 Konfigurácia DCOM nastavení

Nasledujúca kapitola popisuje všetky potrebné nastavenia, ktoré je treba urobiť v prípade, ak OPC server beží na inom počítači ako OPC klient. Nastavenia vychádzajú z postupu uvedeného v [7].

3.3.1 COM a DCOM

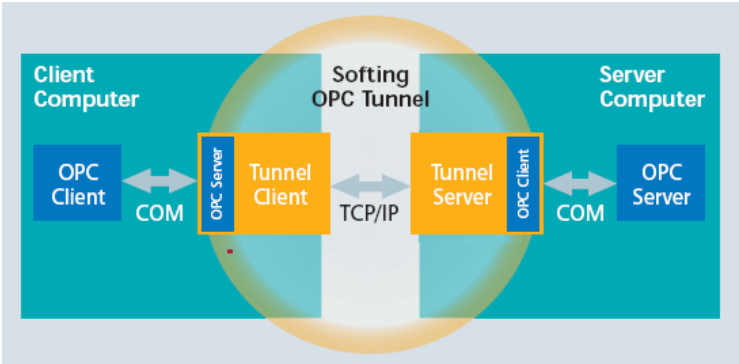
COM (Component Object Model) je technológia spoločnosti Microsoft, ktorá umožňuje softvérovým komponentom Windowsu (súbory DLL) a spustiteľným aplikáciám (súbory EXE) navzájom komunikovať v rámci rovnakého užívateľského účtu.

DCOM (Distributed Component Object Model) je technológia, ktorá na rozdiel od COM umožňuje komponentom Windowsu (súbory DLL) a spustiteľným aplikáciám (súbory EXE) navzájom komunikovať medzi dvoma užívateľskými účtami na dvoch rôznych počítačoch. COM je rýchlejší ako DCOM. Microsoft vyvinul DCOM pre lokálnu sieť typu LAN. Predpokladom veľmi dobrého fungovania DCOM sú rovnaké domény, žiaden firewall, široké prenosové pásmo a spoľahlivá komunikácia [6].

OPC komunikácia závisí na COM aj DCOM. Aby správne fungovala, oba počítače musia zdieľať spoločné bezpečnostné nastavenie tak, aby obe aplikácie (server aj klient) mali garantované nevyhnutné práva na to, aby mohli medzi sebou komunikovať.

3.3.2 OPC Tunneling

Problémom s nastaveniam COM a DCOM je možné sa vyhnúť použitím tzv. tunnelingu. Na oba počítače sa nainštaluje program OPC Tunneler (úspešne bol vyskúšaný softvér Matrikon OPC Tunneler dostupný na stránkach www.matrikonopc.com). Prenos dát medzi počítačmi sa uskutočňuje pomocou TCP/IP, DCOM sa obchádza a teda nie je nutné jeho pracné nastavovanie. V Matlabe pri konfigurácii OPC klienta sa nezadáva IP adresa vzdialeného počítača so serverom, ale ako server sa zvolí OPC Tunneler pracujúci pod localhostom. OPC komunikácia a tunneling sa navzájom nevylučujú, môžu pracovať súčasne na jednom počítači. Tunneling dokonca môže zvýšiť výkon prenosu. Nevýhodou tohto usporiadania je relatívne vysoká cena tohto programu.



Obr. 3.3.1 – OPC komunikácia pomocou tunnelingu (obázok prevzatý z www.foxon.cz)

3.3.3 DCOM konfigurácia

DCOM konfigurácia pozostáva z 5 krokov:

1. Odstránenie zabezpečenia Windowsu
2. Nastavenie vzájomného rozpoznávania užívateľských účtov
3. Konfigurácia systémových DCOM nastavení
4. Konfigurácia DCOM nastavení serveru
5. Obnovenie zabezpečenia Windowsu

3.3.3.1 Odstránenie zabezpečenia Windowsu

Prvým krokom pri konfigurácii DCOM komunikácie je vypnutie Firewallu. Firewall pomáha chrániť počítač pred neautorizovaným prístupom. Po ukončení DCOM nastavení dôjde k opätovnému spusteniu Firewallu.

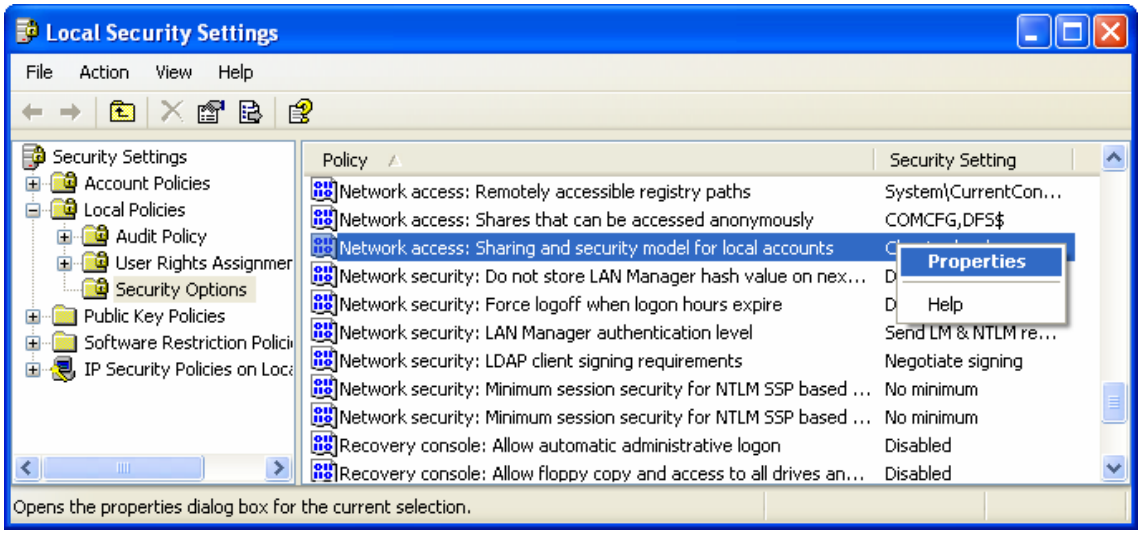
3.3.3.2 Nastavenie vzájomného rozpoznávania užívateľských účtov

Je potrebné, aby všetky počítače, ktorých sa týka OPC komunikácia, mali užívateľský účet s rovnakým menom a heslom. Zároveň OPC klient by mal komunikovať pod týmto užívateľským účtom. Nasledujúce nastavenia stačí urobiť na počítači, na ktorom beží server.

V operačnom systéme Windows XP Professional je implicitne nastavené tzv. zjednodušené zdieľanie súborov, ktoré núti každého vzdialeného užívateľa autentifikovať sa ako užívateľský účet Hosť, čo neumožňuje zriadiť komunikáciu so správnou mierou bezpečnosti. Existujú dve možnosti, ako je to možné vypnúť:

1. **Vypnutie zjednodušeného zdieľania súborov:** dvojklikom otvoríme „My Computer“, v menu „Tools“ vyberieme „Folder Options“ a na záložke „View“ odznačíme položku „Use simple File Sharing (Recommended)“.

2. **Nastavenie miestnych zásad zabezpečenia:** v „Ovládacích paneloch“ otvoríme „Nástroje pre správu“ a v nich „Miestne zásady zabezpečenia“ (Start -> Control Panel -> Administrative Tools -> Local Security Policy), prípadne v príkazovom riadku napíšeme „secpol.msc“. V zozname pod zložkou „Miestne zásady“ (Local Policies) otvoríme „Možnosti zabezpečenia“ (Security Options). Nájdeme „Prístup k sieti: Model zdieľania a zabezpečenia miestnych účtov“ a vo vlastnostiach nastavíme možnosť „Klasický – miestni užívatelia sú overovaní ako oni sami“ (Classic – local user authenticate as themselves).

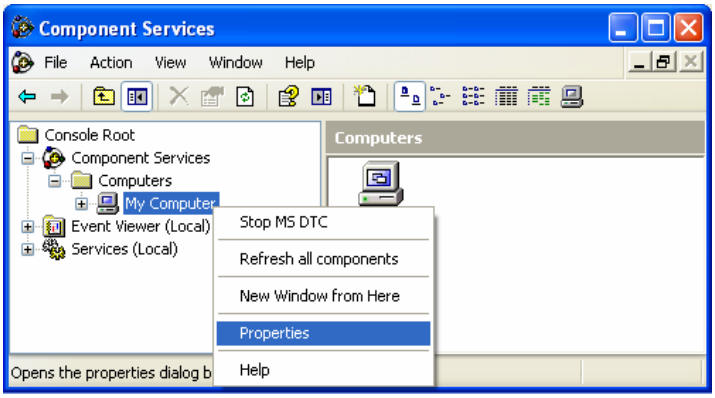


Obr. 3.3.2 – Nastavenie OPC bezpečnosti, ktoré povoľuje lokálnym užívateľom overovať sa ako oni sami, čo je bezpečnejšie oproti autentifikovaniu ako hosť.

3.3.3.3 Konfigurácia systémových DCOM nastavení

Systémové DCOM nastavenia ovplyvnia všetky aplikácie vo Windowse, ktoré používajú DCOM, vrátane OPC aplikácií. Aj keď OPC aplikácie typu klient nemajú vlastné DCOM nastavenia, sú ovplyvnené všeobecnými systémovými nastaveniami.

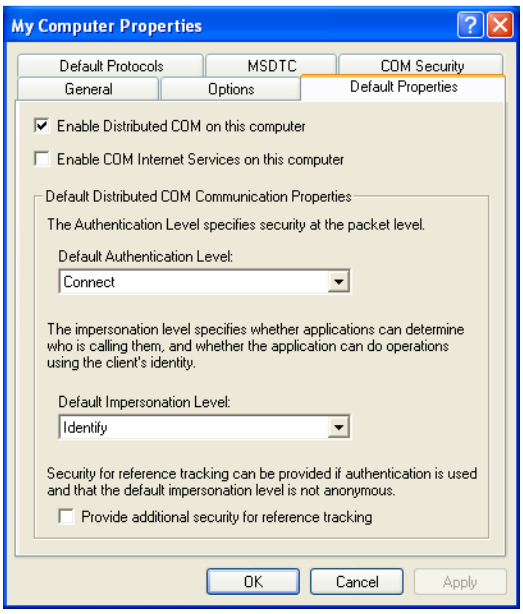
V „Ovládacích paneloch“ otvoríme „Nástroje pre správu“ a v nich „Služba Component Services“, prípadne v príkazovom riadku napíšeme „dcomcnfg“. Podľa obrázku 3.3.3 pohľadáme „Tento počítač“ a otvoríme jeho vlastnosti.



Obr. 3.3.3 – Cesta k východzím DCOM nastaveniam počítača

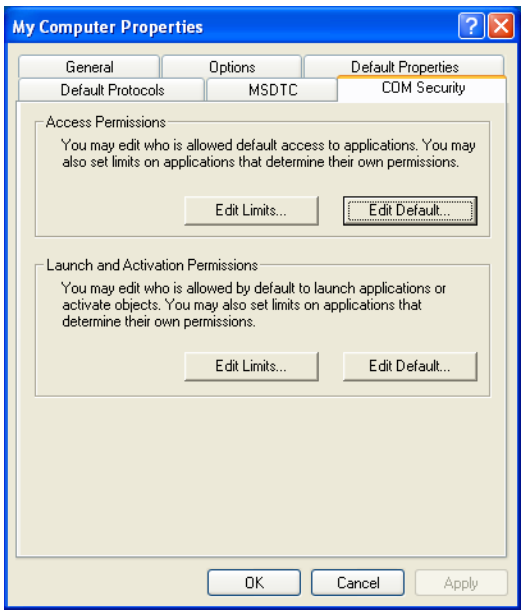
Je potrebné urobiť nasledujúce nastavenia:

- Vo východzích nastaveniach (obrázok 3.3.4) povolíme používanie DCOM objektov v počítači (pri zmene tejto položky je nutné reštartovať systém, aby sa uplatnili zmeny).
- Východziu úroveň šifrovania nastavíme na „Connect“. Je možné použiť aj iné možnosti z tohto rozbaľovacieho menu, možnosť „Connect“ však predstavuje minimálnu úroveň zabezpečenia. K autentifikácii dochádza iba ak sa klient pokúša o nadviazanie spojenia so serverom.
- Východziu úroveň zosobnenia nastavíme na „Identify“.



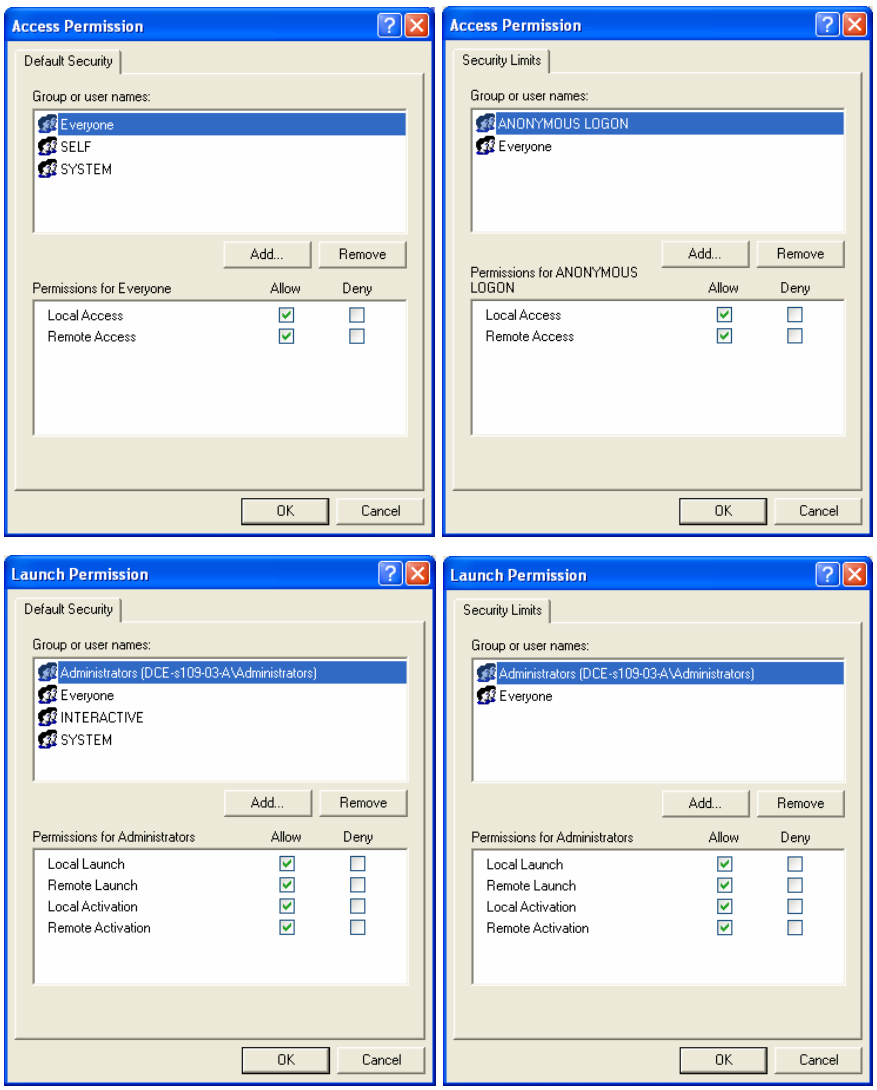
Obr. 3.3.4 – Nastavenie východzích vlastností DCOM

Na záložke COM zabezpečenia (COM Security) sa v hornej polovici nastavuje zoznam užívateľov (Access Control List – ACL), ktorí môžu používať COM aplikácie, v spodnej časti ide o zoznam užívateľov, ktorí môžu spustiť novú COM aplikáciu.



