



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

IMPLEMENTACE ARCHITEKTURY SCADA DO OPTOVLÁKNOVÝCH SENZORICKÝCH SYSTÉMŮ

IMPLEMENTATION OF SCADA ARCHITECTURE INTO FIBER OPTIC SENSING SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Šišolák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Dejdar

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Filip Šišolák

ID: 220830

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Implementace architektury SCADA do optovláknových senzorických systémů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je rozbor problematiky řízení a sběru dat ze zařízení s využitím SCADA. Součástí teoretického rozboru je také analýza současného stavu využití SCADA v optických senzorických systémech. Následně se student seznámí se senzorickým interferometrickým systémem a navrhne komunikaci pro síť Ethernet využívající standardizované protokoly jako je Modbus. Následně student připraví server, realizuje komunikaci a ověří funkčnost systému. V poslední části práce student zprovozní obousměrnou komunikaci mezi serverem a senzorickým systémem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika: Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno :Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] GENG, Hwaiyu (ed.). Internet of things and data analytics handbook. John Wiley & Sons, 2017.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou zberu a riadenia dát s využitím technológie SCADA a následnou realizáciou obojsmernej komunikácie. Súčasťou teoretického rozboru je taktiež analýza súčasného stavu využitia SCADA v optických senzorických systémoch. Z hľadiska nedostatkov dostupných SCADA systémov je implementovaný vlastný softvér programovaný vo vývojovom prostredí LabVIEW. Pri komunikácii s platformou myRIO je využívaný protokol Modbus TCP. Súčasťou práce je taktiež analýza maximálnej dosiahnuteľnej priepustnosti pri protokole Modbus TCP.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

LabVIEW, Modbus, myRIO, optické vlákno, optovláknový senzorický systém, SCADA, senzor

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the issue of data control and acquisition using SCADA technology and the subsequent implementation of two-way communication. The theoretical examination also includes an analysis of the current state of use of SCADA in optical sensing systems. In view of the shortcomings of the available SCADA systems, our own software programmed in the LabVIEW development environment is implemented. The Modbus TCP protocol is used for communication with the myRIO platform. Part of the work is also the analysis of the maximum achievable throughput with the Modbus TCP protocol.

KEYWORDS

fiber optic sensing system, LabVIEW, Modbus, myRIO, optical fiber, SCADA, sensor

ŠIŠOLÁK, Filip. *Implementace architektury SCADA do optovláknových senzorických systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 73 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Petr Dejdar

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Filip Šišolák
VUT ID autora: 220830
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečnéj práce: Implementace architektury SCADA do optovláknových senzorických systémů

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Petrovi Dejdarovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Tvorba tejto práce by sa nezaobišla bez patričnej podpory od rodiny a blízkych, ktorým na tomto mieste patrí najväčšia vďaka.

Obsah

Úvod	12
1 SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition	13
1.1 Generácie SCADA systému	13
1.1.1 Monolitický SCADA systém	13
1.1.2 Distribuovaný SCADA systém	13
1.1.3 Sieťový SCADA systém	14
1.1.4 IoT SCADA systém	14
1.2 Využitie v priemysle	14
2 Architektúra systému SCADA	15
2.1 Field Devices	15
2.1.1 Senzor	16
2.1.2 Akčný člen	16
2.2 Vrstva zberu dát	16
2.2.1 RTU	16
2.2.2 PLC	17
2.2.3 EFM	17
2.3 Transportná vrstva	18
2.3.1 Krútená dvojlinka	18
2.3.2 Koaxiálny kábel	18
2.3.3 Optický kábel	19
2.3.4 Satelitná komunikácia	19
2.3.5 Mikrovlnná komunikácia	19
2.3.6 Rádiová komunikácia	20
2.4 Hostiteľská vrstva	21
2.4.1 MTU	21
2.4.2 Real Time Database	22
2.4.3 Historian Database	22
2.4.4 HMI	22
2.4.5 Alarm Managment	22
3 Komunikačné protokoly	23
3.1 Štandardy	23
3.1.1 IEC 60870-5-104	23
3.1.2 DNP3	24
3.2 MODBUS	26

3.2.1	Popis protokolu Modbus TCP	27
3.2.2	Hlavička MBAP	27
3.2.3	PDU	28
4	Optovláknové senzorické systémy	29
4.1	Optovláknové interferometrické senzory	29
4.1.1	Architektúra interferometrov	30
4.2	Senzory založené na zmene polarizácie	30
4.3	Senzory založené na spätnom rozptyle	31
4.3.1	Senzory na báze OTDR	31
4.3.2	Senzory na báze FBG	32
4.4	Aktuálny stav využitia v SCADA systémoch	32
5	Návrh komunikácie	34
5.1	MTU	35
5.1.1	Výber vizualizačného softvéru	35
5.1.2	Výber databázového systému	36
5.2	Transportná vrstva	38
5.3	RTU	38
5.3.1	NI myRIO-1950	39
5.4	Senzorický systém	39
6	Programové riešenie	41
6.1	Modbus TCP	41
6.1.1	Program ModbusMaster	41
6.1.2	Program ModbusSlave	46
6.2	DNP3	46
7	Maximalizácia výkonnosti	48
7.1	Program ModbusMasterHT	48
7.2	Program ModbusSlaveHT	49
7.3	Výsledky	49
	Záver	52
	Literatúra	53
	Zoznam symbolov a skratiek	59
	Zoznam príloh	61
A	ModbusMaster	62

B	ModbusSlave	67
C	ModbusMasterHT	69
D	ModbusSlaveHT	72
E	Obsah elektronickej prílohy	73

Zoznam obrázkov

2.1	Architektúra systému SCADA [6].	15
2.2	Architektúra RTU [7].	17
2.3	Architektúra PLC [15].	18
2.4	Architektúra hostiteľskej vrstvy SCADA systému [23].	21
3.1	Výber noriem pre protokol IEC 60870-5-104 [28].	24
3.2	Komunikačný model DNP3 EPA [29].	25
3.3	Štruktúra protokolu Modbus TCP [31].	27
3.4	Úplný výpis kódov funkcií protokolu MODBUS TCP [30].	28
4.1	Bloková schéma optovláknového interferometrického senzorického systému [32].	29
4.2	Bloková schéma polarimetru [35].	31
4.3	Bloková schéma systému na báze OTDR [36].	32
4.4	Bloková schéma senzorického systému na báze FBG [37].	32
5.1	Návrh komunikácie so senzorickým systémom	34
5.2	Štruktúra dátového formátu HDF5 [47].	37
5.3	Príklad komunikácie prostredníctvom protokolu DNP3.	38
5.4	Príklad komunikácie prostredníctvom protokolu Modbus TCP.	38
5.5	Rozloženie súčiastok na doske myRIO [49].	39
6.1	Grafický kód komunikačnej časti pre interferometer.	42
6.2	Značka a grafický kód bloku UWarrayToSGLarray.	43
6.3	Grafický kód spracovania dát z registrov pre kombinované meranie.	43
6.4	Grafický kód pre automatické pridávanie dátumu a času k názvu datasetu.	44
6.5	Grafický kód časti na ukladanie dát do súboru HDF5 pre interferometer.	45
6.6	Grafický kód na zápis atribútov do datasetu pre interferometer.	45
6.7	Predný panel aplikácie ModbusMaster s meraným priebehom interferometru.	46
6.8	Grafický kód ModbusSlave pre meranie 5 pinov.	47
7.1	Grafický kód ModbusMasterHT – časť testovania maximálnej rýchlosti.	48
7.2	Grafický kód ModbusSlaveHT.	49
7.3	Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Test FOS s vykresľovaním každej vzorky.	50
7.4	Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Test FOS s vykresľovaním poslednej vzorky v packete.	50
7.5	Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Measure&Save s vykresľovaním každej vzorky.	51

7.6	Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Measure&Save bez vykresľovania.	51
A.1	Bloková schéma programu ModbusMaster pre meranie interferometru.	62
A.2	Bloková schéma programu ModbusMaster pre meranie polarimetru.	63
A.3	Bloková schéma programu ModbusMaster pre kombinované meranie.	64
A.4	Predný panel programu ModbusMaster pre meranie interferometru.	65
A.5	Predný panel programu ModbusMaster pre meranie polarimetru.	65
A.6	Predný panel programu ModbusMaster pre kombinované meranie.	66
B.1	Bloková schéma programu ModbusSlave pre meranie interferometru.	67
B.2	Bloková schéma programu ModbusSlave pre meranie polarimetru.	67
B.3	Bloková schéma programu ModbusSlave pre kombinované meranie.	68
C.1	Bloková schéma programu ModbusMasterHT mód Test FOS.	69
C.2	Bloková schéma programu ModbusMasterHT mód Measure&Save.	70
C.3	Predný panel programu ModbusMasterHT mód Test FOS.	71
C.4	Predný panel programu ModbusMasterHT mód Measure&Save.	71
D.1	Bloková schéma programu ModbusSlaveHT.	72

Úvod

Hlavným cieľom bakalárskej práce je prenos nameraných dát z optovláknových senzorických systémov pomocou štandardizovaných komunikačných protokolov využívaných v SCADA systémoch.

V teoretickej časti bakalárskej práce je pozornosť venovaná objasneniu pojmu SCADA, jednotlivým generáciám vývoja systému a uvedeniu odvetví implementujúcich systém SCADA. Ďalej sa teoretická časť zaoberá problematikou architektúry, prehľadne rozdelená do štyroch hlavných vrstiev, pričom sú popísané jednotlivé stavebné prvky a komunikačné média využívané na prenos informácií. V nasledujúcej časti sú rozobrané najčastejšie štandardné a verejné komunikačné protokoly pre siete Ethernet využívané v SCADA systémoch. Posledná časť teoretickej časti sa zaoberá popisom princípu funkčnosti základných typov optovláknových senzorických systémov využívajúcich sa na meranie rôznych fyzikálnych veličín a analýzou súčasného stavu využitia týchto senzorických systémov v prepojení s technológiou SCADA, formou rozboru výskumných článkov.

Praktická časť práce je rozdelená do troch kapitol. Prvá časť sa zaoberá návrhom komunikácie pre sieť Ethernet, určuje podmienky pre výber vhodného SCADA softvéru a formátu ukladania týchto dát. Časť taktiež obsahuje objasnenie dôvodu výberu vývoja vlastnej aplikácie na zber dát zo senzorického systému za využitia komunikačných protokolov Modbus TCP a DNP3. Druhá časť praktickej časti venuje pozornosť popisu vytvorených programov a problémom spojených s vývojom aplikácie pre protokol DNP3. V poslednej časti je upriamená pozornosť na minimalizáciu programu pre dosiahnutie maximálnej rýchlosti prenosu informácií za využitia protokolu Modbus TCP.

1 SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

Pojem SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) vznikol koncom šesťdesiatych rokov minulého storočia príchodom počítačov a automatizácie do priemyslu. Ide o technológiu využívanú prevažne v ťažkom priemysle ale aj vo verejnoprospešných službách, na vzdialené monitorovanie a riadenie zariadení a procesov. Vývoj tejto technológie viedol k zvýšeniu efektivity výrobných procesov ako aj k zefektívneniu využívania ľudských a finančných zdrojov, čím sa zásadne zmenil spôsob prevádzkovania výrobných závodov, rafinérií či elektrární [1].

1.1 Generácie SCADA systému

V tejto podkapitole sa budeme venovať postupnému vývoju SCADA systémov, ktorý prebiehal paralelne s vývojom modernej výpočtovej techniky. Tento proces môžeme rozdeliť do štyroch generácií SCADA systému:

- monolitický,
- distribuovaný,
- sieťový,
- internet vecí (Internet of Things - IoT) [2].

1.1.1 Monolitický SCADA systém

Monolitický SCADA systém bol prvou generáciou vytvorenou v čase, keď ešte neboli vyvinuté siete. Z toho dôvodu prvé riadiace systémy nebolo možné prepojiť s ostatnými riadiacimi systémami. Aj keď sa pojem WAN (Wide Area Network) používal, účelom tejto siete bolo fyzicky prepojiť RTU (Remote Terminal Unit) a zabezpečiť výmenu dát s MTU (Master Terminal Unit). Jediné dostupné komunikačné protokoly boli vyvinuté výrobcami RTU, ktoré dokázali skenovanie, ovládanie a výmenu dát s MTU od rovnakého výrobcu [1, 3].

1.1.2 Distribuovaný SCADA systém

Druhá generácia označovaná ako distribuovaný SCADA systém, bola založená na vzájomnom prepojení operačných staníc pomocou siete LAN (Local Area Network). Jednotlivé operačné stanice mohli fungovať ako komunikačný procesor, HMI (Human-Machine Interface), databázové servery a podobne, čo malo za dôsledok zvýšenie výpočtového výkonu, redundancie a spoľahlivosti systému. Rovnako ako v prípade

monolitického systému boli distribuované SCADA systémy obmedzené na predajcom dodávaný hardvér, softvér, sieťové protokoly a iné periférne zariadenia [4].

1.1.3 Sieťový SCADA systém

Tretia generácia nazývaná ako moderný SCADA systém, využívala siete a web z dôvodu štandardizácie a zníženia nákladov pri budovaní rozsiahlych systémov. Sieťový SCADA systém je veľmi podobný distribuovanému, s významným rozdielom v používaní štandardizovaných protokolov na komunikáciu, čo umožňuje distribuovať funkcionality SCADA vo WAN. Kľúčovým faktorom, ktorý napomohol rýchlemu vývoju tretej generácie, bolo použitie WAN protokolov ako Internet Protokol na komunikáciu medzi MTU a RTU [1, 4].

1.1.4 IoT SCADA systém

Štvrtá generácia je spojením technológií SCADA a IoT. Integrácia IoT inovácií a ekonomicky dostupných cloudových služieb s existujúcimi systémami SCADA výrazne znížila náklady na jej vybudovanie a nasadenie. Zber a kontrola všetkých údajov prebieha pomocou otvoreného komunikačného štandardu pričom všetky dáta sú ukladané [2].

1.2 Využitie v priemysle

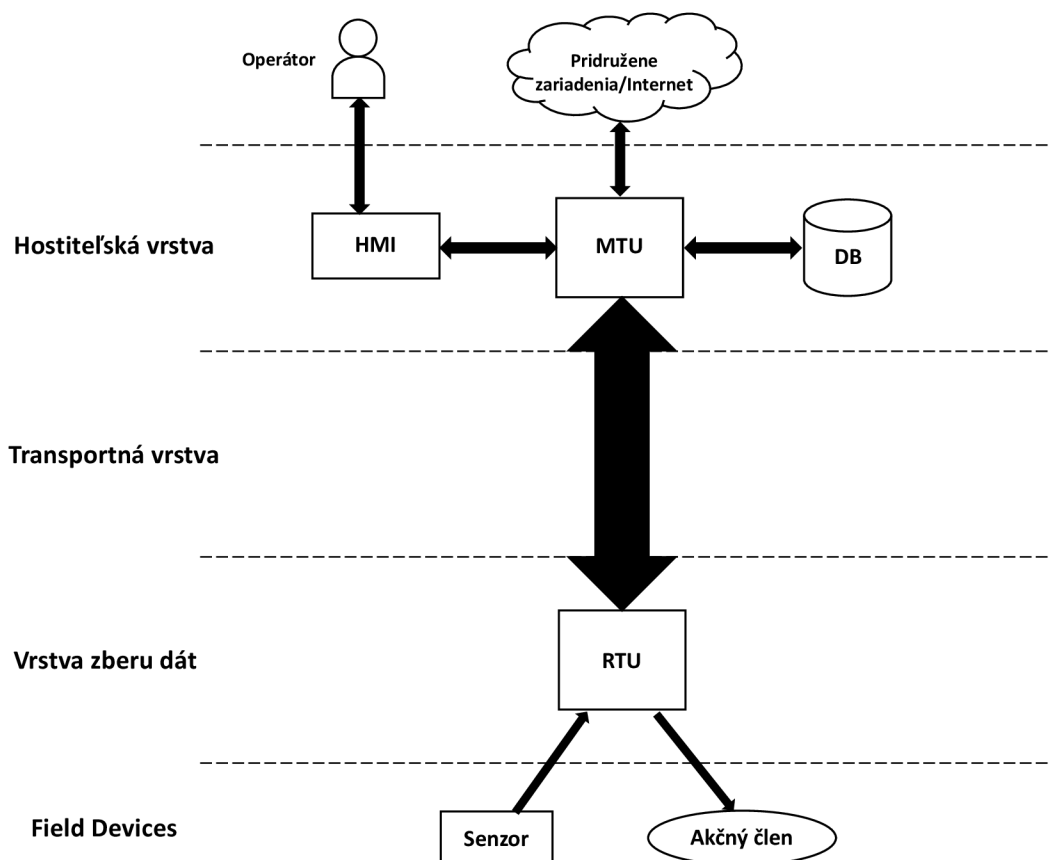
Systémy SCADA zohrávajú kľúčovú úlohu v mnohých priemyselných aplikáciách. Medzi odvetvia priemyslu využívajúce systémy SCADA vo svojej každodennej prevádzke patrí najmä:

- vodohospodársky priemysel,
- energetický priemysel,
- plynárenský priemysel,
- ropný priemysel.

SCADA má uplatnenie aj vo výrobných závodoch, hromadnej doprave či zdravotníctve [5].

2 Architektúra systému SCADA

Podľa Avrahamiho sa SCADA systémy zaraďujú do kategórie priemyselných riadiacich systémov. Bez ohľadu na to čo monitorujú, štruktúra SCADA systémov je v základe rovnaká. Sú založené na spojení hardvéru, softvéru a komunikačných technológií použitých pri vytváraní, ukladaní, výmene a spracovávaní informácií. Architektúru možno rozdeliť do štyroch vrstiev: vybavenie nachádzajúce sa v teréne (Field devices), vrstva zberu dát, transportná vrstva a hostiteľská vrstva SCADA systému [6].



Obr. 2.1: Architektúra systému SCADA [6].

2.1 Field Devices

V prvej vrstve sa nachádzajú zariadenia, ktoré sú v priamom kontakte s procesom a slúžia na meranie dát a vykonávanie úkonov zaslaných riadiacim prvkom.

2.1.1 Senzor

Senzor je elektrické zariadenie, ktoré reaguje na zmenu prostredia a konvertuje fyzikálny jav na merateľnú veličinu akou je napätie alebo prúd. Výstupný signál je ďalej posielať do RTU alebo PLC (Programmable Logic Controller), kde je spracovaný. Z hľadiska princípu fungovania môžeme rozdeliť senzory na analógové a digitálne [7].

2.1.2 Akčný člen

V systémoch SCADA slúžia akčné členy na požadovanú zmenu procesu. Ide o zariadenia, ktoré premieňajú určitý zdroj energie, najčastejšie elektrický, hydraulický alebo pneumatický na mechanický pohyb. V prípade potreby sú riadené signálmi z RTU alebo PLC [8].

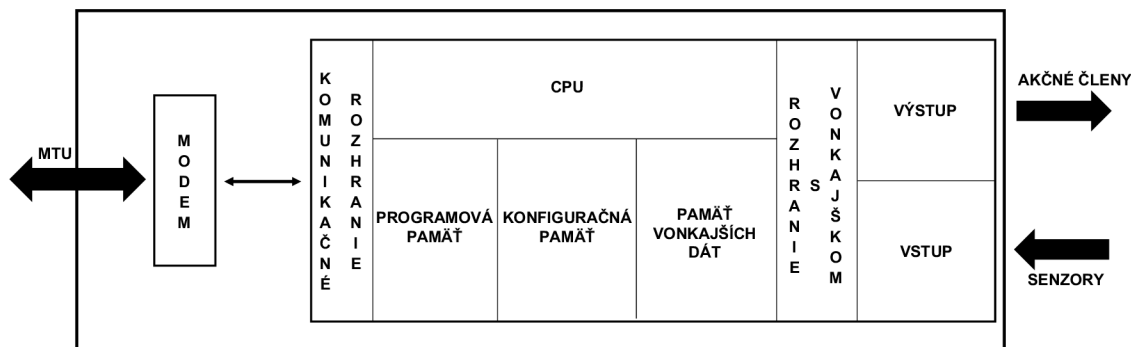
2.2 Vrstva zberu dát

Zariadenia pracujúce na tejto vrstve sa nachádzajú v blízkosti senzorov a akčných členov. Ich hlavnou úlohou je získavanie dát z týchto zariadení, riadenie procesu a následné zabezpečenie možnosti komunikácie s MTU.

2.2.1 RTU

Ako už bolo povedané, cieľom vzdialenej koncovej jednotky je zber dát zo zariadení snímajúcich proces. Ich kódovanie do podoby vhodnej na prenos po komunikačnom kanále a nakoniec zakódované dáta preniesť príslušnej MTU. Rovnako musí byť RTU schopná prijímať riadiace pokyny obsluhy z MTU a následne ich implementovať do procesu. V celom systéme SCADA môže byť použitá buď iba jedna alebo až niekoľko tisíc vzdialených koncových jednotiek [9].

Ako zobrazuje obrázok 2.2, moderné RTU sú mikropočítače. Hlavným prvkom je mikroprocesor, ktorý je obohatený špeciálnymi modulmi určenými na diaľkovú komunikáciu a obsluhu zariadení na nižšej vrstve. Moderné RTU sú vo väčšine prípadov ľahko konfigurovateľné pomocou webového rozhrania. Veľkou výhodou oproti PLC je odolnosť voči extrémnym vplyvom životného prostredia. Teplotný rozsah pri štandardných vyhotoveniach je od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z tohto hľadiska je využiteľnosť RTU v systémoch SCADA väčšia. Príkladom využitia je ropná plošina umiestnená v oceáne, kde sú veľmi nepriaznivé a premenlivé mikroklimatické podmienky [7, 10].



