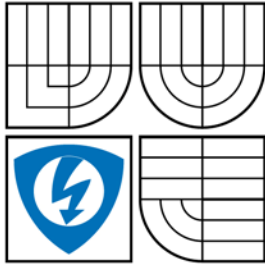


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## **ČASOVÁ SYNCHRONIZACE PC V MĚŘÍCÍCH A ŘÍDICÍCH SYSTÉMECH**

PC TIME SYNCHRONIZATION IN MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

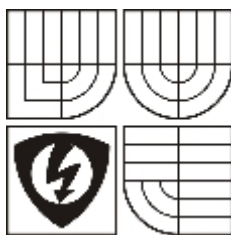
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**KAREL VOŘECHOVSKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. JIŘÍ KEPRT**

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Vořechovský Karel

**Ročník:** 3

**ID:** 83133

**Akademický rok:** 2007/08

## NÁZEV TÉMATU:

### Časová synchronizace PC v měřicích a řídicích systémech

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vývojovým prostředím LabVIEW. Samostatně nastudujte komunikační rozhraní PC a prozkoumejte možnosti jejich využití pro časovou synchronizaci dvou a více PC. Po dohodě s vedoucím práce navrhnete a realizujete metody pro synchronizaci času dvou a více PC. Vytvořte v prostředí LabVIEW synchronizační SW pro vybraná rozhraní a aplikujte jej. Porovnejte a změřte přesnost metod synchronizace pro možné aplikační využití.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

manuál LabVIEW

dle vlastního literárního průzkumu a pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 1.2.2008

**Termín odevzdání:** 2.6.2008

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Keprt

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*předseda oborové rady*

## 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Anotace**

Cílem této práce je změřit přesnost synchronizace vybraných synchronizačních metod. Byla vybrána metoda synchronizace času mezi dvěma uzly pomocí dvou GPS přijímačů a metoda synchronizace času prostřednictvím ethernetu a PTP protokolu. Metody byly proměřeny softwarovým časovým známkováním externě generovaných impulsů. Porovnáním časových známek z obou uzlů se získala časová odchylka mezi nimi. Doplněním je měření přesnosti hodinových čítačů a stanovení ideálního intervalu synchronizace.

**Klíčová slova** : Synchronizace času, GPS, PTP, IEEE 1588.

## **Anotation**

The aim of this thesis is to measure the time synchronization precision of chosen methods. Therefor was chosen the synchronization method between two nodes using a couple of GPS recievers and a synchronizatian method through the ethernet using the precision time protocol. The precision of synchronization methods was measured by generating and timestamping an external measurement pulse wired to both nodes. By comparing the timastamps of both nodes was aquired the jitter between them. In addition was measured the timedrift between two clock counters for precise setup of the synchronization interval.

**Keywords** : Time synchronization, GPS, PTP, IEEE 1588.

## **Bibliografická citace**

VOŘECHOVSKÝ, Karel. *Časová synchronizace PC v měřicích a řídicích systémech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 49s., 1 příloha. Vedoucí práce Ing. Jiří Keprt.

## **P r o h l á š e n í**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Časová synchronizace PC v měřicích a řídicích systémech" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

## **P o d ě k o v á n í**

„Děkuji tímto vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Jiřímu Keprtovi za pomoc při vypracování bakalářské práce. Děkuji svému konzultantovi Ing. Davidu Somolovi za cenné rady a připomínky při realizaci bakalářské práce. Dále děkuji svým rodičům za jejich veškerou podporu během studia.“

V Brně dne :

Podpis:



## 1. OBSAH

<b>1. OBSAH</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>3. ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	<b>6</b>
3.1 Rozhraní PC .....	6
3.1.1 Ethernet (IEEE 802.3) .....	6
3.1.2 Sériová linka .....	9
3.2 Způsoby synchronizace času.....	11
3.2.1 Časování a synchronizace podle standardu IEEE 1588.....	11
3.2.2 časování a synchronizace pomocí GPS .....	14
<b>4. MĚŘENÍ PŘESNOSTI SYNCHRONIZACE</b> .....	<b>15</b>
4.1 IEEE 1588.....	15
4.2 GPS GARMIN LVC 18 .....	15
4.3 Měření driftu hodinových krystalů .....	15
4.4 Zapojení měřicí aplikace.....	15
<b>5. POPIS POUŽITÉHO HARDWARU</b> .....	<b>17</b>
5.1 PC.....	17
5.2 I/O ethernetový modul adam 6060.....	17
5.3 synchronizační Karta NI PCI-1588.....	18
5.4 Přijímač GPS GARMIN 18 LVC.....	19
5.5 Měřicí karta NI 6518.....	21
<b>6. SW PRO ZPRACOVÁNÍ</b> .....	<b>22</b>
6.1 Prostředí LabVIEW 8.5.....	22
6.2 Knihovna Ni-daq.....	23
6.3 Knihovna Ni-sync .....	23
6.4 Knihovna NI-MODBUS .....	23
<b>7. MĚŘICÍ SYSTÉM</b> .....	<b>24</b>
7.1 Měření synchronizace pomocí GPS přijímačů.....	24
7.1.1 Blokové schéma programu .....	24
7.2 Měření synchronizace pomocí NI PCI-1588 karet .....	28

7.2.1	Blokové schéma programu .....	28
7.2.2	Automatizace úlohy .....	30
7.3	Měření časového driftu mezi hodinovými krystaly .....	31
7.3.1	Možnost potlačení driftu .....	32
<b>8.</b>	<b>VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>34</b>
8.1	Synchronizace času .....	34
8.1.1	Zátěž procesoru .....	34
8.1.2	Zátěž sítě .....	35
8.1.3	Tabulka hodnot .....	36
8.1.4	Příklad výpočtu vybraných hodnot – řádek GPS .....	36
8.1.5	Grafy hodnot pro GPS synchronizaci .....	36
8.1.6	Grafy hodnot pro PTP synchronizaci .....	37
8.1.7	Párování hodnot .....	38
8.1.8	Poznámka .....	39
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
<b>10.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>42</b>

## Seznam Obrázků

Obrázek 1 – Referenční model ISO/OSI.....	8
Obrázek 2 – Korekce offsetu.....	13
Obrázek 3 – Měření zpoždění .....	13
Obrázek 4 – Schéma.....	16
Obrázek 5 – ADAM 6060 .....	17
Obrázek 6 – Blokové schéma karty PCI 1588 .....	18
Obrázek 7 – Čelní panel karty PCI 1588 .....	19
Obrázek 8 - princip autokorelace pro tzv. uzamknutí přijímače na danou dvojici signálů L1, L2 .....	20
Obrázek 9 – Přijímač GARMIN LVC 18 .....	20
Obrázek 10 – Karta NI 6518 .....	21
Obrázek 11 - Blokové schéma programu „GPS sync“ .....	24
Obrázek 12 - Vývojový diagram dopočítávání ms času .....	26
Obrázek 13 - Čelní panel programu .....	28
Obrázek 14 - Blokové schéma programu „1588 sync“ .....	28
Obrázek 15 - Čelní panel programu .....	29
Obrázek 16 - Blokové schéma programu „karta x karta“ .....	31
Obrázek 17 - Čelní panel programu .....	31
Obrázek 18 - Vývojový diagram funkce na korekci driftu .....	33
Obrázek 19 - Graf rozložení odchylek, synchronizace pomocí GPS s CPU zátěží ...	36
Obrázek 20 - Graf rozložení odchylek pro synchronizaci pomocí GPS .....	37
Obrázek 21 - Graf rozložení odchylek pro synchronizaci pomocí PTP.....	37
Obrázek 22 - Graf rozložení odchylek, synchronizace pomocí PTP se zátěží sítě ....	38
Obrázek 23 - Graf rozložení odchylek pro synchronizaci pomocí PTP se síťovou i procesorovou zátěží.....	38
Obrázek 24 - Čelní panel programu .....	39

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - statistické vyjádření pro hodnoty odchylek obou metod .....	36
Tabulka 2 - drift hodinových krystalů.....	39

## 2. ÚVOD

Úkolem této bakalářské práce je prozkoumat možnosti synchronizace času u osobních počítačů a vytvořit měřicí systém pro jejich porovnání, seznámit se s hardwarovým vybavením PC a s jeho možným rozšířením za účelem synchronizace času, vytvoření sítě dvou PC a realizace měřicího systému. Posledním krokem je porovnání synchronizačních metod. Změření přesnosti synchronizace a nasimulování možných negativních vlivů.

Tato práce řeší problematiku synchronizace času PC pomocí synchronizačního standardu IEEE 1588, tedy použitím synchronizačních karet NI PCI-1588 a pomocí GPS přijímačů. Princip měření přesnosti synchronizace spočívá v generování externího měřicího pulsu, ten se přivádí do obou synchronizovaných PC a známkuje se časem přijetí v každém PC zvlášť. Porovnáním jednotlivých časů je tedy možné určit přesnost synchronizace.

Měřicí úloha je sestavena ze dvou kancelářských PC osazených synchronizační kartou NI PCI-1588, měřicí kartou NI PCI-6514 a GPS přijímačem, laboratorním zdrojem, a reléovým vstupně-výstupním modulem ADAM 6060. Je nutné nastudovat použití dodávaných knihoven k NI kartám NI-DAQ a NI-SYNC a seznámit se s ovládáním ethernetového I/O modulu ADAM 6060.

Měřicí systém má být oživen pomocí software vytvořeného v prostředí LabVIEW Professional Development System 8.5.

### 3. ROZBOR ZADÁNÍ

Časová synchronizace je nedílnou součástí mnoha průmyslových i neprůmyslových oborů. Je nezbytná pro bezproblémovou komunikaci mezi uzly na síti a s tím souvisejících problémů při řízení, měření, výpočtech a komunikaci v síti. V praxi se setkáváme se synchronizací času neustále, ať jde o telefonování, cestování, obchodní styk, nebo jakékoliv práce na počítačové síti. V každé počítačové síti je třeba zajistiti správnou časovou souslednost událostí, je proto nepřijatelné, aby se například první událost podmiňující vznik druhé následující události stala až po ní. Proto klade moderní výpočetní technika vysoké požadavky na synchronizaci času mezi uzly, obzvlášť moderní průmyslové procesy s požadavky na řízení, měření a komunikaci v reálném čase. Přesný čas se používá při zjišťování polohy, při řízení složitých systémů, pro správné časování výrobních procesů, apod..

Trendem posledních let je nahrazování nákladných průmyslových měřicích a řídicích systémů klasickými PC, které jsou nepoměrně levnější z hlediska pořizovacích i servisních nákladů. Jejich modulárnost a standardizace je předurčuje k širokému využití ve všech oblastech. PC a hlavně Windows ovšem nejsou navrženy pro takové použití, jejich komplexnost, kompaktnost a vlídné uživatelské rozhraní si odporují s průmyslovými požadavky, přesnost, odolnost aj..

Úkolem bakalářské práce je vyzkoušet, s jakou přesností se dá mezi kancelářskými PC s operačním systémem Windows XP synchronizovat čas a rozhodnout do jaké míry jsou takto vybavené PC schopny provádět a řídit přísně deterministické úkony. Vzhledem k tomu, že se měřicí pulsy známkují časem softwarově, bude možné určit míru chyby, kterou do měření zanáší aplikační vrstva PC, tedy operační systém a program.