Obr. 3.3.5 – Záložka zabezpečenia umožňujúca nastaviť zoznam užívateľov využívajúcich COM

- **Prístupové oprávnenia – východzie zabezpečenie:** pridáme užívateľa „Everyone“ a každému užívateľovi alebo skupine zo zoznamu, ktorí sa podieľajú na OPC komunikácii, povolíme obe položky (miestny prístup a vzdialený prístup).
- **Prístupové oprávnenia – obmedzenie zabezpečenia:** pridáme do zoznamu „Everyone“ a „Anonymous Logon“ a obom povolíme obe položky (miestny prístup a vzdialený prístup).
- **Spúšťacie a aktivačné oprávnenia – východzie zabezpečenie:** pridáme užívateľa „Everyone“ a každému užívateľovi alebo skupine zo zoznamu, ktorí sa podieľajú na OPC komunikácii, povolíme všetky štyri položky (miestne spustenie, vzdialené spustenie, miestna aktivácia a vzdialená aktivácia).
- **Spúšťacie a aktivačné oprávnenia – obmedzenie zabezpečenia:** rovnako ako v predchádzajúcom kroku vo východzom zabezpečení.

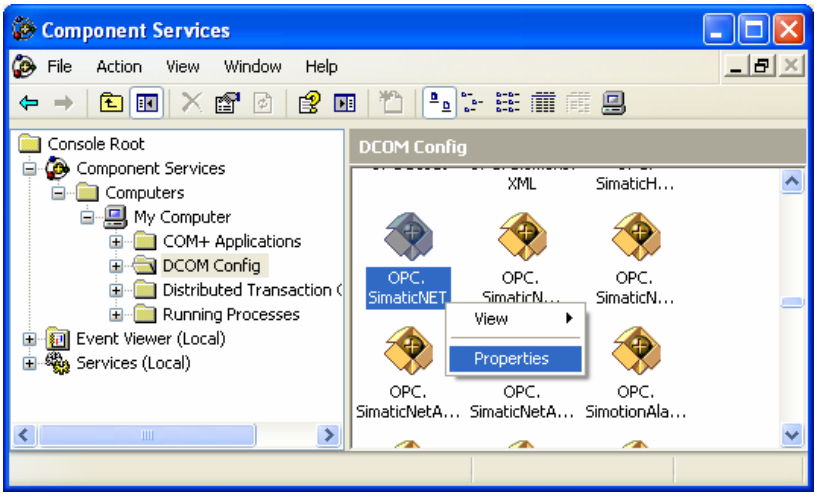


Obr. 3.3.6 – Nastavenia zabezpečenia COM

3.3.3.4 Konfigurácia DCOM nastavení serveru

Nastavenia sa týkajú iba OPC servera a teda sa môžu mierne líšiť v závislosti od jeho typu. V nasledujúcich odsekoch je uvedený postup nastavenia OPC.SimaticNET serveru.

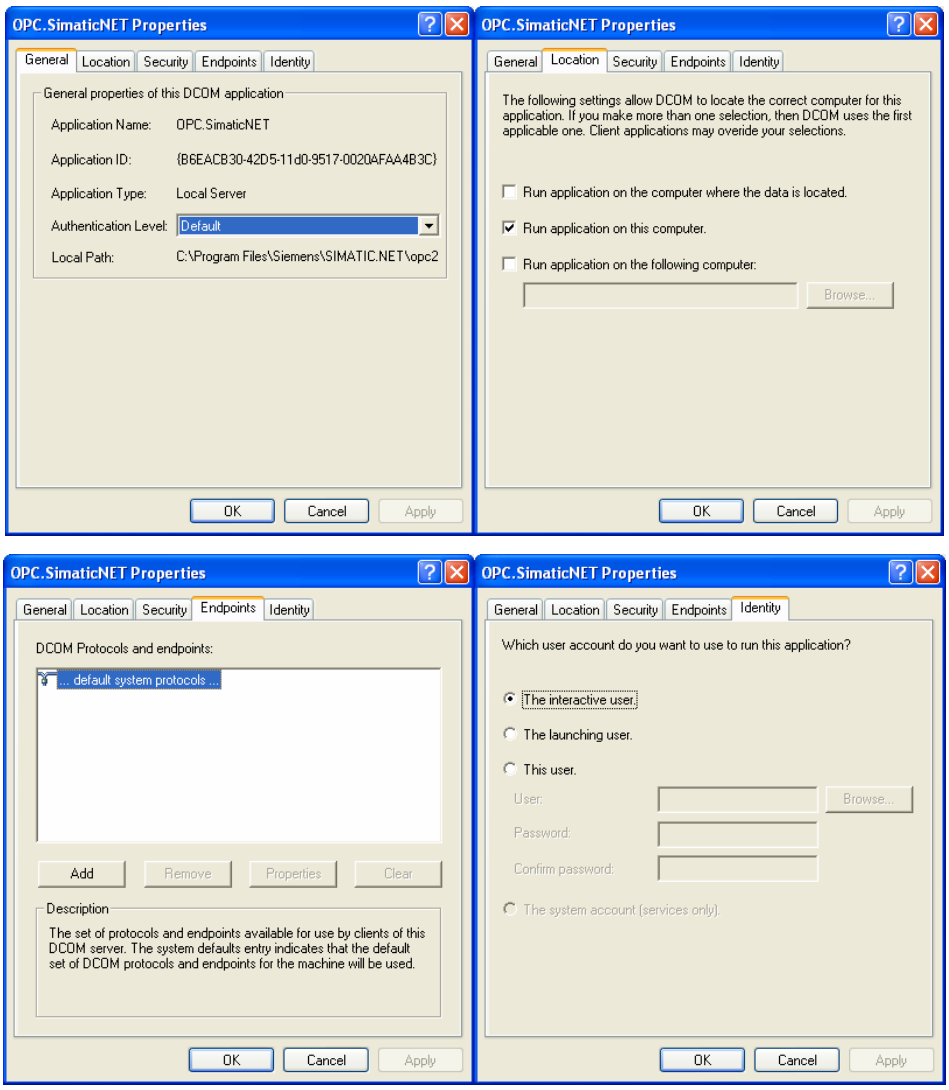
V „Ovládacích paneloch“ otvoríme „Nástroje pre správu“ a v nich „Služba Component Services“, prípadne v príkazovom riadku napíšeme „dcomcnfg“. Podobne ako ukazuje obrázok 3.3.7 nájdeme v zozname náš OPC server a otvoríme jeho vlastnosti.



Obr. 3.3.7 – DCOM nastavenia OPC serveru

Vo vlastnostiach OPC serveru stačí skontrolovať nastavenia na nasledujúcich troch záložkách, na ostatných možno ponechať východzie nastavenia.

- V záložke „Všeobecné“ (General) úroveň overovania nastavíme na „Východzia“ (Default)
- V záložke „Umiestnenie“ (Location) zašktneme „Spúšťať aplikáciu v tomto počítači“ (Run application on this computer)
- V záložke „Identita“ (Identity) sa odporúča nastaviť poslednú možnosť „Systémový účet“ (The system account). OPC server tak má identitu operačného systému (skrátene SYSTEM), spustí sa ihneď po štarte a na počítači nemusí byť prihlásený žiaden užívateľ. Windows však zakazuje túto možnosť (ako je to aj v našom prípade), ak OPC server nie je nastavený ako služba systému Windows. V tom prípade môžeme zvoliť prvú možnosť „Interaktívny užívateľ“ (The interactive user), čo má za následok, že OPC server príjme identitu interaktívneho užívateľa, t.j. užívateľa, ktorý je práve prihlásený. Pokiaľ nikto nie je na počítači prihlásený, server nebeží, rovnako po odhlásení užívateľa server ukončí svoju činnosť.



Obr. 3.3.8 – DCOM nastavenia OPC serveru

3.3.3.5 Obnovenie zabezpečenia Windowsu

Po úspešnej konfigurácii komunikácie OPC server – OPC klient je možné obnoviť činnosť Firewallu. Bolo však pozorované, že pred nadviazaním spojenia OPC Toolboxu s OPC serverom bolo nutné Firewall vypnúť. Po nadviazaní spojenia bolo možné Firewall opätovne zapnúť a na ďalšiu komunikáciu už nemal vplyv.

4 Analýza a riadenie reálneho modelu

4.1 Fyzikálny popis systému

Fyzikálny systém tvoria tri nádoby spojené potrubiami a ventilmi. Pre výšku hladiny v jednej nádrži môžeme napísať vzťah:

$$\frac{dV}{dt} = S\frac{dh}{dt} = q_{\mathrm{i}} - q_{\mathrm{o}} \tag{4.1}$$

kde:

V objem kvapaliny v nádrži [m^3]

S plocha prierezu nádrže [m^2]

h výška kvapaliny v nádrži [m]

q_{i} objemový prítok do nádrže [m^{3}s^{-1}]

q_{o} objemový odtok z nádrže [m^{3}s^{-1}]

Pre systém ako celok môžeme potom napísať vzťahy:

$$S_L\frac{dh_L}{dt} = Q_L - Q_{LR} - Q_{LD} \tag{4.2}$$

$$S_R\frac{dh_R}{dt} = Q_{LR} - Q_R \tag{4.3}$$

$$S_D\frac{dh_D}{dt} = Q_R - Q_L + Q_{LD} \tag{4.4}$$

kde:

S_L, S_R, S_D plochy dna nádrží [m^2]

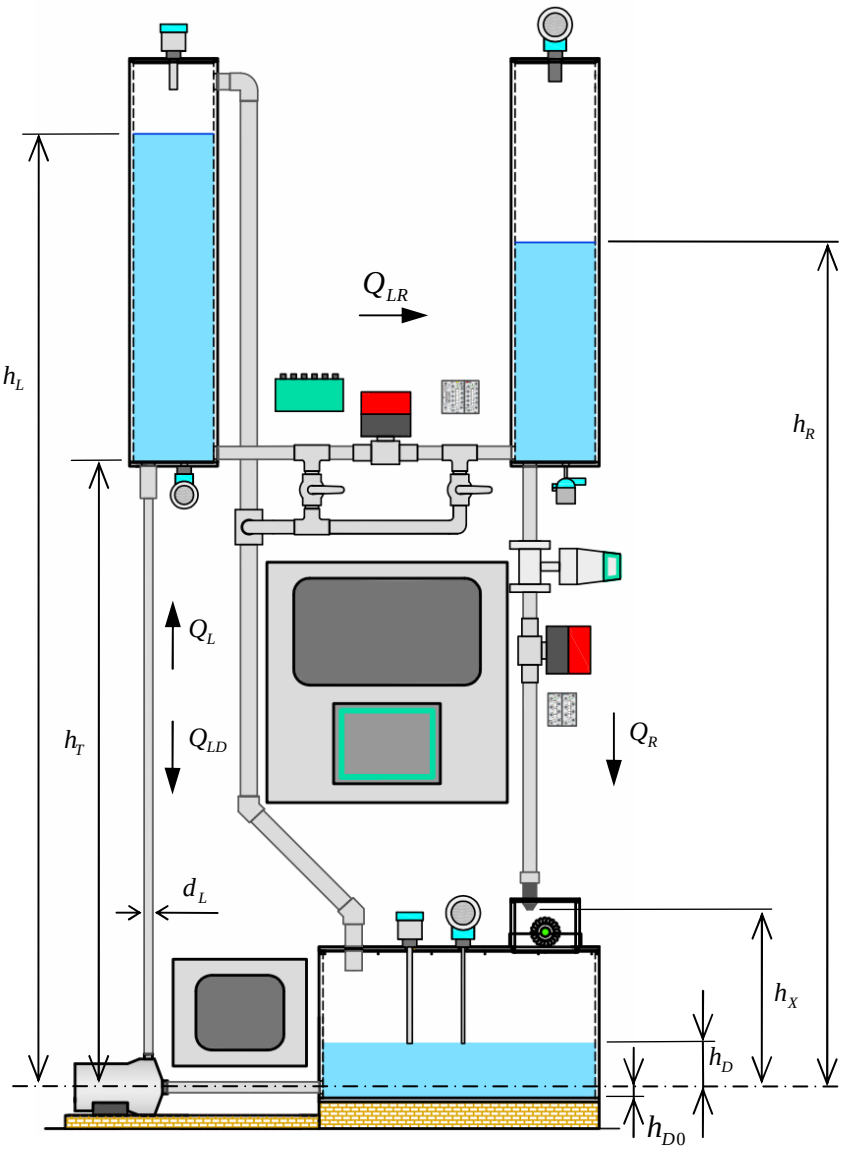
h_L, h_R, h_D výška kvapaliny v ľavej, pravej a dolnej nádrži meraných od úrovne vstupu do čerpadla [m]