Obr. 2.2: Architektúra RTU [7].

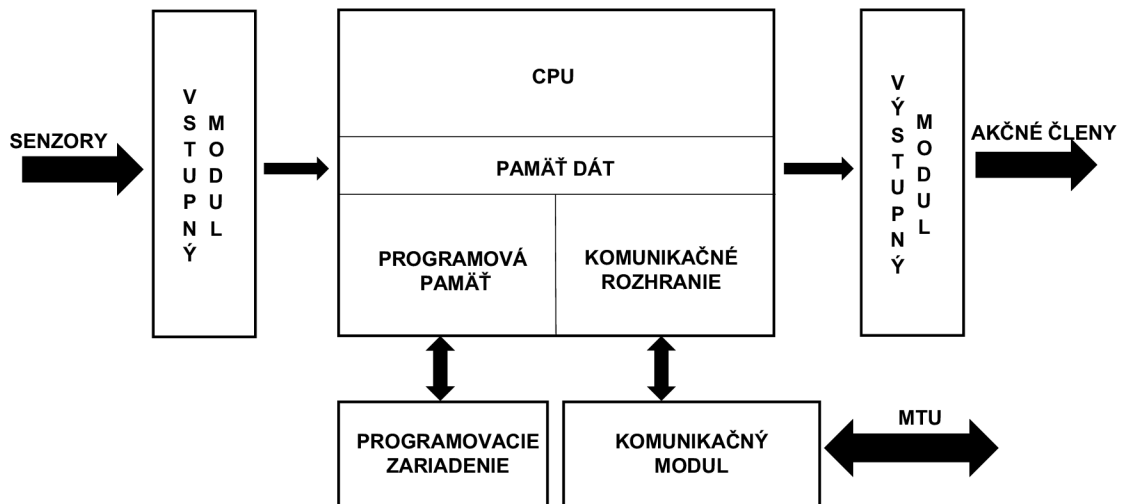
2.2.2 PLC

Programovateľné logické automaty boli vyvinuté v sedemdesiatych rokoch minulého storočia, aby nahradili pevne zapojené relé panely. Ako už názov napovedá, oproti konfigurovateľným RTU je potrebné PLC naprogramovať. Na to slúžia textové alebo grafické programovacie jazyky, ktoré sú definované štýlom, akým sú písané. Najviac sa v praxi používa štruktúrovaný text alebo diagramy rebríkovej logiky. Ovládacie funkcie PLC sú oproti RTU sofistikovanejšie a dokážu implementovať zložité logické operácie na riadenie a sledovanie procesov v reálnom čase.

Vyhotovením sa môžu PLC deliť na kompaktné a modulárne. Kompaktné sú z hľadiska rozširiteľnosti obmedzené, tým že celé PLC je vyhotovené vo výrobni. Obsahuje digitálne aj analógové vstupy a výstupy, procesor, pamäť a podporu komunikácie. Vlastnosti jednotlivých modulov ako napríklad počet vstupov a výstupov sú pevne dané výrobcom a nemenné. Modulárne sa skladajú z jednotlivých častí, ktoré sa následne montujú na DIN lišty. Moduly ako procesor, vstupy, výstupy, komunikačné moduly a podobne si vie zákazník presne nakombinovať podľa potreby [1, 11, 12].

2.2.3 EFM

Ako uvádza Russel vo svojom článku [13], elektronické prietokomery sú špeciálne navrhnuté RTU na meranie v súlade s API (American Petroleum Institute) a AGA (American Gas Association) štandardmi. Podľa skupenstva meranej látky sa EFM (Electronic Flow Measurement) delia na elektronický prietokomer tekutín a elektronický prietokomer plynov. Oproti PLC a RTU musia zabezpečiť prenos veľkých objemov dát získaných z merania ako napríklad objem, energiu, priemernú teplotu, účinnosť a podobne [14].



Obr. 2.3: Architektúra PLC [15].

2.3 Transportná vrstva

Aby bolo možné riadiť a sledovať procesy z pohodlia velína, je nevyhnutné zabezpečiť prenos dát medzi jednotlivými vzdialenými koncovými jednotkami a MTU. Podľa slov korporácie EnerSys [16], vieme získané dáta prenášať prostredníctvom rádiovkej, mikrovlnovej, satelitnej a káblovej komunikácie. V tejto kapitole sa budeme zaoberať jednotlivými komunikačnými médiami na prenos dát medzi RTU a MTU. Dáta z jedného bodu do druhého cez komunikačný kanál prenášame pomocou signálu.

2.3.1 Krútená dvojlinka

Krútená dvojlinka je najvhodnejším ekonomickým riešením pre prenos dát na krátku vzdialenosť. Kábel sa skladá zo štyroch identických dvojíc od seba odizolovaných medených vodičov, ktoré sú krútené do seba s frekvenciou 40 zákrutov na meter. Nevýhodou tohto typu kábla je malá odolnosť voči vode a elektromagnetickému rušeniu [17, 18].

2.3.2 Koaxiálny kábel

Koaxiálny kábel sa skladá z medeného vodiča obaleného v izolačnej vrstve, ktorá je ďalej obalená vodičom vo forme opletanej sieťky alebo kovovej fólie. Celý kábel je obalený izolačnou vrstvou, ktorá ho chráni pred vonkajšími vplyvmi.

Koaxiálny kábel bol vyvinutý na prenos vysoko frekvenčných signálov až niekoľko MHz s malým útlmom v porovnaní s krútenou dvojlinkou. Oproti krútenej dvojlinkke má koaxiálny kábel väčšiu imunitu voči elektromagnetickému rušeniu a kapacitu

kanálu. Metóda vedenia koaxiálneho kábla môže byť podzemná a vedená vo výške pomocou telekomunikačných stĺpov alebo konštrukcii elektrického vedenia [17].

2.3.3 Optický kábel

Optické vlákno pozostáva z jadra, plášťa a plastovej ochrany, ktorá chráni prenosové médium pred okolitými vplyvmi. Najčastejšie sa na výrobu používa kremík s rôznymi prímiesami oxidov [19].

Kvôli svojim vlastnostiam útlmu 0,25 dB/km, vývoju laserov a optických detektorov sú optické káble často využívané v systémoch SCADA, kde prenášame dáta na veľkú vzdialenosť. Rovnako ako pri medených kábloch je vedenie riešené buď pod zemou alebo vzduchom. Kvôli odolnosti voči mechanickému namáhaniu sú vlákna voľne umiestnené v polotuhých rúrkach. Existujú taktiež špeciálne navrhnuté typy optických káblov pre energetický priemysel ako OPGW, ADSS a WOC [17, 18].

2.3.4 Satelitná komunikácia

Satelitná komunikácia je typ bezdrôtovej komunikácie, ktorá funguje na princípe point-to-point. Aby bola umožnená komunikácia pomocou satelitu, je nevyhnutná prítomnosť pozemných staníc. Pozemné stanice sa skladajú z antény, ktorá je presne nasmerovaná na satelit rádiového transceiveru s nízkošumovým zosilňovačom slúžiacim na prijímanie a vysielanie signálu. Nutnými sú aj zariadenia pracujúce v základnom pásme ako napr. modem, kodéry, dekodéry [20]. Satelity obsahujú niekoľko rádiových transpondérov, ktoré prijímajú a následne vysielajú signál spolu so zakódovanými dátami späť na zemský povrch.

Z celkového spektra určeného pre satelitnú komunikáciu (1–40 GHz) sa v systémoch SCADA najčastejšie využívajú pásma C a KU s frekvenciami v rozmedzí 3,4–4,2 GHz, resp. 12–18 GHz [21]. Do systémov SCADA sa implementujú len satelity, ktoré obiehajú zem na geostacionárnej orbite zeme. V tejto výške trvá satelitu obeh okolo zeme 24 hodín, čo v praxi znamená, že satelit je vždy v rovnakom bode na oblohe. Výhodou satelitnej komunikácie medzi MTU a RTU je, že je použiteľná na akomkoľvek mieste na svete, bez potreby brania ohľadu na okolité prostredie, ktoré by mohlo byť prekážkou v prenášaní signálu. Z hľadiska vstupných nákladov na vybudovanie infraštruktúry je satelit veľmi drahý. Ďalšou nevýhodou sú prestoje satelitov minimálne jeden až dvakrát ročne, kvôli údržbe a aktualizáciám [16, 17, 22].

2.3.5 Mikrovlnná komunikácia

Pojem mikrovlnná komunikácia je v podstate komunikácia pomocou UHF (Ultra High Frequency) rádia, ktoré pracuje s frekvenciami nad 1 GHz. Staršia technológia

analogového prenosu bola nahradená digitálnou s viacerých dôvodov. V porovnaní s analogovou technológiou je digitálny prenos schopný dosahovať vyššie prenosové rýchlosti, má väčšiu kapacitu kanála, je flexibilnejší a z hľadiska nákladov efektívnejší. Vyžadujú malú potrebu údržby, čo potvrdzuje Marihart vo svojej publikácii [17], kde doba medzi jednotlivými poruchami činní do 30 rokov.

Nevýhodou mikrovlnnej komunikácie v porovnaní s ostatnými bezdrôtovými komunikáciami je nutnosť špecializovaného vybavenia, školenia pracovníkov a priamej viditeľnosti jednotlivých prijímacích a vysielačích veží [16].

2.3.6 Rádiová komunikácia

Taktiež ide o bezdrôtovú komunikáciu, kde sú dáta modulované na signály z rozsahu frekvencie od 30 do 3000 MHz. V tejto kategórii sa ďalej delí na rádiovú komunikáciu veľmi vysokých frekvencií a ultra vysokých frekvencií.

Ako uvádza korporácia EnerSys vo svojej prednáške z roku 2015 [16], prenosová rýchlosť analogového prenosu činí 9600 bps a v prípade digitálneho prenosu 56 kbps. Z hľadiska inštalácie v teréne je rádiová komunikácia jednoduchá a finančne nenáročná. Pri budovaní infraštruktúry je zapotreby správneho návrhu antény na jednotlivé prenášané frekvencie [16, 17].

VHF

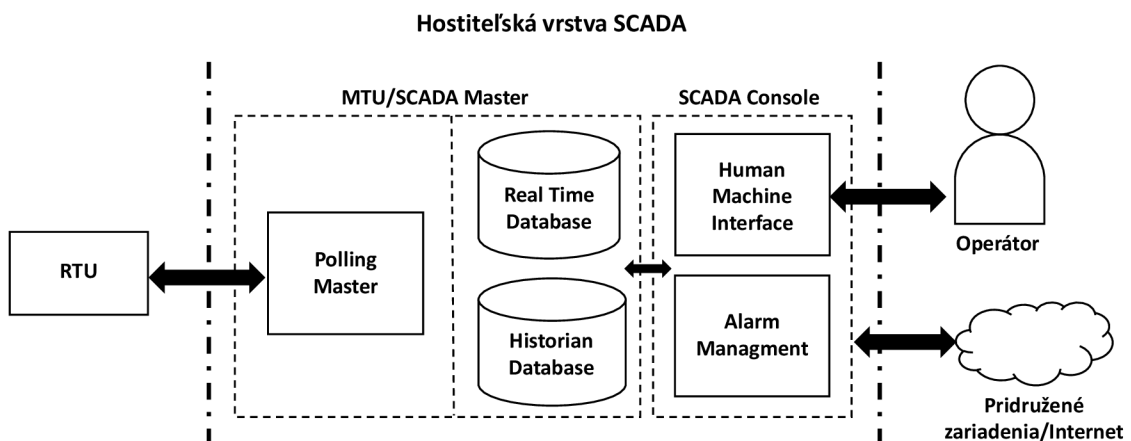
Pásmo VHF (Very High Frequency) siaha od 30 do 300 MHz. Najčastejšie je využívané na prenos vysielať FM rádia alebo na komunikáciu dispečingu s mobilnými jednotkami pomocou vysielačiek v obore taxi služieb a policajného zboru. Aj keď by v systéme SCADA našlo uplatnenie na prenos dát, frekvencie potrebné na prenos sú v tomto spektre rezervované pre vyššie spomenuté účely [17, 21].

UHF

Pásmo UHF je definované v medziach od 300 do 3000 MHz. Pásmo ktoré využívajú UHF rádia sa pohybujú v rozsahu frekvencií od 400 do 900 MHz. Systémy operujúce nad touto hranicou sa nazývajú mikrovlnné, o ktorých som sa zmienil v kapitole 2.3.5. Z hľadiska spôsobu komunikácie môžu byť systémy UHF point-to-point, MARS, TRM, kde všetky nachádzajú využitie v systémoch SCADA na prenos dát, telemetrie, chybových hlásení a podobne [17].

2.4 Hostiteľská vrstva

Hostiteľská vrstva má v systéme SCADA za úlohu zbierať dáta z RTU, vydávať príkazy RTU, zhromažďovať dáta, ukladať informácie, riadiť a kontrolovať proces, odovzdávať informácie pridruženým systémom a interagovať s riadiacimi pracovníkmi. Na splnenie vyššie uvedených úloh je potrebná prítomnosť adekvátneho hardvéru a softvéru. Časti hostiteľskej vrstvy sú zobrazené v obrázku 2.4, ktoré budú bližšie rozobrané v tejto kapitole. Jednotlivé partie môžu byť ako jedno zariadenie alebo sieť zariadení s jednotlivými funkciami [6].



Obr. 2.4: Architektúra hostiteľskej vrstvy SCADA systému [23].

2.4.1 MTU

Srdcom celého systému SCADA je hlavná koncová jednotka. V terminológii sa tak tiež využívajú synonymá ako SCADA server alebo SCADA master. Jedná sa o ovládač na báze počítača s príslušným riadiacim softvérom, ktorého úlohou je obojsmerne komunikovať so vzdialenými koncovými jednotkami, vydávať im príkazy, spracovávať informácie a ukladať ich.

MTU získava údaje prostredníctvom procesu nazývaného polling. Princíp pollingu je založený na odosielaní správ vzdialenej koncovej jednotke, ktorá následne odošle odpoveď s konkrétnymi požadovanými hodnotami. Frekvencia dotazovania závisí od dôležitosti sledovania procesu a rizík, ktoré môžu nastať. Podľa týchto kritérií sa následne určuje frekvencia dotazovania a nastaví sa požadovaná hodnota ako napríklad každú sekundu, minútu, polhodinu a podobne. Získané dáta sú následne ukladané do databáz, odkiaľ sa s nimi ďalej pracuje. Z hľadiska doby, po ktorú sú dáta uložené rozdeľujeme databazy na Real Time Database a Historian Database.

V prípade chybového hlásenie, ktoré by nastalo medzi jednotlivými dobami dotazovania, RTU vydá požiadavku na dotaz, ktorá bude následne spracovaná [7, 23, 24].

2.4.2 Real Time Database

Ide o databázu implementovanú z hľadiska množstva zdieľaných a kontrolných dát v reálnom čase, ktoré systém spracováva. Dáta v reálnom čase majú krátky životný cyklus. Môžu byť aktualizované každú sekundu a rozhodovanie alebo výpočty na základe starých dát, by boli neprípustné. Databáza v reálnom čase oproti klasickej ukladá dáta do pamäte RAM, ktorá poskytuje vyšší výpočtový výkon potrebný pri rýchlo sa meniacich dátach [23, 25].

2.4.3 Historian Database

Historian je zariadenie zodpovedné za uchovávanie a zaznamenávanie všetkých dát, ktoré prechádzajú cez MTU. Umožňuje pozrieť sa operátorom a zainteresovaným stranám na historické údaje. Priame prepojenie s HMI softvérom alebo Real Time Database umožňuje vytvoriť si obraz dát v reálno čase a uložiť si ich na lokálny disk alebo cloud. Ďalšími schopnosťami historianu sú odpovedanie na dopyt po údajoch, vykresľovanie grafov za určité obdobie a vytváranie naplánovaných reportov [23, 26].

2.4.4 HMI

V preklade rozhranie človek-stroj poukazuje na softvérovú časť systému SCADA. Jej hlavnými úlohami je prezentácia meraných veličín a možnosti manuálne zasiahnuť pracovníkovi dispečingu do procesu. V prípade vzniknutia chyby alebo nechcených stavov dať operátorovi najavo, že niečo nie je v poriadku. Všetky tieto funkcie prezentuje pracovníkovi za využitia zobrazovacieho zariadenia ako monitor, tablet alebo prípadne tlačiareň. Grafické užívateľské rozhranie, by malo byť navrhnuté tak aby bolo čo najprehľadnejšie a zobrazovalo len potrebné informácie a riadiace prvky [7, 23].

2.4.5 Alarm Managment

Ide o systém, ktorý monitoruje všetky namerané dáta a porovnáva ich s hraničnými hodnotami. V prípade, že nastane stav kedy hodnota prekročí limity, má za úlohu podať operátorovi hlásenie o prekročení limitov za využitia HMI [23].

3 Komunikačné protokoly

V minulosti boli SCADA systémy odkázané na siete komunikujúce pomocou súkromných protokolov, ktoré boli vyvinuté spolupracovať len s hardvérom a softvérom od rovnakého výrobcu. S vývojom technológií bol kladený dôraz na zavedenie verejných protokolov a protokolov otvorených štandardov.

3.1 Štandardy

Uznanie potreby otvorených štandardov komunikačných protokolov SCADA viedlo koncom 90 rokov k zavedeniu dvoch komunikačných protokolov, známych ako DNP3 a IEC 60870-5-101. Tieto dva protokoly boli paralelne vyvíjané rozličnými spoločnosťami, čo spôsobilo určitú podobnosť na spojovej vrstve. V rovnakom čase vznikol aj sedem vrstvový hierarchický komunikačný model, dnes známy ako ISO/OSI. Trojvrstvová verzia tohto modelu bola navrhnutá organizáciou IEC (International Electrotechnical Commission). Model EPA (Enhanced Performance Architecture) poskytoval zjednodušený hierarchický model, ktorý bol vhodný ako základ pre SCADA komunikáciu [27].

3.1.1 IEC 60870-5-104

S vývojom komunikácie pomocou packetovo orientovaných sietí, rástol záujem využívať TCP/IP aj v oblasti priemyslu. Využitie existujúcej komunikačnej infraštruktúry na prenos protokolových správ bolo pre SCADA atraktívne vďaka úsporám, ktoré ponúka. Potreba štandardu pre prenos komunikačného protokolu cez dátové siete viedla k rozšíreniu existujúceho štandardu IEC 60780-5-101 o prenos správ pomocou protokolov TCP/IP.

Ako demonštruje obr. 3.1, spojová a fyzická vrstva bola nahradená, pričom aplikačná vrstva, jej funkcie a dátové objekty sú podobné s profilom T101 (IEC 60870-5-101).

Na aplikačnej vrstve sa pracuje s APDU (Application Protocol Data Unit). Podľa definície protokolu, APDU pozostáva z hlavičky riadiacich informácií (APCI – Application Protocol Control Info) a dát (ASDU – Application Service Data Unit). V prípade riadiaceho poľa formátu S, APDU obsahuje iba APCI (Application Protocol Control Info) [27].

APCI

Štruktúra APCI vždy začína štartovacím bajtom s hodnotou 0x68. Následuje 8b pole určujúce dĺžku APDU a štyri 8b riadiace polia.

Vybrané funkcie aplikácie	Užívateľský proces
Výber dátových jednotiek aplikačných služieb (ASDU) IEC 60870-5-101 a IEC 60870-5-104	Aplikačná vrstva
Riadiace Informácie Aplikačného Protokolu (APCI)	
Sada protokolov TCP/IP (RFC 2200)	Transportná vrstva
	Sieťová vrstva
	Spojová vrstva
	Fyzická vrstva

Obr. 3.1: Výber noriem pre protokol IEC 60870-5-104 [28].

Štandard definuje tri typy týchto polí:

- I-formát (formát prenosu informácií),
- S-formát (očíslované dozorné funkcie),
- U-formát (neočíslované ovládacie funkcie).

ASDU

ASDU sa skladá z dvoch hlavných častí. Jednou je identifikátor dátovej jednotky s pevnou dĺžkou šesť bajtov a druhou sú údaje tvorené jedným alebo viacerými informačnými objektami.

Identifikátor dátovej jednotky udáva o aký typ údajov sa jedná, poskytuje adresovanie na identifikáciu konkrétnej identity údajov a obsahuje dodatočné informácie ako príčinu prenosu. ASDU dokáže preniesť maximálne 127 informačných objektov [28].

TCP/IP

Adresy TCP/IP sa skladajú z čísla portu a IP adresy. Každé zariadenie pripojené do siete má pridelenú svoju vlastnú IP adresu. Pri používaní transportného protokolu TCP je dôležité mať priradený sieťový port, cez ktorý zariadenie komunikuje. Pre protokol IEC 60870-5-104 je vyhradený port s číslom 2404 [27].