#### 3.1 ROZHRANÍ PC

##### 3.1.1 Ethernet (IEEE 802.3)

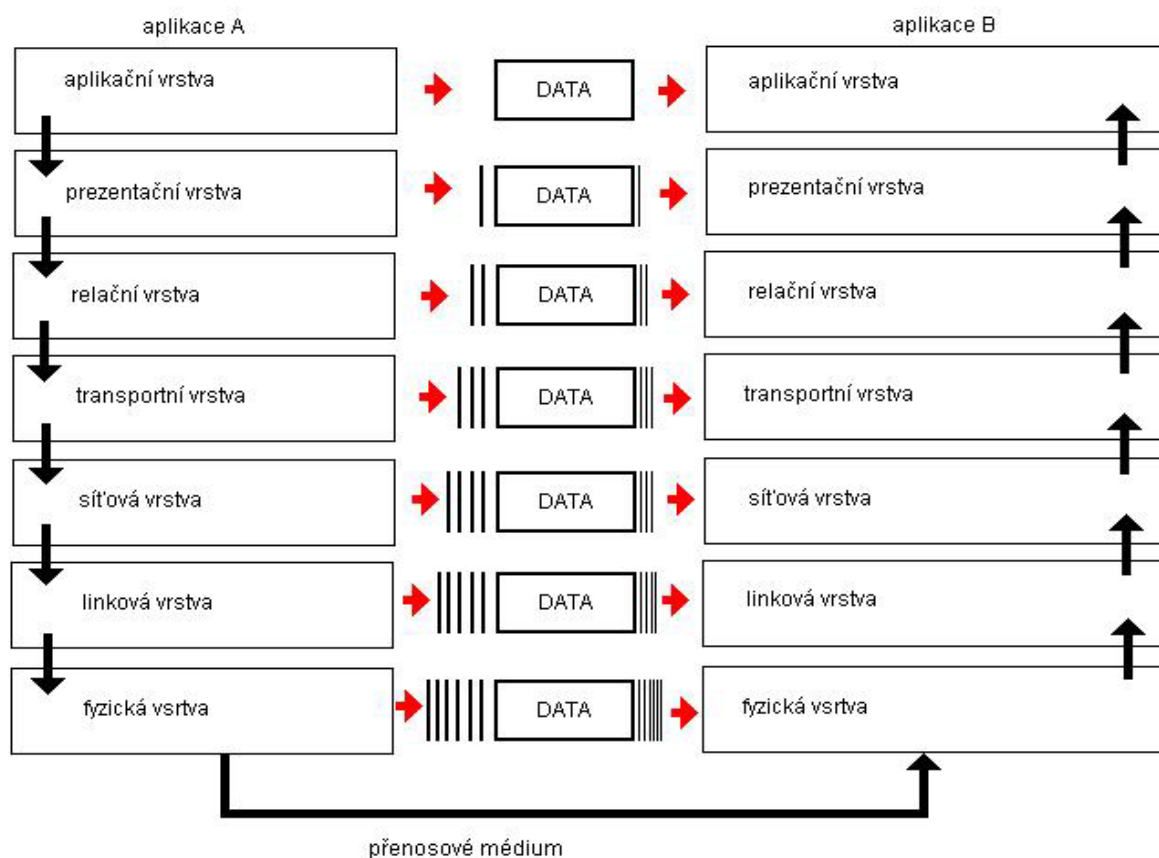
Ethernet se za dvacet let své existence stal nejrozšířenějším komunikačním standardem. V současnosti se nejvíce používá pro realizaci malých nebo středně velkých sítí LAN (local area network). Dále je velmi rozšířen v koncových

segmentech sítě internet. Právě jeho masivní využití je důvodem jeho postupného pronikání do oblastí průmyslové automatizace, můžeme se proto čím dál častěji setkávat s pojmem průmyslový ethernet. Pro bližší seznámením s tímto komunikačním rozhraním je třeba nejdříve vysvětlit pojem „ethernet“. Pod slovem ethernet se jednak myslí komunikační síť, která je součástí počítačové sítě. Ethernet se tedy dá formulovat jako prostředek kterým jsou počítače propojeny. Dál se ovšem slovem ethernet definuje soubor pravidel, podle kterých se toto spojení uskutečňuje.

### ***Model ISO/OSI***

Komunikace v otevřených sítích pracuje na základě referenčního modelu pro otevřenou sériovou komunikaci ISO/OSI. Tento model přesně specifikuje pravidla pro propojování zařízení na úrovni softwaru i hardwaru od různých výrobců. Model komunikace je sedmivrstvý (obr.8).

Fyzická vrstva slouží pro nezabezpečený přenos dat ve formě modulovaného proudu bitů, který je v takové formě přenášen přes propojovací médium. Linková vrstva se stará o zabezpečení přenosu a poskytuje účastníkům komunikace přístup k přenosovému médiu. Síťová vrstva se stará o směrování zpráv při účasti více jak dvou účastníků komunikace. Transportní vrstva se stará o adresování a definuje formát adres. Relační vrstva spravuje jednotlivé relace, jejich navazování a ukončování, nepoužívá se při komunikaci prostřednictvím nenavazovaného spojení. Prezentační vrstva interpretuje aplikační požadavky uživatele pro ostatní vrstvy. Aplikační vrstva poskytuje síťové služby jednotlivých účastníkům komunikace. Každá vrstva doplňuje přenášený datový celek o další zabezpečovací, kódovací, kontrolní aj. bity a bajty. Takové celky potom tvoří celé rámce (frame). Každá vrstva modelu vykonává požadované instrukce od vrstvy bezprostředně nad ní a má práva pro požadování služeb od vrstev bezprostředně nižších (odesílatel, u příjemce je to obráceně).



Obrázek 1 – Referenční model ISO/OSI.

### *LAN Ethernet*

Standard ethernet definuje jen fyzickou a linkovou vrstvu, proto je při praktickém použití doplněn o další sadu protokolů jednotlivých vrstev. V sítích LAN je ethernet doplněn o protokol síťové vrstvy – IP (internet protocol) o protokoly transportní vrstvy – TCP/UDP (transmission control protocol, user datagram protocol) a také o protokoly aplikační vrstvy – FTP, H TTP, SMTP(file transmission protocol, hypertext transmission protocol, short message transmission protocol) nebo o synchronizační protokoly PTP nebo NTP. Ethernet doplněný o rodinu protokolů TCP/IP zcela ovládl veškeré neprůmyslové sektory. Navíc svou pozici posílil díky masivnímu rozšiřování internetu, jako nekonečnému zdroji informací. Dalším kladem tohoto rozhraní je kompatibilita s nejrozšířenějšími výpočetními stanicemi – PC, ty bývají zpravidla vybaveny fyzickým rozhraním ethernet díky zásuvným

síťovým kartám. Stále narůstající spotřebitelská základna neustále tlačí dolů ceny veškerých komponent spojených s využíváním ethernetu.

Z výše uvedených důvodů je patrné, že ethernet nebyl navržen pro použití v průmyslových aplikacích, jeho fyzická vrstva má z hlediska rušení, vlhkosti, teploty a jiných vnějších vlivů naprosto nedostačující vlastnosti. Největším problémem z hlediska časové synchronizace je použitá metoda přístupu k přenosovému médiu. Tato metoda nezaručuje přesně daný okamžik přístupu, to znamená že nejistoty spojené s touto dobou čekání jsou nedeterministické a zpravidla mají největší vliv na výslednou odchylku. Z tohoto důvodu je ethernet nevhodný pro aplikace vyžadující režim reálného času v síti. Navíc jsou díky použité metodě CDMA/CS elektrická rozhraní ethernetu mnohem složitější a dražší pro realizaci než používá většina komunikačních rozhraní běžně v průmyslu – ProfiBUS, ModBUS, WorldFIP, LonTalk, P-Net aj., které používají sériové rozhraní RS-485 nebo upravené rozhraní ethernet. Stejně tak další typy sběrnic, které nepoužívají žádné ze standardizovaných sériových rozhraní (RS-485, RS-422, RS-423), ale rozhraní vlastní – DeviceNET, Foundation FieldBUS, AS-Interface aj.. I přesto se ethernet objevuje stále častěji jako možné komunikační řešení u stále více firem.

Na druhou stranu mluví ve prospěch ethernetu jeho rychlost fyzického přenosu a samozřejmě vysoké tempo jeho vývoje. Ethernet od svého vzniku prodělal velice složitý vývoj. Při prvním předvedení byla rychlost ethernetu 3 Mbitps, v posledních letech zaznamenal ethernet raketový nárůst přenosové rychlosti. Při přechodu na kroucenou dvoulinku v devadesátých letech dosahoval ethernet rychlosti 10 Mbitps a za posledních šestnáct let se jeho rychlost zvýšila 10 000x. V dnešní době je již dostupná 100 Gbitps verze ethernetu. Zvyšování rychlosti vede i přes použitou metodu přístupu CSMA/CD ke snižování délky trvání kolizního intervalu a délky trvání prodlev mezi pakety. Vzhledem k nutnosti použití mnohem rychlejších síťových členů se snižuje i celková latence.

### 3.1.2 Sériová linka

V současné době se v oblasti osobních počítačů od používání sériového rozhraní RS-232 již téměř definitivně ustoupilo a to bylo nahrazeno výkonnějším Univerzálním Sériovým Rozhraním USB. Nicméně v průmyslu je tento standard,

především jeho modifikace - standardy RS-422 a RS-485, velice rozšířen a pro své specifické rysy tomu tak bude i nadále. Na rozdíl od komplexnějšího USB, standard RS-232 pouze definuje, jak přenést určitou sekvenci bitů a nezabývá se už vyššími vrstvami komunikace. V referenčním modelu ISO/OSI tak představuje pouze fyzickou vrstvu.

### ***RS-232***

Komunikace po lince RS232 je nejběžnější, protože rozhraní RS232 má vyveden každý běžný počítač. Používá se pro připojení zařízení komunikujících maximální rychlostí 115.2 kBd na vzdálenost maximálně 15m. Kromě vodičů pro přenos dat - RxD a TxD obsahuje ještě další vodiče pro řízení toku dat. Tyto pomocné řídicí signály nejsou obsaženy v linkách typu RS422 ani RS485 a musí být nahrazeny komunikačním protokolem. Ani mnohá zařízení komunikující po lince RS232 tyto signály nevyužívají.

Nevýhodou linky RS232 je omezená komunikační vzdálenost a nemožnost jejího větvení. Navíc obvykle nebývá od zařízení galvanicky oddělena, což přináší problémy se zemními smyčkami, které v průmyslovém prostředí celou komunikaci znemožní.

Pro přenos dat na větší vzdálenosti je vhodné použít linku RS485 nebo RS422. Linky mohou být vedeny až na vzdálenost 1600m a lze je větvit.

### ***RS-485, RS-422***

I když obě zde uvedené sběrnice, tj. RS-422 a RS-485, mají několik společných vlastností, nelze je v žádném případě zaměňovat a každá je vhodná pro trochu jinou aplikaci. Zatímco RS-485 je plnohodnotná průmyslová sběrnice, RS-422 je spíše určena jen na jednoduchý rychlý sériový přenos dat na velké vzdálenosti a v prostředí se zvýšeným rušením.

Mezi společné vlastnosti patří následující:

- stejný princip přenosu dat
- stejná reprezentace logických stavů
- použití dvou vodičového propojení zařízení

- vzdálenost "krajních" jednotek až 500 m
- přenosová rychlost až 200 kb/s

V případě RS-422 i R-485 může jít o sériovou datovou komunikaci po dvou vodičové stíněném kabelu typu twisted pair (zkroucený pár), kde jednotlivé logické stavy jsou reprezentovány rozdílovým napětím mezi oběma vodiči. Narozdíl od známé RS-232 tak zde není žádná referenční napěťová hladina, která je u RS-232 reprezentována nulovým napětím země GND. To má zásadní vliv i pro měření a analýzu komunikace.

### *Ostatní*

K ostatním běžným rozhraním PC patří : USB, Firewire, paralelní port aj.. Všechna tato rozhraní jsou navržena pro jednoduchou point to point komunikaci s externími zařízeními a ne pro řešení počítačové sítě.

## **3.2 ZPŮSOBY SYNCHRONIZACE ČASU**

### **3.2.1 Časování a synchronizace podle standardu IEEE 1588**

Standard IEEE 1588 je dnes velmi komplexním řešením synchronizace času v sítích ethernet. Protokol byl původně vyvinut firmou Agilent pro distribuované řízení a regulace a jako standard byl schválen na konci roku 2002. Používáním IEEE 1588 se dají v první řadě synchronizovat lokální časy všech koncových zařízení od různých výrobců za použití ethernetu používaného i pro klasický přenos dat s mikrosekundovou přesností. Bez takto standardizovaného synchronizačního protokolu, který je navržen pro použití i s jiným rozhraním, nejen s ethernetem, by asi nebylo možné synchronizovat koncová zařízení od různých výrobců s takovou přesností. Existující synchronizační protokoly jako je NTP, SNTP nevyhovovaly požadavkům. Ostatní jako SynUTC nebyly přijaty trhem.

Protokol byl navržen pro malé homogenní i nehomogenní lokální sítě. Výrobce také apeloval na možnost využití protokolu v nízko-nákladových systémech. Síťový provoz zatěžuje jen minimálně a na výpočetní HW neklade žádné speciální požadavky. Důležitým přívlastkem tohoto protokolu jsou nízké požadavky z hlediska administrace.