Q_L prietok do ľavej nádrže zo spodnej čerpaním [$m^3.s^{-1}$]

Q_{LR} prietok z ľavej nádrže do pravej v prípade otvoreného on/off ventilu [$m^3.s^{-1}$]

Q_{LD} prietok z ľavej nádrže do spodnej v prípade, že je čerpadlo vypnuté (prietok cez čerpadlo) [$m^3.s^{-1}$]

Q_R prietok z pravej nádrže do dolnej, výtok na turbínu [$m^3.s^{-1}$]



Obr. 4.1.1 – Schematický náčrtok modelu s popisom výšok a prietokov

V matematickom modeli uvažujeme aj s trubkou, ktorá privádza vodu z čerpadla do ľavej nádrže. Pre plochu S_L preto platia tieto vzťahy:

$$\begin{aligned} S_L &= \frac{\pi d_L^2}{4} \quad \Leftrightarrow \quad h_L < h_T \\ S_L &= a.b \quad \Leftrightarrow \quad h_L \geq h_T \end{aligned} \tag{4.5}$$

kde:

d_L priemer trubky medzi čerpadlom a ľavou nádržou [m]

a, b rozmery dna ľavej nádrže [m]

h_T vzdialenosť medzi osou čerpadla a dnom ľavej nádrže [m]

Zároveň je potrebné rozlišovať situáciu, či je čerpadlo v činnosti alebo stojí. Na trubke spájajúcej čerpadlo a ľavú nádrž nie je nainštalovaná spätná klapka, ktorá by bránila odtoku vody cez čerpadlo naspäť do spodnej nádrže, keď je čerpadlo vypnuté. V prípade, že čerpadlo beží, priteká do ľavej nádrže zo spodnej prietok Q_L. Ak je čerpadlo vypnuté, vyteká voda z ľavej nádrže do spodnej prietokom Q_{LD}.

$$\begin{aligned} &Q_{LD} > 0 \quad \text{a zároveň} \quad Q_L = 0 \quad \Leftrightarrow \quad n = 0 \\ &Q_{LD} = 0 \quad \text{a zároveň} \quad Q_L > 0 \quad \Leftrightarrow \quad n > 0 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Odstredivé čerpadlo je v sústave zdrojom tlaku, ktorý závisí od druhej mocniny otáčok. Nárast tlaku Δp spôsobený čerpadlom môžeme podľa [10] vyjadriť vzťahom:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 2\rho\pi^2 n^2 \left(R^2 - r^2\right) \\ \Delta p &= K_P \rho n^2 \end{aligned} \tag{4.7}$$

kde:

ρ hustota vody [kg.m^{-3}]

r polomer vstupu do rotora [m]

R polomer výstupu z rotora [m]

n otáčky čerpadla [s^{-1}]

V nasledujúcich výpočtoch zahrnieme všetky konštanty okrem hustoty vody do jedinej K_P a otáčky čerpadla n budeme uvádzať ako podiel menovitých otáčok v percentách.

Z Bernoulliho rovnice odvodíme vzťah pre veľkosť prítoku do ľavej nádrže. Ľavá strana vyjadruje pôsobenie čerpadla spolu s hydrostatickým tlakom vody v dolnej nádrži s výškou h_D (ide o bod teste za čerpadlom), pravá strana vyjadruje energiu v bode na vtoku do ľavej hornej nádrže. Pri prúdení kvapaliny cez rôzne prekážky (ohyb, ventil, atď.) dochádza k rozvíreniu prúdu, čo má vplyv na stratu energie a na pokles tlaku. Všetky tieto straty môžeme vyjadriť členom $\frac{1}{2}\rho\xi_L v_L^2$ [11].

$$p_a + \rho h_D g + \Delta p + \frac{1}{2}\rho v_D^2 = p_a + \rho(h_L - h_T)g + \rho h_T g + \frac{1}{2}\rho v_L^2 + \frac{1}{2}\rho\xi_L v_L^2 \qquad (4.8)$$

$$v_D << v_L$$

kde:

p_a atmosférický tlak [Pa]

v_D rýchlosť zmeny hladiny v dolnej nádrži [ms^{-1}]

v_L rýchlosť zmeny hladiny v ľavej hornej nádrži [ms^{-1}]

ξ_L súčiniteľ hydrodynamického odporu [-]

Dosadením a úpravou dostaneme vzťah pre rýchlosť vody vtekajúcej do ľavej hornej nádrže:

$$v_L = \sqrt{\frac{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)}{1+\xi_L}} \qquad (4.9)$$

Vynásobením tejto rýchlosti prierezom privádzajúceho potrubia dostaneme veľkosť prítoku Q_L. Skutočný prítok je však menší, dochádza totiž k zúženiu kvapalinového lúča a určité straty spôsobuje aj tvar otvoru a viskozita kvapaliny. Predpokladáme, že

všetky tieto straty sa s rýchlosťou kvapaliny nemenia a zahrnieme ich do konštanty μ_L. Prítok kvapaliny do ľavej nádrže z čerpadla môžeme potom vyjadriť vzťahom:

$$Q_L = \mu_L S_L v_L \tag{4.10}$$

kde:

μ_L konštanta vyjadrujúca straty [-]

S_L prierez potrubia [m^2]

Dosadením rovnice (4.9) získame vzťah, ktorý vyjadruje veľkosť prítoku do ľavej nádrže zo spodnej v závislosti na otáčkach čerpadla. Zhrnutím konštánt vyjadrujúcich straty a prierez trubky do jedinej K_L dostaneme rovnicu (4.11).

$$Q_L = \mu_L \frac{\pi d_L^2}{4} \sqrt{\frac{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)}{1+\xi_L}}$$

$$Q_L = K_L \sqrt{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)} \tag{4.11}$$

V prípade, že by súčet v zátvorke pod odmocninou bol záporný (napr. pri znížení otáčok čerpadla pri plnej ľavej hornej nádrži), bude voda z nádrže vytekať cez čerpadlo do spodnej nádrže, prietok Q_L bude záporný a bude mať hodnotu:

$$Q_L = -K_L \sqrt{2g\left|\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right|}; \qquad \frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L < 0 \tag{4.12}$$

Podobne pre prietok z ľavej nádrže do pravej v prípade otvoreného stredného ventilu môžeme odvodiť vzťah:

$$p_a + \rho h_L g + \frac{1}{2}\rho v_L^2 = p_a + \rho h_R g + \rho h_T g + \frac{1}{2}\rho v_{LR}^2 + \frac{1}{2}\rho \xi_{LR} v_{LR}^2$$

$$v_L << v_{LR} \tag{4.13}$$

Za podmienky, že $h_L > h_R$:

$$v_{LR} = \sqrt{\frac{2g(h_L - h_R)}{1+\xi_{LR}}} \tag{4.14}$$

$$Q_{LR} = K_{LR}\sqrt{2g(h_L - h_R)} \tag{4.15}$$

Pri výpočte výtokovej rýchlosti vody prúdiacej z dýzy na turbínu uvažujeme v Bernoulliho rovnici dva body, a to povrch kvapaliny v pravej nádrži a bod v mieste výtoku z dýzy.

$$p_a + \rho h_R g + \frac{1}{2}\rho v_{Rh}^2 = p_a + \rho h_X g + \frac{1}{2}\rho v_R^2 + \frac{1}{2}\rho \xi_R(pv) v_R^2 \qquad v_{Rh} << v_R \tag{4.16}$$

kde:

v_{Rh}	rýchlosť voľnej hladiny v pravej nádrži [ms^{-1}]
v_R	výtoková rýchlosť vody na turbínu [ms^{-1}]
h_X	výška výtoku vody z dýzy vzhľadom na nulovú hladinu (os čerpadla) [m]
$\xi_R(pv)$	funkcia vyjadrujúca straty vzhľadom na stupeň otvorenia proporcionálneho ventilu [-]
pv	otvorenie proporcionálneho ventilu [%]

Úpravou dostaneme vzťahy pre výtokovú rýchlosť v_R a výtokový prietok Q_R, ktorý je meraný prietokomerom.

$$v_R = \sqrt{\frac{2g(h_R - h_X)}{1+\xi_R(pv)}} \tag{4.17}$$

$$Q_R = K_R(pv)\sqrt{2g(h_R - h_X)} \tag{4.18}$$

V prípade, že v ľavej nádrži je nenulová hladina a čerpadlo je vypnuté, vyteká voda z nádrže cez čerpadlo do spodnej nádrže. Tento prietok môžeme opísať ako prietok z jednej nádrže do druhej pri danom rozdiele výšok hladín $h_L - h_D$.

$$Q_{LD} = K_{LD}\sqrt{2g(h_L - h_D)} \tag{4.19}$$

Senzory merajúce výšku hladín v jednotlivých nádržiach udávajú túto hodnotu stále od dna príslušnej nádrže. Tieto hodnoty sú zároveň zobrazované vo vizualizácii na dotykovom paneli a ich hodnoty poskytuje aj OPC server svojím klientom. Vo fyzikálnych výpočtoch v rámci softvérového modelu je potrebné uvažovať s celkovou výškou od spoločnej nulovej hladiny, ktorá v našom prípade prechádza osou potrubia privádzajúceho vodu do čerpadla. Vzdialenosť medzi touto osou a dnom horných nádrží označíme h_T (obrázok 4.1.1) a vzdialenosť medzi nulovou hladinou a dnom spodnej nádrže h_{D0}. Medzi výškami hladín, ktoré poskytuje PLC, a výškami v softvérovom modeli sú vzťahy:

$$\begin{aligned} h_{L_PLC} &= h_L - h_T \\ h_{R_PLC} &= h_R - h_T \\ h_{D_PLC} &= h_D + h_{D0} \end{aligned} \tag{4.20}$$

Dosadením jednotlivých vzťahov pre prietoky do rovníc 4.2 až 4.4 dostaneme základný popis systému v normálnom režime (čerpadlo je v činnosti, voda z ľavej nádrže preteká do pravej a odtiaľ cez proporcionálny ventil na turbínu a späť do spodnej nádrže).

$$S_L \frac{dh_L}{dt} = K_L\sqrt{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)} - K_{LR}\sqrt{2g(h_L - h_R)} \tag{4.21}$$

$$S_R \frac{dh_R}{dt} = K_{LR}\sqrt{2g(h_L - h_R)} - K_R(pv)\sqrt{2g(h_R - h_X)} \tag{4.22}$$

$$S_D \frac{dh_D}{dt} = K_R(pv)\sqrt{2g(h_R - h_X)} - K_L\sqrt{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)} \tag{4.23}$$

4.2 Identifikácia

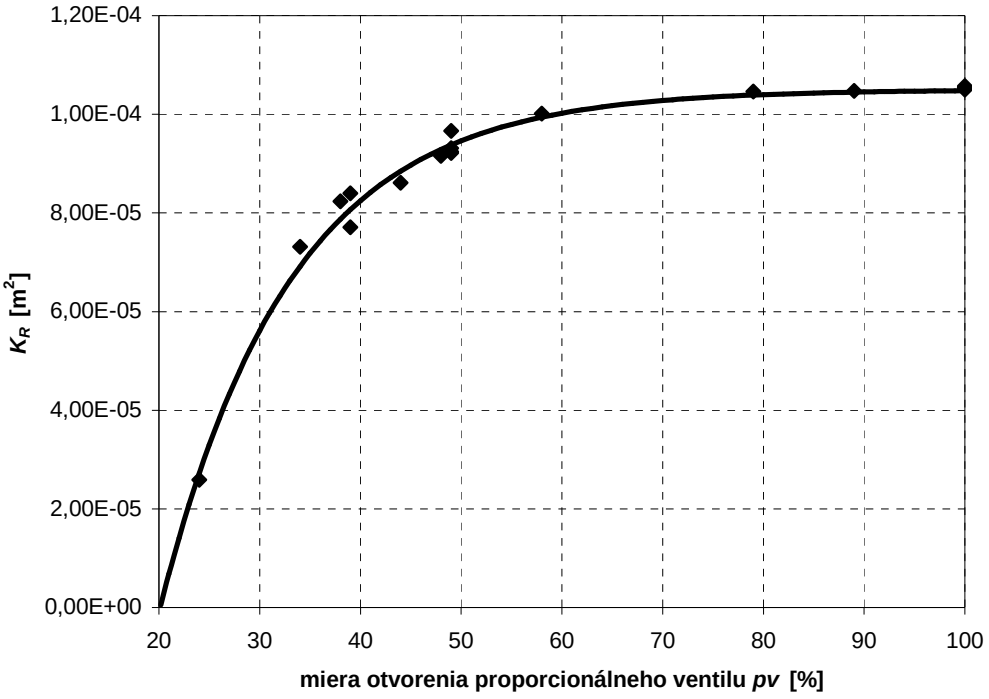
Úlohou identifikácie je stanovenie všetkých neznámych konštánt z predchádzajúcich vzťahov tak, aby následne vytvorený fyzikálny model systému čo najlepšie zodpovedal realite. Konštanty S_L, S_R, S_D a h_X je možné zistiť priamo z rozmeru modelu, a to buď odmeraním alebo vyčítaním z výrobného výkresu. Ide o plochy dna nádrží obdĺžnikového tvaru a o vzdialenosť medzi výtokom dýzy a nulovou hladinou. Konštanta g je tiažové zrýchlenie a je stanovená na $g = 9{,}81\,\mathrm{ms}^{-1}$. Všetky ostatné konštanty alebo funkcie $(K_P, K_L, K_{LR}$ a $K_R(pv))$ je potrebné určiť meraním.

