

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky



Možnosti zlepšení přesnosti synchronizace času v paketových sítích

Disertační práce

Ing. Michal Pravda

Praha, srpen 2015

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Telekomunikační technika

Školitel: Doc. Ing. Jiří Vodrážka Ph.D.

Abstrakt

Disertační práce se zabývá možnostmi zlepšení přesnosti synchronizace času v paketových sítích a následného přesného generování taktu ze synchronizovaného zařízení. Cílem práce bylo prostudování možností synchronizace v paketových sítích a nalezení možností, které zlepšují časovou synchronizaci jednotlivých zařízení a zvýší přesnost generovaného taktu na straně klienta.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je zaměřena na měření a analýzu přesnosti synchronizace času v reálné síti. Při měření byla využívána zařízení s podporou Precision Time Protokolu (PTP). Vlastnosti sítě a přenosové parametry byly měněny pomocí síťového emulátoru a v závislosti na změně docházelo i ke změně výsledné přesnosti synchronizace času.

Druhá část se zabývá možnostmi vylepšení přesnosti synchronizace času. Strana klienta byla rozšířena o druhé lokální hodiny H2, které umožňují pomalejší doladování a zvyšují tak výslednou přesnost synchronizace času klienta. Návrh klienta byl proveden univerzálně, aby mohl být použit buď pro NTP nebo PTP protokol. Při simulacích jednotlivých navržených algoritmů byly použity stejné podmínky, jako při měření v reálném prostředí a výsledky byly následně porovnávány. Výsledná přesnost synchronizace času při simulaci metody s navrženým vylepšením dosahovala lepších výsledků než při měření v reálné síti.

Výsledky simulací uvedené v této práci ukazují, že navržená metoda vylepšení klienta dosahuje vyšší přesnosti synchronizace času. V případě porovnání lokálních hodin H1 a H2 na straně klienta zjistíme, že kolísání hodin H2 je vždy nižší než hodin H1 za stejných vstupních podmínek. Toto chování je správné a bylo cílem této práce.

Abstract

This doctoral thesis deals with the possibilities of improving accuracy of time synchronization over packet networks and the subsequent accurate pulse generation. The goal of this paper is to analyze the options of synchronization in packet networks, and also to design and simulate a possible method for increasing device synchronization and accuracy of pulse generated on the side of the client.

The work is divided into two main parts. The first part is focused on the analysis and measurement of synchronization accuracy in a real packet network. Measurement was performed using the Precision Time Protocol (PTP). Network transmission parameters were changed using a network emulator and depending on the change resulting synchronization accuracy varied.

The second part deals with methods for improving accuracy of clock synchronization. An additional source of a local H2 clock is used on the client's side to improve synchronization accuracy. Client design was made to be very versatile, therefore it can be used for NTP as well as PTP protocol. The proposed methods were simulated under the same conditions as the previous measurements and the results were compared. The resulting synchronization accuracy was better in the simulation than in the real network.

The simulation results presented in this paper indicate that the proposed method of client improvement achieves higher accuracy of time synchronization. When comparing the results of the local H1 and H2 clocks on the client's side, it is apparent that the variation of the H2 is always smaller than that of the H1 under identical input conditions. This behavior proves to be correct which is the aim of this work.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli Doc. Ing. Jiřímu Vodrážkovi, Ph.D. za vytvoření tvůrčích podmínek a za cenné připomínky i rady při tvorbě této disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu a trpělivost během celého mého doktorského studia.

Obsah

Obsah	1
Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	5
Seznam zkratk	7
1 Úvod	9
2 Současný stav řešené problematiky	11
2.1 Časová synchronizace v paketových sítích	11
2.2 Network Time Protocol	12
2.2.1 Výpočet korekce času	13
2.2.2 Výkonnost NTP protokolu	14
2.3 IEEE 1588 – Precision Time Protocol	14
2.3.1 Architektura PTP	16
2.3.2 Princip synchronizace u PTP	17
2.3.2.1 Průchozí hodiny	18
2.3.3 Vlastnosti PTP	19
2.4 Synchronní Ethernet	21
2.5 Porovnání jednotlivých protokolů	22
2.6 Měření v reálné síti	22
2.6.1 Zpoždění paketové sítě	22
2.6.2 Měření PTP	23
2.6.2.1 Popis jednotlivých zařízení	24
2.6.2.2 Síťové topologie a výsledky měření	25
2.7 Zhodnocení současného stavu	33
3 Cíle disertační práce	35
4 Návrh a simulace synchronizačního algoritmu	37
4.1 Model synchronizačních obvodů - aktuální stav	37
4.1.1 Vyhodnocovací algoritmus klienta	38

4.2	Měření synchronizace v reálném prostředí	44
4.3	Návrh na zlepšení synchronizace	47
4.3.1	Návrh vhodného filtru - stabilita obvodu	48
4.3.1.1	Vlastnosti a výsledky FIR filtru	50
4.3.1.2	Vlastnosti a výsledky IIR filtru	53
4.3.2	Simulace a výsledky druhých hodin	57
4.3.2.1	Průměrovací filtr	57
4.3.2.2	Výsledná přesnost hodin H2	59
4.3.2.3	Lokální oscilátor a jeho doladování	64
5	Závěr	69
5.1	Splnění cílů disertační práce	69
5.1.1	Analýza a měření vlivu vel. zpoždění sítě na přesnost synchronizace	69
5.1.2	Simulační program s aktuálním stavem a funkcí synch. algoritmu .	70
5.1.3	Snížení vlivu kolísání zpoždění na přesnost synch. a zvýšení přesnosti	70
5.1.4	Vytvoření simulačního programu s vylepšenou synchronizací	71
5.2	Využití pro praxi a budoucí práce	71
	Literatura	73
	Publikace autora	77