### ***Využití***

Největší zájem o deterministický ethernet je v dnešní době v oblasti automatizace, přesněji řízení pohonů. Mnoho výrobců vybavuje svoje zařízení ethernetovými rozhraními a následně řeší problém přesné synchronizace všech těchto zařízení po celé síti. Několik firem z průmyslového odvětví se rozhodlo pro použití a modifikaci tohoto protokolu pro jejich průmyslové sběrnice. Firma ODVA používá IEEE 1588 pro jejich modifikaci ethernetu CIPSync, používanou pro real-time systémy. Siemens implementuje použití IEEE1588 pro Profinet V3. Stejně tak mnoho dalších firem plánuje nebo už vyvíjí způsoby využití tohoto protokolu v jimi podporovanými sběrnicemi.

### ***Princip synchronizace***

Základní myšlenkou je to, že se podle nejpřesnějších hodin synchronizují všechny hodiny na síti. V celé síti se vyskytují dva typy hodin: master a slave. Přesnost jednotlivých zdrojů času je dána jejich třídou, „stratum“, výběr nejlepších hodin na síti pak probíhá automaticky. Přesnost synchronizace velmi závisí na aktuálním zatížení sítě a HW. Kvůli tomu standard zavádí při přenosu přes nedeterministické síťové prvky tzv. „boundary clock“ – oddělovací hodiny.

Synchronizace času v síti je rozdělena do dvou fází. V první fázi se vykompenzuje offset hodin bez ohledu na zpoždění časovací informace. Během synchronizace offsetu posílá Master-uzel cyklicky časovací informaci (SYNC) a určí interval synchronizace (obvykle 1 nebo 2s). Pro nejpřesnější synchronizaci se pakety značkují časem až na fyzické vrstvě uzlu. V druhé fázi probíhá měření zpoždění přenosu časovací informace. Za tímto účelem pošle Slave informaci o lokálním čase (odezva) a Master mu odpoví kdy zprávu obdržel (délka odezvy). Z výše zmíněných informací se Slave dokáže synchronizovat.

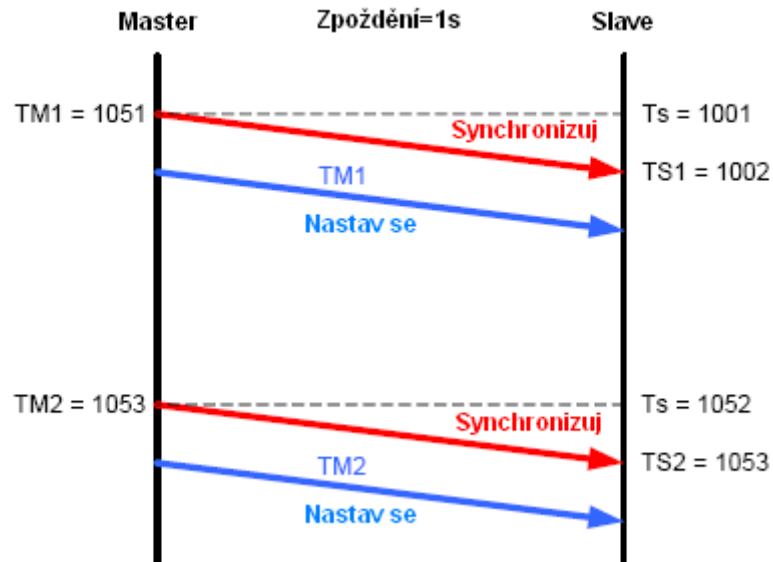
Korekce offsetu :  $Offset = T_{S1} - T_{M1} - \text{zpoždění} = 1002 - 1051 - 0 = -49$

$$T_s = T_s - Offset = T_s - (-49) \quad (\text{Obr. 2})$$

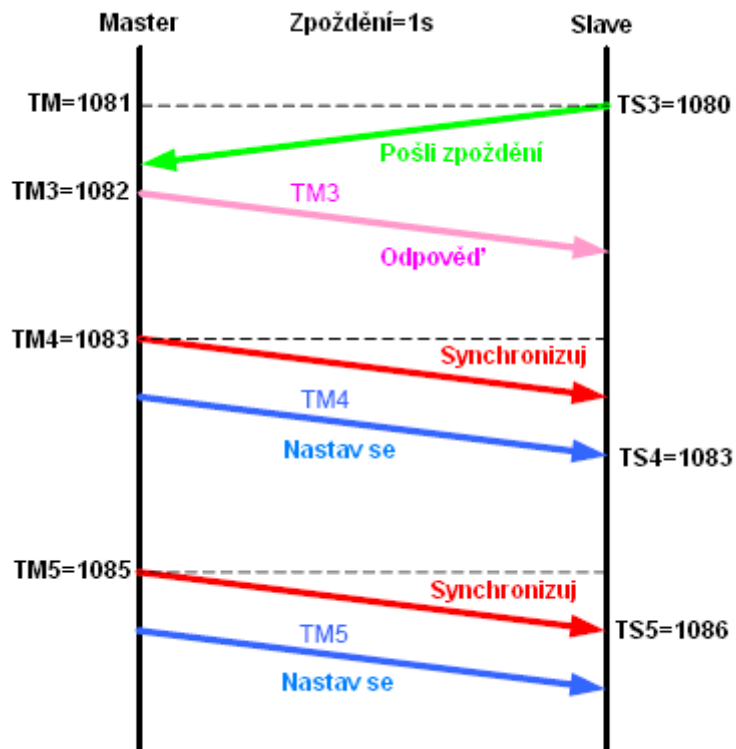
$$\text{Měření zpoždění : } Zpoždění = \frac{(T_{S2} - T_{M2}) + (T_{M3} - T_{S3})}{2} = 0 + \frac{1082 - 1080}{2} = 1$$

Následná korekce offsetu :  $Offset = T_{S4} - T_{M4} - \text{zpoždění} = 1083 - 1083 - 1 = -1$

$$T_S = T_S - Offset = T_S - (-1) \quad (\text{Obr.3})$$



Obrázek 2 – Korekce offsetu.



Obrázek 3 – Měření zpoždění.

### 3.2.2 časování a synchronizace pomocí GPS

#### *GPS*

Vesmírnou část systému GPS tvoří 28 družic (aktivních je obvykle 24, ostatní jsou záložní) o hmotnosti 775Kg. Ty obíhají kolem země na šesti různých oběžných drahách. Oběžné dráhy satelitů se od sebe vzájemně odklánějí o 60 stupňů. Na každé oběžné dráze se pohybuje 4 - 5 družic. Oblet země po oběžné dráze zabere družici přesně 12 hodin. Z jednoho místa na zemi je tedy při ideálních podmínkách viditelných 6 – 12 družic. Družice mají každá 4 atomové hodiny (2x na bázi cesia, 2x na bázi rubidia) a denně dostávají informace z United States Air Force Space Command, Second Space Wing, Satellite Control Squadron což jsou instituce ve Falcon Air Force Base která leží v Coloradu v USA pro změnu vlastní polohy, korekci offsetu, hodin apod.. Systém pracuje pouze jednosměrně a synchronně, tedy družice vysílají a přijímače naslouchají. Družice vysílají signál na dvou nosných kmitočtech L1 a L2. Signál L1 je modulován kódem C/A a kódem P, slouží pro civilní účely, jeho frekvence je 1575,42 MHz. Druhý signál L2 je kódován P kódem a používá se zároveň se signálem L1 pro velmi přesná měření a pro vojenské účely. Frekvence signálu L2 je 1227,60 MHz.

#### *Struktura signálu GPS*

Kódová posloupnost datový signál nejdříve rozprostře a takto upravený signál se pak moduluje na nosnou vlnu o patřičné frekvenci. Celková datová zpráva se dělí do 25 rámců o celkovém trvání 12.5 minuty. V každém rámci GPS vysílá informace o přesném čase UTC v týdnu, astronomické určení vlastní polohy v určitém čase, dále odhad délky zpoždění přenosu způsobené ionosférou aj.. Mj. také vysílají družice databázi ostatních družic (almanac), pomocí ní může přijímač odhadnout kdy se objeví ostatní družice na horizontu.

## 4. MĚŘENÍ PŘESNOSTI SYNCHRONIZACE

U obou měření probíhala synchronizace v intervalu jedné sekundy (1s).

### 4.1 IEEE 1588

Synchronizace času probíhá pomocí ethernetové sítě. Dvě takto zasíťované PC vybavené synchronizační kartou NI PCI-1588 a měřicí kartou NI 6518 známkují časem měřicí impulsy přivedené na měřicí kartu NI 6518. Měřicí puls je generován pomocí vstupně-výstupního ethernetového modulu ADAM 6060.

### 4.2 GPS GARMIN LVC 18

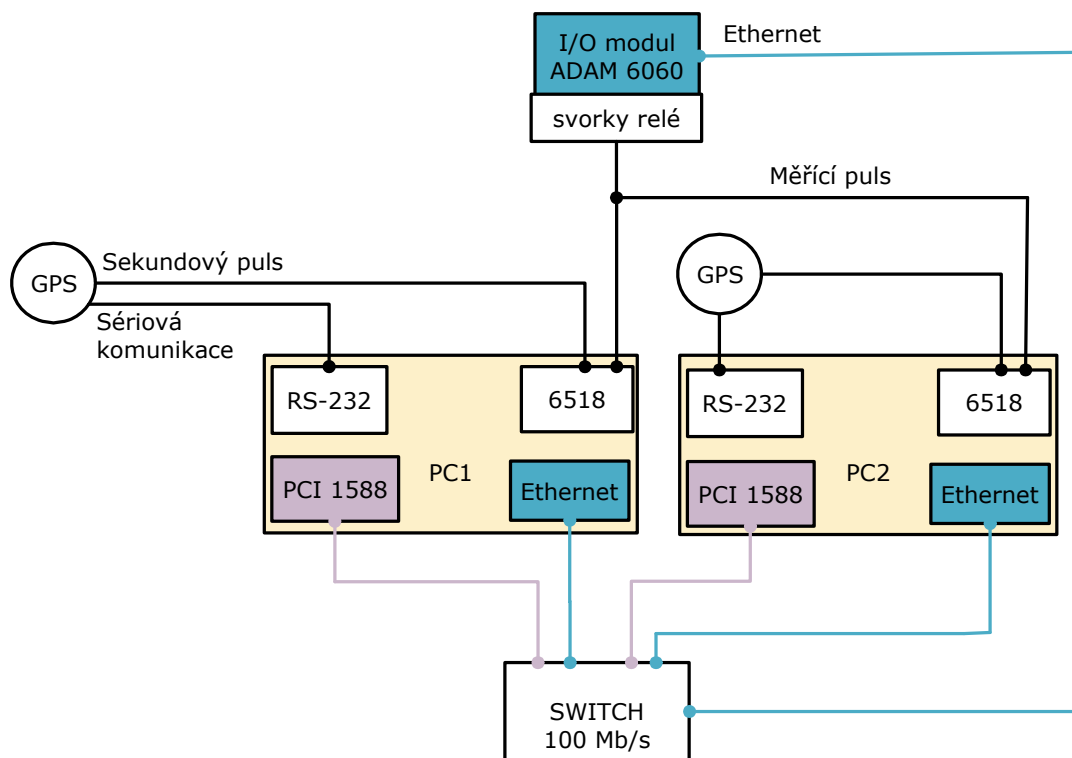
Každé ze dvou PC má k sobě přes sériové rozhraní připojený GPS přijímač, digitální výstup z GPS (odkaz) je připojen do měřicí karty NI 6518. Stejně jako u IEEE 1588 metody je prováděno známkování časem měřicích impulsů. Při měření GPS přesnosti synchronizace jsou karty NI 1588 neaktivní.

### 4.3 MĚŘENÍ DRIFTU HODINOVÝCH KRYSTALŮ

Pro jasné určení synchronizačního intervalu je nutné znát časový drift mezi synchronizovanými uzly. Je zbytečné synchronizovat čas každou sekundu pokud za jednu sekundu vznikne odchylka řádově nižší než je přesnost synchronizace. Z toho důvodu bylo provedeno měření časového driftu mezi hodinovými krystaly dvou karet NI PCI-1588 a hodinového krystalu PC a karty NI PCI-1588.