4.2.1 Identifikácia proporcionálneho ventilu

Zo všetkých konštánt (funkcií) K_X, ktoré vyjadrujú plošnú veľkosť prietokových otvorov a mieru strát v týchto otvoroch sa ukázalo ako najjednoduchšie určenie funkcie $K_R(pv)$, kde pv je otvorenie proporcionálneho ventilu v percentách. V prípade, že je tento ventil otvorený a sústava sa po dostatočne dlhom čase dostala do ustáleného stavu, nemenia sa výšky hladín v nádržiach (derivácie na ľavých stranách rovníc 4.2 až 4.4 sú nulové) a jednotlivé prietoky Q_L, Q_{LR} a Q_R majú rovnakú hodnotu (rovnaké množstvo vody, ktoré pritečie za jednotku času do ľavej nádrže, pretečie do pravej a zároveň aj vytečie cez proporcionálny ventil do spodnej nádrže, čo zároveň vyplýva aj z rovníc 4.21 až 4.23 upravených pre ustálený stav). Pred proporcionálnym ventilom je nainštalovaný prietokomer, ktorý umožňuje určiť tento prietok. Z rovnice 4.18 je zrejmé, že prietok Q_R závisí iba na výške vody v pravej nádrži h_R a na miere otvorenia proporcionálneho ventilu pv. Jednotlivé hodnoty pre funkciu $K_R(pv)$ môžeme určiť podľa vzťahu:

$$K_R(pv) = \frac{Q_R}{\sqrt{2g(h_R - h_X)}} \tag{4.24}$$

Vykreslením hodnôt $K_R(pv)$ pre jednotlivé ustálené stavy s rôznymi otvoreniami ventilu pv, prietokmi Q_R a výškami h_R dostaneme nasledujúci graf:



Obr. 4.2.1 – Priebeh miery strát v proporcionálnom ventile vzhľadom na stupeň jeho otvorenia.

Jednotlivé body boli pomocou metódy najmenších štvorcov preložené exponenciálnou krivkou s rovnicou:

$$K_R(pv) = 1{,}05.10^{-4} - 5.10^{-4} e^{-0{,}0775.pv} \tag{4.25}$$

Z grafu je patrné, že otvorenie ventilu pod 20 % už vodu neprepúšťa a otvorenie nad 60 % má už len veľmi malý vplyv na zväčšenie prietoku.

4.2.2 Identifikácia čerpadla

S čerpadlom a čerpaním vody do ľavej hornej nádrže súvisia dve konštanty, a to K_P a K_L. Predpokladáme, že čerpadlo je zdrojom tlaku a pôsobí tak, že hladina v nádrži nad čerpadlom sa po určitom čase ustáli vo výške, v ktorej nastane tlaková rovnováha. Uzavretím výpustného ventilu zamedzíme odtoku vody do spodnej nádrže. Prostredný ventil, ktorý spája ľavú a pravú hornú nádrž necháme buď otvorený alebo uzavretý. V ustálenom stave sú teda výšky hladín v oboch horných nádržiach rovnaké

(v prípade otvoreného prostredného ventilu), výšky hladín sa nemenia (derivácie na ľavých stranách rovníc 4.21 až 4.23 sú nulové) a prietoky Q_L, Q_{LR} a Q_R sú nulové. Môžeme preto napísať vzťah:

$$0 = K_L \sqrt{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)}$$

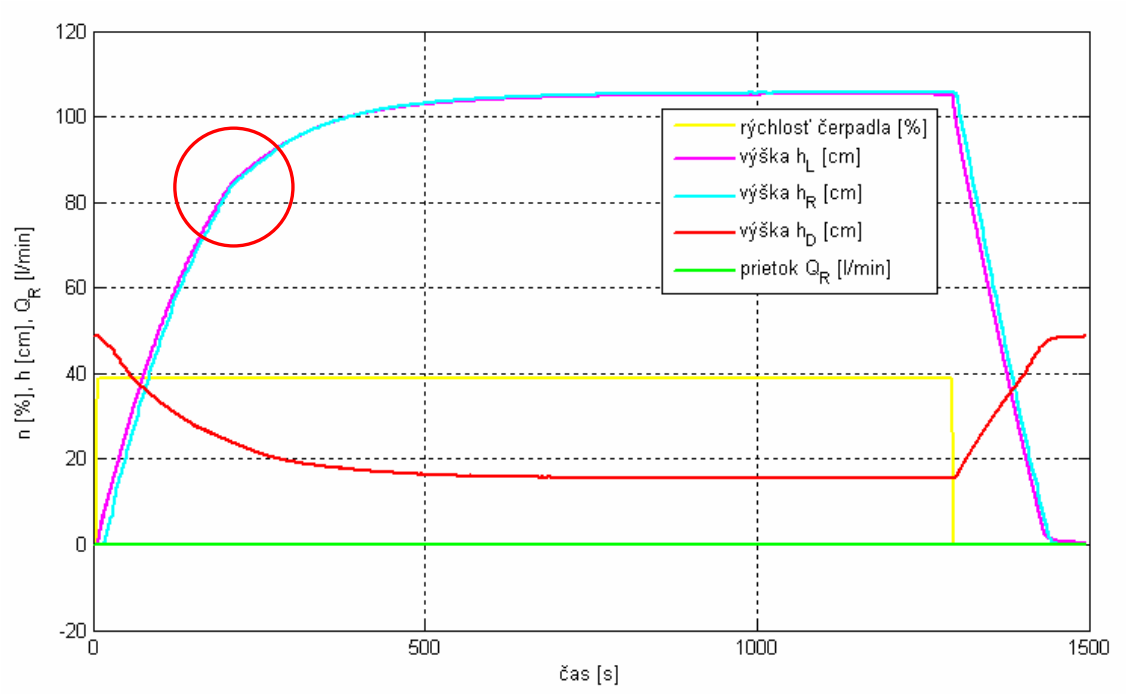
$$K_P = \frac{(h_L - h_D)g}{n^2} \tag{4.26}$$

Spriemerovaním hodnôt pre rozličné ustálené stavy získame hodnotu konštanty $K_P = 0{,}021241\,\mathrm{m}^2$. Odchýlka od priemeru pri určení tejto konštanty z jednotlivých ustálených stavov nepresiahla 0,5 % a nezáleží pritom, či je prostredný ventil otvorený alebo uzavretý. Konštantu K_P je však možné určiť iba v intervale otáčok, ktoré vedú na ustálený stav hladiny v rozmedzí výšok, v ktorých sa nachádzajú horné nádrže (2,36 m až 3,8 m). Pre väčšie otáčky voda preteká cez prepad, pre menšie zase nedosiahne dno nádrže, od ktorej počíta senzor výšku hladiny. Otáčky nášho čerpadla sa v tomto prípade pohybujú v rozmedzí 33 – 40 % z maximálnych otáčok.

4.2.3 Dynamika nábehu hladiny

Výpustný ventil necháme zatvorený, stredný buď otvorený alebo ho zavrieme. Do prázdnych nádrží čerpáme vodu čerpadlom s konštantnými otáčkami tak, aby sa výška hladiny v nádržiach ustálila. Dynamiku nábehu hladiny podľa fyzikálnych vzťahov vyjadruje konštanta K_L a určíme ju porovnaním skutočného časového priebehu s vypočítaným.

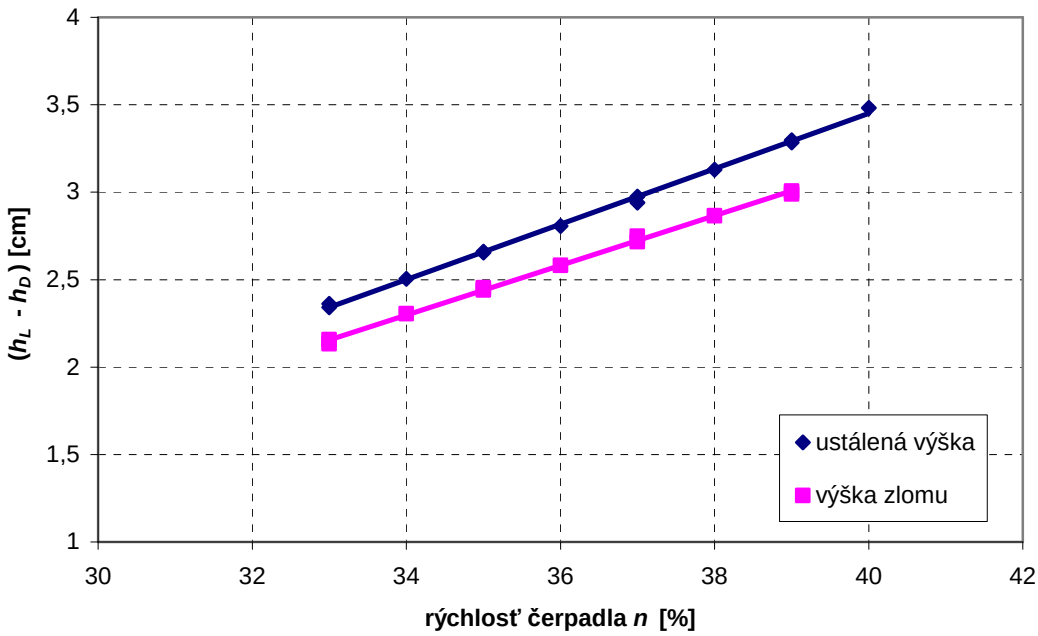
Počas čerpania vody do uzavretých horných nádrží bol pozorovaný nepredvídaný jav v chovaní čerpadla. Pri určitej výške hladiny začalo čerpadlo vydávať zvláštne zvuky, ako by v ňom voda bublala alebo vrela. Následne sa to prejavilo na charakteristike nábehu hladiny jasným zlomom. K opísanému javu dochádza pri rôznych otáčkach čerpadla v inej výške.



Obr. 4.2.2 – Zlom v dynamike nábehu výšky vody v horných nádržiach pri uzatvorenom výpustnom ventile a konštantných otáčkach čerpadla

Bolo urobených 10 meraní prechodovej charakteristiky z prázdnych nádrží do ustáleného stavu s rôznymi otáčkami čerpadla. Pri niektorých meraniach bol prostredný ventil otvorený a pri niektorých uzavretý. Z nameraných priebehov boli odčítané výšky hladín pri ktorých dochádza k zlomu na charakteristike a tiež aj ustálená výška. Do grafu na obrázku 4.2.3 sú zakreslené rozdiely výšok v ľavej a dolnej nádrži $(h_L - h_D)$ v závislosti na otáčkach čerpadla *n*. Z grafu je zrejmé, že výška, v ktorej dôjde k ustáleniu hladiny a výška, v ktorej začína zvláštne chovanie čerpadla (resp. rozdiel výšok v hornej a dolnej nádrži) závisia lineárne na otáčkach čerpadla. Ďalšími výpočtami bolo zistené, že k tomuto javu dochádza vtedy, keď rozdiel výšky hladiny v hornej a dolnej nádrži podelený druhou mocninou otáčok čerpadla sa rovná určitej konštante. Presnejšie:

$$\frac{(h_L - h_D)g}{n^2} = 0{,}9168K_P \tag{4.27}$$



Obr. 4.2.3 – Závislosť ustálenej výšky hladiny a výšky, pri ktorej dochádza ku zlomu na prechodovej charakteristike od rýchlosti čerpadla.

Popisovaný jav bol konzultovaný aj s výrobcom čerpadla a spôsobuje ho zrejme kavitácia. **Kavitácia** je zložitý jav vzniku a zániku dutín vyplnených parami a plynmi v prúdiacej kvapaline [12]. Tieto dutiny vznikajú v mieste, kde dôjde k zníženiu tlaku kvapaliny na hodnotu tlaku nasýtených pár pri danej teplote vody. Existencia dutín je nestabilná, preto v miestach s väčším tlakom para opäť kondenzuje a bublinky sa zaplnia vodou, implodujú. K striedaniu týchto zmien dochádza s vysokou frekvenciou asi 10 kHz. Implózia bubliniek je veľmi rýchla, takže okolitá kvapalina zaplňujúca ich miesto narazí veľmi rýchlo na lopatku, čím vznikajú počuteľné rázy alebo chvenie stroja [13, 14]. Materiál stroja je silno namáhaný a dochádza k rozrušovaniu jeho povrchu. Zmes vody, pary a vzduchu sa nechová ako súdržná kvapalina a účinnosť čerpadla rapídne klesá. To sa následne prejaví v našom prípade ako pokles rýchlosti nárastu hladiny v nádrži.

Kavitácia je jav, ktorej pôsobenie je veľmi ťažko fyzikálne opísateľné. Jej dôsledky boli preto do modelu zahrnuté tak, že v závislosti na pomere rozdielu výšok hladín a druhej mocniny otáčok čerpadla $(h_L - h_D)g/n^2$ sa menila hodnota konštanty K_L. K_L teda už nie je konštantou, ale funkciou tohto podielu $K_L\left((h_L - h_D)g/n^2\right)$. Hodnoty tejto

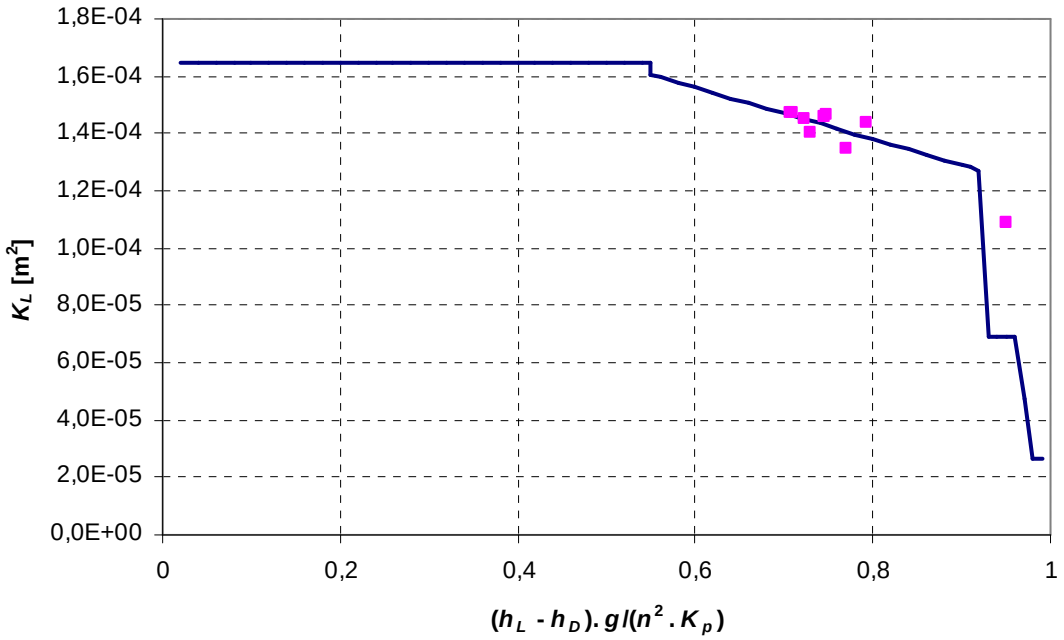
funkcie boli určené experimentálne odmeraním príslušného priebehu a nastavením jej hodnôt tak, aby odchýlka modelu od skutočného priebehu bola minimálna.