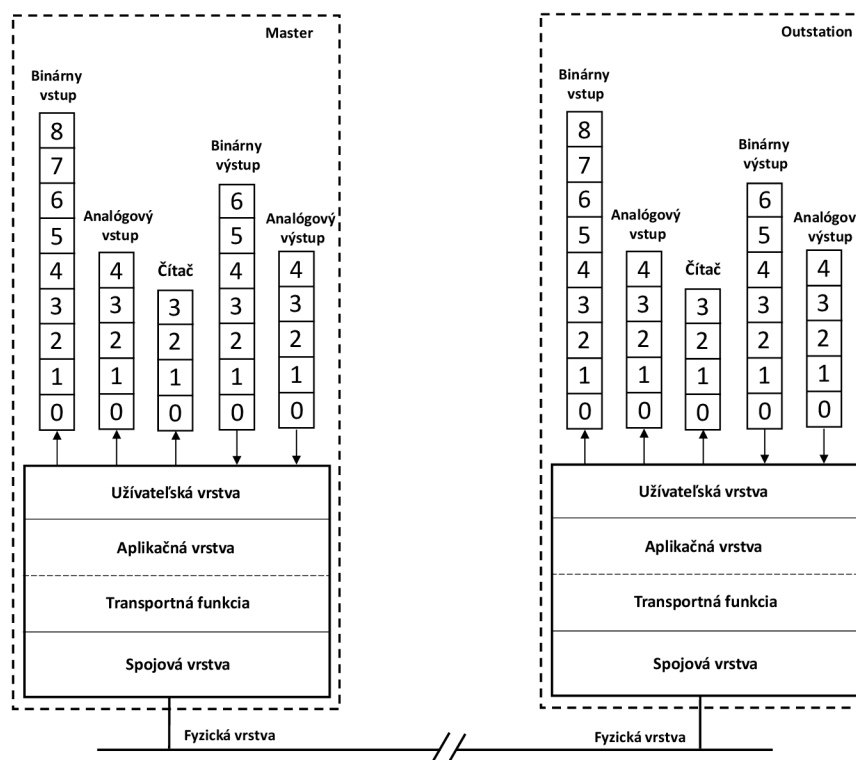
3.1.2 DNP3

Distributed Network Protocol je telekomunikačný štandard, definujúci komunikáciu medzi MTU, RTU a ostatnými inteligentnými elektrickými zariadeniami. Zo začiatku súkromný protokol, bol v roku 1993 sprístupnený tretím stranám prevodom vlastníctva na DNP3 User Group. Po pripojení do tejto organizácie je za symbolický poplatok poskytnutá úplná špecifikácia protokolu.

Protokol bol špecificky navrhnutý na získavanie dát a odosielanie riadiacich príkazov medzi fyzicky oddelenými počítačovými zariadeniami. V dnešnej dobe má protokol DNP3 silné zastúpenie zväčša v anglicky hovoriacich oblastiach ako Severná Amerika, Južná Amerika, Južná Afrika, Ázia a Austrália. V Európe je DNP3 nahradzovaný protokolom IEC 60870-5-104 [27].

Model dátovej komunikácie

DNP3 je protokol, ktorý dodržiava zjednodušený trojvrstvový štandard EPA. Tento model sa však ešte rozširuje o štvrtú transportnú funkciu, ktorá umožňuje segmentáciu správ. Diagram komunikácie medzi hlavnou stanicou (angl. master) a podriadenou stanicou (angl. outstation) je zobrazený na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Komunikačný model DNP3 EPA [29].

Aplikačná vrstva

Aplikačná vrstva spracováva dáta z vyššej užívateľskej vrstvy ako napríklad alarmy, údaje o udalostiach, stavové údaje alebo aj konfiguračné súbory. Protokol DNP3 nemá určenú maximálnu veľkosť vstupných dát. V prípade riadiacich príkazov je veľkosť dátovej zložky nulová. Aplikačná vrstva tieto dáta rozdeľuje do blokov s definovanou veľkosťou. Tieto bloky sa nazývajú fragmenty aplikačnej vrstvy a sú tvorené

kombináciou hlavičky a dát. Veľkosť hlavičky môže byť 2 B v prípade požiadavky alebo 4 B v prípade odpovede. Obsahom hlavičky je oktet, ktorý ma za úlohu správne poskladať jednotlivých fragmentov do podoby dát. Funkciu správy identifikuje časť hlavičky s názvom kód funkcie [27, 29].

Transportná funkcia

Ide o pod-vrstvu aplikačnej vrstvy, ktorej úlohou je segmentácia fragmentov aplikačnej vrstvy. Keďže maximálna veľkosť fragmentu aplikačnej vrstvy je 2048 B, je zapotreby rozložiť správu do viacerých prenosových segmentov. Veľkosť takéhoto segmentu je 250 B, z ktorého prvý oktet predstavuje hlavičku pozostávajúcu z troch polí. Pole FIN a FIR indikujúce posledný, resp. prvý prenosový segment a pole SEQUENCE number. Transportná funkcia slúži rovnako aj na spätné zostavenie rámcov, predaných od nižšej vrstvy [29].

Spojová vrstva

Hlavnou úlohou spojovej vrstvy je zapúzdrenie prenosových segmentov do rámcov na prenos cez komunikačný kanál, rovnako aj dekódovanie prijatých rámcov, adresovanie staníc, detekcia chýb a riadenie toku. Túto funkciu plní pridaním hlavičky a cyklického redundantného kódu. Výsledná veľkosť rámcu je 292 B [29].

Fyzická vrstva

Fyzická vrstva konvertuje rámce zo spojovej vrstvy na tok bitov, ktoré následne posielajú cez komunikačné médium. V počiatku bol protokol DNP3 špecifikovaný pre sériovú komunikáciu RS-232 alebo RS-485. V dnešnej dobe ide do popredia komunikácia použitím optického vlákna alebo ethernetu [27].

3.2 MODBUS

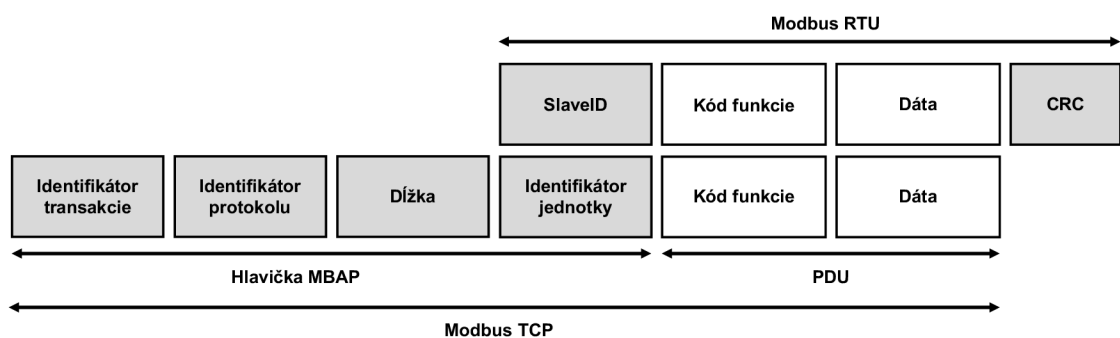
Komunikačný protokol MODBUS bol vyvinutý v roku 1979 firmou MODICON. Pracuje na úrovni aplikačnej vrstvy modelu ISO/OSI. Komunikácia prebieha na princípe client-server prípadne master-slave. V súčasnej dobe podporuje niekoľko komunikačných médií ako napríklad asynchrónne sériové linky RS-232, RS-422, RS-485, rádiové alebo optické siete. Momentálne je v popredí komunikácia TCP/IP pomocou protokolu MODBUS TCP v sieťach Ethernet [30].

3.2.1 Popis protokolu Modbus TCP

Štruktúra protokolu je definovaná na úrovni PDU (Protocol Data Unit). V závislosti na type siete, je PDU rozšírená o ďalšie časti tvoriace správu na aplikačnej úrovni ADU (Application Data Unit) s veľkosťou 260 B [30].

Protokol definuje tri typy základných správ (PDU):

- požiadavku (Request PDU),
- odpoveď (Response PDU),
- zápornú odpoveď (Exception Response PDU).



Obr. 3.3: Štruktúra protokolu Modbus TCP [31].

3.2.2 Hlavička MBAP

MODBUS TCP sa od klasického MODBUS RTU líši vynechaním poľa adresy SlaveID, kontrolného súčtu CRC a pridaním hlavičky MBAP o veľkosti 7 B, ako je zobrazené na obr. 3.3. Obsahom hlavičky MBAP je:

- **Identifikátor transakcie** o veľkosti 2 B, ktorý je nastavený klientom. Server následne odosiela odpovede s rovnakým číslom, aby bolo možné priradiť odpoveď k požiadavke.
- **Identifikátor protokolu** o veľkosti 2 B, ktorý klient nastavuje vždy na danú hodnotu 00 00. Táto hodnota odpovedá protokolu MODBUS.
- **Dĺžka** o veľkosti 2 B identifikuje počet bajtov v nasledujúcej správe. Veľkosť sa začína počítať od poľa identifikátoru jednotky až po koniec správy.
- **Identifikátor protokolu** o veľkosti 1 B sa využíva na identifikáciu podriadeného zariadenia pri komunikácii po sériových linkách. V prípade použitia sietí TCP/IP, je táto hodnota nastavená na 00 alebo FF, ktorá je v odpovedi vrátená späť [31].

3.2.3 PDU

Kód funkcie

Jedná sa o kód, ktorý informuje server, aký druh operácie má byť vykonaný. Protokol MODBUS definuje tri kategórie týchto kódov:

- verejné kódy funkcií,
- užívateľom definované kódy funkcií a
- rezervované kódy funkcií.

				Kódy funkcií		
				Kód	Podfunkcie	(hex)
Prístup k dátam	Bitový prístup	Fyzické diskrétnne vstupy	Načítaj diskrétnne vstupy	02		02
		Interné bity alebo fyzické cievky	Načítaj cievky	01		01
			Zapiš jednu cievku	05		05
	Zapiš viac cievok		15		0F	
	16 bitový prístup	Fyzické vstupné registre	Čítaj vstupný register	04		04
		Interné registre alebo fyzické výstupné registre	Čítaj uchovávané registre	03		03
			Zapiš jeden register	06		06
			Zapiš viac registrov	16		10
			Čítaj/zapiš viac registrov	23		17
			Zapiš register s maskovaním	22		16
			Čítaj FIFO frontu	24		18
	Prístup k záznamom v súboroch	Čítaj záznam zo súboru	20		14	
		Zapiš záznam do súboru	21		15	
	Diagnostika			Čítaj stav	07	
Diagnostika				08	00-18,20	08
Čítaj čítač kom. udalostí				11		0B
Čítaj záznam kom. udalostí				12		0C
Nahlas Server ID				17		11
Čítaj identifikáciu zariadenia				43	14	2B
Ostatné			Zapúzdrený prenos	43	13, 14	2B
			CANOpen základný odkaz	43	13	2B

Obr. 3.4: Úplný výpis kódov funkcií protokolu MODBUS TCP [30].

Dáta

Obsah dátovej časti správy zaslanej klientom slúži serveru k uskutočneniu operácie zadanej kódom funkcie. Obsahom môže byť napríklad adresa a počet vstupov, ktoré má server zapísať. Server následne zapisuje do dátovej zložky dáta z registrov [30].

4 Optovláknové senzorické systémy

Zariadenia pracujúce s optickým vláknom ako prostriedkom na meranie rôznych veličín sa nazývajú optovláknové senzorické systémy. V súčasnej dobe umožňujú tieto systémy merať teplotu, vibrácie, mechanické napätie, tlak kvapalín a plynov, vlhkosť, pH alebo intenzitu elektromagnetického pola [32, 33].

Zbytok tejto časti práce sa venuje objasneniu princípov merania fyzikálnych veličín pomocou optovláknových senzorických systémov a analýze súčasného stavu využitia spojenia technológie SCADA s optovláknovými senzorickými systémami.

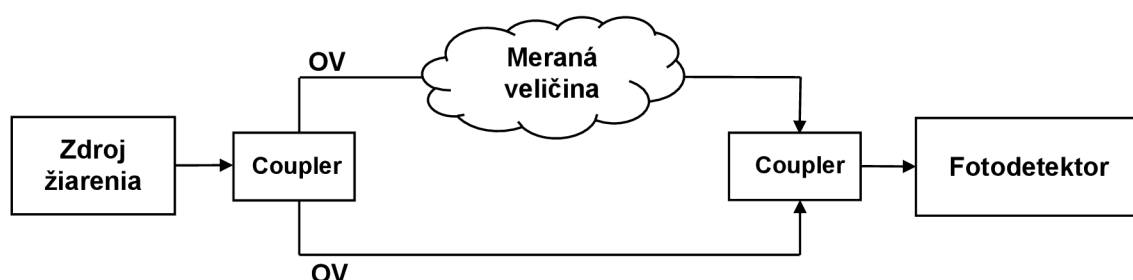
4.1 Optovláknové interferometrické senzory

Princíp funkčnosti interferometrického senzora je založený na rozdelení svetelného zväzku na dve vlny pomocou deliča, pričom jedna z týchto vln prechádza cez prostredie, pri ktorom na optické vlákno pôsobí meraná veličina. Pôsobenie meranej veličiny na optické vlákno spôsobí posun fáze alebo fázovú moduláciu. Následným spojením referenčného lúča a lúča meracieho je možné zaznamenať fotodetektorom tieto zmeny [33].

Šifra v článku [32] opisuje konštrukciu interferometrického senzora pomocou blokovej schémy, viď obr. 4.1, ktorá definuje hlavné stavebné prvky:

- zdroj žiarenia,
- delič,
- fotodetektor.

Následné rozloženie a typ jednotlivých prvkov podľa spôsobu merania nazývame architektúrou interferometrov.



Obr. 4.1: Blokovaná schéma optovláknového interferometrického senzorického systému [32].

4.1.1 Architektúra interferometrov

Základným komponentom fázových optovláknových interferometrických systémov sú vláknové interferometry. Podľa Kanga v knihe [33] je možné až na Sagnacov interferometer merať akékoľvek fyzikálne veličiny a jediným rozdielom pri výbere daného typu je odlišný dizajn, cena a výkonnostné parametre.

Michelsonov interferometer

Michelsonov interferometer využíva jeden delič a dve nepriepustné zrkadlá, ktoré odrazia lúč smerom naspäť do deliča, kde sú signály znovu spojené. Výsledný lúč putuje smerom do detektoru, kde je pozorovaná interferencia týchto signálov [33].

Fabry–Perotov interferometer

Interferometer pozostáva z dvoch polopriepustných zrkadiel paralelne od seba nastavených na vzdialenosť, kedy je svetlo odrazené medzi týmito zrkadlami. Následnej ovplyvnený lúč pokračuje v smere, v ktorom vstúpilo medzi zrkadlá [33].

Mach–Zehnderov interferometer

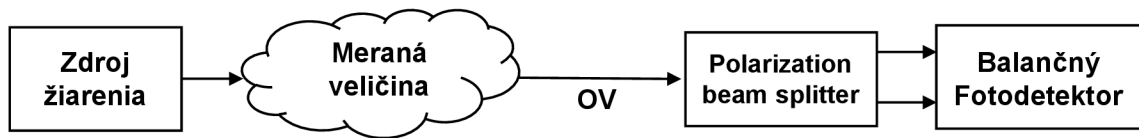
Svetelný lúč zo zdroja je pomocou deliča rozdelený na dva lúče, ktoré sú po priechode prostredím opäť zlúčené a na detektoroch je pozorovateľný interferometrický vzor [33].

Sagnacov interferometer

Svetelný lúč je rozdelený na dve časti, ktoré prejdú identickú vzdialenosť, ale v opačnom smere. V bode vstupu sa po ukončení okruhu znovu tieto lúče spoja a putujú do fotodetektoru [33].

4.2 Senzory založené na zmene polarizácie

Optovláknové senzory tohto typu sú založené na meraní stavu polarizácie svetelnej vlny šíriacej sa v optickom vlákne. Princíp merania spočíva v zmenách indexu lomu jadra optického vlákna, ktoré sú spôsobované vonkajšími vplyvmi ako napr. manipuláciou s vláknom alebo vibráciami z okolitého prostredia. Tento jav je nazývaný ako fotoelastický efekt. Výhodou takéhoto senzora v porovnaní s interferometrickým je fakt, že na meranie postačuje len jedno vlákno. Na druhej strane polarizačný rozdeľovač lúčov (angl. polarization beam splitter) potrebný k snímaniu zmien polarizácie, je niekoľko násobne drahší ako coupler používaný v interferometrických sensorických systémoch [35].



Obr. 4.2: Blokovaná schéma polarimetru [35].

4.3 Sensory založené na spätnom rozptyle

Sensory založené na spätnom rozptyle sú pre ľudí zaoberajúcich sa telekomunikáciami známe, nakoľko OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) sensory sa aktívne využívajú na hľadanie problémových článkov optického telekomunikačného vedenia.

V nasledujúcich podkapitolách sú priblížené sensory na báze OTDR a FBG (Fiber Bragg Grating).

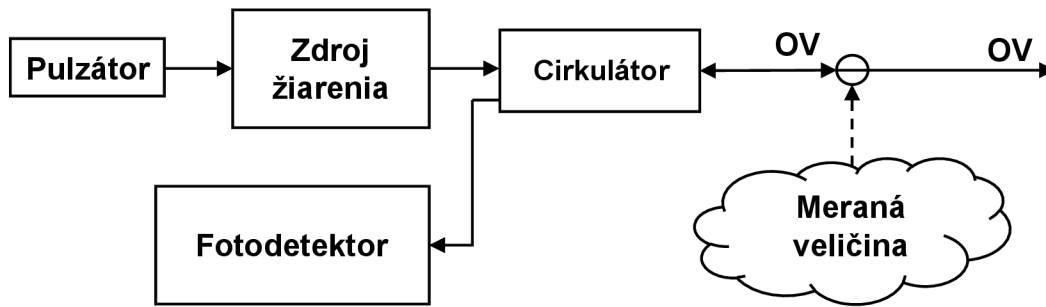
4.3.1 Sensory na báze OTDR

Šírením svetelného lúča optickým vláknom vznikajú tri základné typy spätného rozptylu a to:

- elastický rozptyl (Rayleighov), spôsobovaný mikroskopickými zmenami hustoty optického vlákna,
- nepružný rozptyl (Brillouinov) posunutý o 11 GHz, ktorý je výsledkom pôsobenia zvukových vln na svetelný lúč a nakoniec
- Ramanov rozptyl s podobným princípom, ale frekvenčne posunutým o 13 THz od dopredného optického signálu [32].

Pri rozptýlení je svetlo rozptýlené všetkými smermi, pričom malá časť rozptýleného svetla je odrazená naspäť k zdroju. Tento efekt využívajú systémy OTDR najčastejšie na meranie nedeštruktívneho útlmu optického vlákna spôsobeného spojmi, vloženými konektormi, ohybmi alebo aj dĺžkou optického vlákna. Pri meraní vibrácií je metóda OTDR prispôbená meraniu fázy (Φ -OTDR), stavu polarizácie (POTDR) alebo frekvencie odrazeného signálu (BOTD) [32, 36].

Senzorický systém OTDR funguje na princípe kedy za pomoci pulzátoru a laseru je do optického vlákna vyslaný pulz svetelného lúča, ktorý po odrazení naspäť putuje smerom ku zdroju, kde je cirkulátorom privedený na fotodetektor a následne spracovaný. Vzdialenosť miesta rozptylu je definovaná dobou odozvy medzi vyslaným svetelným pulzom a prijatým rozptylovým signálom [36].

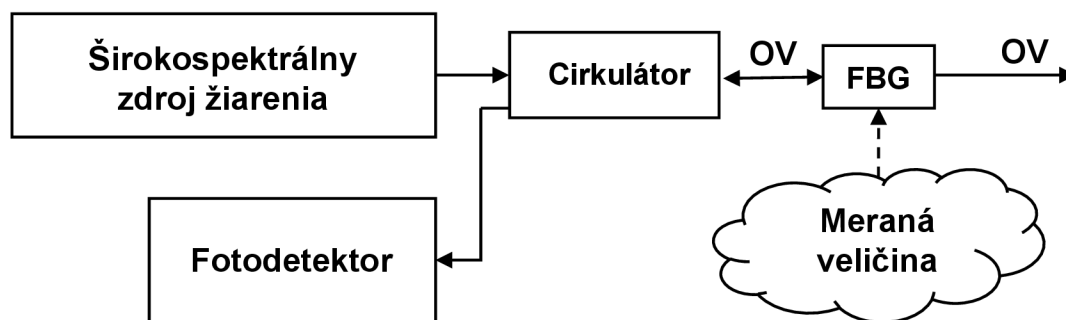


Obr. 4.3: Bloková schéma systému na báze OTDR [36].

4.3.2 Sensory na báze FBG

Sensory na princípe vláknových mriežok (FBG) pracujú s myšlienkou prechodu a odrazu svetelného lúča cez tzv. Braggovú mriežku, ktorá periodicky mení fázu a intenzitu prechádzajúcej alebo odrážanej svetelnej vlny. Pri meraní musí byť svetelný lúč vyžiarený zo širokospektrálneho zdroja žiarenia. Periodické zloženie Braggových mriežok tvorí rozložené Braggovo zrkadlo, ktoré má definovanú Braggovú rezonančnú frekvenciu. Túto frekvenciu ovplyvňujú parametre ako rád periódy mriežky N , efektívny vidový index n_{eff} a priestorová perióda mriežky Λ . Braggovú rezonančnú frekvenciu ovplyvňujú taktiež vonkajšie vplyvy, čo využívajú sensorické systémy, ktoré merajú frekvenciu spätného odrazu, čím dokážu monitorovať fyzikálne vplyvy ako teplotu, mechanické deformácie, vibrácie a pod.

Podľa Šiftu v článku [32] je pri meraní iných veličín ako je teplota potrebná teplotná kompenzácia za využitia druhej nefixovanej mriežky k obalu senzoru [37].



Obr. 4.4: Bloková schéma sensorického systému na báze FBG [37].

4.4 Aktuálny stav využitia v SCADA systémoch

Problematike spracovania dát z optických sensorických systémov pomocou SCADA sa doposiaľ venovalo malé množstvo vedeckých skupín. Jednotlivé články, ktoré sa

podarilo dohľadať využívajú rozličné prvky SCADA systémov a prenosové technológie na spracovanie dát.

Článok skupiny čínskych vedecko-výskumných pracovníkov, ktorý pojednáva o sieťovej integrácii distribuovaného optovláknového teplotného senzoru. Z hľadiska potreby vysokej prenosovej rýchlosti bol vybratý protokol Modbus TCP, ktorý implementovali použitím cross-platformy INDY [38].