### 4.4 ZAPOJENÍ MĚŘICÍ APLIKACE

Dvě PC spojené pomocí ethernetu přes 100Mb/s switch. Každé PC je vybaveno ethernetovým rozhraním, rozhraním RS – 232, kartou NI PCI-1588 a kartou NI 6518. Do měřicí karty NI 6518 je přiveden sekundový puls z výstupu GPS a měřicí puls z modulu ADAM 6060, ten je ovládán prostřednictvím ethernetu z jednoho PC. Switch je mj. použit pro generování externího zatížení sítě. Přijímač GPS posílá na naslouchající rozhraní RS-232 informace o čase.



Obrázek 4 – Schéma zapojení.

## 5. POPIS POUŽITÉHO HARDWARU

### 5.1 PC

Při měření bylo použito dvou totožných kancelářských PC rozšířených zásuvnými PCI kartami. Konfigurace :

- CPU Intel Core 2 Duo
- paměti DDR2 Kingston 1024 MB, 400 MHz
- základní deska MSI 945GM3-F
- pevný disk SEAGATE barracuda ST380211AS

### 5.2 I/O ETHERNETOVÝ MODUL ADAM 6060

Jedná se o programovatelný modul s reléovými vstupy a výstupy. V této aplikaci je použit pro generování měřicího impulsu. V praxi tedy ve specifikovaném intervalu spíná a rozspíná výstupní relé. Modul je řízen jedním ze dvou použitých PC se kterým je propojen pomocí ethernetu. Komunikace tedy probíhá pomocí TCP/IP protokolu za použití NI knihovny NI-Modbus ve které jsou již naprogramované funkce pro nastavení příslušných registrů sloužících k ovládání celého modulu.

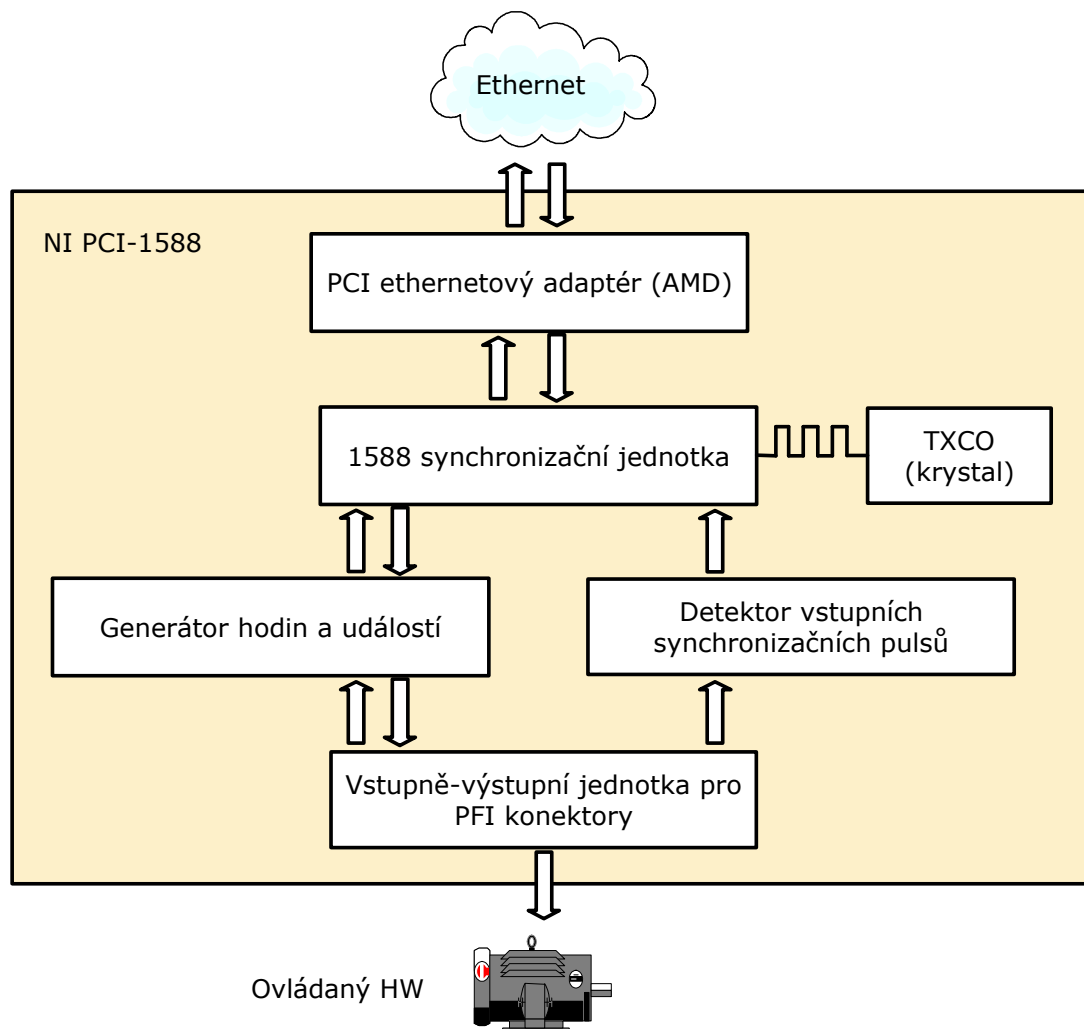
Modul je napájen z Laboratorního zdroje +24V stejnosměrně stejně jako vstupy výstupních relé.



Obrázek 5 – ADAM 6060.

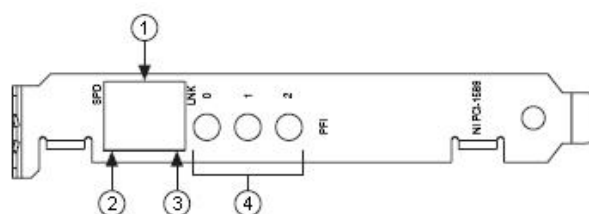
### 5.3 SYNCHRONIZAČNÍ KARTA NI PCI-1588

S kartou NI PCI-1588 je možné synchronizovat události po ethernetové síti. Karta je schopná generovat události a hodinové signály ve specifikovaných časech. To poskytuje metodu pro vykonávání synchronních událostí a analýzy pomocí levné ethernetové sítě. Karta je opatřena ethernetovým rozhraním, vlastním hodinovým krystalem, a třemi PFI vstupně-výstupními konektory. Karta obstarává veškerou PTP komunikaci sama. Softwarově je možné kartu triggerovat, generovat události jak po ethernetovém rozhraní tak pomocí PFI rozhraní a vyčítat čas přímo z karty.



**Obrázek 6 – Blokové schéma karty PCI 1588.**

V praxi je tedy karta inicializována, je nastaven hodinový čítač a na síti je mezi zúčastněnými PC vytvořena PTP relace. Tu obstarává karta sama a podle nastaveného intervalu se synchronizuje s master uzlem, ten je v tomto případě na jednom z PC manuálně nastaven. Největší předností této karty je generování budoucích událostí pomocí PFI výstupu nezávisle na PC tedy i na operačním systému. Pokud je tedy vytvořena v budoucnosti událost, generátor událostí událost sám ohlídá a je-li tak naprogramován, v předem určenou dobu také nastaví výstup PFI.



**Obrázek 7 – Čelní panel karty PCI 1588.**

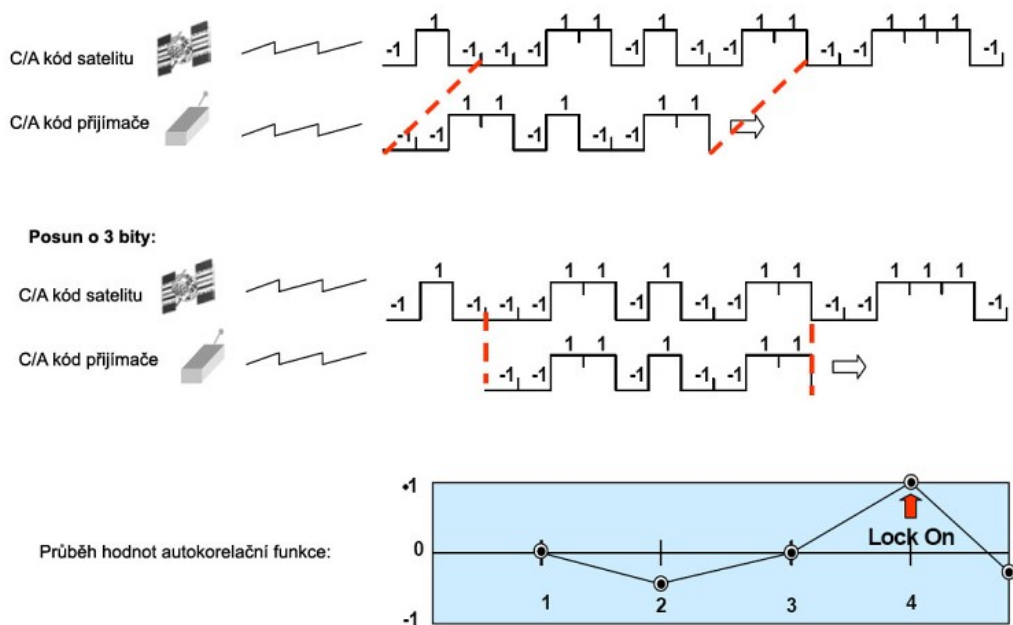
1. RJ-45 ethernet konektor
2. 10/100 Mbps LED
3. Síťová LED
4. PFI 0,1,2 konektory

#### 5.4 PŘIJÍMAČ GPS GARMIN 18 LVC

Přijímač získává od družice čas v týdnu a to každých 30s. Přesná synchronizace probíhá v přijímači použitím obou nosných signálů L1, L2. Několik nejbližších vzorků signálu si přijímač ponechá jako aktuální a každý přijatý signál GPS s nimi porovnává. Činí tak prostřednictvím matematické operace zvané autokorelace (obr.12) a posouváním posloupností o jednotlivé bity vpřed či vzad. Pokud se signál nějaké družice shoduje s uloženým kódem, přijímač se na něj takzvaně uzamkne. Při synchronizaci pak dokáže z obou signálů spočítat přesnou délku trvání přenosu. Pomocí této metody se dokáže přijímač synchronizovat s přesností  $< 1 \mu s$ . Přesnost synchronizace také narůstá při dosažitelnosti více družic.

Přijímač GARMIN 18 LVC komunikuje s PC po sériovém rozhraní RS-232. Tímto způsobem posílá údaje o poloze, směru a rychlosti pohybu, a času. Pro synchronizaci je tedy potřeba dekódovat jen čas.

Dále je opatřen digitálním výstupem. Zde se každou sekundu generuje měřící puls s programovatelnou šířkou. Zpracováním tohoto pulsu je možné na HW úrovni získat až  $\mu s$  přesnost. Výrobce udávána  $\mu s$  přesnost byla v praxi ověřena mezi dvěma GPS přijímači pomocí osciloskopu.



**Obrázek 8 - princip autokorelace pro tzv. uzamknutí přijímače na danou dvojici signálů L1, L2.**



**Obrázek 9 – Přijímač GARMIN LVC 18.**

## 5.5 MĚŘICÍ KARTA NI 6518

Jedná se o PCI kartu s 16 vstupy a 16 výstupy. Rozhraním je konektor CANON 37P. Výhodou karty je velikost vstupního i výstupního napětí, 24V, díky tomu je ideální pro klasické průmyslové řízení a sběr dat. Navíc je zde provedeno optické oddělení vstupů a výstupů pro ochranu zařízení. Citlivost logických vstupních obvodů je programově nastavena na změnu vstupního signálu.

Data jsou zpracovávána programově pomocí knihovny Ni-DAQ.



Obrázek 10 – Karta NI 6518.