Seznam obrázků

2.1	Hierarchie jednotlivých vrstev NTP [22]	12
2.2	Časové značky při komunikaci klienta se serverem	13
2.3	Topologie jednoduché sítě	15
2.4	Architektura synchronizační jednotky s PTP. [23]	16
2.5	Korekce offsetu [14]	18
2.6	Měření zpoždění [14]	19
2.7	Blokové schéma využití průchozích hodin	20
2.8	Jednotlivá zpoždění v síti	20
2.9	Funkce synchronního Ethernetu	21
2.10	Četnost zpoždění paketů při propojení na NTP server	23
2.11	Blokové schéma synchronizační karty PTP serveru [9]	24
2.12	Přímé propojení serveru a klienta	25
2.13	Síťová topologie se serverem, PTP přepínačem a klientem	26
2.14	Výsledky měření při přímém propojení a s PTP přepínačem	26
2.15	Topologie pro měření standardního přepínače a rozbočovače	27
2.16	Výsledky měření při použití standardního přepínače a rozbočovače	27
2.17	Topologie pro měření rozbočovače se zatížením	28
2.18	Výsledky měření při použití rozbočovače se zatížením a bez zatížení	29
2.19	Topologie pro měření přepínače se zatížením	30
2.20	Výsledky měření standardního přepínače se zatížením a bez zatížení	31
2.21	Výsledky měření stand. přepínače a Hirschmann přepínače se zatížením	31
4.1	Blokové schéma synchronizace času	38
4.2	Fitr FIR s řádem 10	39
4.3	Korekce K1 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms	40
4.4	Korekce K2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms	40
4.5	Odchylka času při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms	41
4.6	Korekce K1 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms	42
4.7	Korekce K2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms	42
4.8	Odchylka času při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms	43
4.9	Blokové schéma měření s emulátorem sítě	44
4.10	Odchylka času při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms	45
4.11	Odchylka času při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms	45

4.12	Odchylka času při střední hodnotě zpoždění 10 ms a rozptylu 1 ms	46
4.13	Rozšířené blokové schéma synchronizace času	47
4.14	Regulační smyčka	48
4.15	Oblast stability diskretních regulačních obvodů	49
4.16	Amplitudová charakterist. filtru FIR řádu 20 s mezním kmitočtem 0,03 Hz	50
4.17	Zobrazení nul a pólů filtru FIR řádu 20 s mezním kmitočtem 0,03 Hz . . .	51
4.18	Výsledek synchronizace času klienta s filtrem FIR řád 20	52
4.19	Filtr IIR s řádem 4	53
4.20	Zobrazení nul a pólů filtru IIR řádu 4 s mezním kmitočtem 0,03 Hz	54
4.21	Nyquistův diagram pro filtr IIR s řádem 4	55
4.22	Korekce K1 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms . . .	55
4.23	Korekce K2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms . . .	56
4.24	Odchylka času při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms	56
4.25	Část blokového schématu s hodinami H2	57
4.26	Výsledné korekce K4 a K2 při střední hodnotě zpožd. 3 ms a rozptylu 1 ms	59
4.27	Rozdíl času serveru a H2 při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms	60
4.28	Rozdíl času serveru a H1, H2 při střední hodnotě zpožd. 3 ms a rozpt. 1 ms	61
4.29	Rozdíl času serveru a H1, H2 při střední hodnotě zpožd. 3 ms a rozpt. 3 ms	63
4.30	Rozdíl času serveru a H1, H2 při střední hodnotě zpožd. 10 ms a rozpt. 1 ms	63
4.31	Část blokového schématu s oscilátorem	64
4.32	Fázový závěs	65
4.33	Převodní charakteristika doladění oscilátoru	66
4.34	Rozdíl času serveru a času H1 a H2 při chybě lokálního oscilátoru o 2 Hz .	67
4.35	Doladování osc. s chybou 2 Hz při střední hodnotě zpož. 3 ms a rozp. 1 ms	68
4.36	Doladování osc. s chybou 2 Hz při střední hodnotě zpož. 3 ms a rozp. 2 ms	68
5.1	Histogram četností rozdílů času serveru a času hodin H1 a H2	72

Seznam tabulek

2.1	Výsledky měření pro různé topologie při různých podmínkách	32
4.1	Výsledky simulací při různých podmínkách nastavení sítě	43
4.2	Výsledky měření s emulátorem sítě při různých podmínkách nastavení sítě	46
4.3	Výsledky přesnosti syn. hodin H1 při různých podmínkách nastavení sítě .	62
4.4	Výsledky přesnosti syn. hodin H2 při různých podmínkách nastavení sítě .	62
4.5	Funkce doladění oscilátoru při simulaci	65
4.6	Výsledky přesnosti synchronizace hodin H2 v závislosti na doladění osc. . .	67

Seznam zkratek

SDH	Synchronous Digital Hierarchy
OTH	Optical Transport Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Sector
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
RFC	Request for Comments
ISO	International Organization for Standardization
SNTP	Simple Network Time Protocol
NTP	Network Time Protocol
PTP	Precision Time Protocol
BMC	Best Master Clock
TSU	Time Stamp Unit
TC	Transparent Clock
E2E	End to End
P2P	Peer to Peer
FTP	File Transfer Protocol
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
FPGA	Field Programmable Gate Array
PHY	Physical Layer
MII	Media Independent Interface
MAC	Medium Access Layer
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
SyncE	Synchronous Ethernet
SSM	Synchronization status message
LAN	Local Area Network
MAN	Metropolitan Area Network
WAN	Wide Area Network

GPS	Global Positioning System
USB	Universal Serial Bus
PPS	Pulse Per Second
FIR	Finite Impulse Response
IIR	Infinite Impulse Response
PLL	Phase Lock Loop
VCO	Voltage Controlled Oscillator
RTT	Round Trip Time

Používané symboly

x	Proměnná, která představuje nějakou hodnotu
t	Reprezentuje čas - využíváno zejména v simulacích
Δt	Reprezentuje rozdíl časů (hodin) - využíváno zejména při porovnání rozdílu hodin klienta a serveru
δ	Reprezentuje počet průměrovaných vzorků - využíváno u průměrovacích filtrů
f	Symbol frekvence
Δf	Reprezentuje odchylku frekvence
k	Symbol korekce - reprezentuje hodnotu korekce hodin na straně klienta

Kapitola 1

Úvod

Synchronizace času a distribuce taktu je důležitým parametrem telekomunikačních a počítačových sítí. Přesná distribuce a synchronizace taktu je vyžadována při komunikaci v reálném čase například v automatizačních systémech nebo při přenosu audia či videa. V páteřních sítích jsou využívány sítě se synchronizací (například síť SDH), nicméně je potřeba umožnit synchronizaci i přes jiné typy sítí, jakými jsou například paketové sítě.

V automatizaci dochází vlivem vzrůstající složitosti a výkonu strojních zařízení, které pracují relativně samostatně, k decentralizaci řízení. To klade větší důraz na rychlost a přesnost vzájemné synchronizace jednotlivých zařízení a přesné generování řídicího taktu pro další zařízení. Koordinaci a přesné časování zařízení je potřeba řešit pomocí síťového propojení a jednou z možností, která je nejvíce rozvíjena a diskutována, je využití standardní paketové sítě Ethernet.