Experimentmi s otvoreným výpustným ventilom však došlo k zmene situácie. Na rozdiel od predchádzajúcich meraní, keď voda z nádrží nevytekala a čerpadlo svojimi otáčkami držalo hladinu v stálej výške, otvorením výpustného ventilu v ustálenom stave už voda cez čerpadlo preteká. Tým dôjde k zmene tlakových pomerov v sústave a kavitácia tak môže zaniknúť. Hodnoty funkcie $K_L\left((h_L - h_D)g / n^2\right)$ tak vychádzajú odlišne. V ustálenom stave v prípade otvoreného výpustného ventilu môžeme určiť hodnoty tejto funkcie podobne, ako sme určili priebeh funkcie $K_R(pv)$, a to podľa vzťahu 4.29:

$$Q_R = K_L \sqrt{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)} \tag{4.28}$$

$$K_L = \frac{Q_R}{\sqrt{2g\left(\frac{K_P n^2}{g} + h_D - h_L\right)}} \tag{4.29}$$

Hodnoty vypočítané podľa tohto vzťahu sú zakreslené v grafe 4.2.4 štvorčekmi. Výsledný priebeh funkcie K_L bol nakoniec zvolený tak, aby chovanie softvérového modelu čo najlepšie vystihovalo reálny systém v režimoch, o ktorých sa predpokladá, že budú používané najčastejšie. To je najmä v stredných intervaloch otáčok čerpadla a v stredných výškach hladín v horných nádržiach. Zároveň v týchto intervaloch dostatočne vystihuje chovanie systému, keď v čerpadle vznikne kavitácia (priebeh funkcie K_L pre x-ové hodnoty nad 0,9). Funkcia je po častiach spojitá v rámci štyroch intervalov.



Obr. 4.2.4 – Priebeh funkcie K_L

Z ustáleného stavu, kde $Q_L = Q_{LR} = Q_R$ a $\frac{dh_R}{dt} = 0$ môžeme odvodiť vzťah pre konštantu K_{LR}:

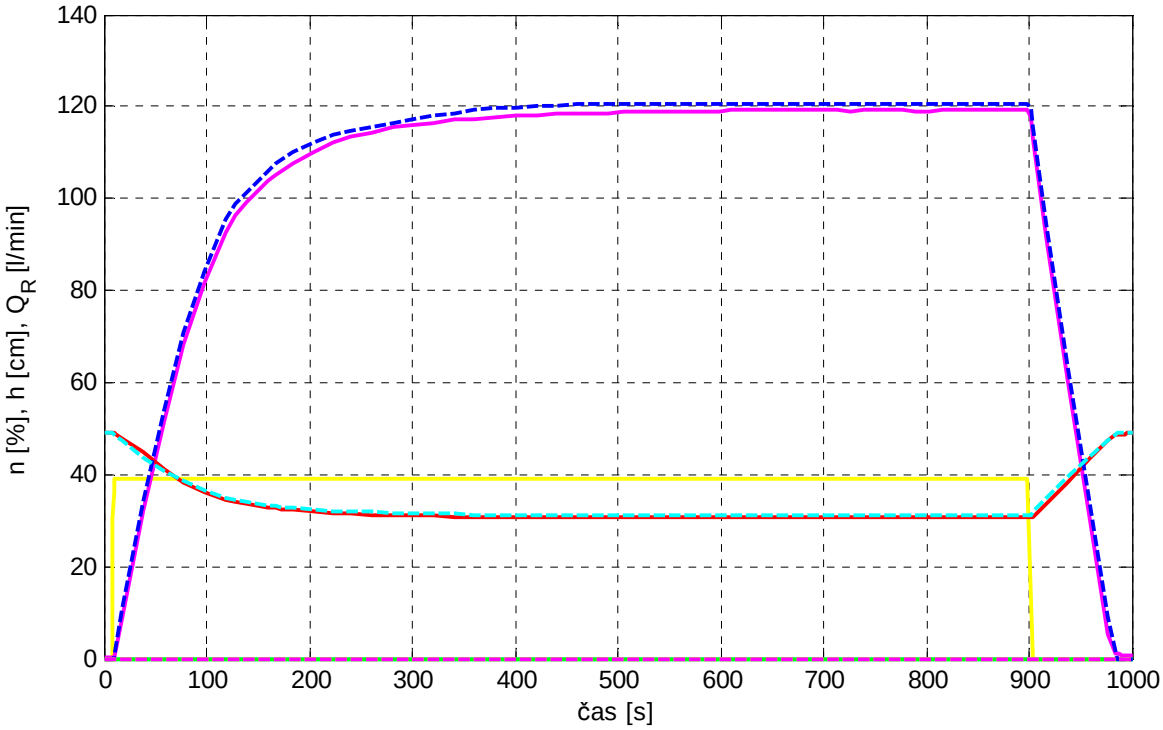
$$Q_R = K_{LR}\sqrt{2g(h_L - h_R)} \tag{4.30}$$

$$K_{LR} = \frac{Q_R}{\sqrt{2g(h_L - h_R)}} \tag{4.31}$$

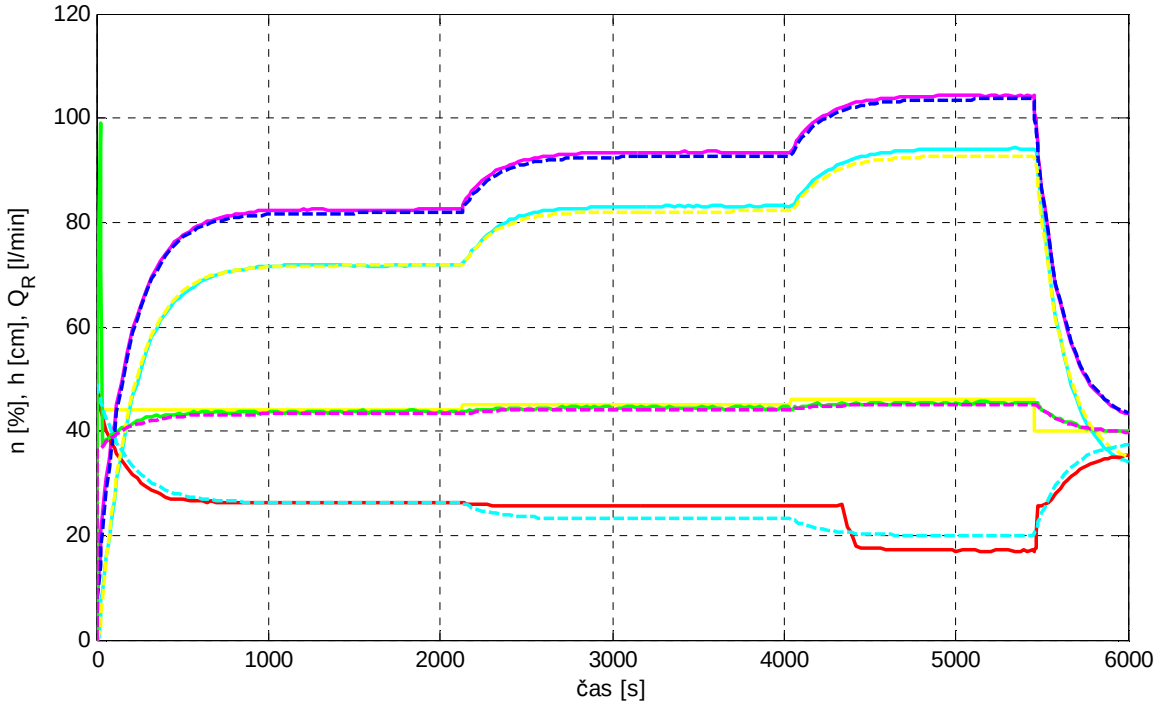
Spriemerovaním hodnôt z rozličných ustálených stavov získame konštantu $K_{LR} = 5{,}14.10^{-4}\ \mathrm{m}^2$.

4.2.4 Porovnanie nelineárneho softvérového modelu so skutočnosťou

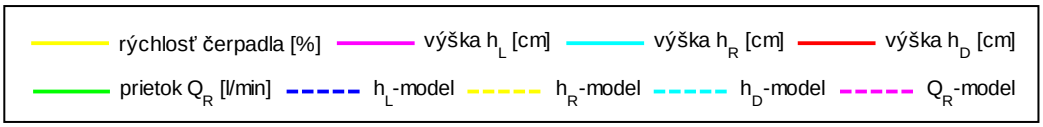
Všetky vyššie popisované vzťahy sú zahrnuté do softvérového modelu, ktorý bol vytvorený v Simulinku. Nasledujúce obrázky sú porovnaním chovania tohto modelu a reálneho systému.



Obr. 4.2.5 – Porovnanie nelineárneho modelu so skutočnosťou (uzatvorené ventily)



Obr. 4.2.6 – Porovnanie nelineárneho modelu so skutočnosťou (otvorené ventily)



Na obrázku 4.2.5 je porovnanie nelineárneho modelu so skutočnosťou pri čerpaní vody čerpadlom s konštantnými otáčkami $n = 39\,\%$ a uzatvoreným stredným a výpustným ventilom. Model celkom dobre aproximuje počiatočný nárast hladiny, oblasť v ktorej dochádza ku kavitácii aj výslednú ustálenú hladinu. Odchýlka modelu od skutočnosti je asi 1 cm, čo predstavuje menej ako 1 %. So zmenšujúcimi otáčkami rastie aj chyba modelu, v ustálených stavoch však odchýlka hladín nikdy neprekročí 2 cm a pri náraste hladiny 5 cm.

Rovnako dobrá aproximácia je aj na obrázku 4.2.6. V tomto prípade sú otvorené oba ventily na maximum a počas merania sa trikrát zmenia otáčky čerpadla. Rozdiel medzi prietokom spočítaným modelom a skutočným je výborný a dosahuje max. 0,5 l/min. Veľké odchýlky vo výške hladiny v spodnej nádrži sú spôsobené chybným senzorom, ktorý nesprávne udáva výšku, ak klesne hladina pod 25 cm. V čase písania tejto práce ešte nebolo zistené, čo daný problém spôsobuje, je možné, že riešenie problému sa nezaobíde bez reklamácie senzora. Vysoká špička v prvých sekundách merania prietoku je spôsobená chybným meraním prietokomeru. Bolo zistené, že pokiaľ senzorom nepreteká dostatočný prúd vody (minimálne 30 l/min), udáva nezmyselné hodnoty. Môže to byť spôsobené aj tým, že pri malom prietoku nie je senzor úplne zaplavený vodou.

Softvérový model dobre aproximuje reálny systém v už spomínaných stredných otáčkach čerpadla (36 % a vyššie) a pri väčšom otvorení proporcionálneho ventilu (40 % a viac). Pri nižších alebo naopak veľmi vysokých otáčkach čerpadla (cca. 70 % a viac) a pri menšom otvorení výpustného ventilu presnosť modelu klesá. Aj napriek tomu je veľmi vhodné ho použiť na prvotný návrh a odskúšanie regulátorov, najmä pre študentov.

Navrhnutý softvérový model bude slúžiť študentom na otestovanie regulátorov predtým, ako ich aplikujú na reálny model. Zároveň v rámci tejto diplomovej práce je použitý v režime riadenia, keď regulátor PLC získava stavy systému nie z reálnej sústavy, ale práve zo softvérového modelu, vypočíta akčný zásah a pošle ho späť počítačovému modelu.

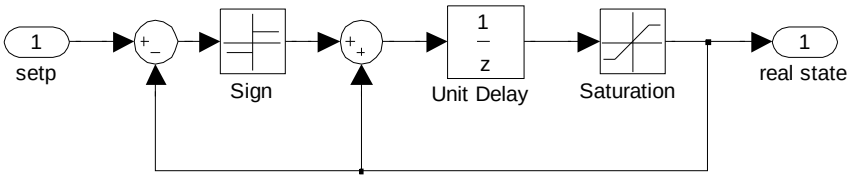
Aby softvérový model ešte lepšie zodpovedal realite, boli k nemu nad rámec rovníc 4.21 – 4.23 popisujúcich systém doplnené nasledujúce položky:

- dynamika prenastavovania polohy proporcionálneho ventilu
- dynamika rozbehu čerpadla
- simulácia pomalého ultrazvukového senzoru

4.2.5 Dynamika prenastavovania polohy proporcionálneho ventilu

Poloha proporcionálneho ventilu je ovládaná motorčekom na jednosmerné napätie 24 V s prevodovkou. Prenastavenie z jednej krajnej polohy do druhej trvá ventilu asi 40 s, preto je nutné pri návrhu regulátorov počítať s touto dynamikou. Poloha ventilu vzhľadom na čas prenastavovania sa mení lineárne.

Na simuláciu zmeny polohy proporcionálneho ventilu bol navrhnutý nasledujúci diskrétny systém so saturáciou 0 – 100 pre krajné polohy. Vzorkovacia perióda členu $1/z$ bola zvolená $T_s = 0{,}4\,\mathrm{s}$, k zmene polohy z 0 % na 100 % tak dôjde presne za 40 s. Výstup tohto systému má schodovitý tvar a mení sa v celých číslach podobne, ako je tomu v skutočnosti.