## 6. SW PRO ZPRACOVÁNÍ

### 6.1 PROSTŘEDÍ LABVIEW 8.5

Software pro tuto práci měl být naprogramován v prostředí LabVIEW professional development system. Mým úkolem bylo se s prostředím seznámit. LabVIEW slouží k rychlému vývoji jednoduchých i složitých aplikací. Jedná se o grafické programovací prostředí pro práci s grafickým programovacím jazykem. Aplikace se v tomto prostředí tvoří pomocí spojování jednotlivých programových bloků. Každý takový blok je obdobou funkce v jazycích typu C, Delphi aj.. LabVIEW obsahuje veškeré základní funkce a programové struktury známé z jiných programovacích jazyků, navíc je rozšířeno o širokou škálu dalších před-programovaných funkcí a upravených programových struktur sloužících k rychlejšímu vytváření zdrojového kódu. Je zde spousta rutinních programátorských procedur automatizováno, např. automatická deklarace proměnných, automatické indexování prvků v poli při práci s „forcykly“ aj.. Pospojováním těchto bloků je možné vytvořit určitou funkci popř. celý program, získáme tak tzv. virtuální přístroj . Každá takový virtuální přístroj je složen ze své programové část (blokového schématu) a uživatelské části (čelního panelu). Čelní panel slouží ke komunikaci mezi programovou částí a uživatelem, slouží tedy k zobrazování a ovládání. Čelní panel má každé blokové schéma které je vytvořeno ze základních programových prvků. Jeho viditelnost se dá nastavit programově. V případech kdy se opakuje určitá část kódu v programu vícekrát, je vhodné z něj pro čitelnost a přehlednost vytvořit programový blok. Pokud se ale jedná o funkci na prohledání pole, je logické, že čelní panel zůstane skryt a data se budou zpracovávat jen programově bez zásahu uživatele. Naopak pro hierarchicky nejvyšší blokové schéma, je třeba vytvořit přehledný a praktický ovládací panel jehož prostřednictvím se bude aplikace ovládat.

Programování v tomto prostředí se velmi liší od klasického programování kde je běh programu řízen posloupností příkazů. Zde je běh programu řízen tokem dat. Každý programový blok je tedy spuštěn, získá-li hodnotu pro všechny svoje vstupy od bloků programově bezprostředně před ním. Čeká-li takový blok na určitou změnu,

celá programová struktura ve které se blok nachází na něm zůstane tzv. „viset“ a čeká dokud se programový blok neukončí.

## 6.2 KNIHOVNA NI-DAQ

NI-Daq je software který zahrnuje ovladače a knihovny funkcí. Ovladače mají svoje vlastní programové rozhraní (API), hardwarovou a softwarovou konfiguraci. Umožňuje vytváření simulovaného HW, to je velmi důležité při vytváření aplikace bez potřebného HW. Uživatelsky přívětivé API umožňuje snadnou a rychlou konfiguraci HW. Funkce slouží pro programovou komunikaci mezi PC a širokou škálou podporovaného HW. Jedná se především o vstupně výstupní PCI karty.

Knihovna NI-Daq je použita při komunikaci s kartou NI 6518. Umožňuje detailní nastavení pro maximální eliminaci možných prodlev. Při programování je navíc možné použít vlastní API NI-Daq pro vytvoření patřičného programového bloku. Ten je vytvořen v jednoduchém a intuitivním rozhraní, které si ponechává veškeré možnosti nastavení. Navržený virtuální přístroj je pak vytvořen a umístěn do blokového schématu.

## 6.3 KNIHOVNA NI-SYNC

NI-Sync obsahuje ovladače a knihovny funkcí jen pro HW sloužící k synchronizaci času. Nemá vlastní API, virtuální přístroj sloužící pro komunikaci s kartou NI-PCI 1588 je nutné naprogramovat klasickým způsobem. Celá knihovna je navržena hlavně pro práci s kartami do PXI systémů tedy karty typu 665x, pro zde použitou PCI 1588 kartu jsou použitelné základní funkce avšak plně postačující.

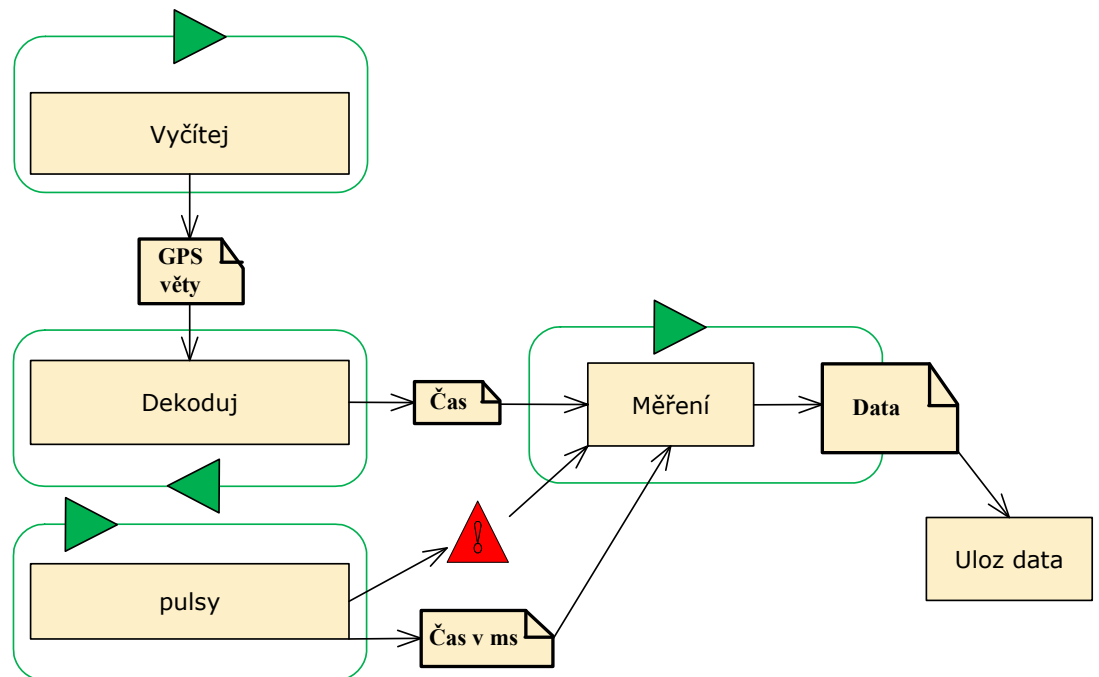
## 6.4 KNIHOVNA NI-MODBUS

NI-Modbus je knihovna funkcí sloužících k jednoduchému ovládání ethernetových zařízení podporujících standard ModBUS. Jedná se o soubor frekventovaně používaných instrukcí. Programátor tedy požadovanou instrukci pouze volí, není třeba ji vytvářet bit po bitu podle specifikací daného zařízení.

## 7. MĚŘICÍ SYSTÉM

### 7.1 MĚŘENÍ SYNCHRONIZACE POMOCÍ GPS PŘIJÍMAČŮ

#### 7.1.1 Blokové schéma programu



**Obrázek 11 - Blokové schéma programu „GPS sync“.**

Program se skládá ze tří nezávislých modulů:

1. Vyčítej
2. Dekóduj
3. Pulsy

Tyto bloky pak slučuje hlavní běžící program, který shromažďuje data a ukládá je.

#### ***Blok vyčítej***

Tento programový blok se stará o čtení dat ze sériové linky PC. Realizuje tedy její korektní nastavení, inicializaci a správu. Sem posílá přijímač GPS data o čase, poloze, směru a rychlosti pohybu. Tyto data posílá do bloku dekóduj. Předávání

dat probíhá pomocí datové fronty. Jedná se o jednoduchý FIFO buffer (první bit vložený je první taky vyčten). Blok vyčítej taky kontroluje stav sériové linky. Při tzv. „timeout“ komunikace, tedy pokud v určitém časovém intervalu nepřijme z přijímače žádná data, nastaví stav sériové linky jako chybový a časová známka měřícího pulsu bude neplatná. Pokud tedy čekáme data z přijímače každou sekundu, je vhodné nastavit „timeout“ na hodnotu kolem 1.5s, dostatečně dlouhou aby nedocházelo k bezdůvodným chybám a dostatečně krátkou aby měřící program stihl chybový stav sériové linky vyhodnotit. Při komunikaci s GPS přijímačem se stávalo, že datová komunikace na hardwarové úrovni „zamrzla“ a při časovém známkování se stále používal poslední přijatý čas. To vedlo k nesmyslným hodnotám.

### ***Blok Dekóduj***

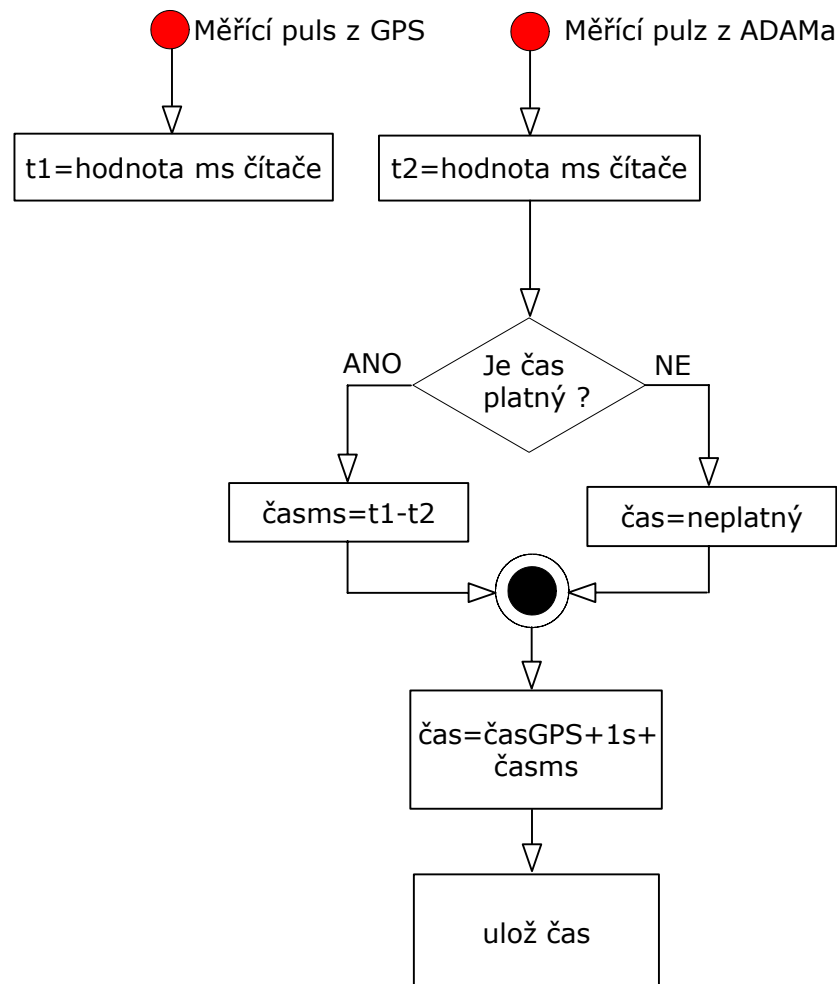
Zde se dekodují potřebná data, v tomto případě jen čas. Data jsou nezávisle na ostatních blocích vyčtena z fronty a pomocí úprav a formátování datových vět upravena do speciálního časového formátu. V tomto tvaru je čas s ostatními informacemi uložen do globální proměnné. V bloku dekoduj se provádí kontrolní součet každé dekodované věty. Každá věta kterou přijímač vyše obsahuje na konci v hexadecimálním tvaru bitový součet všech znaků ve větě, pokud tento součet nesedí, je pravděpodobné že věta byla přijata poškozená a data v ní mohou být zavádějící. Vzhledem ke kvalitě přenosu sériové linky standardu RS-232 a prostředí ve kterém byla úloha měřena (výstup GPS byl prodloužen na délku 7m kvůli dosažitelnosti oblohy) je zde kontrola přijatých prováděna pomocí šablon do kterých jsou data načítány. Při použití kontrolního součtu jako parametru platnosti času program vyloučí příliš velké množství „zdravých“ dat. Pokud se tedy vyskytne v komunikaci šum nebo výpadek, data jsou jednoduše zahozena a stav sériové linky je nastaven jako chybový. Nicméně je zde kontrolní součet indikován na hlavním panelu a slouží jako jeden z ukazatelů stavu sériové komunikace.

### ***Blok pulsy***

Nejdůležitější programový blok se stará o správné známkování měřících pulsů časem. Při GPS synchronizaci navíc s blokem měření obstarávají dopočítávání

milisekundového času. Tento blok přímo komunikuje s měřicí kartou NI 6518. Do této karty je přiveden jak sekundový puls z GPS tak měřicí puls z ADAMA.

V tomto bloku se nachází virtuální přístroj vytvořený pomocí NI-DAQ API sloužící pro správné nastavení čtení dat kartou a nastavení požadovaného výstupu. Právě kvůli omezeným možnostem realizovatelného výstupu virtuálního přístroje jej bylo nutné převést na klasický programový blok a jeho blokové schéma poupravit. Velmi důležité pro tuto úlohu je správné nastavení vstupních logických obvodů. Ty reagují na náběžnou a sestupnou hranu přivedeného signálu.