Tanilla a Hill v článku [39] navrhli niekoľko riešení na prenos dát z distribuovaných akustických senzorov (DAS), ktoré mali informovať o únikoch plynov z potrubia. Jednotlivé riešenia v sieťach Ethernet využívali protokol Modbus TCP resp. OPC v kolaborácii s OPC serverom.

Práca rumunských výskumníkov sa zaoberá systémom na monitorovanie teploty horúceho bodu vinutia výkonového transformátora za využitia optovláknových senzorických systémov, Kalmanovho filtra a integrácie SCADA. Aj keď vo svojom článku presne neuvádzajú protokol, stojí za zmienku spomenúť využitie vývojového prostredia LabVIEW na vývoj aplikácie, ktorá automaticky generuje hlásenia v prípade prekročenia stanovenej hodnoty. Aplikácia taktiež ukladá hodnoty do databázového systému MySQL [40].

Journal of Innovative Research and Solutions zverejnil výskum, implementujúci prenosovú technológiu ZigBee na zber dát úniku plynu alebo ropy z potrubného systému v púšti. Cieľom bolo redukovať náklady s využitím bezdrôtovej technológie na spojenie SCADA systému so senzorom nachádzajúcim sa pozdĺž potrubia [41].

Allwood, Wild a Hinckley v článku [42] používajú ako vzdialenú jednotku PLC, ktorou získavajú dáta zo senzoru na báze FBG. Riešením bol vývoj jednoduchého softvéru, ktorý zobrazoval dáta a poplachy pri prekročení medze stanovených hodnôt. Použitím vývojového prostredia WinCC Flexible bolo programované PLC Siemens S7-300.

5 Návrh komunikácie

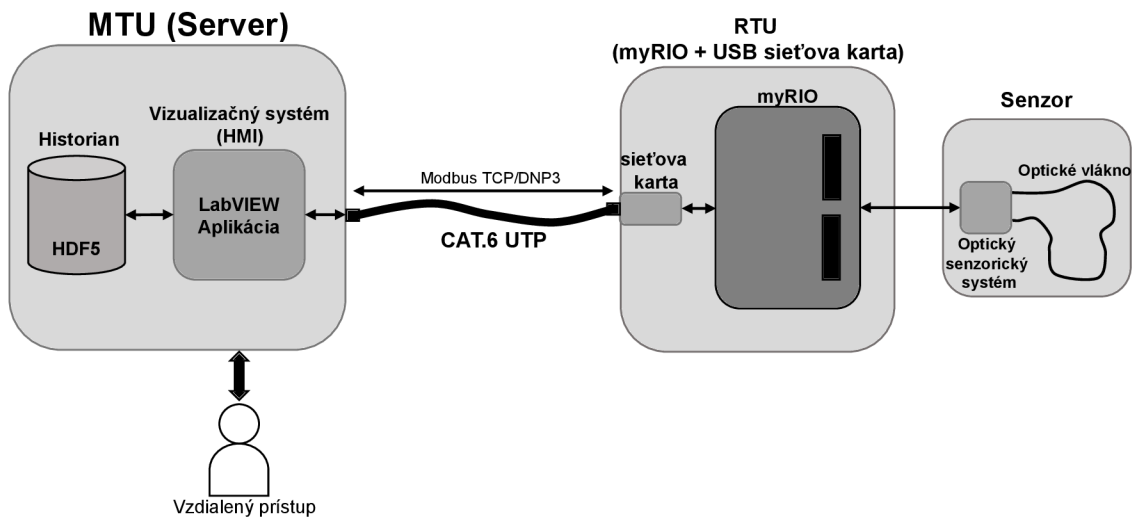
Odkazujúc sa na teoretickú časť tejto práce, bolo potrebné pri návrhu SCADA systému dodržať určitú štruktúru, viď obr. 2.1.

Počnúc hostiteľskou vrstvou je v systéme SCADA nutná MTU, ktorej funkciu bude vykonávať server s potrebným vizualizačným softvérom (HMI) a systémom, ktorý sa bude starať o ukladanie prijatých hodnôt do databázy (Historian). Výberu vhodných softvérových položiek sú venované podkapitoly 5.1.1 a 5.1.2.

Zadaním bakalárskej práce bol návrh komunikácie pre siete Ethernet. Podľa zdroja [43], najčastejšie využívaným prenosovým médiom v sieťach Ethernet je krútená dvojlinka. Rovnako tomu bude aj v našom prípade, kedy použitím sieťového dátového kábla UTP Cat.6 je zabezpečené prepojenie MTU a RTU. Na transportnej vrstve ostáva určiť najvhodnejší komunikačný protokol pre prenos dát, ktorému sa venuje podkapitola 5.2.

Funkciu RTU bude spĺňať zariadenie myRIO-1950 od firmy National Instruments, ktorého úlohou bude zber dát zo senzorov a schopnosť prijímať riadiace pokyny a posilať dáta MTU.

Popisom použitých senzorov merajúcich vibrácie sa zaoberá kapitola 5.4.



Obr. 5.1: Návrh komunikácie so senzorickým systémom

5.1 MTU

Táto podkapitola sa zaoberá výberom vhodného vizualizačného softvéru a databázového systému, ktoré sú potrebné k fundamentálnej funkčnosti celého SCADA systému. Na účely vypracovania bakalárskej práce bol poskytnutý server, kde určitá časť výpočtového výkonu bola sprístupnená za pomoci virtuálneho stroja. Pri výbere operačného systému do virtuálneho stroja bol uprednostnený Windows Server 2016 Standard od spoločnosti Microsoft. Sťahovanie, inštalácia a následná konfigurácia potrebného softvérového vybavenia prebiehala za pomoci vzdialeného prístupu.

5.1.1 Výber vizualizačného softvéru

V oblasti technológie SCADA je vizualizačný softvér základným ovládacím prvkom celého SCADA systému. Tento typ programu zabezpečuje vizualizáciu a riadenie technologických procesov v širokom spektre využitia [44]. Prvotne pri výbere vhodného softvéru bolo potrebné určenie jednotlivých požiadaviek na systém. Pri výbere boli brané do úvahy:

- Podpora operačného systému Windows Server 2016 Standard,
- obstarávacia cena (open source, freeware alebo light verzia),
- nepretržitý chod, bez nutnosti reštartu aplikácie,
- prítomnosť ovládačov pre štandardné komunikačné protokoly, viď kapitola 3,
- rýchlosť spracovania prijatých dát.

Tab. 5.1: Porovnanie dostupných vizualizačných softvérov.

Názov softvéru	Verzia	časové obmedzenie pri verzií Light	Podpora OS Windows Server 2016	Rýchlosť [samples/s]
mySCADA	Pro/Light	áno	áno	1000
PROMOTIC	Pro/Light	nie	áno	10
Reliance SCADA	Pro/Light	nie	áno	1
Rapid SCADA	Open Source	-	áno	1
VTScada	Pro/Light	nie	áno	4000
Tatsoft Factory Studio	Pro/Light	áno	áno	1

Analýzou dostupných vizualizačných softvérov sme pre našu prácu ako najvhodnejšie vybrali softvéry od českého vývojára MICROSYS, spol. s.r.o PROMOTIC

a americký SCADA softvér VTScada od spoločnosti Trihedral. Ich následná implementácia ukázala, že funkcionálnosť je z veľkej miery obmedzujúca pri spracovávaní rozsiahleho množstva heterogénnych dát. Keďže vývojové prostredie LabVIEW, v ktorom je programovaná vzdialená koncová jednotka myRIO-1950 umožňuje tak tiež aj vývoj SCADA softvéru pre server, bola táto možnosť ako najviac vyhovujúca.

Komerčné SCADA softvéry

Počas riešenia semestrálnej práce bolo určujúcim kritériom na softvér jeho cena, preto bol zvolený a implementovaný softvér Rapid SCADA. Tento výber sa však ukázal ako nevhodný, nakoľko z hľadiska rýchlosti zapisovania dát do databázy bol nepostačujúci, viď 5.1.

Následným rešeršom sa podarilo nájsť ďalšie vizualizačné softvéry, ktoré boli dostupné vo verziách light alebo freeware a rýchlosť zápisu by teoreticky spĺňala naše požiadavky. Implementácia odhalila problémom s formátmi ukladania nameraných hodnôt, ktoré tieto softvéry ponúkajú. Systémy spomenuté v tabuľke 5.1, ponúkajú možnosť ukladania do SQL databáz, súborov CSV (Comma Separated Values) alebo databázových systémov implementovaných daným výrobcom.

LabVIEW

LabVIEW je grafické vývojové prostredie vyvinuté americkou spoločnosťou National Instruments (NI), ktorá poskytla tento systém verejnosti prvýkrát v roku 1986. Programovanie potrebných aplikácií prebieha v grafickom programovacom jazyku zvanom „G“, ktorý je oproti textovým jazykom užívateľsky prívetivejší a intuitívnejší. Základnými stavebnými prvkami v každom LabVIEW projekte sú súbory formátu VI (Virtual Instrument) obsahujúce kód s potrebnou funkcionálnosťou vo forme blokového diagramu a predného panelu (front panel) tvoriaceho rozhranie človek-stroj, ktorý umožňuje prezentáciu a riadenie dát [45].

Uprednostnenie vývoja vlastného softvéru pred dostupnými SCADA riešeniami bolo postavené na požiadavke zvýšenia rýchlosti a flexibility pri práci s prijatými dátami. Pre výber vývojového prostredia LabVIEW nás utvrdil aj fakt, že zariadenie myRIO-1950 použité ako RTU bolo vyvinuté primárne na prácu s týmto prostredím.

5.1.2 Výber databázového systému

Tvrdenie Boyera [7], že zber dát z koncovej jednotky prebieha rádovo v sekundách, vysvetľuje prečo veľké množstvo komerčných SCADA softvérov ponúka z našej perspektívy tak pomalé hodnoty rýchlosti zapisovania do databázy. Tomuto faktoru sú prispôsobené aj ukladacie formáty ako SQL, CSV alebo natívne databázové systémy,

ktoré vybrané SCADA softvéry podporujú. Aj keď VTScada vo svojej dokumentácii [46] uvádza rýchlosť zápisu 4000 S/s, implementáciou bolo overené, že reálna hodnota sa pohybovala pri komunikácii protokolom Modbus na úrovni hodnoty 15 S/s, aj keď počet prijatých packetov bol omnoho vyšší.

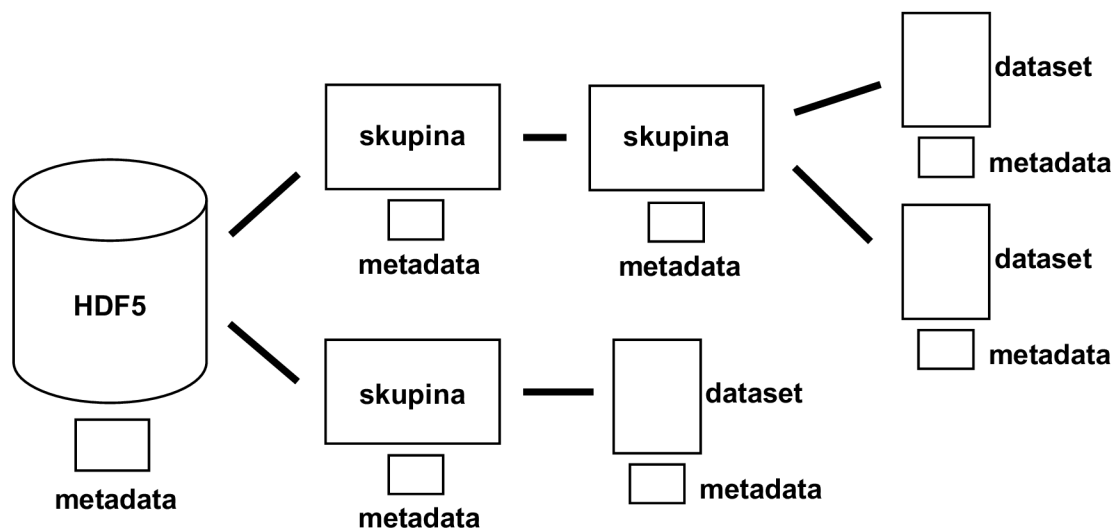
Na základe doposiaľ nadobudnutých skúseností vedúceho práce v oblasti spracovania dát z optických senzorických systémov bolo podotknuté, že spomenuté ukladacie média nie sú najvhodnejšími pri riešení danej problematiky a práca s nimi je časovo a výpočtovo náročná. Vhodným formátom na ukladanie veľkých množstiev nameraných hodnôt bol doporučený formát HDF5, ktorý rieši tento problém.

HDF5

Hierarchický dátový formát verzie 5 (angl. Hierarchical Data Format version 5) je open source súborový formát umožňujúci ukladanie veľkého množstva komplexných a heterogénnych dát. HDF5 organizuje údaje do štruktúry adresárov a súborov, podobnej ako využívajú dnešné operačné systémy. Štruktúra formátu HDF5 je priblížená na obr. 5.2 [47].

Pri HDF5 je nutné definovať 2 základné prvky:

- **Skupina** – Prvok podobný adresáru, ktorý môže obsahovať iné skupiny alebo množiny údajov (angl. dataset).
- **Dataset** – Prvok obsahujúci skutočné dáta.



Obr. 5.2: Štruktúra dátového formátu HDF5 [47].

5.2 Transportná vrstva

Zadaním bakalárskej práce bol obmedzený výber prenosového média na krútenú dvojlinku, čím ostáva určiť komunikačný protokol, ktorým definujeme formu akými sú dáta po prenosovom médiu distribuované.

Pre prenos veľkého počtu rýchlo meniacich sa dát je vhodnejšou možnosťou využitie tzv. „nespolahlivého“ transportného protokolu UDP (User Datagram Protocol). Tejto požiadavke vyhovujú štandardy IEC60870-5-104 a jeho americký konkurent DNP3, ktoré ponúkajú možnosť výberu transportného protokolu medzi TCP a UDP. Následný pokus o implementáciu ukázal, že knižnica IEC60870-5-104 pre LabVIEW nepodporuje vývoj aplikácie na strane servera (station), čím znemožňuje použitie tohto protokolu v našej práci. Monitorovaním komunikácie protokolom DNP3 s možnosťou transportného protokolu UDP pomocou aplikácie Wireshark vyšlo najavo, že v našom prípade je komunikácia identická s protokolom Modbus, ktorý využíva TCP, viď obr. 5.3 a 5.4 s porovnaním.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	DATA	Info
1640	13.124449	192.168.1.12	192.168.1.10	DNP 3.0	64		Read, Octet String
1641	13.125408	192.168.1.10	192.168.1.12	DNP 3.0	74		Response

Obr. 5.3: Príklad komunikácie prostredníctvom protokolu DNP3.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	DATA	Info
335	2.024980	192.168.1.12	192.168.1.10	Modbus/TCP	66		Query:
336	2.026460	192.168.1.10	192.168.1.12	Modbus/TCP	307		Response:

Obr. 5.4: Príklad komunikácie prostredníctvom protokolu Modbus TCP.

Toto zistenie usmernilo výber komunikačného protokolu na Modbus TCP a DNP3, ktorých snahu o implementáciu popisuje kapitola 6.

5.3 RTU

Vzdialená jednotka, ktorá sa bude starať o zber a odosielanie dát je vývojová platforma myRIO-1950 od spoločnosti National Instruments. Uprednostnenie práve tejto vývojovej dosky pred ostatnými alternatívami je rozoberané v článku [35] a bolo učené vedúcim práce a jeho kolegami. Výber vývojovej dosky myRIO-1950 ovplyvnila vysoká vzorkovacia frekvencia, ktorou disponuje.

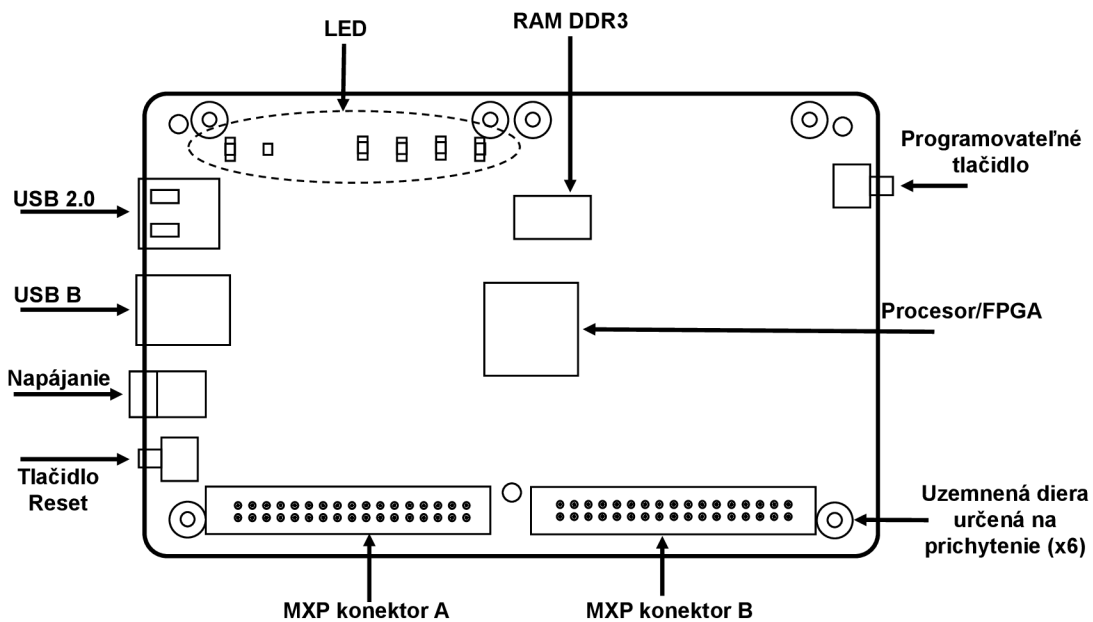
Rada myRIO-1950 v základe neobsahuje sieťovú kartu pre prácu v sieťach Ethernet, čo zapríčinilo nutnosť pripojenia externej sieťovej karty cez dostupný USB port. Použitá bola sieťová karta U3METALGLAN od spoločnosti i-tec [48].

5.3.1 NI myRIO-1950

MyRIO je vývojová programovateľná platforma od spoločnosti National Instruments určená predovšetkým študentom vytvárajúcich riadiace, robotické alebo mechatronické systémy. Spoločnosť National Instruments distribuuje platformu myRIO v dvoch variantoch a to myRIO-1900 a myRIO-1950. Pre náš účel bol použitý lacnejší variant 1950, ktorý nedisponuje WiFi modulom a MSP konektorom. Výhodou je podpora vývoja programov v grafickom vývojovom prostredí LabVIEW [49].

Na obrázku 5.5 je vizualizácia rozloženia jednotlivých prvkov na doske plošného spoja. Zariadenie je napájané z napájacieho konektoru (6-16 VDC), ďalej dva typy USB portov, B a 2.0 zabezpečujú pripojenie k PC resp. periférie. Vstupno-výstupné piny, umožňujú meranie alebo riadenie pripojených komponentov. Ako väčšina vývojových dosiek tak aj myRIO obsahuje dva typy týchto pinov a to analógové a digitálne, ktoré sú riadené procesorom/FPGA. Ako doplnok sú súčasťou dosky štyri LED a jedno tlačidlo, ktoré sú využiteľné pri programovaní [49].

Konfigurácia prebieha pomocou programu NI MAX, ktorá je súčasťou celku LabVIEW alebo pomocou SSH (Secure Shell).



Obr. 5.5: Rozloženie súčiastok na doske myRIO [49].

5.4 Senzorický systém

Senzor je poslednou časťou nášho reťazca, viď obr. 5.1, ktorá je v priamom kontakte s meranou veličinou, čím poskytuje potrebné dáta. Ako bolo spomenuté už v ka-

pitole 4 existujú určité spôsoby merania okolitých vplyvov pôsobiacich na optické vlákno, ktoré sa líšia v počte výstupov potrebných na pripojenie k akvizičnej platforme. Pri návrhu bolo potrebné uvažovať nad možnosťou zmeny počtu snímaných vstupov, aby sa zbytočne neznižovala vzorkovacia frekvencia pri meraní.

Od softvéru bolo požadované, aby dokázal získavať a spracovávať informácie z

- **interferometru** (1 pin),
- **polarimetru** (4 piny) alebo
- **kombinácie** týchto dvoch systémov (4+1 pinov) v prípade, že by boli obidva systémy zapojené súčasne.

6 Programové riešenie

Kapitola venuje pozornosť vyvinutým programom, jednému na strane serveru a druhému implementovaného do vzdialenej jednotky myRIO, ktorých úlohou je zber dát z RTU pomocou využívaných SCADA protokolov. Snahou bol vývoj dvoch samostatných aplikácií pre komunikáciu protokolom Modbus TCP a DNP3. Pri programovaní aplikácie pre protokol DNP3 sa vyskytlo mnoho problémov, viď 6.2, ktoré viedli k rozhodnutiu ustúpiť od dokončenia aplikácie pre tento typ komunikácie.

6.1 Modbus TCP

Výsledný program pozostáva z dvoch spolu komunikujúcich častí `ModbusMaster.vi` pracujúceho na serveri a `ModbusSlave.vi` nahratého do platformy myRIO. Ako už bolo spomenuté, rôzne druhy optovláknových senzorických systémov využívajú rôzny počet vstupných pinov, ktoré je potreba do dosky pripojiť. Myšlienkou bolo vytvoriť aplikáciu, pri ktorej si užívateľ vyberie z akého senzorického systému budú dáta zberané, čím dokážeme ovplyvniť zbytočnú stratu výpočtového výkonu vzdialenej jednotky, ktorá by bola spôsobená monitorovaním neaktívnych vstupov. Pre tento účel bolo nutné definovať reprezentáciu jednotlivých senzorických systémov pomocou celočíselného identifikátoru.