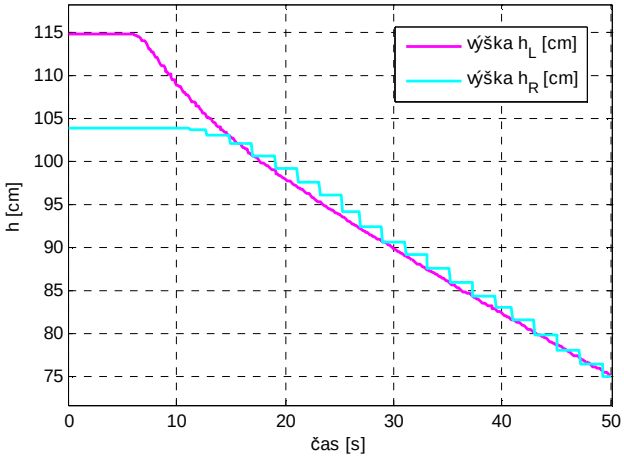
Obr. 4.2.7 – Dynamika prenastavovania polohy prop. ventilu (schéma v Simulinku)

4.2.6 Dynamika rozbehu čerpadla

V konfigurácii frekvenčného meniča, ktorý reguluje otáčky asynchrónneho motoru čerpadla, je ako rozbehová a dobehová charakteristika nastavená rampa s dobou trvania 5 s. Otáčky čerpadla z 0 % na 100 % sa teda zmenia lineárne za túto dobu. V prípade požiadavky na menšiu zmenu dôjde k ustáleniu nových otáčok za priamoúmerne nižší čas. Dynamika čerpadla sa týmto podobá dynamike prenastavovania polohy proporcionálneho ventilu, preto aj v softvérovom modeli bola k tomuto účelu použitá rovnaká schéma (obrázok 4.2.7). Vzorkovacia perióda členu $1/z$ bola zvolená $T_s = 0{,}05\,\mathrm{s}$.

4.2.7 Simulácia pomalého ultrazvukového senzoru

Ultrazvukový senzor, ktorý meria výšku hladiny v pravej nádrži h_R, aktualizuje svoju hodnotu každé 2 s. V nastaveniach senzoru neexistuje položka, ktorá by umožnila túto dobu urýchliť. Daný senzor je zrejme určený pre aplikácie v priemysle, kde sa výška hladiny mení pomaly a teda vzorkovanie s periódou 2 s plne postačuje. V našom prípade pomerne rýchlych zmien hladiny to už spôsobuje problémy pri návrhu regulátora výšky hladiny v pravej nádrži (viac o regulátore v kapitole Návrh regulátorov). Aby bolo možné tento pomalý senzor simulovať aj v softvérovom modeli, bol tesne pred výstupom pridaný blok „Zero-Order Hold“ so vzorkovacou periódou $T_s = 2\,\text{s}$.



Obr. 4.2.8 – Porovnanie výstupu tlakového (h_L) a ultrazvukového (h_R) senzoru.

4.3 Návrh regulátorov

Model prečerpávacej elektrárne má dva akčné členy, ktorých parametre možno regulovať plynulo, a to čerpadlo s plynulo ovládateľnými otáčkami a výpustný proporcionálny ventil. Prostredný ventil, ktorý má len dve polohy (otvorený/uzavretý) za akčný člen nepovažujeme. Možno ním dodatočne simulovať poruchu systému. Pri väčšine meraní je tento ventil v otvorenom stave. Konštrukcia pohonu tohto ventilu neumožňuje zmenu smeru otáčania ventilu na opačný, pokiaľ je ventil v pohybe. Má to za následok taký úbytok napájania na zdroji 24 V, že sa reštartujú všetky zariadenia

pripojené na rovnaké napájanie. Preto je už priamo v programe PLC blokovaná požiadavka na zmenu smeru otáčania, pokiaľ ventil nedošiel do krajnej polohy.

Dvoma vyššie spomenutými akčnými členmi možno regulovať nezávisle dve stavové veličiny, a to výšku v niektorej z nádrží a veľkosť prietoku na turbínu. S kolegami bolo rozhodnuté, že okrem prietoku sa bude regulovať výška hladiny v pravej nádrži.

Nasledujúce odstavce popisujú návrh regulátorov v rámci regulácie reálneho modelu z Matlabu a návrh regulátorov pre PLC, ktoré slúžia na reguláciu vlastného reálneho modelu, ale aj v rámci PIL simulácie.

4.3.1 Návrh regulátoru pre Matlab

V Matlabe bol navrhnutý PID regulátor s obmedzením integračnej zložky (anti-windup) s rovnicou v tvare:

$$C(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \tag{4.32}$$

Konštanty regulátoru boli odladené metódou cyklickej optimalizácie. Regulátor bol odskúšaný najprv na nelineárnom softvérovom modeli v Simulinku a následne aplikovaný na reálny systém. Pomalý ultrazvukový senzor, ktorý aktualizuje výstupné dáta každé dve sekundy, spôsoboval veľké kmity sústavy. Preto bol za výstup senzoru navrhnutý spojitý Butterworthov filter druhého rádu typu dolná prepusť so zlomovou frekvenciou:

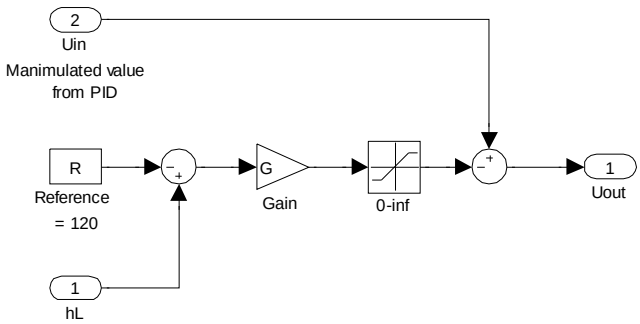
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{4\,\mathrm{s}} \approx 1{,}5\,\mathrm{rad.s^{-1}}$$

Zahrnutím filtra do regulácie síce došlo k posunu fázy a oneskoreniu aktuálnych dát, sústava však je vďaka spojitému priebehu výstupu stabilnejšia. Konštanty PID regulátoru sú:

K_P	5
K_I	0,2
K_D	40
saturácia *I* zložky	±50

Tabuľka 4.1 – Konštanty PID regulátoru výšky hladiny

Aby sa obmedzilo príliš veľkému akčnému zásahu pri regulácii z prázdnych nádob a aby nedošlo k pretekaniu vody v ľavej nádrži cez prepad prípadne k bezpečnostnému vypnutiu čerpadla, je za PID regulátor zaradený pomocný P regulátor, ktorý sleduje práve hladinu v ľavej nádrži. V prípade, že výška vody presiahne 120 cm, odčíta sa od akčného zásahu PID regulátora svoj vlastný akčný zásah a tým zníži otáčky čerpadla. Keď klesne hladina späť pod 120 cm, putuje do čerpadla iba akčný zásah PID regulátora. Konštanta K_P má vysokú hodnotu, $K_P = 3000$, schéma regulátora je na obrázku 4.3.1.



Obr. 4.3.1 – Schéma P regulátora v Simulinku na zabránenie pretekaniu vody cez prepad

Na reguláciu prietoku proporcionálnym ventilom bol navrhnutý PI regulátor. Aj keď je výstup z prietokomeru značne zašumený, absenciou derivačnej zložky nebolo nutné pristúpiť k návrhu filtru. Regulátor ma nasledujúce konštanty:

K_P	1,2
K_I	0,4
saturácia I zložky	± 100

Tabuľka 4.2 – Konštanty PI regulátoru prietoku

Priebeh regulácie reálneho systému z Matlabu je znázornený na obrázku 4.3.3.

4.3.2 Návrh regulátoru pre PLC

V Simaticu S7-300 je možné využiť PID inštrukciu, ktorá je súčasťou knižnice Standard Library a do programu je možné ju vložiť ako funkčný blok FB41. Výpočet je nutné volať v pravidelných intervaloch, inak vypočítaný akčný zásah nie je korektný. Preto sa ho odporúča volať z bloku, ktorý sa spúšťa prerušením v pravidelných

intervaloch (OB30 až OB38). Použitý procesor však podporuje iba organizačný blok OB35, ktorý sa spúšťa prerušením každých 100 ms. Rýchlejšiu alebo pomalšiu periódu nie je možné preto pomocou organizačných blokov dosiahnuť. Snahou bolo naprogramovať v PLC rovnaký PID regulátor ako v Matlabe, aby bolo možné následne obe regulácie porovnať. PID inštrukcia v PLC počíta akčný zásah podľa vzorca:

$$C_{PLC}(s) = K_{P_PLC}\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \tag{4.33}$$

Nutné je preto prepočítať konštanty regulátoru podľa vzťahov:

$$K_{P_PLC} = K_P = 5 \tag{4.34}$$

$$T_I = \frac{K_P}{K_I} = 25\,\mathrm{s} \tag{4.35}$$

$$T_D = \frac{K_D}{K_P} = 8\,\mathrm{s} \tag{4.36}$$

V nasledujúcej tabuľke je uvedené, ktoré parametre PID inštrukcie treba nastaviť a na akú hodnotu. Položkám, ktoré nie sú uvedené v tabuľke, zostávajú hodnoty základného nastavenia. PID regulátoru pre výšku hladiny v pravej nádrži prislúcha dátový blok DB41.

označenie	**názov parametru**	**hodnota**
K_P	GAIN	5.0
T_I	TI	T#25S
T_D	TD	T#8S
T_S	CYCLE	T#100MS
derivačná zložka zapnutá	D_SEL	TRUE

Tabuľka 4.3 – Konštanty PID regulátoru výšky hladiny v PLC

Podobne sa v bloku OB35 nachádza aj PID inštrukcia na reguláciu prietoku pomocou proporcionálneho ventilu. Funkčnému bloku FB41 tentokrát prislúcha dátový blok DB42. V tabuľke sú opäť uvedené nastavenia parametrov, ktoré treba zmeniť oproti základnému nastaveniu:

označenie	názov parametru	hodnota
K_P	GAIN	1.2
T_I	TI	T#3S
T_S	CYCLE	T#100MS
derivačná zložka zapnutá	D_SEL	FALSE

Tabuľka 4.4 – Konštanty PID regulátoru prietoku v PLC

Rovnako ako pri regulácii z Matlabu, aj tu je potrebné výstup z pomalého ultrazvukového senzoru filtrovať. Filter v tomto prípade musí byť už digitálny, spúšťaný v pravidelných intervaloch. Preto predtým, ako dôjde k vykonaniu PID inštrukcie v organizačnom bloku OB35, je v tom istom bloku zavolaný funkčný blok s výpočtom filtrácie.

Digitálny Butterworthov filter je IIR filter, teda filter s nekonečne dlhou impulznou charakteristikou. Takýto filter druhého rádu možno popísať diskrétnym prenosom:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \tag{4.37}$$

alebo analytickým vzťahom:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \tag{4.38}$$

Vzťah 4.38 je jednoduché naprogramovať do funkčného bloku v PLC. Posledným problémom je správne určenie konštánt *a* a *b*. Pre tento účel bola použitá funkcia `butter` v Matlabe, ktorej vstupom je typ filtru (dolná prepusť, horná prepusť…), rád a normalizovaná medzná frekvencia ω_n (číslo od 0 do 1, kde 1 zodpovedá Nyquistovej frekvencii ω_0, teda π radiánov za vzorku).

$$T_s = 0{,}1\,\mathrm{s}$$

$$\omega = 1{,}5\ \mathrm{rad.s^{-1}}$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{T_s}$$

$$\omega_n = \frac{\omega}{\omega_0}$$

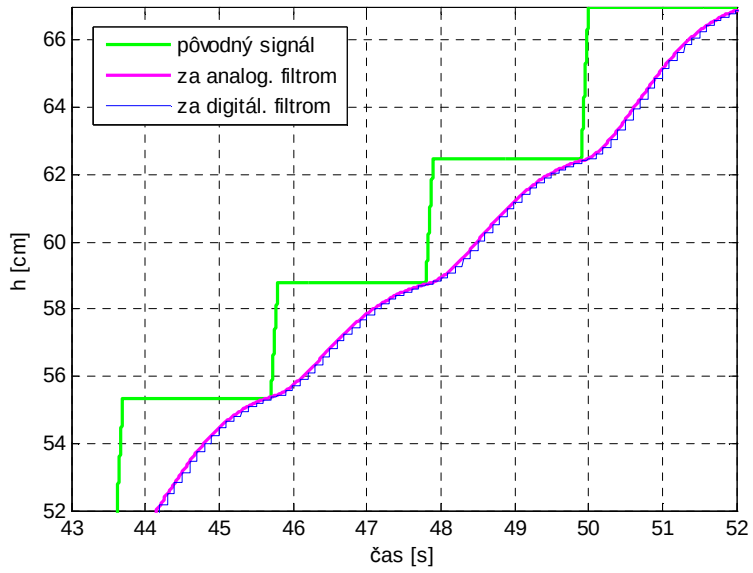
$$\omega_n = \frac{\omega T_s}{\pi} = 0{,}0477 \tag{4.39}$$

Diskrétny Butterworthov filter má potom konštanty:

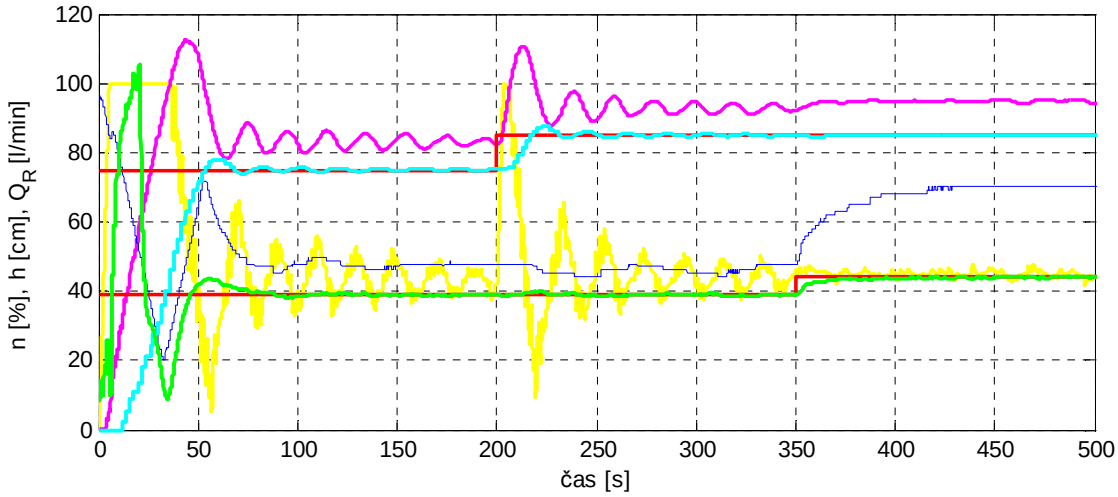
a_1	$-1{,}788548.10^{0}$
a_2	$8{,}088601.10^{-1}$
b_0	$5{,}077887.10^{-3}$
b_1	$1{,}015577.10^{-2}$
b_2	$5{,}077887.10^{-3}$

Tabuľka 4.5 – Konštanty diskrétneho Butterworthovho filtra

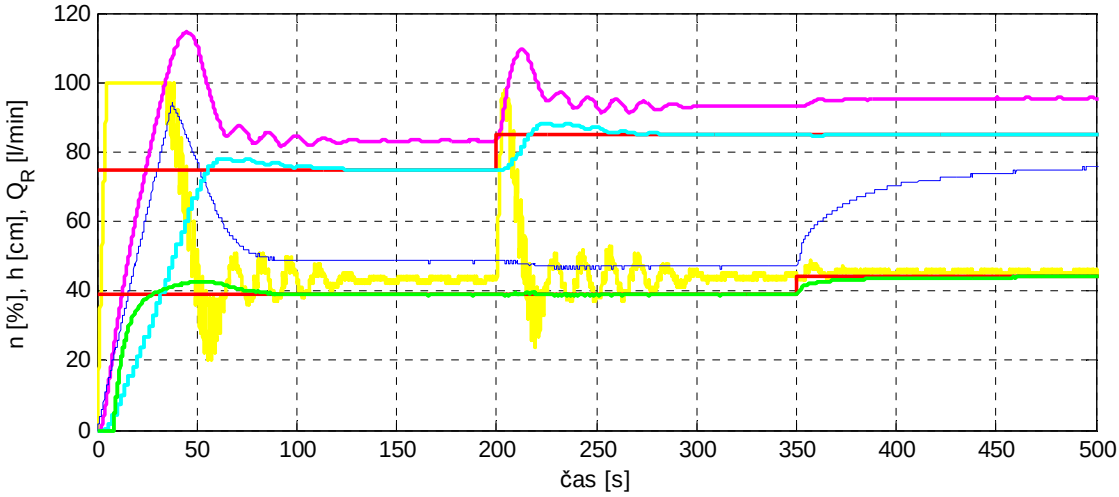
Meraniami bolo zistené, že konštanty filtru by mali byť určené aspoň na 7 platných číslic, aby rozdiel vo výstupe medzi analógovým a digitálnym filtrom bol čo najmenší. Na nasledujúcom obrázku je porovnanie filtrácie signálu z ultrazvukového senzoru pomocou analógového a jemu prislúchajúcemu digitálneho Butterworthovho filtru.



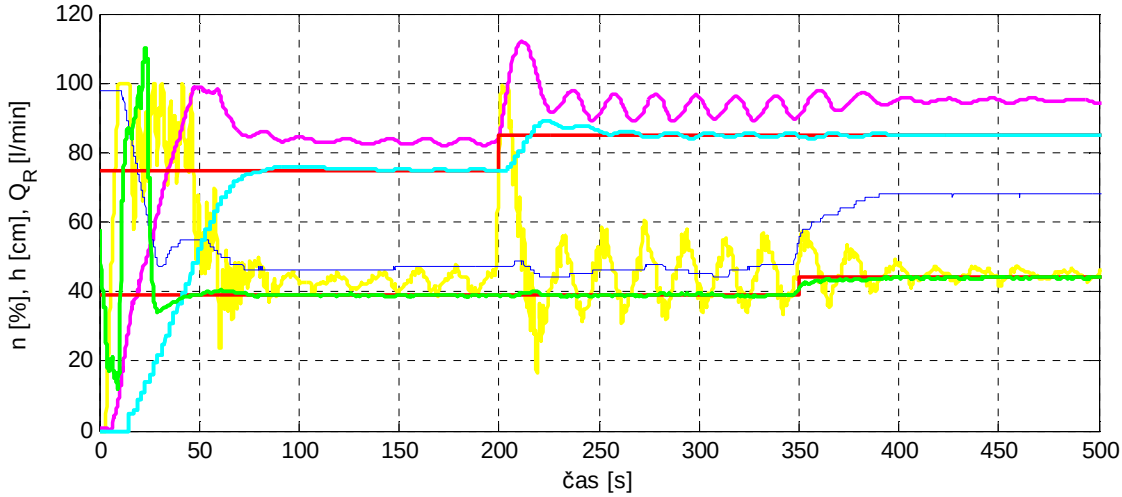
Obr. 4.3.2 – Porovnanie filtrácie signálu z ultrazvukového senzoru pomocou analógového a jemu prislúchajúcemu digitálneho Butterworthovho filtra



Obr. 4.3.3 – Priebeh regulácie z Matlabu



Obr. 4.3.4 – Priebeh regulácie v PIL simulácii



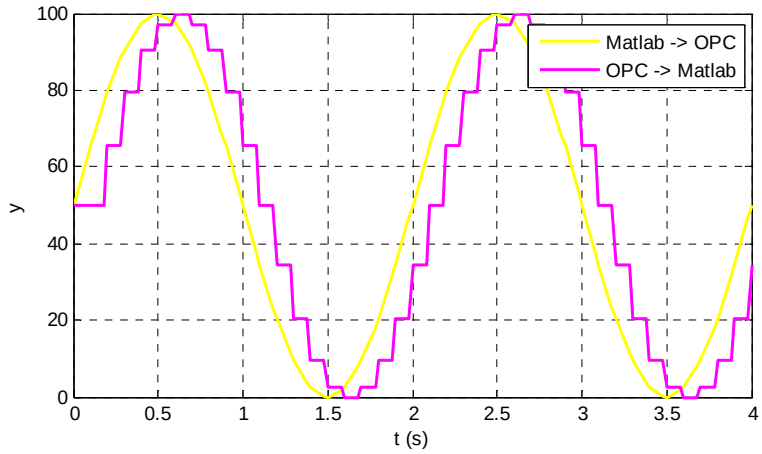
Obr. 4.3.5 – Priebeh regulácie PLC

rýchlosť čerpadla [%] | výška h_L [cm] | výška h_R [cm] | prietok Q_R [l/min] | prop. ventil | referencie

Na obrázkoch 4.3.3 až 4.3.5 je možné vzájomne porovnať reguláciu modelu vodnej elektrárne pri troch režimoch riadenia. Najlepší priebeh bol dosiahnutý na druhom obrázku pri PIL simulácii. Dalo sa to však očakávať, ide o reguláciu počítačového modelu, kde nepôsobia žiadne rušenia, ako je tomu v skutočnosti. Veľmi podobný priebeh regulácie je na obrázku 4.3.3, kde je riadený reálny model z Matlabu pomocou OPC komunikácie. Je možné pozorovať menšie rozdiely v priebehoch medzi reguláciou z Matlabu a priamo z PLC. Môžeme si ich vysvetliť tým, že aj keď oba regulátory majú konštanty nastavené rovnako, Matlab a PLC počítajú akčný zásah v iných časových intervaloch (PLC až každých 100 ms) a mierne odlišným matematickým algoritmom. Rozdiel v regulácii môže spôsobovať aj oneskorenie signálu v OPC komunikácii.

4.3.3 Oneskorenie signálu pri OPC komunikácii

Na odmeranie oneskorenia signálu pri OPC komunikácii bola v Simulinku vytvorená schéma, ktorá posielala na server signál v tvare sínusoidy s periódou 2 s. Tieto dáta boli prečítané na začiatku riadiacej slučky v PLC, uložené do pamäti a na konci riadiacej slučky zapísané do špeciálneho dátového bloku. Z tohto bloku bol signál opätovne prečítaný Matlabom. Na obrázku 4.3.6 vidíme oba signály vzájomne posunuté o 100 ms, čo bola približne najvyššia rýchlosť, pri ktorej nedochádzalo k výpadkom dát. Pri vyššej rýchlosti Matlab už nestíhal čítať dáta a poskytoval údaje v pseudoreálnom čase.



Obr. 4.3.6 – Oneskorenie signálu pri OPC komunikácii

Záver

Cieľom tejto práce bolo v prvom kroku dokončiť model prečerpávacej vodnej elektrárne po stránke hardvérovej a softvérovej, ktorý sa bude využívať v predmetoch na katedre řídicí techniky Fakulty elektrotechnickej. Ide o asi 4 m vysoký systém spojených nádob s uzavretým cyklom vody, kde čerpadlom je čerpaná voda do horných nádrží, ktorá je potom potrubím privádzaná na turbínu poháňajúcu generátor. Na modeli boli použité výhradne priemyselné senzory a akčné členy, čím sa viac približuje systémom v reálnej praxi.

Po stránke softvérovej bol v rámci tejto práce vytvorený kompletný program do PLC automatu Simatic S7-300 vrátane PID regulátoru na riadenie výšky hladiny v pravej hornej nádrži a PI regulátoru na riadenie prietoku. Súčasťou je aj P regulátor zabraňujúci pretekaniu vody cez prepad v ľavej hornej nádrži. V rámci regulácie bol navrhnutý aj digitálny Butterworthov filter, ktorý filtruje dáta z pomalého ultrazvukového senzoru merajúceho výšku v pravej hornej nádrži (regulovaná veličina) a posielajúceho dáta každé 2 s. Bez neho dochádzalo pri regulácii k veľkým kmitom.

Súčasťou diplomovej práce je aj fyzikálny popis celého systému a následne vytvorený kompletný nelineárny model v Simulinku. Aproximácia reálneho systému modelom je veľmi dobrá pri vyšších výškach hladín, stredných otáčkach čerpadla a pri vyšších prietokoch. Aj v ostatných intervaloch dáva model uspokojivé výsledky a je veľmi vhodné ho využiť pri prvotnom návrhu regulácie. Model zachycuje dobre aj javy, s ktorými pri prvotnom návrhu nebolo počítané. Medzi ne patrí napríklad kavitácia, ktorá vzniká pri nízkych prietokoch v blízkosti bodu ustálenia, simulácia pomalého ultrazvukového senzoru a dynamika čerpadla a proporcionálneho ventilu.

Na prepojenie PLC regulujúceho model elektrárne a Matlabu bol zvolený OPC server od spoločnosti Siemens s názvom OPC.SimaticNET. Ako klient na strane Matlabu bol použitý OPC Toolbox. Úmyselne boli vybrané komerčne dostupné a v priemysle využívajúce sa produkty. Cieľom nebola teda tvorba vlastného OPC servera alebo klienta.

Vďaka OPC komunikácii a prepojeniu PLC s Matlabom bolo možné vytvoriť viacero režimov riadenia. Okrem ovládania modelu z dotykového panelu, do ktorého zahrňujeme aj reguláciu algoritmom PID umiestneným v PLC (referencie sú zadávané z panelu), je možné riadiť model priamo z Matlabu, prípadne spustiť simuláciu Processor-in-the-loop (PIL), kedy regulátor v PLC reguluje nelineárny model v Matlabe-Simulinku. Vzhľadom na absenciu špeciálneho hardvéru nebola v rámci tejto práce realizovaná simulácia Hardware-in-the-loop (HIL).

Ukázalo sa, že OPC je za určitých okolností veľmi vhodným nástrojom, ktorý umožňuje poskytovať procesné dáta z PLC iným aplikáciám. V prípade, že server aj klient bežia pod rovnakým užívateľským účtom na rovnakom počítači, je konfigurácia veľmi rýchla. Problémy nastávajú, keď OPC klient a OPC server bežia na rôznych počítačoch. Nutné je pracné nastavovanie DCOM komunikácie. Zároveň je nevyhnutné mať na oboch počítačoch užívateľov s rovnakým menom a heslom. (Všetkými potrebnými nastaveniami sa zaoberá veľká časť tretej kapitoly.)

OPC server v našom prípade získaval dáta z PLC prostredníctvom ethernetu na lokálnej sieti v laboratóriu. Na tejto sieti komunikovali so serverom aj OPC klienti a zároveň boli na ňu pripojené aj všetky ostatné počítače v laboratóriu. Pri viac zaťaženej sieti to malo za následok malé výpadky v komunikácii. Meraniami bolo zistené, že najkratšia dĺžka trvania časovej slučky od zápisu dát OPC Toolboxom na OPC server, ich spracovania v PLC a opätovného prečítania z OPC servera OPC klientom sa pohybovala v intervaloch o niečo menších ako 100 ms. Takýto čas už môže byť pri regulácii rýchlejších systémov problematický. V našom prípade relatívne pomalšieho systému nehral tento čas výraznú úlohu.

V prípade, že sa zabezpečí stabilita prenosovej siete a systém je dostatočne pomalý na to, že mu oneskorenie komunikácie nevadí, OPC je veľmi vhodný nástroj na otestovanie správnosti riadiaceho algoritmu v rámci PIL simulácie. V prípade, že nejde o kritický systém (ale napr. o riadenie výukového modelu, ako je to u nás), je vhodný aj na priamu reguláciu z Matlabu. Je však nutné počítať s občasnými výpadkami vzhľadom na stabilitu používanej siete.

Literatúra

[1] ŠVEC, Jan. *Vizualizace a řízení modelu vodní elektrárny*. Praha, 2010. 68 s. Diplomová práce. ČVUT -- FEL, Katedra měření.

[2] ZVOLÁNEK, Michal. *Laboratorní model vodní přečerpávací elektrárny*. Praha, 2011. 70 s. Dokumentace. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky.