**Obrázek 12 - Vývojový diagram dopočítávání ms času**

Při přijetí měřicího pulsu z ADAMA je zde programově generována událost, která je v bloku měření vyhodnocena a v případě platnosti času je čas přijetí uložen. Generování události slouží čistě jen pro ukládání času. Časovou známku ukládá

přímo tento blok a ukládá ji do globální proměnné. Ta je v bloku měření pak jen přečtena.

Při přijetí sekundového měřicího pulsu z GPS přijímače je uložen stav milisekundového systémového čítače a jeho hodnota je chápána programově jako celá sekunda. Při přijetí měřicího pulsu z ADAMa je pak znovu uložen stav milisekundového systémového čítače. Od toho je odečten stav celé sekundy a je tak získána doba v milisekundách která uplynula od příchodu sekundového měřicího pulsu z GPS do přijetí měřicího pulsu z ADAMa. Tímto způsobem je možné vytvořit milisekundové rozlišení při příjmu času jen jednou za sekundu.

### ***Hlavní program***

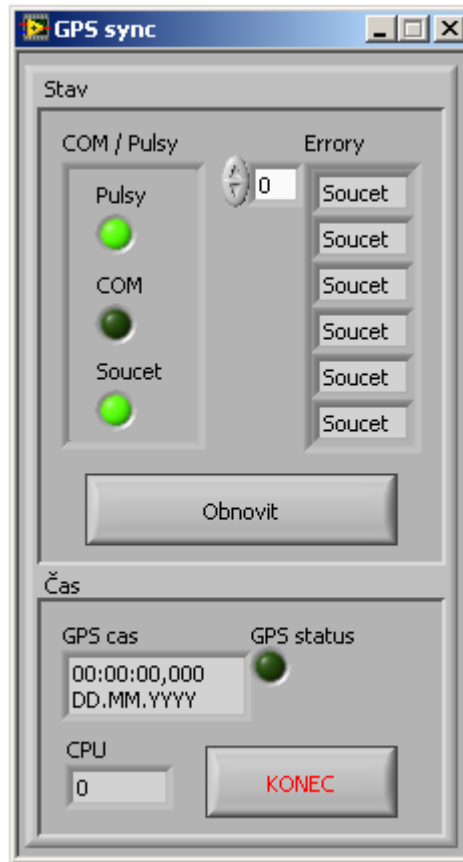
Hlavní program se stará o sběr dat, jejich ukládání, správné obslužení povelů od obsluhy a korektní správu všech programových struktur. Kromě hodnot času přijetí měřicího pulsu z ADAMa se ukládají i informace o vytížení procesoru pro analýzu zátěžového testu.

Při spuštění program čeká na událost, tu může buď vygenerovat uživatel stiskem tlačítka obnovit sloužícímu k načtení aktuálních hodnot do všech indikátorů, stiskem tlačítka konec pro korektní ukončení všech modulů a uzavření všech používaných referencí, v neposlední řadě generuje událost modul pulsy. Při přijetí této události se uloží přijatá časová známka.

Po skončení programu dojde k uložení naměřených hodnot do uživatelem vybraného souboru.

### ***Čelní panel programu***

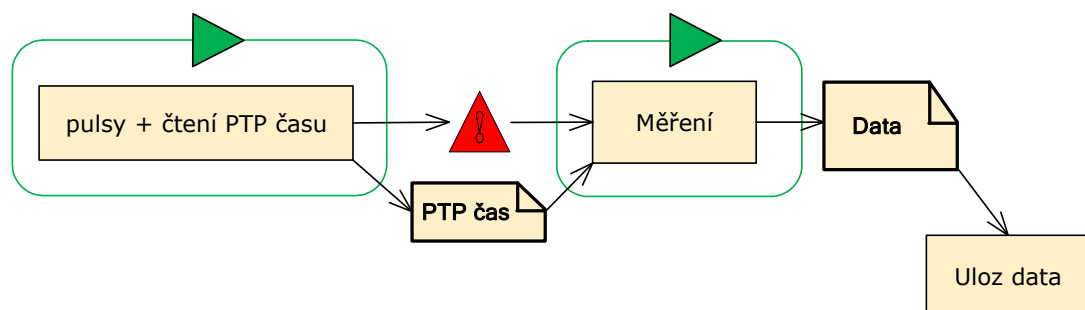
Vzhledem k účelnosti programu se na čelním panelu nachází pouze indikátory platnosti času (indikátor stavu sériové komunikace a příjem sekundových pulsů), indikátor posledního uloženého času a indikátor zhoršené přesnosti příjmu GPS (příjem signálu z méně jak tří družic) a indikátor pole chybových hlášení. Dále se zde nachází tlačítka obnovit a konec.



Obrázek 13 - Čelní panel programu.

## 7.2 MĚŘENÍ SYNCHRONIZACE POMOCÍ NI PCI-1588 KARET

### 7.2.1 Blokové schéma programu



Obrázek 14 - Blokové schéma programu „1588 sync“.

### ***Blok pulsy + čtení PTP času***

Jediným samostatným modulem je modul pulsy. Ten navíc zpracovává jen měřicí puls z ADAMa a známkuje ho časem karty. Jak již bylo výše uvedeno, veškerou správu PTP relace obstarává karta. Veškerý čas přečtený z karty je považován za platný. Při příchodu měřicího pulsu z ADAMa je generována událost pro hlavní program.

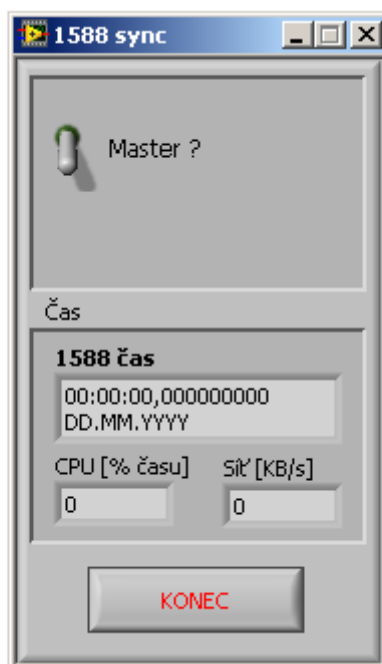
### ***Hlavní program***

Stejně jako v předchozím případě, i zde sbírá hlavní program data z modulu pulsy a stará se o jeho správu. Hlavní program kromě časových známek ukládá informace o vytížení procesoru a vytížení sítě.

Po skončení programu dojde k uložení naměřených hodnot do uživatelem vybraného souboru.

### ***Čelní panel programu***

Čelní panel zobrazuje poslední uložený čas, tentokrát v nanosekundové přesnosti, vytížení sítě a procesoru. Tlačítko konec pro korektní ukončení programu a přepínač „Master ?“ pro definování PTP hierarchie (zvolení master uzlu).



**Obrázek 15 - Čelní panel programu.**

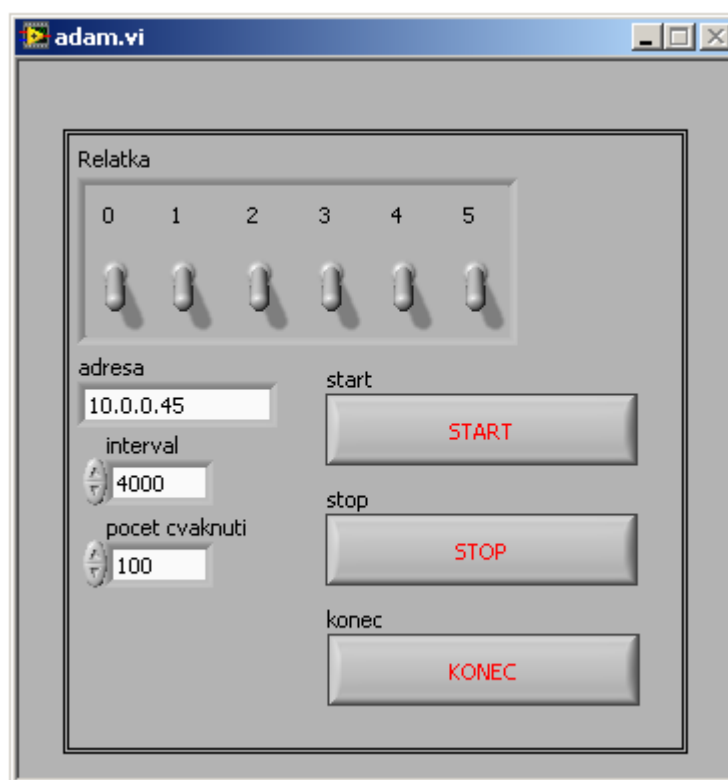
### 7.2.2 Automatizace úlohy

Pro automatizaci úlohy bylo nutné naprogramovat SW pro ovládání ethernetového I/O modulu ADAM 6060 sloužícího ke generování externích měřicích pulsů.

Program v časových intervalech spíná a rozspíná napájená relátka jejichž výstupy jsou přivedeny na vstup měřicí karty NI 6518.

#### *Čelní panel programu*

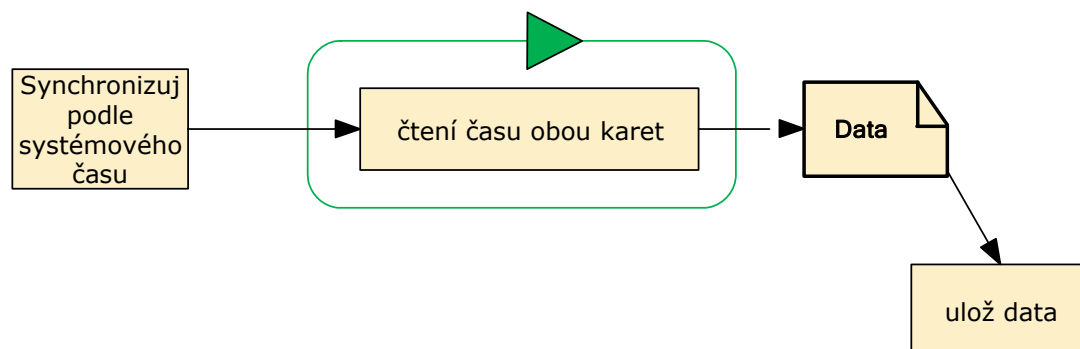
Čelní panel umožňuje volbu spínaných relátek, IP adresy ADAMa, délku intervalu mezi jednotlivými sepnutími a celkový počet sepnutí.



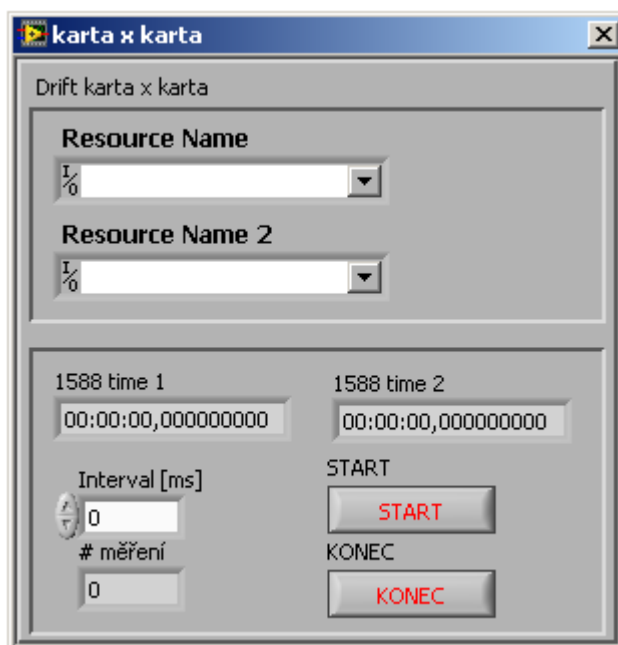
obrázek 16 – Čelní panel programu.

### 7.3 MĚŘENÍ ČASOVÉHO DRIFTU MEZI HODINOVÝMI KRYSTALY

Program je velmi jednoduchý a pouze vyčítá časy v předem určenou dobu z obou karet ve stejný čas. Před spuštěním samotného měření tlačítkem start je nutné nastavit jména karet a interval čtení času. Před načtením první hodnoty jsou obě karty synchronizovány na systémový čas. Při měření se tlačítko konec změní na stop.



Obrázek 17 - Blokové schéma programu „karta x karta“.