Přínos této disertační práce

Hlavní náplní této disertační práce je analýza možností synchronizace času v paketových sítích a zvýšení přesnosti synchronizace času i generování taktu. Pro synchronizaci času se využívá několik synchronizačních protokolů. Základní princip synchronizace času je u všech protokolů podobný a spočívá ve výměně časových zpráv mezi serverem a klientem. Hlavním problémem při synchronizaci času je zpoždění při doručování jednotlivých zpráv pomocí paketů. V případě generování taktu je nejdůležitějším aspektem přesnost generátoru a jeho schopnost doladění na základě informací získaných ze synchronizačního protokolu.

Hlavní oblasti této práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Měření a analýza způsobů synchronizace času klienta v různých sítích a za různých podmínek.
2. Simulace způsobu synchronizace času u stávajících synchronizačních protokolů.
3. Vytvoření optimalizovaných algoritmů a simulačního modelu na straně klienta, který vylepšuje výslednou přesnost synchronizace času.

4. Implementace generátoru taktu do simulačního modelu na straně klienta za účel zvýšení přesnosti stability generovaného taktu.

Předložená práce shrnuje výsledky výzkumu v oblasti synchronizace času v paketových sítích v návaznosti na návrh synchronizační jednotky s generátorem taktu a navrhuje možnosti vylepšení pro budoucí implementaci do jednotlivých zařízení.

Kapitola 2

Současný stav řešené problematiky

Paketové sítě jsou nejrychleji se rozvíjejícím typem sítí v současnosti. Přenosy přes paketové sítě jsou dnes využívány i v páteřních sítích, kde dříve byly využívány jiné technologie. Ethernet je nejznámějším zástupcem paketových sítí. Ještě před rokem 2000 se Ethernet [4] stal dominantní technologií pro drátové lokální sítě (LAN). Dnes je Ethernet definován i pro optické vlákno, kde je dosahováno rychlosti desítek Gbit/s. V závislosti na rozšiřování paketových sítí do průmyslové oblasti se vzájemná synchronizace zařízení stává požadovanou funkcí jednotlivých zařízení. Proto je synchronizace v paketových sítích velice diskutovaným problémem [12].

Moje práce se zaměřuje na synchronizaci a distribuci času v paketových sítích a následné generování přesného taktu. Network Time Protocol (NTP), Simple Network Time Protocol (SNTP) a relativně nový IEEE-1588 Precision Time Protocol (PTP) patří mezi nejrozšířenější synchronizační protokoly. Network Time Protocol [1] patří mezi nejznámější protokoly a je využíván k synchronizaci času počítačů přes Internet. SNTP [2] je zjednodušený synchronizační protokol vycházející z NTP, který má horší přesnost synchronizace. Nejnovější synchronizační protokol popisuje standard IEEE 1588 a je také známý jako PTP (Precision Time Protocol). První návrh standardu byl vydán v roce 2002, ale v roce 2008 byla vydána druhá revize tohoto dokumentu [6]. Hlavním rozdílem mezi NTP a PTP protokolem jsou možnosti jejich implementace. Zatímco NTP dovoluje pouze softwarovou implementaci, PTP protokol umožňuje jak softwarovou, tak hardwarovou implementaci. Hardwarová implementace umožňuje přesnější určení času přijetí či odeslání paketu, čímž se zvyšuje výsledná přesnost synchronizace [23].

2.1 Časová synchronizace v paketových sítích

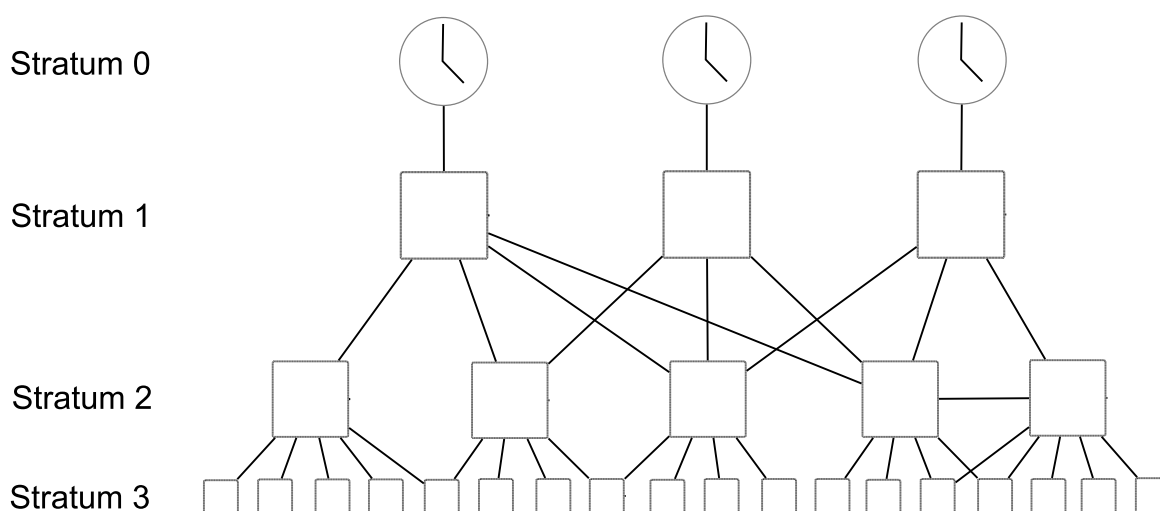
Obsahem této kapitoly jsou jednotlivé možnosti synchronizace času v paketových sítích, popis jednotlivých protokolů, které synchronizaci umožňují a jejich vlastnosti. Jak bylo zmíněno v úvodu, mezi nejznámější protokoly patří Network Time Protocol (NTP) a Precision Time Protocol (PTP). NTP je velice populární a široce rozšířený hlavně v počítačových sítích, kde se používá k synchronizaci času počítačů a jednotlivých síťových

zařízení. Přesnost NTP protokolu je v řádu jednotek až desítek milisekund. PTP protokol je dnes nejpřesnějším protokolem pro synchronizaci času přes paketové sítě. Jeho přesnost při hardwarové podpoře je v řádu desítek nanosekund. NTP protokol využívá podobných principů jako PTP, nicméně hlavní důvod lepší přesnosti synchronizace u PTP je přesné určení příchodu časové značky na úrovni síťové karty, to ale vyžaduje hardwarovou implementaci protokolu. Tato vlastnost speciální hardwarové podpory může být jasnou nevýhodou oproti NTP.