- Interferometer = 1,
- polarimeter = 4,
- kombinácia = 5.

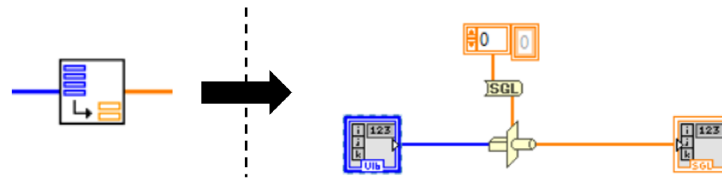
Pri použití knižnice NI Modbus Library, je možné vyvíjať aplikáciu štýlom Modbus I/O server alebo Modbus API. V našom prípade bola využitá možnosť Modbus API, ktorá poskytuje väčšiu rýchlosť a flexibilitu.

Optimalizáciou výsledného programu na strane servera bola šesťnásobne zvýšená rýchlosť spracovávania dát pri meraní z piatich pinov.

6.1.1 Program ModbusMaster

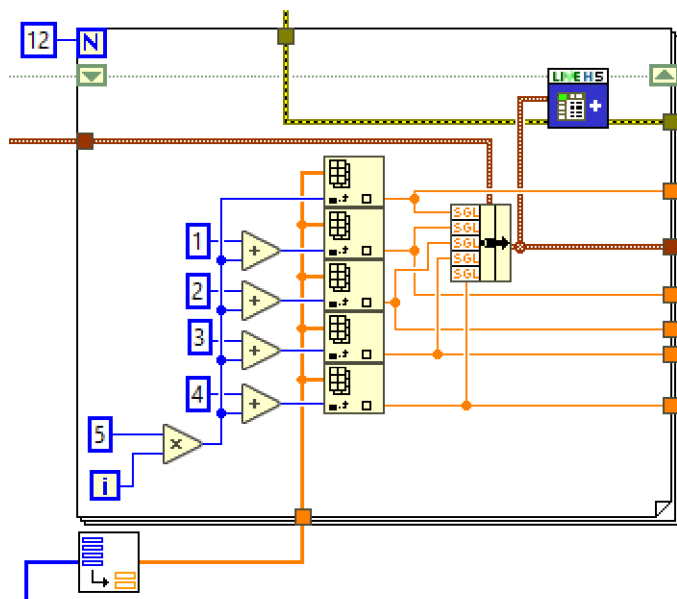
Štruktúru programu možno rozdeliť do troch častí a to komunikačná časť, spracovanie hodnôt a časť, ktorá sa bude starať o ukladanie dát do súboru s formátom HDF5. Pre prácu s protokolom Modbus a formátom HDF5 je potrebné si dodatočne stiahnuť balíčky NI Modbus Library a LiveHDF5, ktoré rozširujú základnú funkcionálnu LabVIEW.

pomocou funkcie Type Cast, ktorá vstupné dáta transformuje na typ dát privedený na vstup *type*.



Obr. 6.2: Značka a grafický kód bloku UWarrayToSGLarray.

V prípade polarimetru, resp. kombinácie sensorických systémov, kedy sú hodnoty jednotlivých pinov v poli radené za sebou je potrebná implementácia určitej logiky v cykle For pomocou blokov Add a Multiply napojených na premennú aktuálnej iterácie. Pripojenie výslednej logiky na vstup bloku Index Array zabezpečí roztriedenie hodnôt pinov do štyroch, resp. piatich samostatných prúdov.



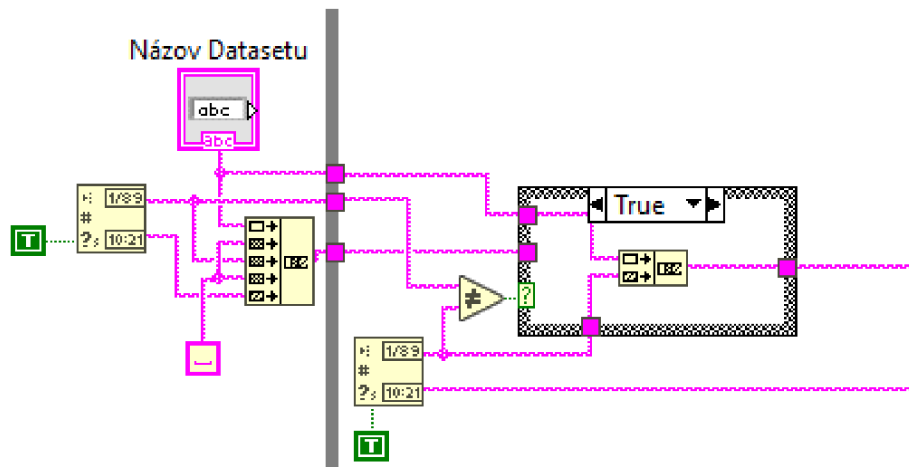
Obr. 6.3: Grafický kód spracovania dát z registrov pre kombinované meranie.

Funkcia Bundle následne spája jednotlivé prúdy do formy v akej majú byť dáta zapisované do datasetu. Formáty ukladania sú pre každý typ merania vopred v programe zadané.

Názov datasetu

Po zadaní názvu datasetu v prednom paneli a následnom spustení programu je tento názov automaticky doplnený o čas a dátum spustenia.

V prípade, že meranie je prevádzkované viac ako jeden deň, program v čase 00:00 vytvorí nový dataset s dátumom daného dňa, čím napomáha užívateľovi v rýchlejšej orientácii v súbore HDF5.



Obr. 6.4: Grafický kód pre automatické pridávanie dátumu a času k názvu datasetu.

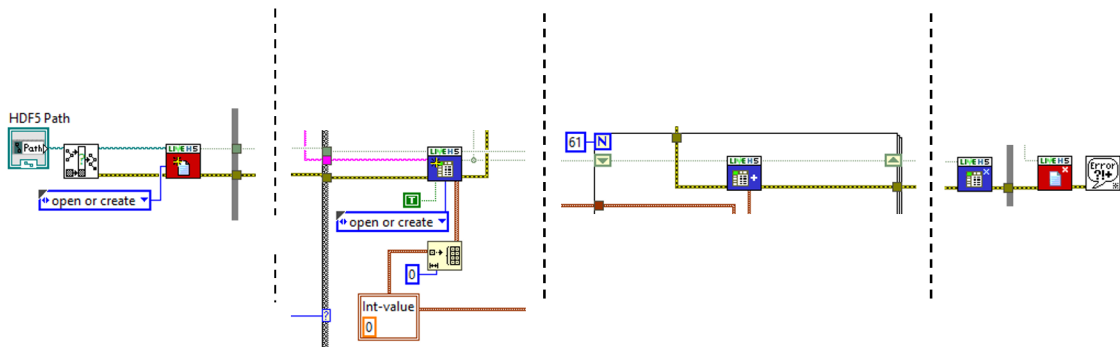
Ukladanie dát – Historian

Základná vetva ukladania dát využíva bloky:

- **Open/Create/Replace HDF5 File** – Vstupom funkcie je cesta k súboru HDF5, ktorý je následne otvorený alebo vytvorený. Pri vytváraní súboru cez prieskumník predného panelu je nutné zadať koncovku súboru `.h5` alebo `.hdf5`.
- **Simple OpenCreateReplace Dataset** – Slúži na otvorenie alebo vytvorenie datasetu v súbore HDF5. Vstupmi do bloku určujeme názov datasetu, nekonečnosť datasetu, aká operácia sa má vykonať so súborom a nakoniec formát stĺpcov tabuľky.
- **Append Element(s) to Dataset** – Umiestnením tohto bloku do for cyklu je zabezpečené pridávanie hodnôt do datasetu.
- **Close Dataset** – Uzavrie otvorený dataset.
- **Close HDF5 File** – Zatvára otvorený súbor HDF5.

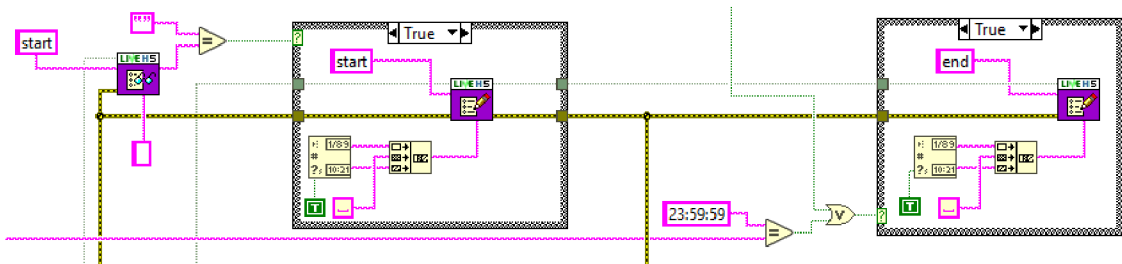
Presunutím blokov na otváranie a zatváranie súboru HDF5 z While cyklu, ktorý je zodpovedný za chod programu, bolo dosiahnuté zvýšenie rýchlosti behu programu.

Vedľajšia vetva slúži na pripísanie atribútov k vytvorenému datasetu. Atribúty *start* a *end* boli zahrnuté z dôvodu informovať užívateľa o čase začiatku a ukončení merania. Prípadne spätného zobrazovania dát z datasetu do grafu, keďže na základe rozdielu atribútov vieme určiť dobu trvania merania, z ktorej je následne možné vypočítať vzorkovaciu frekvenciu. Zápis atribútov prebieha pomocou blokov:



Obr. 6.5: Grafický kód časti na ukladanie dát do súboru HDF5 pre interferometer.

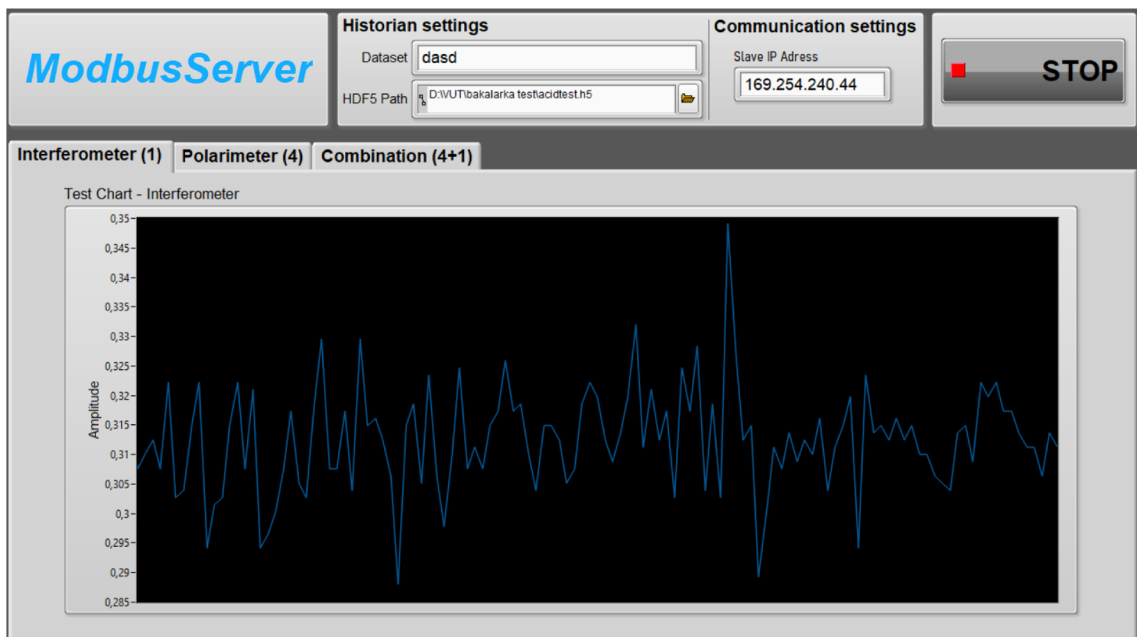
- **Simple Read** – Slúži na prečítanie hodnoty zadaného atribútu. Výstupu odpovedá jeho hodnota, ktorá je v našom prípade porovnávaná s prázdnu konštantou typu string. V prípade, že je hodnota *start* prázdna, je do nej zapísaný aktuálny čas pomocou bloku Write.
- **Write** – Funkcia bloku Write zapisuje názov atribútu a jeho hodnotu.



Obr. 6.6: Grafický kód na zápis atribútov do datasetu pre interferometer.

Predný panel

Predný panel obsahuje prvky na zadávanie premenných parametrov (IP adresa vzdialenej jednotky, názov datasetu a cesta k súboru HDF5), ktoré sú vizuálne od seba oddelené. Pomocou položky Tab Control je zabezpečený výber typu senzorickeho systému pripojeneho k vzdialenej jednotke. Na jednotlivých kartách sú umiestnené grafy zobrazujúce časové priebehy meraných kanálov, ktorých účelom je informovať užívateľa o správnej funkcii senzorickeho systému. Pri meraní viacej ako jedného pinu je pre každý kanál vytvorený samostatný graf pre rýchlejšiu identifikáciu prípadného problému.



Obr. 6.7: Predný panel aplikácie ModbusMaster s meraným priebehom interferometru.

6.1.2 Program ModbusSlave

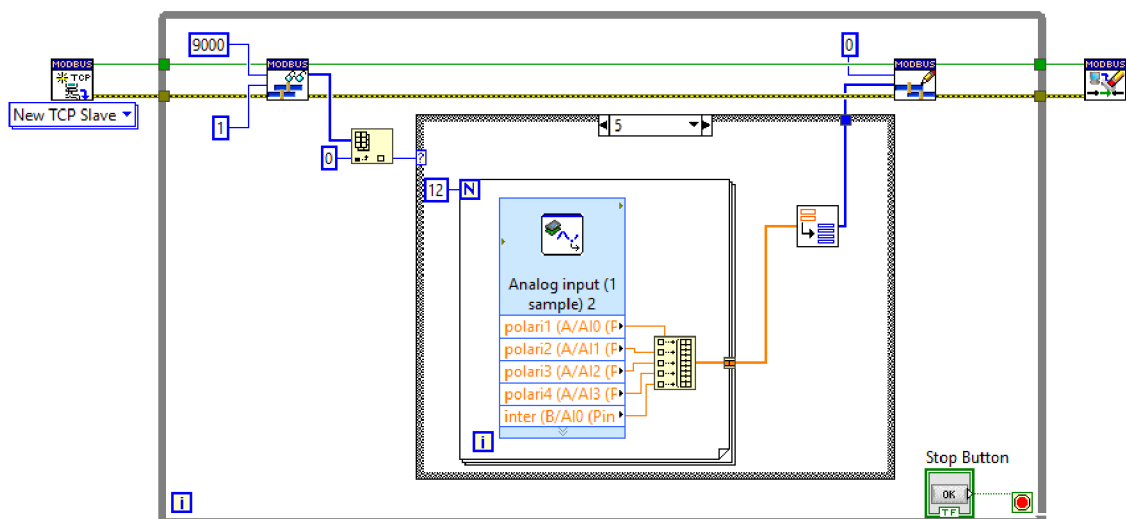
Pre programovanie vzdialenej jednotky myRIO je nevyhnutné do vývojového prostredia LabVIEW stiahnuť sadu nástrojov LabVIEW myRIO Toolkit, LabVIEW FPGA Module a LabVIEW Real-Time Module.

Programová časť vzdialenej jednotky pracuje spôsobom aktívneho sledovania holdingového registru (angl. holding registers) s adresou 9000, kde sa nachádza hodnota identifikátoru senzorickeho systému. Po prečítaní je nastavený počet meraných pinov, ktoré sú umiestnené do cyklu For z hľadiska zvýšenia efektivity prenosu. Cyklus For pomocou typu tunela nastaveného na Concatenating vyskladá určitý počet hodnôt do premennej array. Následne sú načítané hodnoty transformované z poľa typu single do poľa typu unsigned word za pomoci subVI Array32ToArray16. Na zapisovanie hodnôt sú využívané holdingové registre.

6.2 DNP3

Vývoj aplikácie pre protokol DNP3 bol sprevádzaný mnohými problémami s ukladaním dát do súboru HDF5, kedy jediným možným východiskom bola duplikácia už funkčného programu `ModbusMaster.vi` a modifikáciou komunikačnej časti.

Protokol DNP3 umožňuje prenášať premennú analog input, ktorá by mala byť typu double. Po privedení typu double do bloku Write bola v komunikácii zachytená



Obr. 6.8: Grafický kód ModbusSlave pre meranie 5 pinov.

celočíselná hodnota, z ktorej nebolo možné späť získať originálnu hodnotu. Jedným riešením tejto anomálie bola transformácia hodnoty na typ reťazec (angl. string) a tú následne prenášať.

Zlomový bod, ktorý viedol k ukončeniu vývoja aplikácie bol, kedy hlavný cyklus While zodpovedný za beh celého programu pracoval natoľko pomaly, že jeden cyklus trval rádovo desiatky sekúnd. Jednotlivé inštancie sa neboli schopné vytvoriť a celý program sa javil ako zaseknutý.

Riešenie problémov pri práci bolo náročné z hľadiska malého počtu zdrojov, ktorých obsahom je popis funkcionality knižnice protokolu DNP3 pre LabVIEW. Internetové fóra s riešeniami vyššie uvádzanej problematiky neboli taktiež obsahovo postačujúce, čo svedčí o nižšej miere využitia v praxi.

7 Maximalizácia výkonnosti

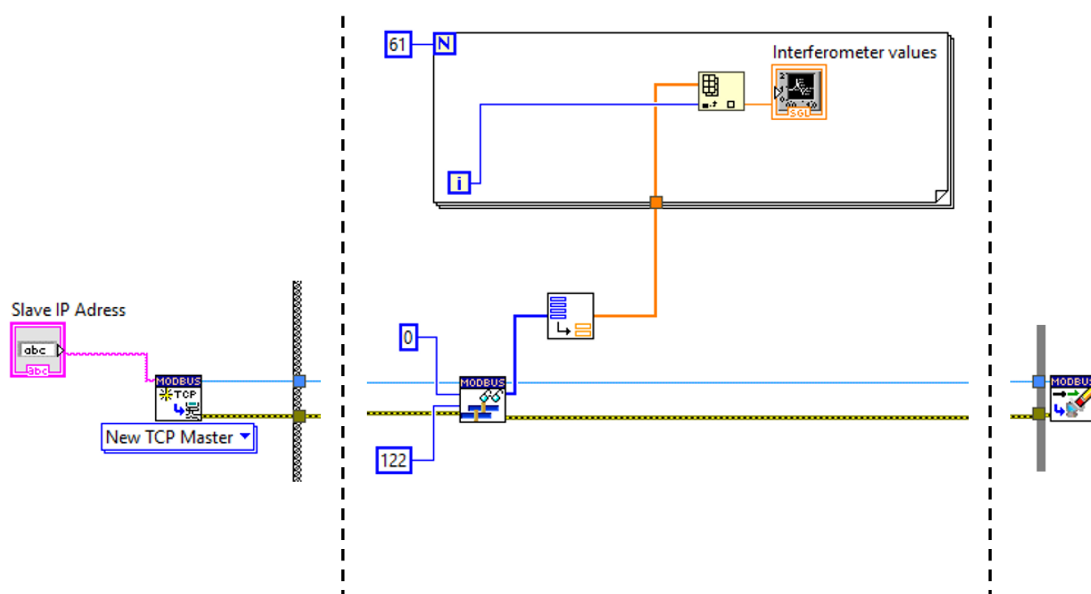
Pri meraní optovláknovými senzorickými systémami je snahou docieľiť čo najväčší počet vzoriek signálu z meraného vlákna. Táto kapitola pojednáva o zisťovaní maximálnej rýchlosti prenosu dát pomocou protokolu Modbus TCP a negatívnom vplyve prídavných prvkov v programe na počet prenesených packetov/s.

7.1 Program ModbusMasterHT

Vývoj programu bol cieľný na zistenie maximálneho počtu vzoriek signálu, ktoré dokážeme pomocou protokolu Modbus TCP preniesť za jednotku času. Keďže pri komunikácii protokolom Modbus sú dáta na stranu servera posielané až v momente, kedy vzdialená jednotka prijme požiadavku na dáta, bola potrebná minimalizácia programu ako na vzdialenej jednotke, tak aj na strane servera.

Výsledná aplikácia ponúka možnosť užívateľovi výberu medzi testovaním optovláknového senzoru (Test FOS), kedy dáta nie sú ukladané, ale iba prezentované do grafu a módom Measure&Save, kedy sú dáta aj ukladané.

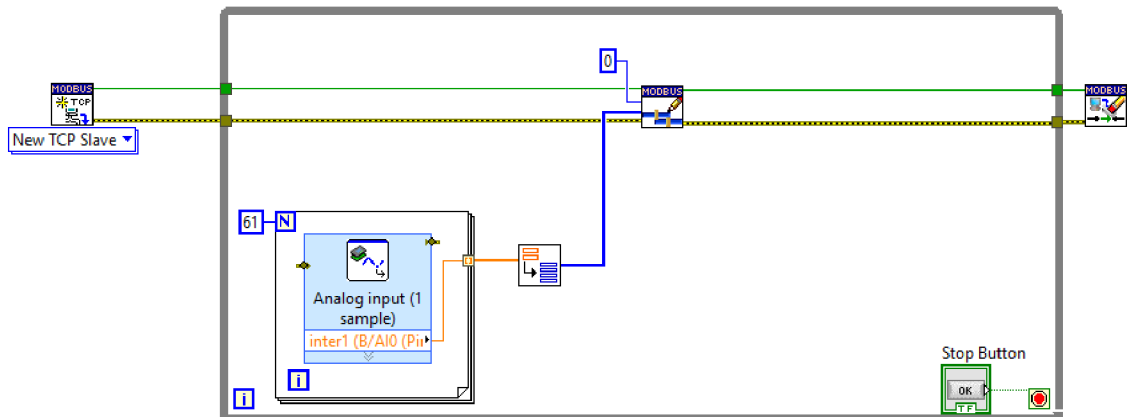
Kvôli znižovaniu vzorkovacej frekvencie s rastúcim počtom meraných pinov, aplikácia dokáže obsluhovať len optovláknové senzorické systémy, ktoré sú do vzdialenej jednotky pripojené jedným pinom. Na obrázku 7.1 je minimalizovaná časť programu pre potreby testovania senzorického systému. Časť programu Measure&Save je identická s programom ModbusMaster pre meranie jedného pinu, viď 6.1.1. Výber je docieľený za využitia štruktúry Case.