Obrázek 18 - Čelní panel programu.

### 7.3.1 Možnost potlačení driftu

Interval synchronizace je volen co nejmenší vzhledem k dosažení co nejlepších výsledků synchronizace a naopak co nejdelší pro minimalizaci celkového výpočetního výkonu. Právě vzájemný drift hodin je hlavním důvodem celé synchronizace, je tedy vhodné jej minimalizovat.

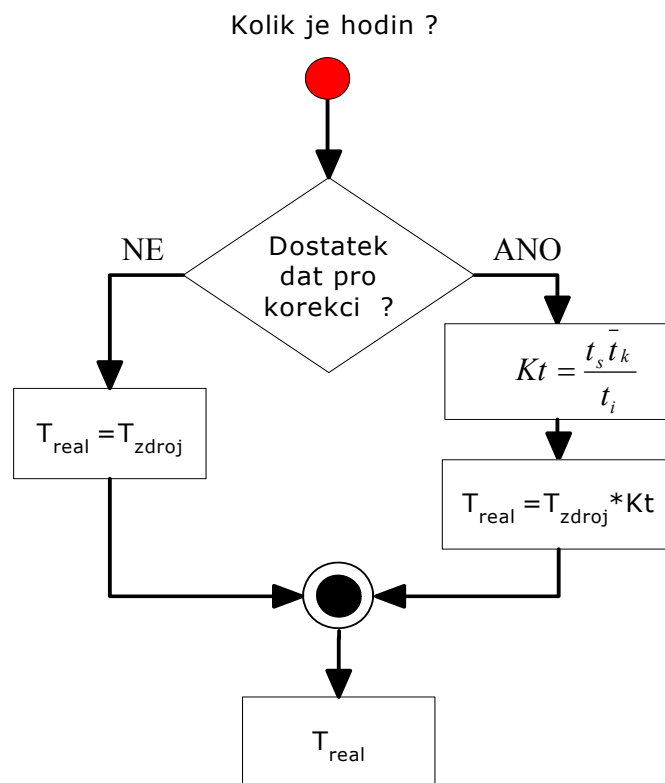
Velmi jednoduchý a efektivní způsob je zavést časovou korekci. Pokud by si jednotlivé synchronizované uzly byly schopny pamatovat korekční hodnoty, po několika synchronizačních krocích je možné zavést korekční člen pro použitý zdroj hodin. Vzájemný drift je v ideálních podmínkách lineární. Korekce pro tento případ :

$$T_{real} = T_{zdroj} * Kt$$

kde  $T_{real}$  je výsledný čas po korekci,

$T_{zdroj}$  je čas hodin,

$Kt$  je korekční člen kde  $K$  je přímo úměrné době uplynulé od poslední synchronizace a  $t$  je nejmenší časová jednotka.



**Obrázek 19 - Vývojový diagram funkce na korekci driftu**

$t_s$  je doba uplynulá od poslední synchronizace,

$t_i$  je synchronizační interval,

$\bar{t}_k$  je průměrná hodnota několika posledních korekcí času, při samotné synchronizaci se korekce vynechá.

## 8. VYHODNOCENÍ

### 8.1 SYNCHRONIZACE ČASU

Výstupem jednotlivých programů pro záznam časových známek měřících impulsů jsou textové soubory .txt. Na každém PC je tedy po měření vytvořen takový soubor. V každém souboru je sloupec hodnot zaznamenaných časů. Při porovnání těchto sloupců, tedy absolutní hodnota jejich rozdílů, dostaneme výsledné časové odchylky. Pro zpracování takových hodnot bylo nutné naprogramovat program pro korektní odečtení všech časů. Tabulkový kalkulátor Excel umí pracovat s časovým formátem s přesností maximálně ms. Výstupem tohoto programu byly 2 textové soubory .txt. V jednom byly uloženy časové odchylky v nanosekundách resp. milisekundách a ve druhém v celých časech. Pro výpočet nejistot bylo použito odchylek ve zlomcích sekund.

Pro hodnoty změřené bez zátěže procesoru (včetně hodnot pro PTP při simulování zatížení sítě) nebyl problém. Veškeré odchylky včetně maximálních byly v očekávaném intervalu.

#### 8.1.1 Zátěž procesoru

Při měření se zátěží procesoru (pro zatížení byla použita prázdná opakující se smyčka) se stávalo, že program načte hodnotu z předchozího měření místo použití hodnoty aktuální. V použitém programovacím prostředí je omezená správa proměnných, takže není možné podobným situacím předejít. Navíc docházelo k podobným excesům při dopočítávání ms času při synchronizaci pomocí GPS. To v případě, kdy byl měřící impuls přijat na hranici jedné sekundy a obě PC neměli stejný sekundový čas. Bez zatížení bezproblémová věc, kdy jedno PC mělo čas  $t_1 = \text{časGPS} + 999\text{ms}$ ; a druhé  $t_2 = \text{časGPS} + 1\text{s} + 0\text{ms}$ . Vznikl tedy přijatelný rozdíl  $\Delta t = |t_1 - t_2| = 1\text{ms}$ . V případě zatížení někdy „nestihl“ program programově vynulovat milisekundový čítač při příchodu měřícího impulsu z GPS přijímače a nastala situace, kdy se výsledná odchylka lišila téměř o sekundu. Pokud se tato situace navíc stala v taktu společně s přečtením krok staré hodnoty, vznikla odchylka větší jak 1s.

I přesto, jak jsou výše zmíněné odchylky děsivé, dá se jen stěží předpokládat, že by se v reálné synchronizaci opravdu vyskytly. Oba výše zmíněné problémy se dají softwarově ošetřit (u synchronizačního sw této práce ošetřeny nebyly právě proto, aby se zjistila jejich přítomnost) a navíc je velmi nepravděpodobné, že se takto použitá zátěž opravdu objeví. Pokud by se stalo, že by právě během synchronizačního taktu, byl procesor enormně vytížen a vnesl by do synchronizace nepřijatelnou prodlevu, je možné informaci o nastavení hodinového krystalu porovnat s jeho aktuální hodnotou a v případě velké odchylky ji jednoduše zahodit a vyžádat si novou synchronizaci resp. počkat na další.

Zde je důležité zmínit, že i přesto, že během PTP synchronizace vyčítáme čas z přesného hodinového čítače karty s ns rozlišením, právě vyčítání programově pomocí aplikace běžící pod Windows XP degraduje jeho rozlišení a zanáší největší časovou odchylku do celého měření. V případě, že není procesor zatížen je reakční čas operačního systému menší než  $150 \mu s$ . Pokud jsou právě zpracovávány instrukce jiného programu, reakční čas narůstá kvůli 1KHz časování procesů (obr. 23).

### 8.1.2 Zátěž sítě

PTP synchronizace funguje na bázi ethernetu. Proto je přesnost synchronizace měřena i s externím zatížením sítě. Pomocí dalšího ethernetového adaptéru (nesmí být použit ten na kartě NI PCI-1588 aby switch musel přepínat komunikaci) bylo mezi oběma PC přenášeno velké množství dat. Pro přepínání komunikace byl použit 100 Mb/s switch Zyxel 108A. Obě PC ale neměli dostatečný HW výkon pro maximální využití jeho rychlosti a rychlost přenosu se pohybovala okolo 20 Mb/s. Na rozdíl od zatěžování procesorem se synchronizace chovala korektně a došlo tedy k očekávanému zvětšení odchylky o jeden řád.

Z grafu rozložení odchylek je patrné pseudo-diskrétní rozložení hodnot. Odchylky zde nabývají hodnot blízkých se k 0,5ms a 0ms. Toto rozložení je způsobeno časováním jednotlivých procesů právě operačním systémem windows XP. Během tohoto měření bylo mezi oběma PC přenášeno nepřetržitý tok dat, oba procesy (přenos dat a měření) měly v systému nastavenou stejnou prioritu.

### 8.1.3 Tabulka hodnot

Tabulka zpracovaných hodnot.

měření	max [s]	min [s]	prumer [s]	nejistota A [s]	směr.odch. výběr [s]
GPS + CPU	0,235	0	3,85E-02	1,68E-03	3,46E-02
GPS	0,002	0	1,32E-03	1,62E-05	5,13E-04
PTP + CPU	0,240	2,096E-06	3,07E-02	1,67E-03	3,40E-02
PTP + CPU + SIT	0,245	3,536E-06	3,81E-02	1,72E-03	3,51E-02
PTP	1,2528E-04	2,880E-07	4,36E-05	9,40E-07	2,97E-05
PTP + SIT	1,1297E-03	3,200E-07	4,37E-04	1,25E-05	2,78E-04

Tabulka 1 - statistické vyjádření pro hodnoty odchylek obou metod

### 8.1.4 Příklad výpočtu vybraných hodnot – řádek GPS

$$\text{Průměr : } \bar{t} = \frac{\sum_{i=0}^n t_i}{n}, \quad \bar{t} = \frac{1,323}{1001} = \underline{\underline{1,323E - 3s}}$$

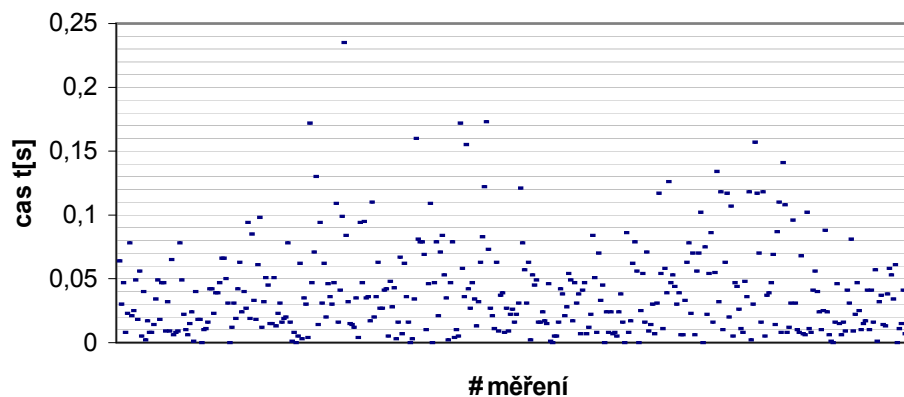
$$\text{Směrodatná odchylka výběru : } s(t) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (t_i - \bar{t})^2},$$

$$s(t) = \sqrt{\frac{1}{1001-1} 0,000262671} = \underline{\underline{5,12514E - 4s}}$$

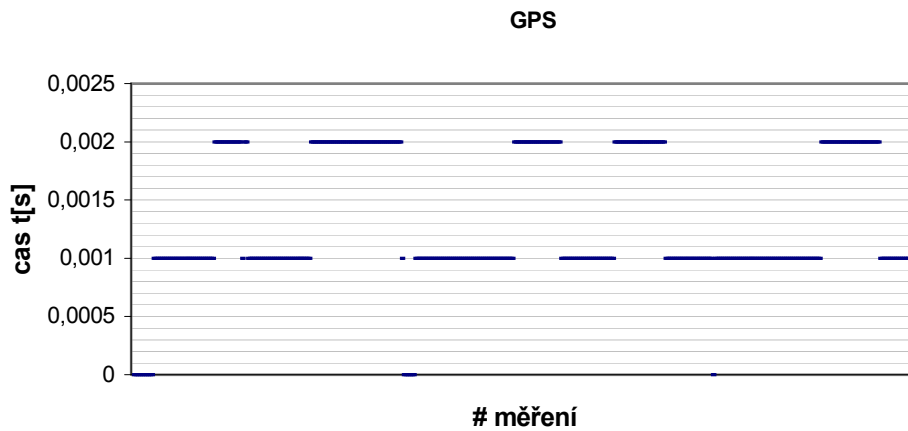
$$\text{Nejistota typu A : } s(\bar{t}) = \sqrt{\frac{s^2(t)}{n}} = \sqrt{\frac{(5,12514E - 4)^2}{1001}} = \underline{\underline{1,6199E - 5s}}$$