2.2 Network Time Protocol

Network Time Protocol (NTP) je jeden z nejstarších a nejrozšířenějších protokolů, který je využíván pro časovou synchronizaci v prostředí Internetu. NTP byl primárně vynalezen pro synchronizaci hodin v počítačích a jeho struktura umožňuje i synchronizaci jednotlivých důvěryhodných časových serverů, které následně poskytují přesný čas svým klientům. Bylo vytvořeno několik verzí tohoto protokolu. Nejrozšířenější verzí je verze 3, kterou vytvořil David Mills v roce 1992 [1].

NTP využívá konceptu jednotlivých úrovní, které jsou označovány jako stratum. Jedná se o hierarchický model, kde každé zařízení v určité vrstvě může fungovat jako časový server pro zařízení v nižší vrstvě (obr. 2.1). Stratum 0 reprezentují servery se samostatnými referenčními hodinami. Čím vyšší číslo stratum, tím nižší přesnost hodin. Stratum 1 a 2 mají NTP servery velkých poskytovatelů a stratum 3 a 4 jsou už pro klienty či lokální poskytovatele. NTP klient umí přijmout časovou informaci současně od více NTP serverů, což umožní přesnější určení času. Transportním protokolem pro NTP pakety je UDP (User Datagram Protocol), který používá port 123. UDP nevytváří stálé připojení mezi serverem a klientem.



Obrázek 2.1: Hierarchie jednotlivých vrstev NTP [22]

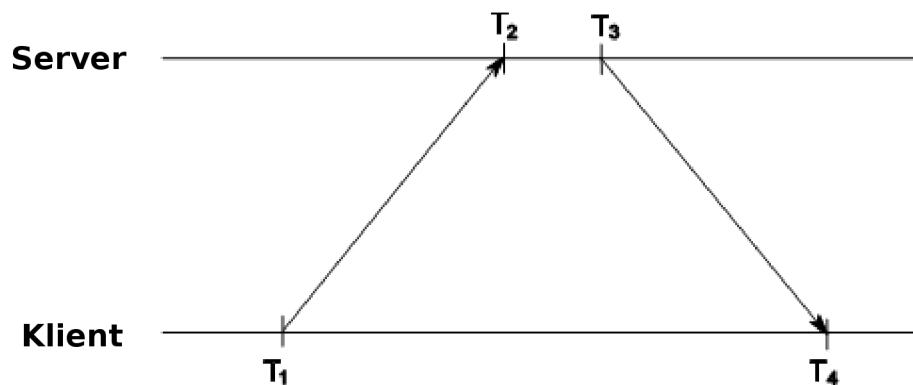
NTP využívá několik algoritmů, které jsou určeny pro specifické činnosti a mezi které

patří například Marzulloho algoritmus. Tento algoritmus se stará o výběr jednoho synchronizačního serveru z několika serverů. Algoritmus je schopný určit, které časové servery mají nejvyšší přesnost. Další algoritmus zajišťuje správný synchronizační proces a je založen na postupném přibližování k přesnému času. U algoritmu můžeme rozlišit dvě fáze. První fáze je použita při velkém rozdílu času klienta a serveru (obvykle nad 125 milisekund) a v tomto případě dojde ke skokové synchronizaci. Čas klienta se okamžitě upraví o vypočtenou korekci. V druhé fázi dochází k pravidelné synchronizaci, která pozvolna zpřesňuje čas klienta.

2.2.1 Výpočet korekce času

NTP protokol je založen na výměně časových zpráv mezi jednotlivými zařízeními, kterými mohou být jak servery, tak počítače či jiná síťová zařízení [1]. Jednotlivé časové značky jsou přenášeny v NTP paketech. Časová značka je číslo, které udává datum a čas. Časová značka je v paketu reprezentována číslem o velikosti 64 bitů, kde prvních 32 bitů reprezentuje počet sekund od 1. ledna 1900 a druhých 32 bitů vyjadřuje číslo za desetinou tečkou. Jsme tedy schopni přenášet čas s přesností 232 ps. Při synchronizaci času klient pošle dotaz na NTP server, který doplní svou lokální časovou značku a pošle ji zpět klientovi. Jeden klient se může dotazovat současně několik NTP serverů a podle vestavěného algoritmu vybere ten nevhodnější. Výsledná časová korekce lokálních hodin je následně vypočítávána ze všech časových značek zobrazených na ilustračním obrázku 2.2.

Začátek komunikace zahajuje klient, který vyšle žádost ve formě NTP paketu, který obsahuje první časovou značku T_1 (čas odeslání požadavku). Poté co server přijme tuto zprávu, vygeneruje časovou značku T_2 , která reprezentuje čas přijetí NTP paketu. Následně server požadavek zpracuje a posílá zpět NTP paket, do kterého těsně před odesláním doplní časovou značku T_3 . Posledním krokem je přijetí paketu klientem v čase T_4 .



Obrázek 2.2: Časové značky při komunikaci klienta se serverem

Z těchto čtyřech časových značek je vypočítáno zpoždění sítě δ (2.1) a odchylka času serveru a klienta (offset) o (2.4).

$$\delta = ((T_4 - T_1) - (T_3 - T_2))/2 \quad (2.1)$$

Výpočet síťového zpoždění předpokládá, že zpoždění ve směru od klienta k serveru je stejné jako ve směru od serveru ke klientovi. Přesně jsme schopni určit jen celkové zpoždění tam i zpět $(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)$.

Rozdíl času serveru a klienta vyjadřuje, o kolik se má čas klienta upravit, aby odpovídal času serveru. Rovnice (2.2) prezentuje ideální případ, kdy čas klienta je přesně zasynchronizován s časem serveru.

$$T_4 = T_3 + \delta \quad (2.2)$$

V případě, že klient není zasynchronizován, musí se k času klienta přičíst korekce o , která čas klienta upraví. Výsledný výpočet hodnoty korekce po úpravách je uveden ve vztahu 2.4.

$$o + T_4 = T_3 + \delta \quad (2.3)$$

$$o = (T_2 - T_1 + T_3 - T_4)/2 \quad (2.4)$$

2.2.2 Výkonnost NTP protokolu

Přesnost NTP protokolu je značně závislá na vzdálenosti od NTP serveru. V případě velkých sítí jako je třeba Internet se přesnost synchronizace času pohybuje v řádu desítek milisekund. V případě lokálních sítí (LAN) je přesnost synchronizace v rozmezí od 0,5 do 10 milisekund. Studie [23] uvádí pro lokální síť průměrnou hodnotu časové nepřesnosti 8,2 milisekundy, medián 1,8 milisekundy a směrodatnou odchylku 18 milisekund. V případě Internetu byla zjištěna průměrná hodnota 88 milisekund, medián 30 milisekund a směrodatná odchylka 175 milisekund.