[3] JELÍNEK, Pavel. Simulace Processor In the Loop a Hardware In the Loop. *AUTOMA : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2007, 5, [cit. 2010-12-20]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34311>.

[4] *Autonomie* [online]. September 2010 [cit. 2010-12-21]. Model-based design definition of terms. Dostupné z WWW: <http://www.autonomie.net/references/model_based_design_defs_24.html>.

[5] RAPAVÝ, Martin. *Processor In the Loop simulace*. Praha, 2007. 111 s. Diplomová práce. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky.

[6] *OPC & DCOM Diagnostics : Hands-On OPC Training - Level 1*. OPC Training Institute, c2008. 235 s.

[7] *OPC System Architecture : Hands-On OPC Training - Level 2*. OPC Training Institute, c2008. 195 s.

[8] OLE for process control. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 21 July 2004, last modified on 16 December 2010 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/OLE_for_process_control>.

[9] Siemens. S7 communication via Industrial Ethernet . *Service & support* [online]. 03.12.2007 , V1.0, [cit. 2010-12-21]. Dostupný z WWW: <http://support.automation.siemens.com/WW/view/en/24969740>.

[10] Odstredivé čerpadlo. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 27. jún 2007, last modified on 22. október 2010 [cit. 2010-12-20]. Dostupné z WWW: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Odstrediv%C3%A9_%C4%8Derpadlo>.

[11] MIKULIK, Marian. *Mechanika tekutin*. [Žilina], [200?]. Prezentácie z prednášok. Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, katedra energetickej techniky. Dostupné z WWW: <http://fstroj.utc.sk/web/ket/na%20stiahnutie.htm>.

[12] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. 237 s.

[13] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. Praha : SNTL, 1962. Kavitace, s. 54.

[14] BLÁHA, Jaroslav; BRADA, Karel. *Hydrodynamická čerpadla*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1985. Kavitace v kapalinách, s. 33.

[15] KROUZA, Václav. *Čerpadla odstředivá a jim příbuzná*. Praha : Nakladatelství Československé akademie věd, 1956. 363 s.

[16] LAMAČ, Jiří. *Elektrohydraulická regulace vodních turbín*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. 160 s.

[17] ZVOLÁNEK, Michal. *Systémová integrace reálného modelu přečerpávací vodní elektrárny*. Praha, 2011. 60 s. Diplomová práce. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky.

[18] FETTERIK, Jozef. *PLC riadenie modelu technologického procesu*. Praha, 2008. 37 s., xiv s. Bakalárska práca. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky.

[19] SOCHOR, Milan. *Řízení modelu simulovaného v Matlabu pomocí PCS7*. Praha, 2009. 54 s. Diplomová práce. ČVUT - FEL, Katedra řídicí techniky.

[20] GOMEZ, Martin. Hardware-in-the-Loop Simulation. *EE Times Design* [online]. 30.11.2001, [cit. 2010-12-21]. Dostupný z WWW: <http://www.eetimes.com/design/embedded/4024865/Hardware-in-the-Loop-Simulation>.

[21] FRANEKOVÁ, Mária; PENIAK, Peter. Ukážky použitia Matlab OPC Toolboxu s technológiou Rockwell Automation. In *Conference Technical Computing* [online]. Praha : VŠCHT - Ústav počítačové a řídicí techniky, 2009 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/028_franekova.pdf>.

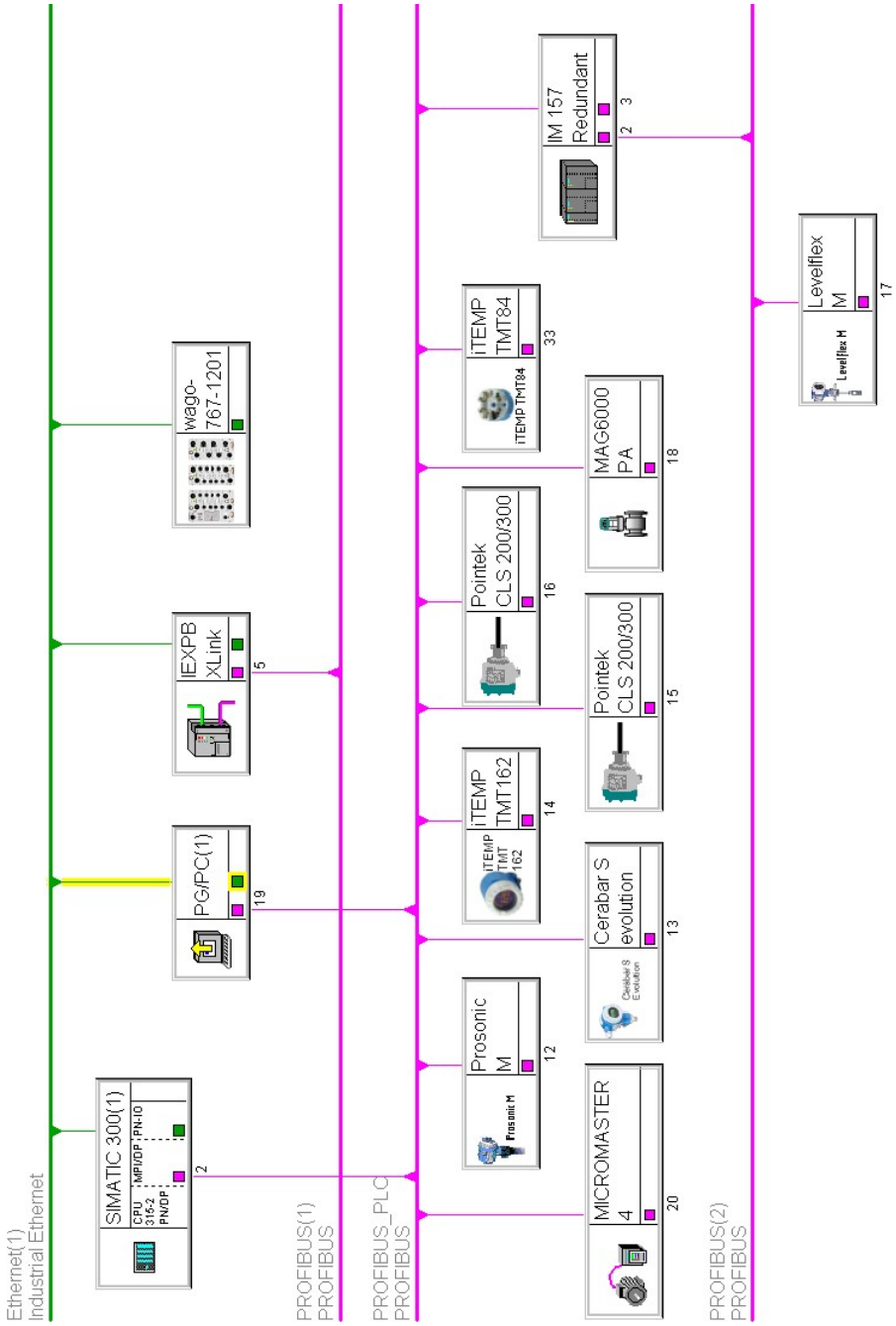
[22] ŠKRABÁNEK, Pavel; DUŠEK, František. Simulink and OPC in real time simulation. In *Conference Technical Computing* [online]. Praha : VŠCHT - Ústav počítačové a řídicí techniky, 2007 [cit. 2010-12-21]. Dostupné z WWW: <http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/skrabanek_dusek/skrabanek_dusek.pdf>.

[23] *Product Overview Introduction (OPC Toolbox™)* [online]. The MathWorks, 2010 [cit. 2010-12-21]. About OPC Toolbox Software. Dostupné z WWW: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/opc/ug/f10-6381.html#brcdx4_>.

Použitý software

	Verzia:
SIMATIC Manager © STEP 7 S7/M7/C7	V5.4 + SP5
STARTER	V4.1.5.1
OPC Scout	2.5
SIMATIC WinCC flexible	2008 SP1
Matlab R2007b Full Release	7.5.0.342 (R2007b)
AutoCAD 2005	N.63.0
FieldCare	2.05.00.1203

A Hardvérová konfigurácia PLC



B Popis blokov v PLC

OB1
Organizačný blok s hlavným programom spúšťajúci sa každý cyklus PLC.

OB35
Organizačný blok, ktorý je spúšťaný prerušením každých 100 ms. Je tu umiestnený digitálny filter výšky hladiny v pravej nádrži (FB30, DB30) a PID regulátory výšky hladiny a prietoku (SFB41, DB41, DB42)

FB1 (FB_sensor_DATA_RD)
Prečíta dáta zo senzorov cez Profibus DP a uloží ich do DB1. Zároveň prevedie úpravu načítaných dát do formy vhodnej na zobrazenie (napr. prevod na cm).

FB2 (FB_valves_RD)
Čita dáta z ventilov (koncové spínače, analógové hodnoty) cez moduly Waga a interpretuje ich hodnoty.

FB10 (FB_states)
Skopíruje do DB10 všetky zaujímavé stavové hodnoty elektrárne (z blokov DB1, DB2 a DB106), aby mohli byť k dispozícii pre vizualizáciu alebo OPC server.

FB20 (FB_datablocks_switching)
Tento blok obsahuje logiku prioritného prepínania medzi režimami ovládania a obsahuje funkcie, ktoré na základe aktuálneho režimu kopíruju dáta medzi príslušnými dátovými blokmi. Pri prepínaní režimov dôjde zároveň k vynulovaniu niektorých dát v dátových blokoch (hlavne akčné zásahy), aby nedošlo k nežiaducemu spusteniu systému.

FB30 (FB_Digital_Filter)
Digitálny Butterworthov filter.

FB41 (CONT_C)
Chránený funkčný blok – spojitý PID regulátor.

FB101 (CW1)
Prevádza syntézu riadiaceho slova (poskladanie bitov do slova). Jednotlivé bity berie z DB101 (defaultné, prípadne zvonku prepísané hodnoty) a výsledné slovo je uložené do DB110.

FB103 (SW1)
Prevádza analýzu stavového slova (rozklad na bity). Analyzované stavové slovo zoberie z DB110 a analyzované bity uloží do DB103.

FB105 (SETPOINT_CONV_W)
Konvertuje žiadanú rýchlosť čerpadla uvedenú v percentách v DB29 na hexadecimálne číslo a uloží ho do DB110.

FB106 (ACTUAL_V_CONV_W)
Skonvertuje skutočnú rýchlosť čerpadla uloženú v DB110 v hexadecimálnom tvare na percentá (0 – 100 %) a uloží ho do DB106.

FC1 (FC_RD_ALL)
Združuje funkčné bloky a funkcie, ktoré čítajú dáta zo senzorov, ventilov a meniča.

FC2 (FC_WR_ALL)
Združuje funkcie, ktoré zapisujú akčné zásahy na ventily a menič.

FC3 (FC_valves_WR)
Prepočíta akčný zásah na ventily a pošle ho Wagu.

FC6 (FC_MM440_RD)
Číta z Profibusu stavové dáta z meniča a ukladá ich do DB110, analyzuje ich v FB103 (DB103).

FC7 (FC_MM440_WR)
Vytvára riadiace slovo v FB101 a spolu aj so žiadanou rýchlosťou ho uloží do DB110. Následne oba pošle po Profibuse meniču.

FC21 (FC_panel_mode)
Kopírovanie dát medzi príslušnými dátovými blokmi v ovládaní modelu cez dotykový panel.

FC22 (FC_SAM/SRI_mode)
Kopírovanie dát medzi príslušnými dátovými blokmi v SRI režime.

FC23 (FC_PIL_mode)
Kopírovanie dát medzi príslušnými dátovými blokmi v PIL režime.

FC31 (FC_DeleteDB16)
Vynuluje dáta v bloku DB16, ktoré patria akčným zásahom.

FC32 (FC_DeleteDB28)
Vynuluje dáta v bloku DB28, ktoré patria akčným zásahom.

FC33 (FC_DeleteDB29)
Vynuluje dáta v bloku DB29, ktoré patria akčným zásahom.

DB1 (DB_sensor_data) – Inštančný blok FB1.

DB2 (DB_valves_RD) – Inštančný blok FB2.

DB5 (DB_states_CTRL)
Dátový blok so stavmi veličín, z ktorých počíta PLC akčný zásah.

DB7 (DB_states_fromMatlab)
Stavy softvérového modelu vypočítané Matlabom pri PIL simulácii.

DB10 (DB_states) – Inštančný blok DB10.

DB15 (DB_REF_CTRL)
Požadované hodnoty výšky hladiny a prietoku (referencie) určené pre regulátor v PLC.

DB16 (DB_Data_from_TouchPanel)
Dátový blok, do ktorého zapisuje vizualizácia.

DB17 (DB_REF_from_Matlab)
Dátový blok s referenciami zadávanými z Matlabu pri PIL simulácii.

DB20 (DB_datablocks_switching) – Inštančný blok DB20.

DB25 (DB_Man_Value_CTRL)
Akčný zásah vypočítaný regulátorom v PLC.

DB27 (DB_man_value_for_Matlab)
Dátový blok s akčným zásahom pre model v Matlabe pri PIL simulácii.

DB28 (DB_man_value_from_Matlab)
Dátový blok s akčným zásahom pri priamej regulácii z Matlabu

DB29 (DB_man_value_real)
Dátový blok s reálnymi akčnými zásahmi.

DB30 (DB_Digital_Filter) – Inštančný blok DB30.

DB41 (DB_PID_level_system) – Inštančný blok FB41.

DB42 (DB_PID_flow_system) – Inštančný blok FB41.

DB101 (ControlWord_TO_FreqConv) – Inštančný blok FB101.

DB103 (StatusWord_FROM_FreqConv) – Inštančný blok FB103.

DB105 (DB_ConverterSetp) – Inštančný blok FB105.

DB106 (DB_ActualSpeed) – Inštančný blok FB106.

DB110 (DB_FreqConv_DATA_EXCH)
Do tohto dátového bloku sa ukladajú stavové dáta meniča prečítané cez Profibus vo FC6.