Obr. 7.1: Grafický kód ModbusMasterHT – časť testovania maximálnej rýchlosti.

7.2 Program ModbusSlaveHT

Programová časť vzdialenej jednotky rovnako ako na strane servera pozostáva len zo základných blokov potrebných na komunikáciu protokolom Modbus a funkčného bloku na meranie analógového vstupu. Za využitia knižnice NI High Throughput Add-on for myRIO bola docieľená zmena chovania vstupného pinu, čo viedlo k zvýšeniu vzorkovacej frekvencie. Blok je umiestnený do cyklu For, ktorý zabezpečuje využitie celej dĺžky packetu.



Obr. 7.2: Grafický kód ModbusSlaveHT.

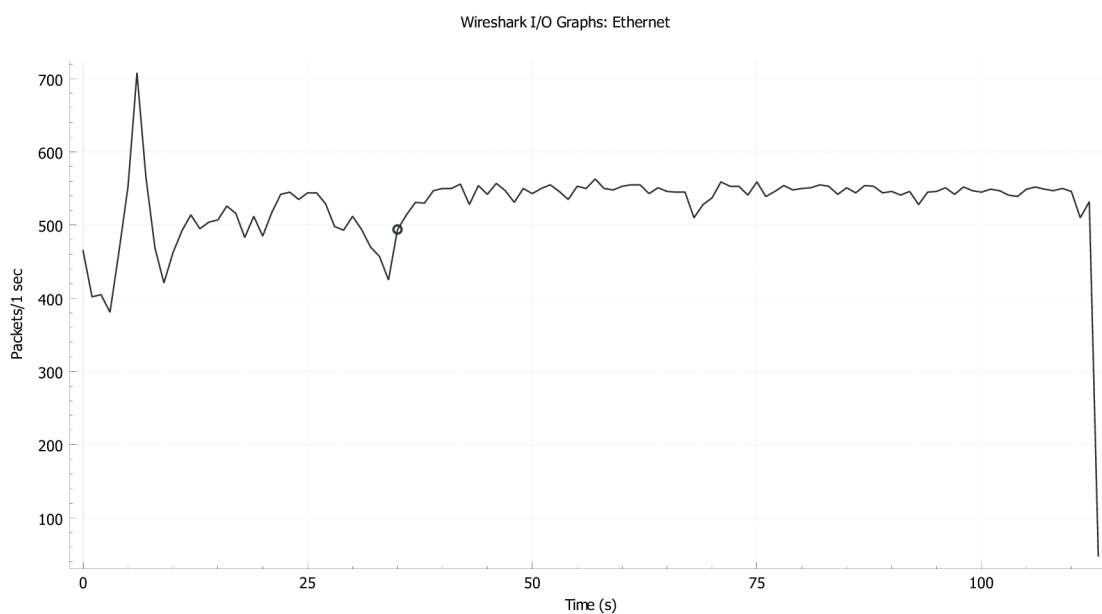
7.3 Výsledky

Merania boli uskutočnené pomocou nástroja I/O Graph, ktorý ponúka softvérový analyzátor Wireshark. Filtrom s atribútmi `modbus and ip.dst==192.168.1.12` bolo docieľené odfiltrovanie nežiadúcej dátovej komunikácie a zaručené zobrazovanie počtu serverom prijatých Modbus packetov za určitý časový úsek do grafu. V nasledujúcich grafoch sú zobrazené časové priebehy počtu prijatých packetov pre rôzne zmeny v programe.

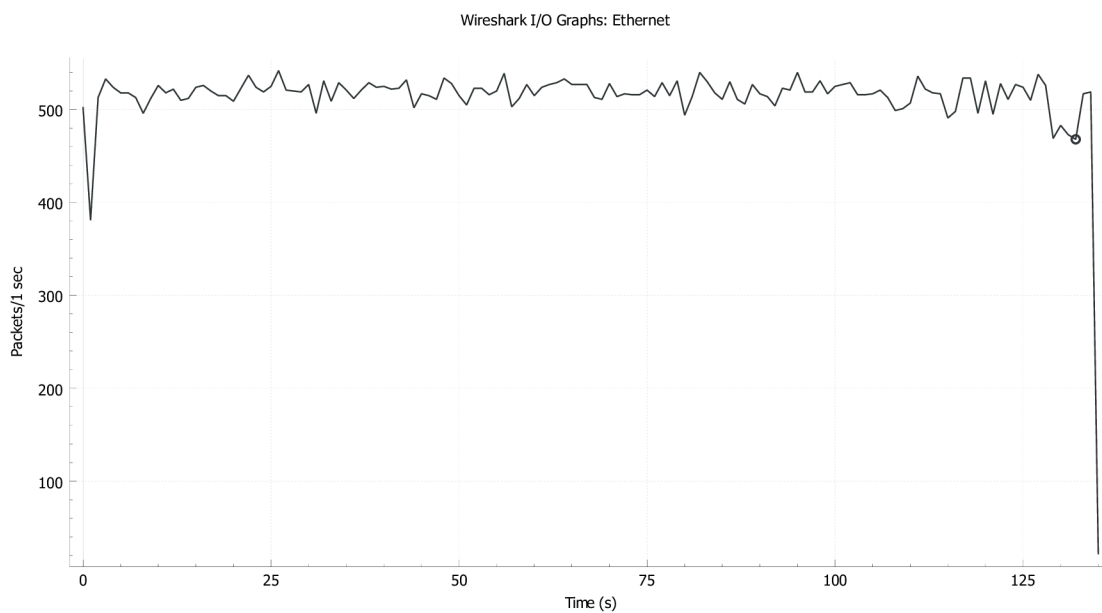
Výpočet aktuálnej rýchlosti spracovávania dát je možné vypočítať podľa vzťahu

$$N_{samples/s} = N_{packets/s} \cdot 61,$$

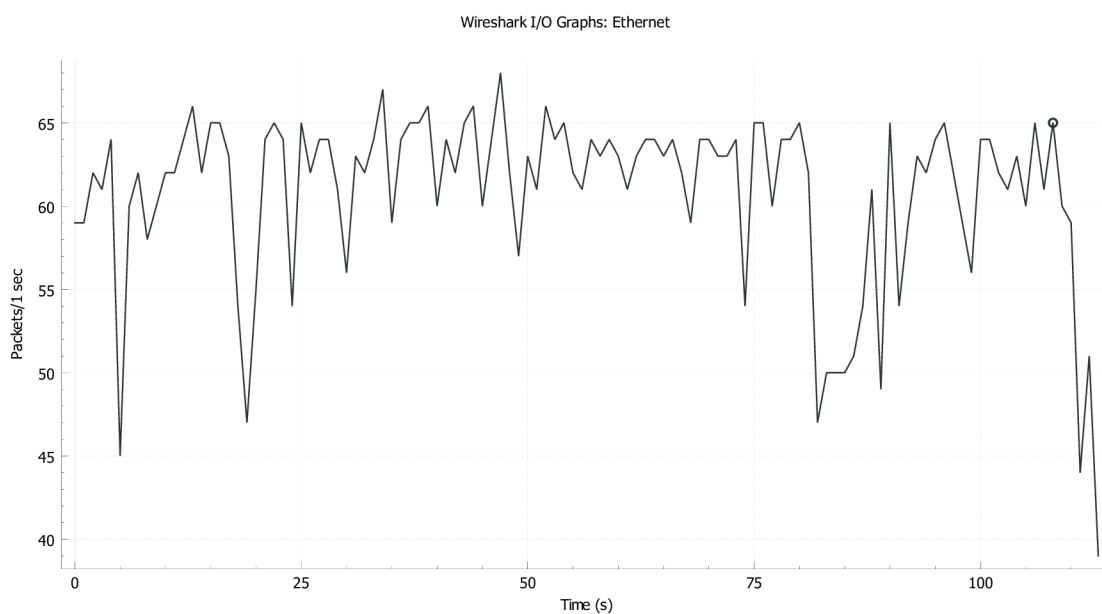
kde $N_{samples/s}$ je počet prenesených vzoriek za sekundu, $N_{packets/s}$ je počet prijatých packetov za sekundu a konštanta s hodnotou 61, ktorá odpovedá maximálnemu počtu hodnôt zapísaných do jedného packetu.



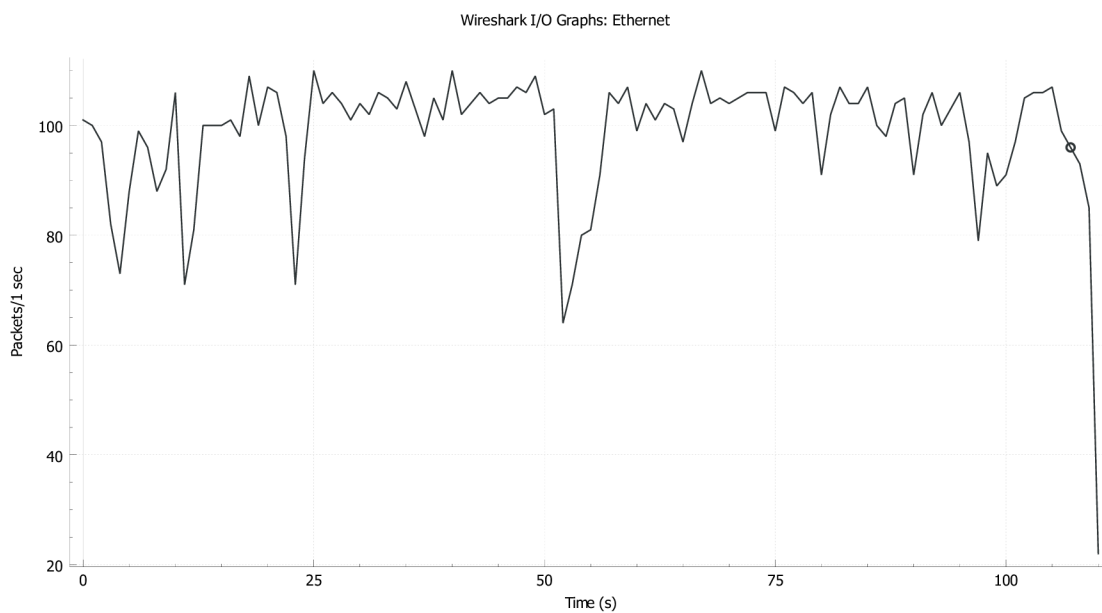
Obr. 7.3: Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Test FOS s vykresľovaním každej vzorky.



Obr. 7.4: Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Test FOS s vykresľovaním poslednej vzorky v packete.



Obr. 7.5: Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Measure&Save s vykresľovaním každej vzorky.



Obr. 7.6: Časový priebeh počtu prijatých packetov – ModbusMasterHT mód Measure&Save bez vykresľovania.

Záver

Cielom bakalárskej práce bolo vytvorenie systému na princípe technológie SCADA, ktoré by dokázalo zbierať dáta z optovláknových senzorických systémov, prípadne prijímať riadiace pokyny.

V teoretickej časti práce bol objasnený pojem SCADA, generácie vývoja, možnosti využitia a popisom jednotlivých stavebných prvkov SCADA systémov bola priblížená ich architektúra. Následne boli popísané najčastejšie využívané protokoly v týchto systémoch ako Modbus, DNP3 a IEC 60870-5-104. V poslednej časti teoretickej práce boli rozobraté princípy funkcionality hlavných typov optovláknových senzorických systémov a ich aktuálny stav využitia v SCADA. V časti pojednávajúcej o architektúre bol problematickým nedostatok aktuálnych zdrojov.

Na základe nízkej flexibility a rýchlosti práce s dátami, ktoré dostupné SCADA softvéry ponúkali, bolo rozhodnuté vytvoriť si vlastný program v grafickom vývojom prostredí LabVIEW. Vytvorený program pozostáva z dvoch spolu komunikujúcich častí na strane servera a platformy myRIO, ktoré boli vytvorené len pre komunikáciu protokolom Modbus TCP, kvôli vzniknutým problémom pri vývoji aplikácie pre DNP3.

Výsledná aplikácia vo forme spustiteľného súboru `.exe` bola úspešne nahratá na poskytnutý server, kde bolo nutné doinštalovať LabVIEW Runtime Engine, aby bolo možné aplikáciu vôbec spustiť. Overenie funkčnosti ukázalo neschopnosť aplikácie nadviazať spojenie so vzdialenou jednotkou, ktorá bola očividne zapríčinená zabezpečením siete slúžiacej na prepojenie servera s myRIO. Funkcia bola následne úspešne overená pripojením notebooku do switchu, v ktorom bola priamo pripojená aj vzdialená jednotka. Na základe neprítomnosti polarimetru pri testovaní z hľadiska nasadenia v teréne, bola overená funkčnosť aplikácie len pre interferometer.

Posledná časť praktickej časti bola venovaná zisťovaniu maximálneho počtu vzoriek prenášaných pomocou protokolu Modbus TCP. Vytvorením si minimalistického programu, ktorý obsahoval len časti potrebné na komunikáciu a zobrazovanie dát bolo dosiahnuté prenášanie 27 až 30 kS/s. V prípade možnosti kedy boli dáta aj ukladané, rýchlosť bola na úrovni 4 až 6 kS/s. Vo výsledných grafoch sú taktiež viditeľné negatívne vplyvy na rýchlosť chodu programu, spôsobené vykresľovaním priebehu do grafu.

Rovnako ako poznatky z literatúry, tak aj výsledky praktickej časti práce konvergujú k záveru, že technológia SCADA nie je navrhnutá na prenos takého veľkého množstva heterogénnych dát. Z čoho je možné vyvodiť záver, že technológia SCADA nie je ideálnou možnosťou pri prenose dát z optovláknových senzorických systémov, ktoré vyžadujú vysoké nároky na rýchlosť.

Literatúra

- [1] *Bulletin of the Transilvania University of Braşov: EVOLUTION OF SCADA SYSTEMS* [online]. 2016. Transilvania University of Braşov, 2016 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: http://webbut.unitbv.ro/BU2015/Series%20I/2016/BULLETIN%20I%20PDF/Ujvarosi_Al.pdf
- [2] SUBRAMANIAN, C. *Demystifying Integration of SCADA and IoT in an Industry*. Palakkad, Kerala, India, 2017. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/profile/Chamakuzhi-Subramanian/publication/319416763_Demystifying_Integration_of_SCADA_and_IoT_in_an_Industry/links/59a90bfda6fdcc23983bf261/Demystifying-Integration-of-SCADA-and-IoT-in-an-Industry.pdf
- [3] CSANYI, Edvard. 3 Generations of SCADA system architectures you should know about. *Electrical Engineering Portal* [online]. 2013 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://electrical-engineering-portal.com/three-generations-of-scada-system-architectures>
- [4] YADAV, Geeta. *ARCHITECTURE AND SECURITY OF SCADA SYSTEMS: A REVIEW* [online]. School of Information Technology IIT Delhi, India, 2020 [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/338500163_Architecture_and_Security_of_SCADA_Systems_A_Review. Prieskum. School of Information Technology IIT Delhi, India. Vedoucí práce Kolin Paul.
- [5] BALSOM, Paul. Industries That Use SCADA Systems. *High Tide Technologies* [online]. March 7, 2020 [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://htt.io/scada-system-industries/>
- [6] AVRAHAMI, Tal. SCADA for Remote Utilities Monitoring: 4 Layers to Grasp. *IIoT World* [online]. 23 Marec 2017 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.iiot-world.com/industrial-iiot/connected-industry/scada-systems-for-remote-utilities-monitoring-the-four-layers-you-need-to-understand/>
- [7] BOYER, Stuart A. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. 4. United States of America: International Society of Automation, 2010. ISBN 978-1-93600-709-7.
- [8] RealPars, 2020, *What is an Actuator?*, [YouTube video], [2021-11-07], Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=LHn706PUaoY&t=228s&ab_channel=RealPars

- [9] *Advanced Journal of Graduate Research* [online]. 2017. 2017 [cit. 2021-11-05]. ISSN 2456-7108.
- [10] BAILEY, David a Edwin WRIGHT. *Practical SCADA for Industry* [online]. 1. Oxford: Newnes, 2003 [cit. 2021-11-08]. ISBN 0750658053. Dostupné z: https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/5004/Practical_SCADA_for_Industry-1-110.pdf?sequence=1
- [11] Difference between Compact PLC and Modular PLC | Block Diagram. *DipsLab* [online]: Chaudhari, 2018 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://dipslab.com/difference-between-compact-modular-plc/>
- [12] PLC BASICS. *RealPars* [online]: RealPars, 2018 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://realpars.com/plc-basics/>
- [13] Russel. *SCADA AND TELEMETRY IN GAS TRANSMISSION SYSTEMS*. [online]. Houston, Texas: EnerSys Corporation, 2014 [2021-11-07] Dostupné z: <http://asgmt.com/wp-content/uploads/2016/02/109.pdf>
- [14] EnerSys Corporation. 2018. *Fundamentals of SCADA - Field Devices - PLCs*. [YouTube video]. [2021-11-07]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Zv8UJB6wvGg&t=2s&ab_channel=EnerSysCorporation
- [15] MRAFKO, Leo, Marián MROSKO a Ladislav KÖRÖSI. PLC a ich programovanie: 1. Čo je to PLC? *Posterus* [online]. Bratislava: Ústav riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 21. Apríl, 2010 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.posterus.sk/?p=6903>
- [16] EnerSys Corporation. 2018. *Fundamentals of SCADA Communications Media - Part 5*. [YouTube video]. [2021-11-07]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=vaYagLSmSg4&ab_channel=EnerSysCorporation
- [17] MARIHART, D.J. Communications technology guidelines for EMS/SCADA systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2001, **16**(2), 181-188 [cit. 2021-11-08]. ISSN 08858977. Dostupné z: doi:10.1109/61.915480
- [18] CARDOSO, Beatriz Batista, Marcos Aurelio Izumida MARTINS, Alberto Ferreira DA SILVA, Amadeu Fernandes DE MACEDO a Kennedy Alves MARTINS. Development of Fiber Optic Network for Underground Distribution Systems. *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)* [online]. Latin America: IEEE, 2021,

- 2021-9-15, **2021**(1), 1-5 [cit. 2021-11-09]. ISBN 978-1-6654-4421-7. Dostupné z: doi:10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543047
- [19] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1
- [20] Baseband Equipment - Satellite Ground Station Components. *Satcoms UK* [online]. Spojené královstvo: Satcoms UK, 2015, 7 August 2015 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: http://www.satcoms.org.uk/satellite/forum/baseband-equipment-ground-station-components_topic2271.html
- [21] Satellite frequency bands. *The European Space Agency* [online]. neznáme: The European Space Agency, neznámý [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands
- [22] EnerSys Corporation. 2018. *Fundamentals of SCADA Communications and Media - Part 6*. [YouTube video]. [2021-11-11]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=X8fYe6N6fXI&t=228s&ab_channel=EnerSysCorporation
- [23] EnerSys Corporation. 2018. *Fundamentals of SCADA Host Software Components - Part 10*. [YouTube video]. [2021-11-13]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=TxikkpRsPbY&list=PLW5i0rpCzrBUvtUMeTLjeFwfPRDFj7Bha&index=10&ab_channel=EnerSysCorporation
- [24] MULLINS, Philip. How SCADA Works: SCADA AND POLLING. *Radio Academy* [online]. Radio Academy [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.tairadioacademy.com/topic/scada-and-polling-1/>
- [25] WU, Jian, Yong CHENG a N.N. SCHULZ. Overview of Real-Time Database Management System Design for Power System SCADA System. *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2006* [online]. IEEE, 2006, , 62-66 [cit. 2021-11-14]. ISBN 1-4244-0168-2. Dostupné z: doi:10.1109/second.2006.1629324
- [26] MORLAN, Troy. SCADA 101: LOCAL HISTORIAN OVERVIEW. *NOR-CAL CONTROLS* [online]. Morlan, 2019 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://blog.norcalcontrols.net/local-historian-overview>
- [27] CLARKE, Gordon, Deon REYNDERS a Edwin WRIGHT. *Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems* [online]. Oxford: Elsevier, 2004 [cit. 2021-11-27]. ISBN 07506 7995. Dostupné z: <https://www.ju>

lesbartow.com/Pictures/RF/Practical_modern_SCADA_protocols_-_dnp3_60870-5_and_Related_Systems.pdf