Na přesnost synchronizace má vliv mnoho faktorů. Proměnlivé zpoždění sítě můžeme považovat za nejvýznamnější a je zejména způsobeno síťovými prvky v cestě mezi klientem a serverem (přepínače, směrovače). V kapitole 2.6.1 je popsáno měření v reálné síti s NTP.

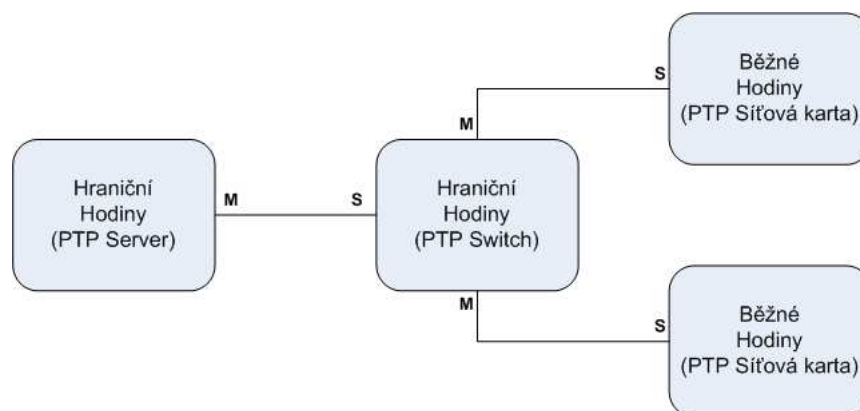
2.3 IEEE 1588 – Precision Time Protocol

Přesný časový protokol (The Precision Time Protocol - PTP) je název pro synchronizační protokol umožňující synchronizaci času v paketových sítích a je popsán ve standardu IEEE 1588. První verze tohoto standardu byla publikována v roce 2002. Druhá verze, která je nyní aktuální a přináší malé změny a vylepšení, byla publikována v roce 2008. Cílem vývoje protokolu PTP bylo hlavně zvýšení přesnosti synchronizace [29]. Důraz při vývoji a formulaci standardu byl kladen zejména na:

- výslednou přesnost synchronizace času, která je v řádu desítek až stovek nanosekund
- vytvoření mezinárodního standardu, který by zajistil interoperabilitu zařízení jednotlivých výrobců a umožnil tak větší rozšíření a využití tohoto synchronizačního protokolu

- všestrannost a univerzálnost protokolu, který umožní využití v nejrozšířenějších typech sítí (Ethernet), dále použitelnost i v malých sítích či podsítích s minimálními nároky na správu, nízké nároky na hardware a výpočetní výkon jednotlivých zařízení

PTP protokol slouží k synchronizaci času všech zařízení, která jsou připojena k jedné síti. PTP protokol je založen na přenosu synchronizačních zpráv mezi jednotlivými zařízeními. Aby bylo dosaženo vysoké přesnosti synchronizace času, je na začátku synchronizačního algoritmu nutné určit zařízení s nejpřesnějším časem a toto zařízení je v rámci synchronizačního algoritmu označeno jako hlavní (master). Ostatní zařízení se následně chovají jako podřízená, ale i u nich dochází k určité konfiguraci, a to podle toho zda jsou hraničními zařízeními (boundary) a nebo běžnými koncovými zařízeními (ordinary). Hraniční síťové prvky přijímají synchronizaci od hlavního (master) síťového prvku a následně ji předávají koncovým síťovým prvkům (obr. 2.3). Druhá verze PTP navíc definuje takzvané průchozí hodiny (transparent clock) [13], kterým se budeme věnovat později.



Obrázek 2.3: Topologie jednoduché sítě

Příklad jednoduché sítě je zobrazen na obrázku 2.3. Jsou zde zobrazeny dvoje hraniční hodiny a dvoje standardní. Při startu je nastaveno jedno zařízení jako hlavní (master) a to podle přesnosti vnitřních hodin jednotlivých zařízení. Následně toto zařízení poskytuje přesný čas ostatním. Zařízení, které mají více portů (například přepínače), mohou mít některé porty v režimu slave a některé v režimu master (v obrázku označeno jako S a M). To znamená, že zařízení se synchronizují z jednoho zdroje a přesný čas dále poskytují dalším zařízením. Algoritmus, který určuje nejpřesnější hodiny, se nazývá Best Master Clock (BMC). Detailní popis návrhu a realizace jednotlivých topologií je popsána v kapitole 3.3 v knize [14].

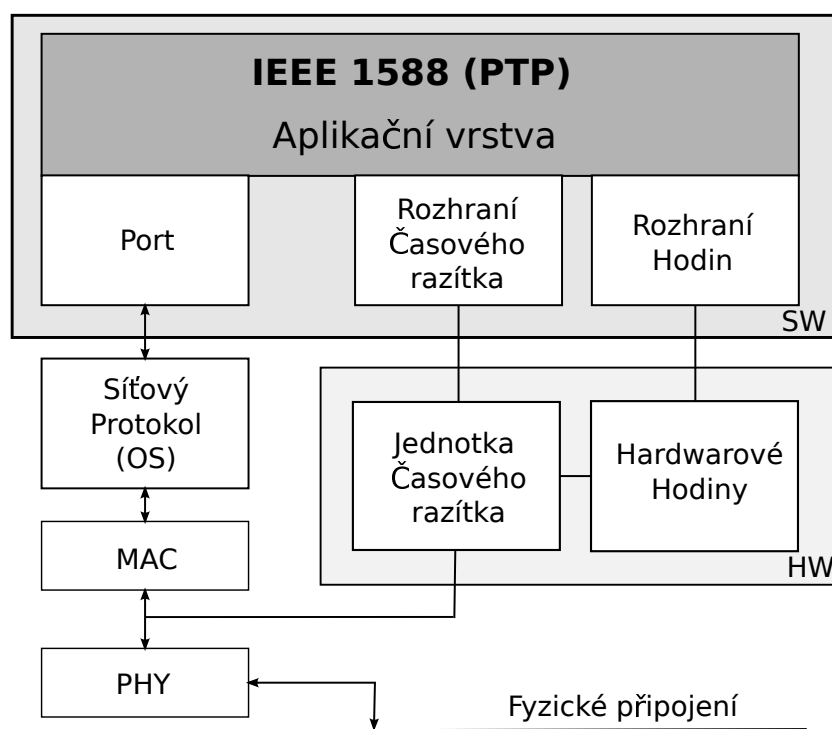
Po nastavení jednotlivých síťových prvků a určení master-slave hierarchie dojde ke spuštění synchronizace mezi jednotlivými prvky. Přesný čas je na jednotlivých síťových prvcích určován výpočtem. Podobně jako u NTP protokolu dochází k výpočtu zpoždění paketu mezi dvěma zařízeními a následně je vypočítána korekce času klienta.