### 8.1.5 Grafy hodnot pro GPS synchronizaci

GPS + CPU



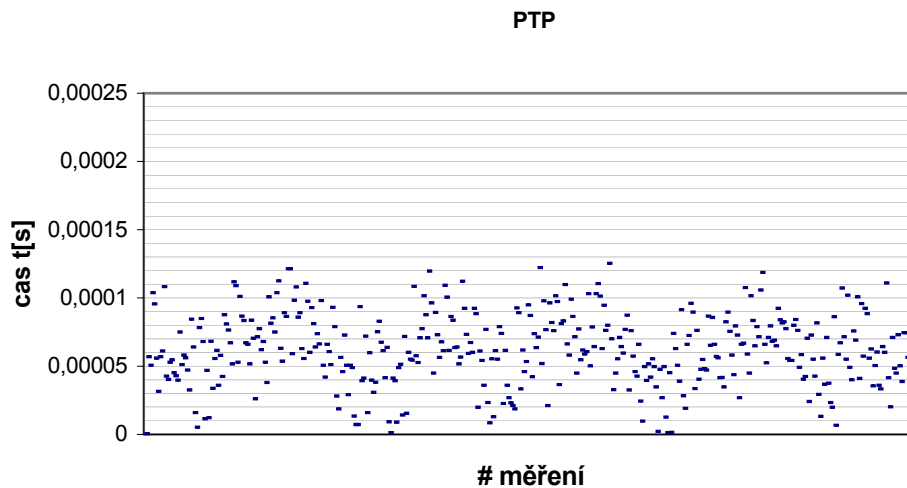
Obrázek 20 - Graf rozložení odchylek, synchronizace pomocí GPS s CPU zátěží



**Obrázek 21 - Graf rozložení odchylek pro synchronizaci pomocí GPS**

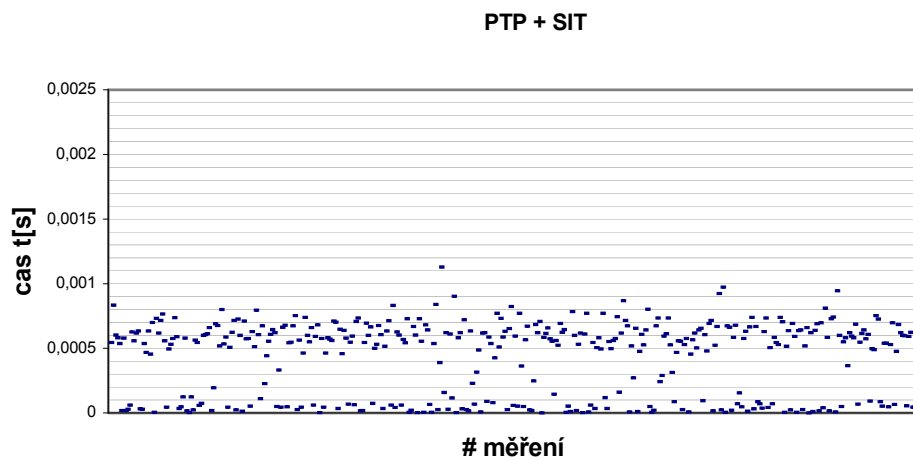
Zde je diskrétní rozložení hodnot (0,1,2 ms) způsobeno dopočítáváním času pomocí milisekundového systémového čítače.

### 8.1.6 Grafy hodnot pro PTP synchronizaci

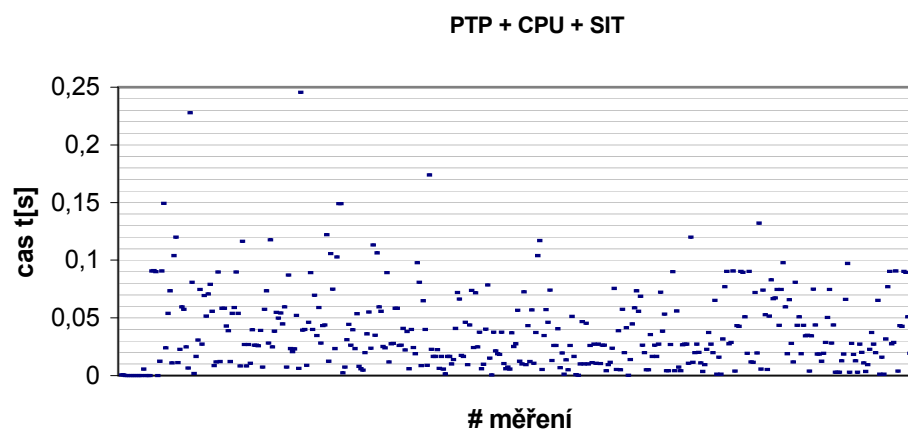


**Obrázek 22 - Graf rozložení odchylek pro synchronizaci pomocí PTP**

Právě toto měření je ze všech uskutečněných nejprůkaznější. Maximální změřená odchylka  $125 \mu s$  dává představu o reakčním času aplikace a celého operačního systému. National Instruments udává přesnost synchronizace pomocí IEEE 1588, při použití síťových prepínačů (switch), desetin  $\mu s$ . Naměřené hodnoty v řádech desítek  $\mu s$  tedy přímo ukazují reakční dobu operačního systému.



**Obrázek 23 - Graf rozložení odchylek, synchronizace pomocí PTP se zátěží sítě**

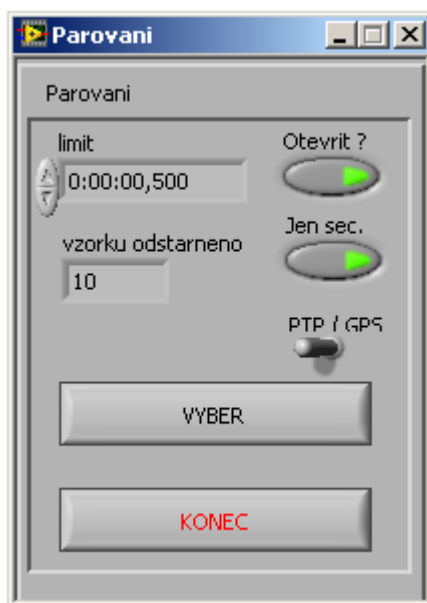


**Obrázek 24 - Graf rozložení odchylek pro synchronizaci pomocí PTP se sít'ovou i procesorovou zátěží**

### 8.1.7 Párování hodnot

Pro výpočet jednoznačné odchylky mezi oběma časy bylo nutné od sebe jednotlivé časy odečíst. Pro jednoduché zpracování hodnot pomocí tabulkového kalkulátoru MS Excel byl vytvořen program, který generoval .txt soubor obsahující pouze sekundy a zlomky sekund jednotlivých odchylek.

Program umožňuje volbu časového rozlišení, následné otevření souboru a generování pouze sekundových odchylek.



Obrázek 25 - Čelní panel programu

### 8.1.8 Poznámka

#### *Drift hodinových krystalů*

Pro určení vhodných synchronizačních intervalů jakýchkoliv časů je nutné znát přesnost jednotlivých hodinových krystalů. Pro odhad přesnosti hodinového krystalu PC byl použit hodinový krystal karty NI PCI-1588. Dále byl proměřen časový drift hodin krystalů vzájemně mezi oběma kartami. Podmínky, vy kterých toto měření proběhlo se dají považovat za ideální (konstantní teplota, vlhkost, oba krystaly byly během celého měření v nezměněných podmínkách a na stejném místě), reálně se tedy hodnoty mohou výrazně lišit.

Následující tabulka znázorňuje časový drift pro dva typy krystalů. Nebylo možné jednoduše změřit drift dvou různých hodinových krystalů PC, ten je uložen v základní desce PC, proto byl vztažen ke krystalu karty.

	T=1m	T=2m	T=2h
Typ krystalu	$\Delta t$ [s]	$\Delta t$ [s]	$\Delta t$ [s]
PC	9,06E-04	1,81E-03	0,1087
NI PCI-1588	5,23E-05	1,05E-04	0,0063

Tabulka 2 - drift hodinových krystalů

Podle naměřených intervalů, by pro synchronizaci PC pomocí metody GPS, s požadavkem na co nejmenší odchylku, bylo vhodné vybrat interval synchronizace  $\Delta t = \langle 30, 60 \rangle$  s. Časový drift hodinových krystalů dvou PC může být vyšší než zde měřený PC a karty.

V případě dvou karet NI PCI-1588 by za stejné podmínky i vzhledem k větší přesnosti metody stačilo zvolit interval  $\Delta t = \langle 60, 120 \rangle$  s. To umožňuje větší přesnost použitých hodinových krystalů.

## 9. ZÁVĚR

Práce řeší problematiku synchronizace času mezi PC metodou synchronizace pomocí GPS a metodou synchronizace pomocí ethernetového rozhraní za použití PTP protokolu. Aplikace pro synchronizaci pomocí obou metod jsou na programovány v prostředí LabVIEW v8.5 pro operační systém Windows XP. Synchronizace je měřena pomocí externího měřicího pulsu, který je softwarově známkován časem, do výsledné synchronizace se tedy započítává reakční doba operačního systému. Právě ta tvoří největší část výsledné časové nejistoty.

Naměřené hodnoty byly pro přehled vyneseny do tabulky a do grafů. Pro každé měření byla určena nejistota typu A. Z časové nejistoty je možné určit vhodnost dané metody pro aplikaci se specifickými požadavky na časování.

Synchronizace pomocí PTP protokolu a operačního systému Windows XP je při přijatelných nárocích na výpočetní výkon HW schopná poskytnout přesnost do desetiny milisekundy. GPS synchronizace spolu se systémovým časem poskytuje milisekundovou přesnost.

Obě synchronizační metody byly vybrány s ohledem na dostupný HW. V případě GPS je výsledný čas softwarově dopočítáván, výsledná synchronizace je tedy omezena rozlišením systémového času. Při požadavku na přesnější synchronizaci by bylo nutné použít přídavný HW.

Kvůli softwarovému známkování měřících impulsů je přesnost PTP synchronizace degradována časováním procesů operačním systémem. Při použití synchronizačních karet NI PCI-1588 je možné dosáhnout mnohem přesnějšího časování událostí s omezením na výstupní obvody karty. Použití v kombinaci s jinou zásuvnou kartou by opět vyžadovalo softwarové zpracování času.

Úkolem této práce bylo vybrat a proměřit některé z metod pro synchronizaci času mezi PC. Metody byly vybrány s ohledem na hardwarové vybavení dnešních PC a jejich reálnou použitelností v praktickém využití. Měření obou metod jasně stanovilo jejich použitelnost.

## 10. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] STEINER, I., ČERNÝ J.: GPS od A do Z , eNav, s.r.o., 2003, ISBN: 80-239-0228-8.
- [2] SNÁŠEL, J.: Vím, jak pracuje GPS. Computer Press, 21.10.2005, ISSN 1214-1887.
- [3] National Instruments : NI-DAQ<sup>TM</sup> NI651x User manual 2007 [online].  
Dostupné z : <<http://www.ni.com/pdf/manuals/372172a.pdf>>.
- [4] National Instruments : PCI NI PCI-1588 User manual 2005 [online]. Dostupné z : <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371670a.pdf>>.
- [5] NI support forum [online] dostupné z : <<http://forums.ni.com/>>
- [6] National Instruments : NI – Sync<sup>TM</sup> User manual 2007 [online]. Dostupné z : <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371670a.pdf>>.
- [7] HRUŠKA, K, BRADÍK, J.: Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti, VUT v Brně, 2001, ISBN : 80-214-1656-1.
- [8] MOHL, S., D., : IEEE 1588 - Precise Time Synchronization as the Basis for Real Time Applications in Automation [online] dostupné z : <<http://www.ieee1588.com/>>.
- [9] National Instruments : LabVIEW 7 user manual 2003.
- [10] National Instruments : LabVIEW 7 measurements manual 2003.
- [11] GARMIN : GPS 18 Technical Specifications 2005 [online] dostupné z : <<http://www.garmin.com>>.

## Seznam zkratek

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$T_i$	[s]	uplynulá doba od určité události kde $i$ je index
$t_i$	[s]	čas
$n$	bezrozměrné	počet pozorování
$s(t)$	dle argumentu	směrodatná odchylka výběru
$\bar{s}(t)$	dle argumentu	nejistota typu A
$K$	bezrozměrné	korekční člen

## Seznam příloh

Disk CD – ROM obsahující :

Zdrojové soubory	Knihovnu všech programových bloků – formát .llb
GPS manuál	Manuál přijímače GARMIN LVC 18
PCI 1588 manuál	Manuál PCI karty NI PCI-1588
Video	Video ukázka běžících programů
NI 6518 manuál	Manuál PCI karty NI 6518
Bakalářskou práci	Elektronická podoba práce – formát .pdf
Bakalářskou práci	Elektronická podoba práce – formát .doc