- [28] MATOUŠEK, Petr. *Description and analysis of IEC 104 Protocol* [online]. Faculty of Information Technology BUT, 2017 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/publication/11570.FacultyofInformationTechnologyBUT>.
- [29] IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3). *IEEE Std 1815-2012 (Revision of IEEE Std 1815-2010)* [online]. 10 October 2012, 821 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: doi:10.1109/IEEESTD.2012.6327578
- [30] *MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION*. V1.1b3. Modbus.org, 2012, 50 s. Dostupné z: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
- [31] Podrobný popis protokolu Modbus TCP s příklady příkazů. *Ipc2U* [online]. 14 Prosinec 2020 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://ipc2u.cz/blogs/news/podrobny-popis-protokolu-modbus-tcp-s-priklady-prikazu>
- [32] ŠIFTA, Radim. Optovláknové senzorické systémy. *AUTOMA* [online]. 2020 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2020_05/
- [33] KANG, Jin. *Fiber Optic Sensing and Imaging: Fiber Optic Interferometric Devices* [online]. Baltimore: Springer, 2013, 171 s. [cit. 2022-04-23]. ISBN 978-1-4614-7482-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4614-7482-1
- [34] KERSEY, A.D. a A. DANDRIDGE. Applications of fiber-optic sensors. *Proceedings., 39th Electronic Components Conference* [online]. IEEE, 1989, 472-478 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: doi:10.1109/ECC.1989.77791
- [35] DEJDAR, Petr, Pavel HANÁK, Petr MUNSTER a Tomas HORVATH. Polarization Monitor for High-speed State of Polarization Changes Detection. *International Journal of Advances in Telecommunications Electrotechnics, Signals and Systems* [online]. 2021, **2021**(10), 1-5 [cit. 2022-04-17]. ISSN 1805-5443. Dostupné z: doi:10.11601/ijates.v10i1-3.296
- [36] LIU, Xin, Baoquan JIN, Qing BAI, Yu WANG, Dong WANG a Yuncai WANG. Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection. *Sensors* [online]. 26 July 2016, **16**(8), 31 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: doi: 10.3390/s16081164

- [37] LI, Tianliang, Jinxiu GUO, Yuegang TAN a Zude ZHOU. Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2020, **20**(20), 12074-12087 [cit. 2022-05-12]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2020.3000257
- [38] LI, Gui-yan, Hong-lin LIU a Zai-xuan ZHANG. Network integration of distributed optical fiber temperature sensor. *2008 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference* [online]. IEEE, 2008, 2008, 1-4 [cit. 2022-05-17]. ISBN 978-1-4244-2131-2. Dostupné z: doi:10.1109/APOS.2008.5226288
- [39] TANIMOLA, Femi a David HILL. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* [online]. 2009, **1**(4-5), 134-143 [cit. 2022-05-17]. ISSN 18755100. Dostupné z: doi:10.1016/j.jngse.2009.08.002
- [40] NICOLA, Marcel, Claudiu-Ionel NICOLA, Marian DUTTA, Dumitru SACERDOTIANU a Iulian HUREZEANU. System for monitoring of hot spot temperature of power transformer windings using fiber optic sensors, Kalman Filter and SCADA integration. *2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS)* [online]. IEEE, 2018, 2018, 99-104 [cit. 2022-05-17]. ISBN 978-1-5386-1493-8. Dostupné z: doi:10.1109/DAAS.2018.8396079
- [41] MACHAP, Kamalakannan a Abdulmajeed Mohammed Ali GARADAN. ANALYSIS OF INTEGRATING ZIGBEE DEVICES FOR DATA TRANSFORMATION IN SCADA SYSTEM. *Journal of Innovative Research and Solutions* [online]. 2018, Jan-Jun 2018, **4**(1), 170-174 [cit. 2022-05-17]. ISSN 2348 3636. Dostupné z: <https://acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10b/64.pdf>
- [42] ALLWOOD, Gary, Graham WILD a Steven HINCKLEY. Universal Signal Conditioning Technique for Fiber Bragg Grating Sensors in PLC and SCADA Applications. *Instruments* [online]. 2017, **1**(1) [cit. 2022-05-17]. ISSN 2410-390X. Dostupné z: doi:10.3390/instruments1010007
- [43] Ethernet LAN Media and Cable Lengths. *Vskills* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.vskills.in/certification/tutorial/ethernet-lan-media-and-cable-lengths/>
- [44] *PROMOTIC SCADA visualization software* [online]. Ostrava: MICROSYS, spol. s r.o. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.promotic.eu/cz/>
- [45] *National Instruments: What Is LabVIEW?* [online]. Austin, TX 78759-3504 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>

- [46] Historical Data Logging. *VTScada* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <http://www.vtscada.com/historical-data-logging/>
- [47] WASSER, Leah A. Hierarchical Data Formats - What is HDF5?. *National Ecological Observatory Network* [online]. Oct 7, 2020 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/about-hdf5>
- [48] Sieťová karta i-tec USB 3.0/RJ45 (U3METALGLAN) sivá. *Hej.sk* [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.hej.sk/sietova-karta-i-tec-usb-3-0-rj45-u3metalglan-siva/>
- [49] MyRIO Student Embedded Device: myRIO-1950. *NI* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.myrio-1950.html>

Zoznam symbolov a skratiek

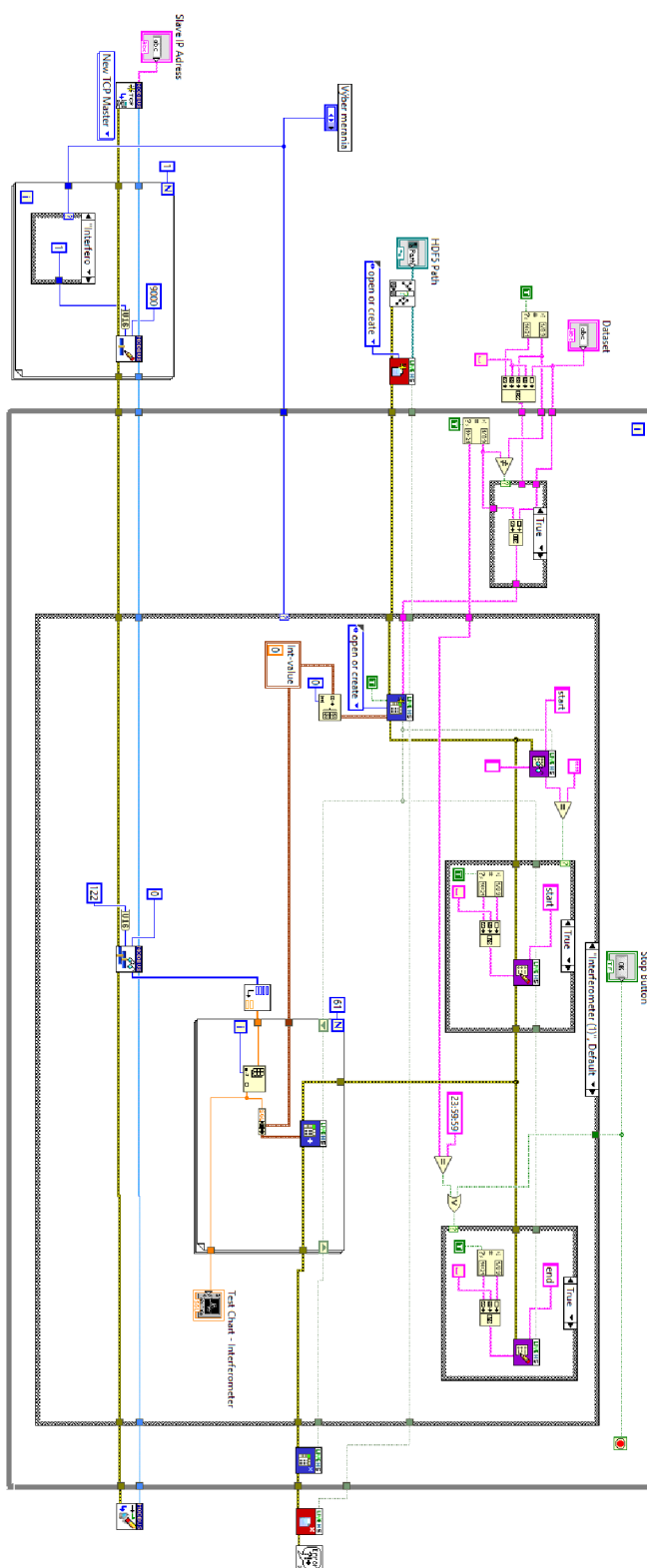
ADSS	All Dielectric Self Supporting
AGA	American Gas Association
APCI	Application Protocol Control Info
API	American Petroleum Institute
ASDU	Application Service Data Unit
CSV	Comma Separated Values
UDP	User Datagram Protocol
EFM	Electronic Flow Measurement
FBG	Fiber Bragg Grating
HDF5	Hierarchical Data Format version 5
HMI	Human Machine Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network
MARS	Multiple Adress Radio System
MTU	Master Terminal Unit – Hlavná koncová jednotka
OPC	Open Platform Communication
OPGW	Optical Ground Wire
OSI	Open System Interconnection
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
PLC	Programmable Logic Controller
RAM	Random Access Memory

RTU	Remote Terminal Unit – Vzdialená koncová jednotka
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SSH	Secure Shell
SQL	Structured Query Language
TCP	Transmission Control Protocol
TRM	Trunked Mobile
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
WAN	Wide Area Network
WOC	Wrapped Optical Cable

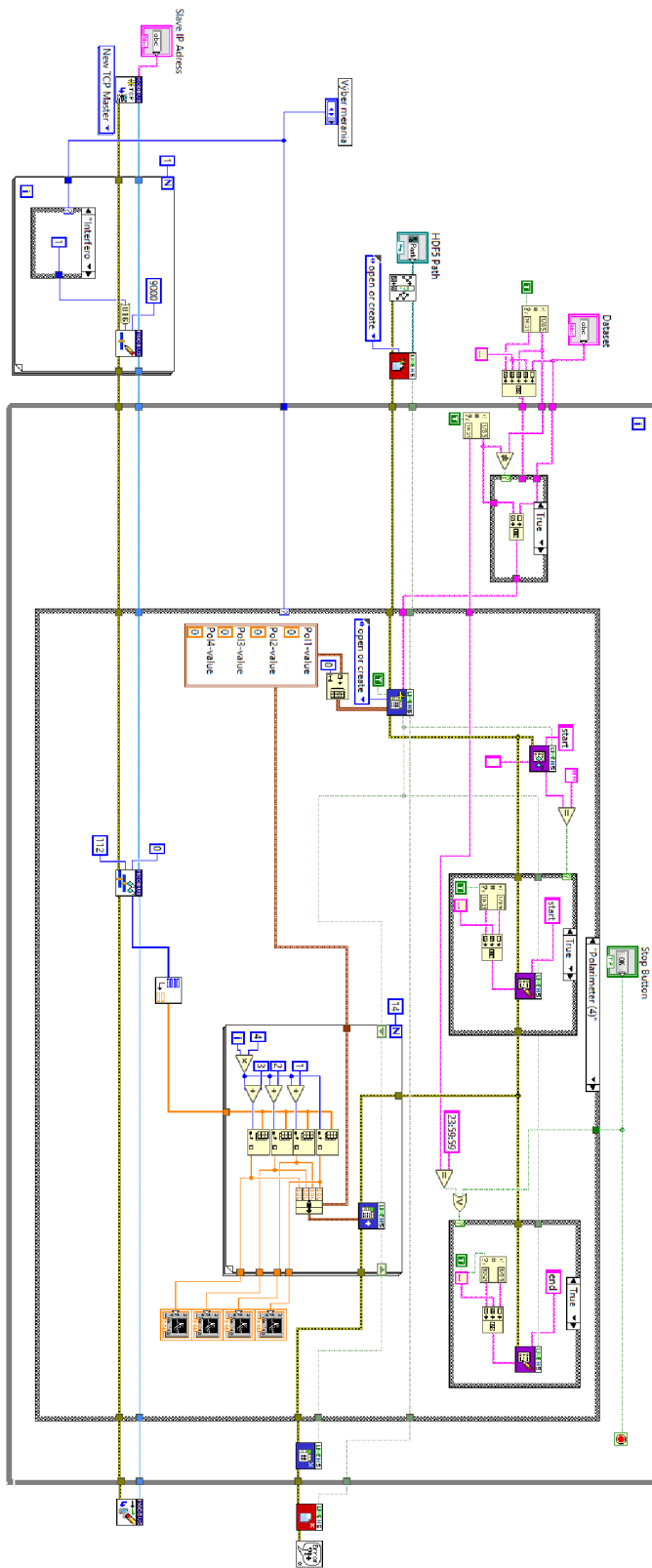
Zoznam príloh

A ModbusMaster	62
B ModbusSlave	67
C ModbusMasterHT	69
D ModbusSlaveHT	72
E Obsah elektronickej prílohy	73

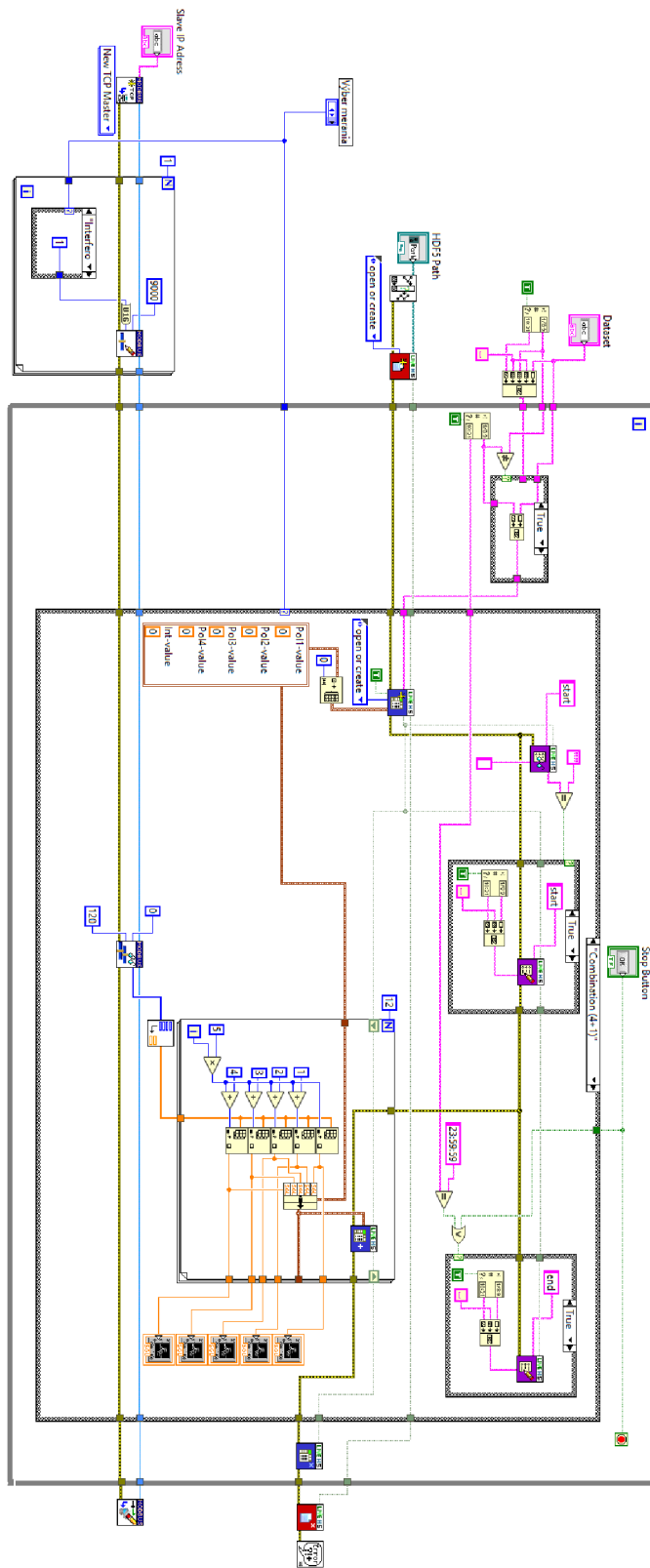
A ModbusMaster



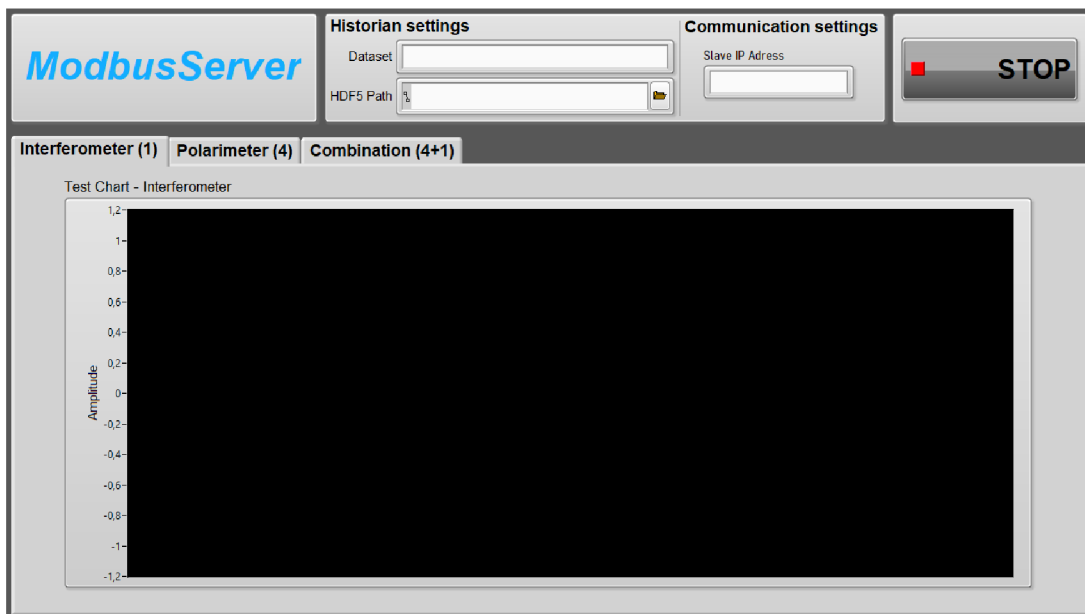
Obr. A.1: Blokóvú schéma programu ModbusMaster pre meranie interferometru.



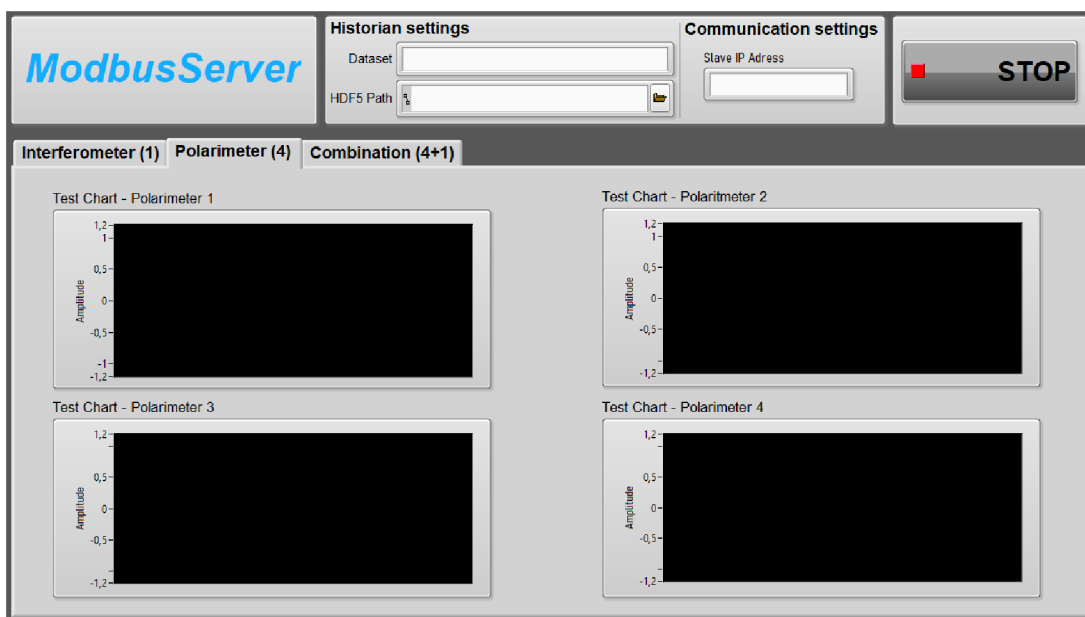
Obr. A.2: Bloková schéma programu ModbusMaster pre meranie polarimetru.



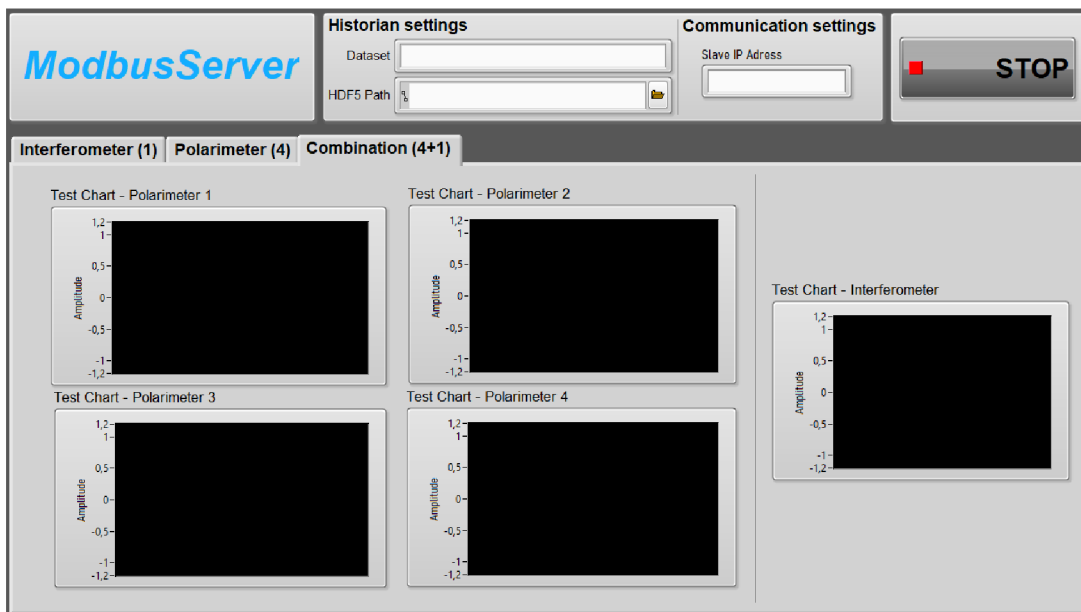
Obr. A.3: Bloková schéma programu ModbusMaster pre kombinované meranie.