Využití vysoké přesnosti synchronizace času a tedy celého protokolu PTP se najde v mnoha oblastech. Jednou z nich jsou například měřicí systémy, kde potřebujeme znát

přesný okamžik měření určitého senzoru. Proto je potřeba mít přesně synchronizovaný čas v měřicím zařízení. Synchronní sběr dat, registrace událostí a další funkce vyžadují vysokou přesnost synchronizace. Uplatnění je možné najít například v inteligentních sítích "Smart Grid", které vznikají v oblasti řízení energetických sítí. PTP se také využívá v telekomunikacích například pro synchronizaci taktu základnových stanic v mobilní síti a následně generování taktu pro další zařízení v mobilní síti. Tento protokol je velice vhodné využít v případě potřeby generování přesného taktu pro další zařízení v odlehle lokalitě. Díky tomuto protokolu nepotřebujeme budovat samostatnou synchronizační síť, což má přímou návaznost na finanční náklady. Vlastnosti a frekvence generovaného taktu je závislá na možnostech koncového zařízení.

2.3.1 Architektura PTP

Standardní synchronizační protokoly byly vždy implementovány jen softwarově a to přináší určité nevýhody [23]. PTP protokol přináší možnost jak softwarově, tak hardwarové implementace. Hardwarová implementace je náročnější a jednotlivá zařízení musí podporovat tento synchronizační protokol, ale výsledná přesnost synchronizace je mnohem lepší v porovnání se softwarovou implementací. Hardwarová implementace umožňuje přesné určení času příchozího a odchozího PTP paketu na fyzické médium.



Obrázek 2.4: Architektura synchronizační jednotky s PTP. [23]

Architektura protokolu PTP je specifická tím, že jsou oddělené časově náročné úkoly, které jsou implementovány v hardwaru a pak samotný protokol. Díky tomuto dochází

k rozdělení hardwarové a softwarové části. Z toho vyplývají nižší nároky na výkonnost procesoru.

Hardwarová jednotka obsahuje velmi přesné hodiny a jednotku časového razítka (TSU - Time Stamp Unit). Jednotka časového razítka zajišťuje vložení či vyjmutí časových značek z paketu. Softwarová část implementuje protokol IEEE 1588 s vazbou na přesné hodiny a jednotku časového razítka (Obr. 2.4).

Protokol podle IEEE 1588 je nezávislý na operačním systému, a proto je třeba vytvořit mezivrstvu, která bude komunikovat mezi operačním systémem a protokolem. Můžeme tedy hovořit o třech vrstvách. První vrstva implementuje synchronizaci v síti a lze jí nalézt v různých komunikačních zařízeních (switch, router, PC). Mezivrstva označovaná jako Abstraction Layer zajišťuje předávání potřebných informací mezi operačním systémem a PTP (protokolovou vrstvou). Komunikace této vrstvy s protokolovou vrstvou je realizována pomocí fronty. Mezivrstva obsahuje několik rozhraní. Rozhraní časového razítka zpracovává jednotlivé zprávy ze síťové komunikace a rozhraní hodin slouží ke čtení a modifikování lokálních hodin. Při realizaci mohou být použity například systémové hodiny z operačního systému, pokud nebudou realizovány žádné hardwarové hodiny. Posledním rozhraním je rozhraní portu, které se používá k vysílání a příjmu PTP zpráv. PTP může kromě UDP/IP využít jenom IP protokolu. Detailní popis možné hardwarové implementace pomocí FPGA je popsán v článku "Design and implementation of IEEE1588 time synchronization messages timestamping based on FPGA" [21].

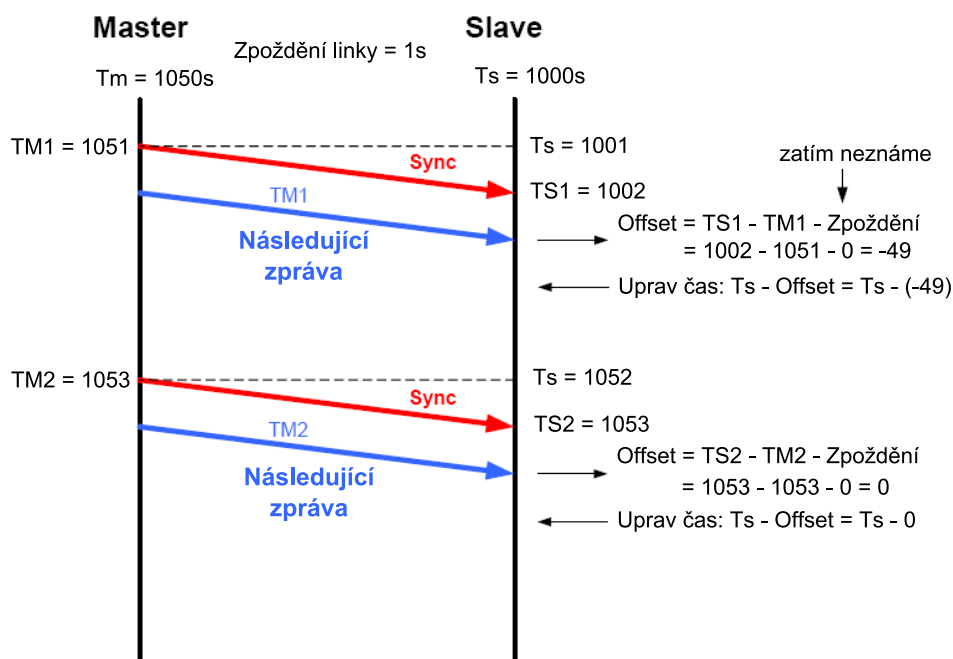
2.3.2 Princip synchronizace u PTP

Princip synchronizace klienta je uveden na obrázku 2.5. Hodnoty zpoždění a počátečních časů jsou z názorného důvodu zvoleny tak, aby se s nimi dobře počítalo a neodpovídají realitě.

Jelikož časový rozdíl mezi hlavními a podřízenými hodinami je součtem offsetu (rozdílu) hodin a přenosovým zpožděním sítě, probíhá synchronizace ve dvou fázích: oprava offsetu a korekce vlivu síťového zpoždění. V první fázi je vysílána synchronizační zpráva "Sync", která je následována zprávou "Následující zpráva". Hodnoty T_m a T_s představují aktuální časy na zařízení master a slave. Hodnoty T_M a T_S vyjadřují časy, kdy byl odeslán nebo přijat paket.

Ve zprávě "Sync" se přenáší informaci o času hlavní časové základny v době, kdy byla zpráva odeslána. Tato hodnota se "Následující zprávou" potvrdí, nebo může dojít k upřesnění této hodnoty vlivem kontrolních mechanismů masteru. Vedlejší časová základna tyto zprávy přijme a provede výpočet offsetu na základě rozdílu svého interního času a času přijatého v synchronizačních zprávách. Na základě offsetu je následně upravena hodnota času v synchronizujícím se zařízení.

Ve druhé fázi (obr. 2.6) se určuje zpoždění mezi hlavní a vedlejší časovou základnou. Vedlejší časová základna pošle zprávu "Dotaz" a začne měřit dobu přenosu zprávy. Hlavní časová základna přijme zprávu, přečte si svůj aktuální čas, který doplní do zprávy "Odpověď" a odešle zprávu zpět. Po přijetí zprávy vedlejší časovou základnou dojde k výpočtu zpoždění a k opravě času na zařízení.



Obrázek 2.5: Korekce offsetu [14]

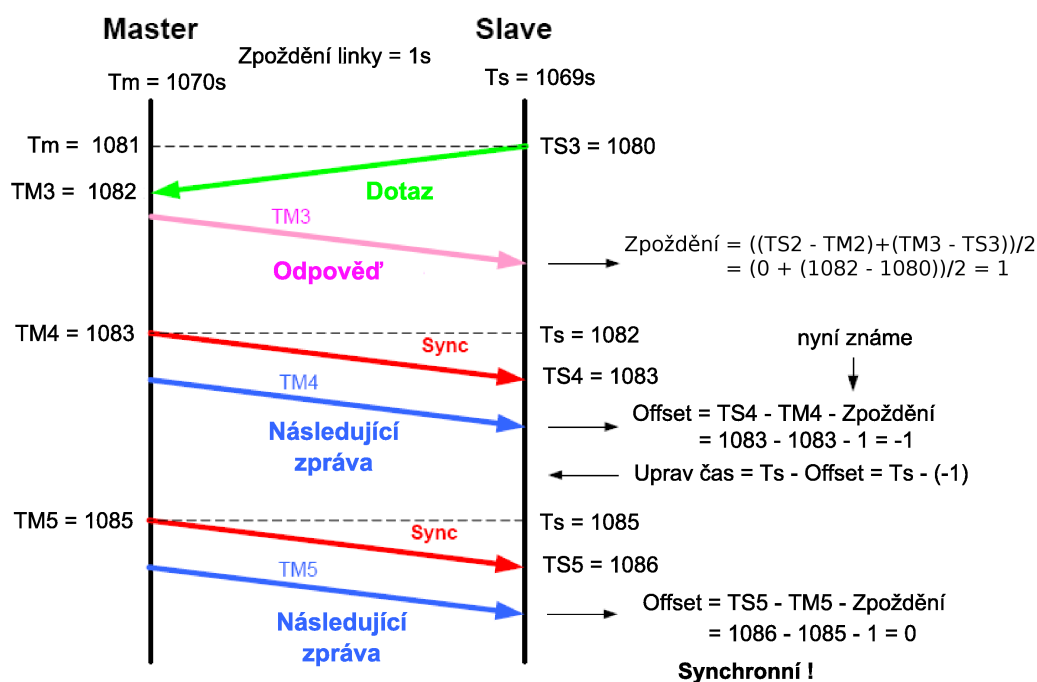
Díky tomu, že měření je prováděno vždy jen mezi dvěma prvky sítě, se výsledná přesnost pohybuje v řádech desítek nanosekund. Měření zpoždění je vykonáváno nepravidelně. Hodnota intervalu je mezi 4 a 60 sekundami, kde 60 sekund je nastaveno jako základní. Díky této možnosti lze ovlivnit zatížení sítě, které může být nepatrné.

2.3.2.1 Průchozí hodiny

Pojem transparent clock [25, 16, 17], který můžeme přeložit jako průchozí hodiny, byl zaveden až v druhé verzi standardu pro PTP protokol vydaného v roce 2008. Důvodem byla nižší výsledná přesnost času klienta při použití více prvků v síti, které byly zapojeny sériově. V případě většího zatížení určité cesty, která může být dokonce asymetrická, dochází při přenosu k většímu zpoždění PTP paketů určitým směrem. To se následně projevuje ve větší nepřesnosti synchronizace jednotlivých zařízení, které se ve výsledku sčítají. Dále v případě změny konfigurace sítě roste čas k resynchronizaci všech hodin za změněným síťovým prvkem.

Ve standardu IEEE 1588 jsou definovány dva režimy průchozích hodin (Transparent Clock TC) a to End-to-End a Peer-to-Peer. Síťová zařízení v režimu průchozích hodin neprovádějí synchronizaci svých vnitřních hodin. Princip TC hodin je takový, že měří a kompenzují zpoždění, které vzniká při průchodu synchronizačního paketu přes blok TC hodin.