Obr. A.4: Predný panel programu ModbusMaster pre meranie interferometru.

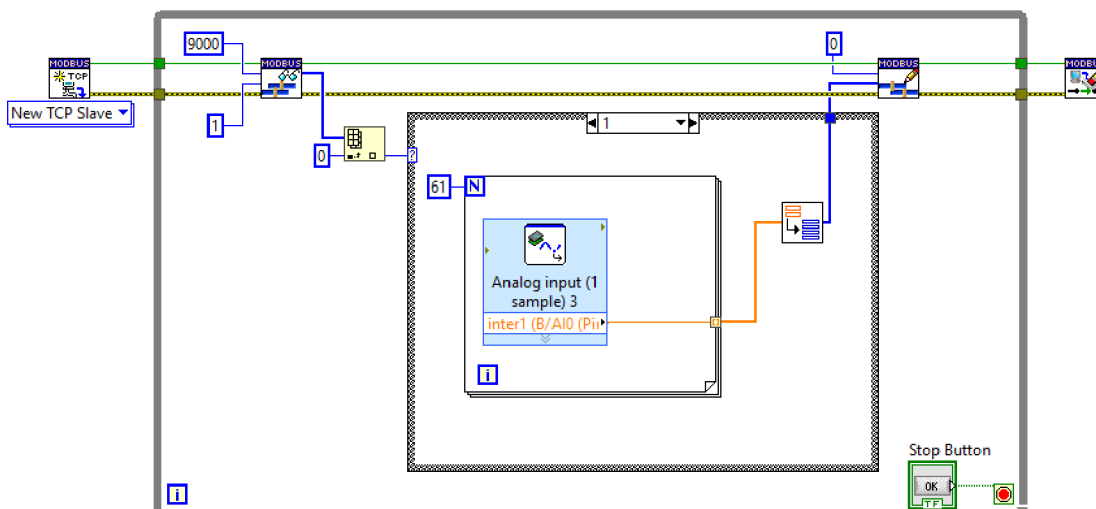


Obr. A.5: Predný panel programu ModbusMaster pre meranie polarimetru.

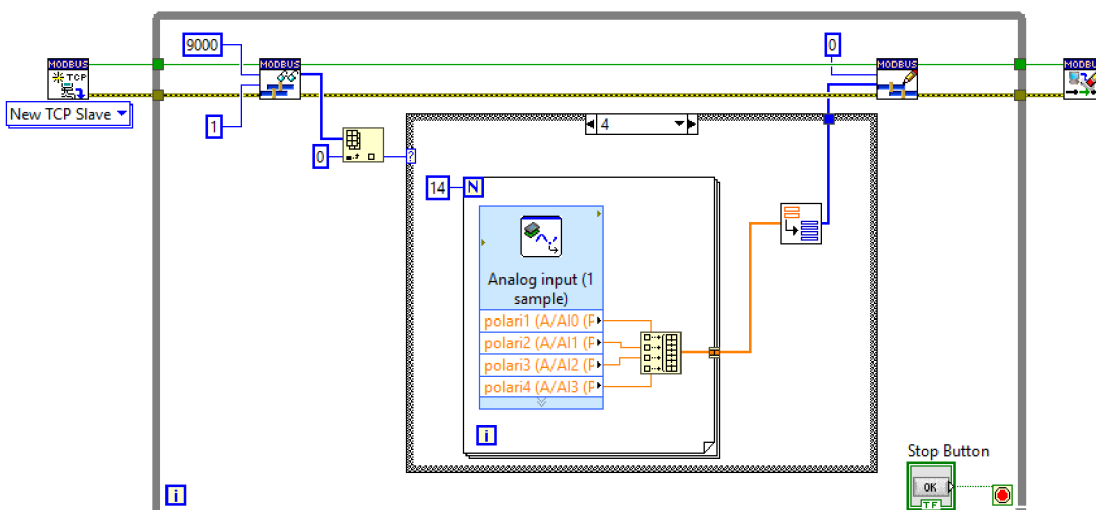


Obr. A.6: Predný panel programu ModbusMaster pre kombinované meranie.

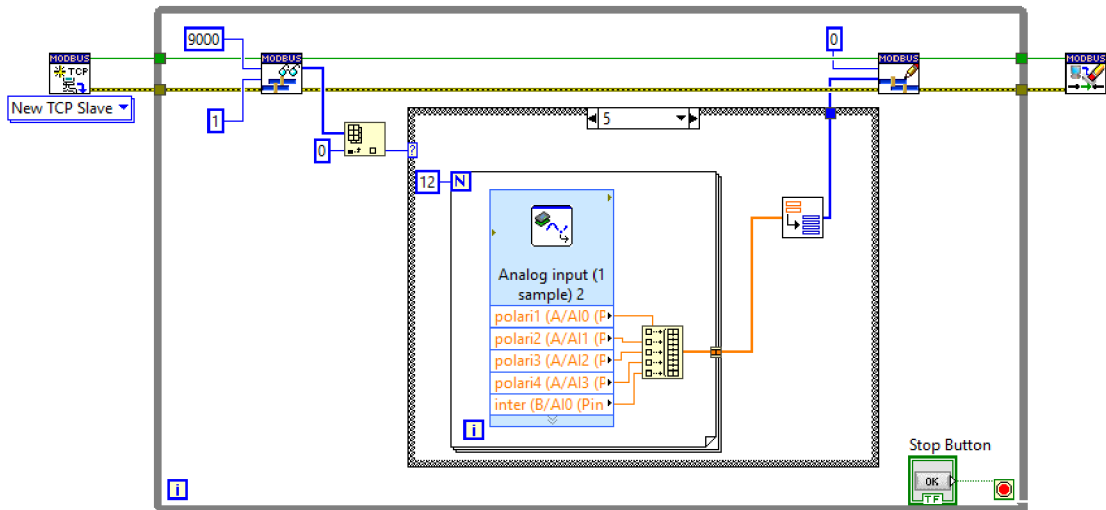
B ModbusSlave



Obr. B.1: Bloková schéma programu ModbusSlave pre meranie interferometru.

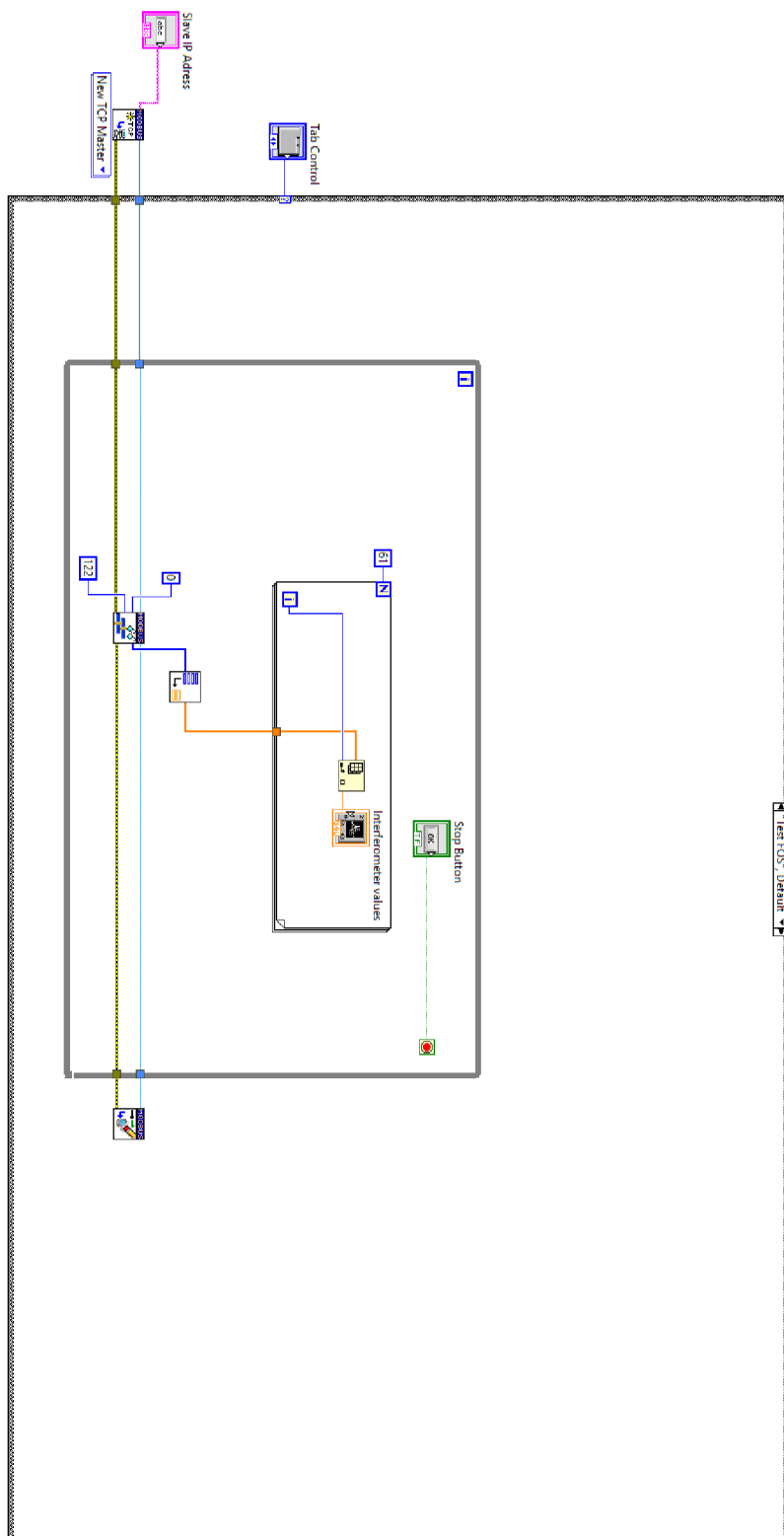


Obr. B.2: Bloková schéma programu ModbusSlave pre meranie polarimetru.

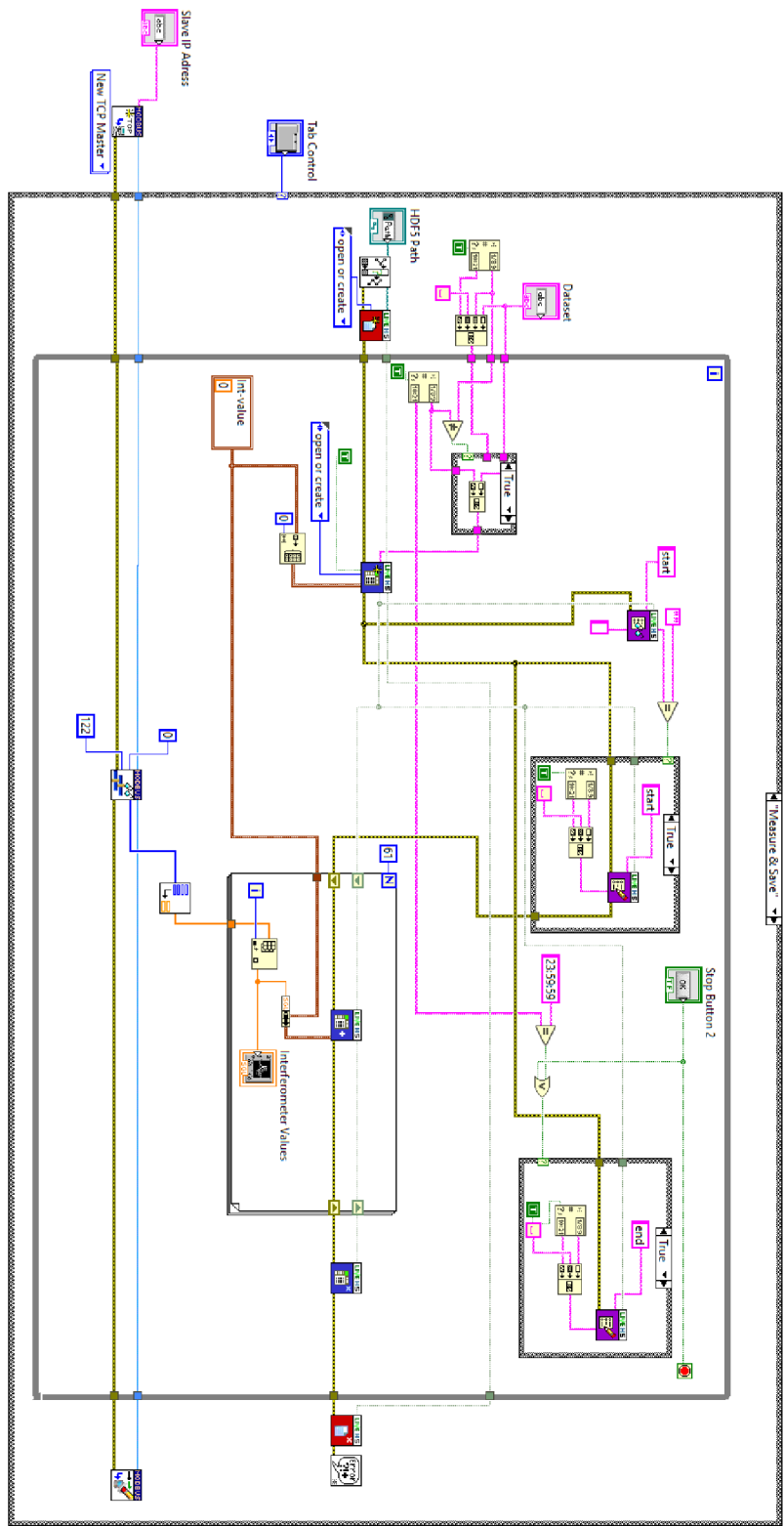


Obr. B.3: Bloková schéma programu ModbusSlave pre kombinované meranie.

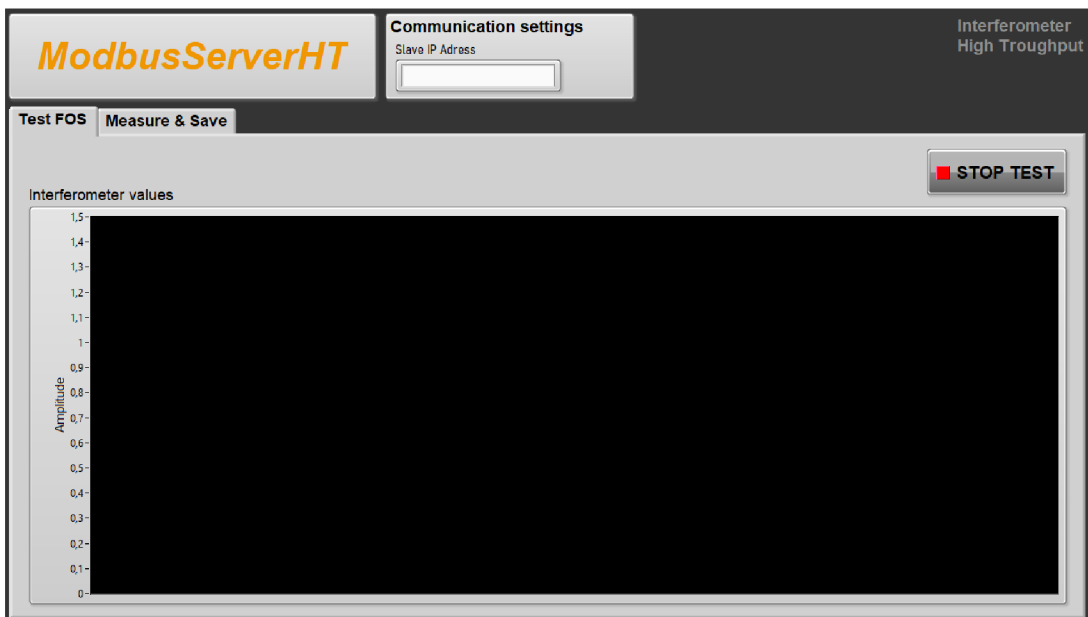
C ModbusMasterHT



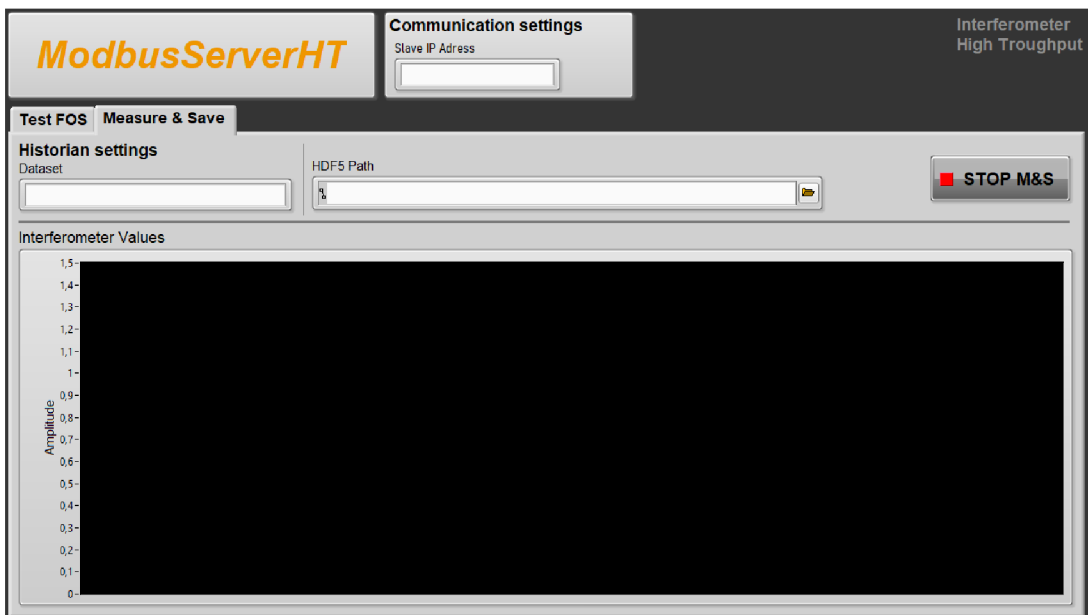
Obr. C.1: Bloková schéma programu ModbusMasterHT mód Test FOS.



Obr. C.2: Bloková schéma programu ModbusMasterHT mód Measure&Save.

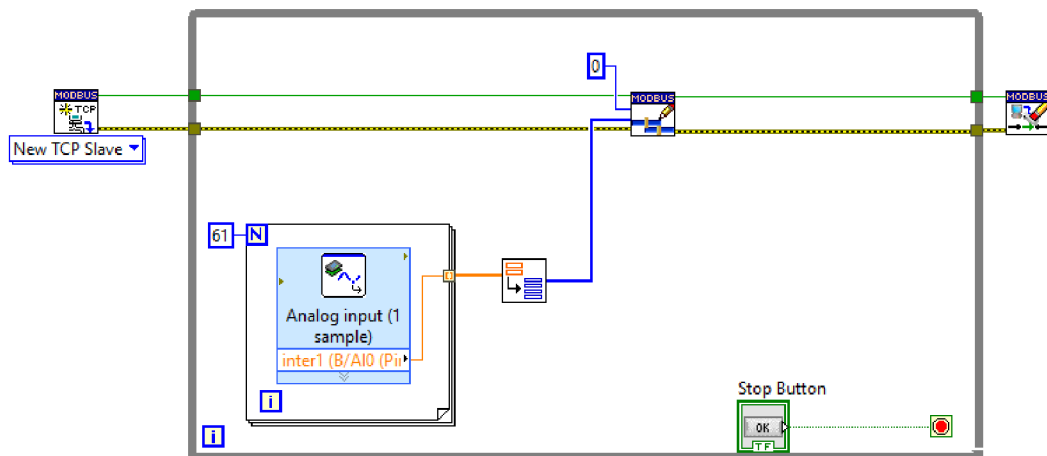


Obr. C.3: Predný panel programu ModbusMasterHT mód Test FOS.



Obr. C.4: Predný panel programu ModbusMasterHT mód Measure&Save.

D ModbusSlaveHT



Obr. D.1: Bloková schéma programu ModbusSlaveHT.

E Obsah elektronickej prílohy

Príloha obsahuje výslednú aplikáciu vo forme spustiteľného súboru `.exe` a programu vo verzii `.vi`. Kód bol testovaný programom LabVIEW 2018 vo verzii 18.0.1.

```
/. ..... Koreňový adresár prílohy
├── Final Programs ..... Adresár so súbormi výsledných programov
│   ├── ModbusMaster.exe ..... Adresár so spustiteľným súborom ModbusMaster
│   │   ├── Data ..... Adresár s potrebnými súbormi .dll
│   │   │   ├── h5helper.dll
│   │   │   ├── hdf5.dll
│   │   │   └── hdf5_hl.dll
│   │   ├── ModbusMaster.aliases
│   │   ├── ModbusMaster.exe
│   │   └── ModbusMaster.ini
│   ├── ModbusMasterHT.exe .... Adresár so spustiteľným súborom ModbusMasterHT
│   │   ├── Data ..... Adresár s potrebnými súbormi .dll
│   │   │   ├── h5helper.dll
│   │   │   ├── hdf5.dll
│   │   │   └── hdf5_hl.dll
│   │   ├── ModbusMasterHT.aliases
│   │   ├── ModbusMasterHT.exe
│   │   └── ModbusMasterHT.ini
│   ├── SubVI ..... Adresár s pomocnými SubVI
│   │   ├── Array32toArray16
│   │   └── UWarrayToSGLArray
│   └── VI Files ..... Adresár s programami vo formáte VI
│       ├── ModbusMaster.vi
│       ├── ModbusMasterHT.vi
│       ├── ModbusSlave.vi
│       └── ModbusSlaveHT.vi
```