End-to-End (E2E) TC předává synchronizační zprávu Sync od serveru nezměněnou a zaměřuje se jen na přesné změření zpoždění paketu v daném zařízení. Každé zařízení



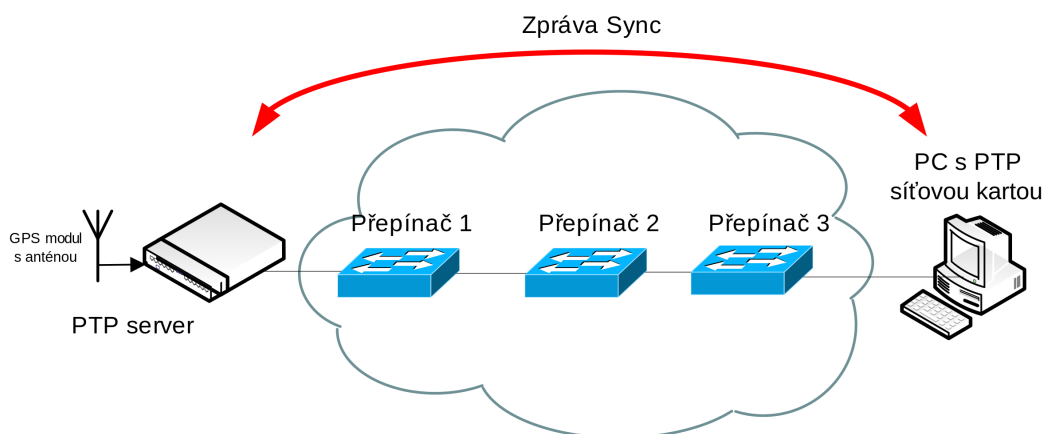
Obrázek 2.6: Měření zpoždění [14]

nastavené v režimu E2E TC a umístěné mezi masterem a slavem určuje, kdy synchronizační PTP paket přišel a kdy odešel a výslednou délku zpoždění zaznamenává a posílá dále. Klient tuto hodnotu spolu s hodnotami od serveru použije při výpočtu výsledné odchylky svého času.

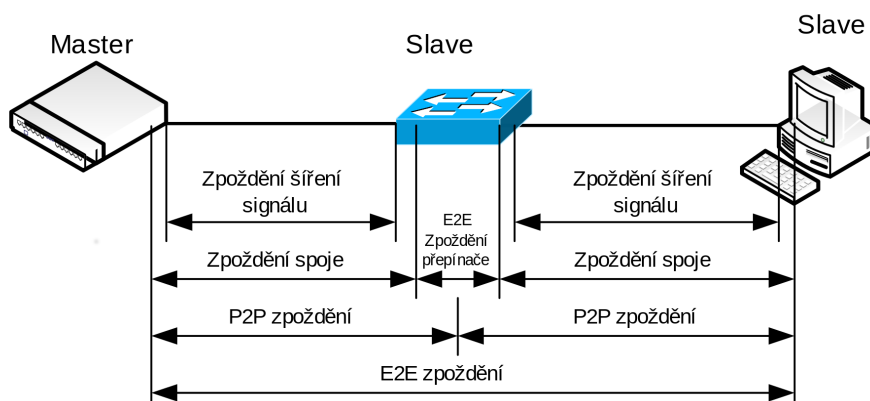
V případě použití režimu Peer-to-Peer (P2P) není měřeno jen zpoždění v daném zařízení, ale je zde zahrnováno i zpoždění trasy. Jednotlivá zařízení zjišťují zpoždění jednotlivých připojených tras pomocí Peer delay mechanismu. Naměřená zpoždění jsou následně vyhodnocována a připočítávána ke zpoždění jednotlivých síťových prvků a dále předávána koncovým klientům. Klient tyto hodnoty využívá k určení přesnějšího zpoždění a následně k přesnější korekci lokálních hodin.

2.3.3 Vlastnosti PTP

Dosahovaná přesnost hardwarové implementace je v řádu desítek nanosekund. Bylo provedeno několik různých reálných měření, které jsou popsány v kapitole 2.6.2. Hlavním omezením v případě hardwarové implementace PTP je nutnost nových zařízení s podporou daného protokolu. Proto je PTP momentálně využíván spíše v menších sítích, kde lze umístit jeden synchronizační server s přesným časem, který distribuuje synchronizaci ke koncovým bodům sítě. Tento protokol se v posledním období velice rychle vyvíjí a začíná být součástí jednotlivých síťových zařízení.



Obrázek 2.7: Blokové schéma využití průchozích hodin

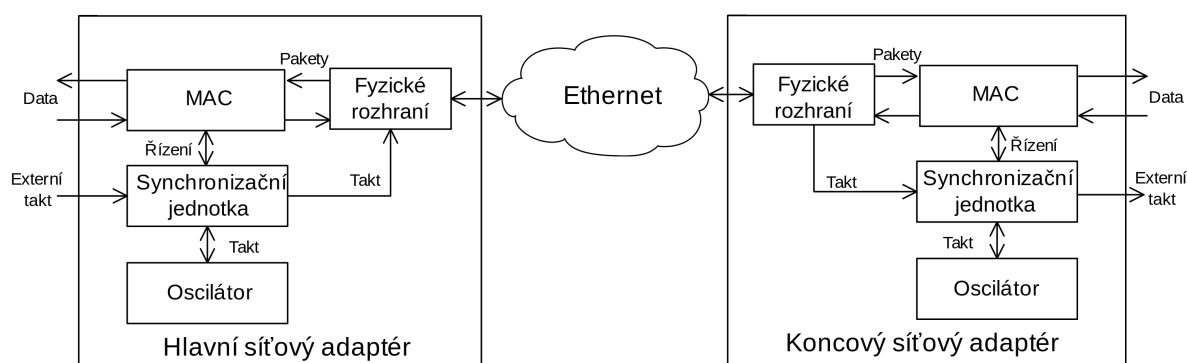


Obrázek 2.8: Jednotlivá zpoždění v síti

2.4 Synchronní Ethernet

Jako další alternativou, která umožňuje synchronizaci v Ethernet síti, je Synchronní Ethernet. Synchronní Ethernet (označovaný jako SyncE) využívá přímo fyzické vrstvy a takt je odvozován přímo z přenášeného bitového toku dat. Je zde využíváno podobného principu jako například u E1 signálu v telekomunikacích. Synchronní Ethernet byl standardizován organizací ITU-T ve spolupráci s IEEE a je popsán ve třech doporučeních [5, 8, 7].

Synchronní Ethernet nelze úplně porovnávat s předchozími protokoly jako je PTP či NTP. Při synchronizaci, která probíhá po fyzické vrstvě, není možné přenášet žádnou informaci o čase, a proto se zde mluví o synchronizaci taktu. Pro určitou správu a informaci o přesnosti se samozřejmě využívají protokoly vyšších vrstev. Konkrétně se jedná o zprávy SSM (synchronization status message). Synchronní Ethernet hlavně řeší synchronizaci taktu jednotlivých zařízení. Pro většinu zařízení, které mají mezi sebou komunikovat, je synchronizace taktu dostatečná, protože nepotřebují znát přesný čas. Vzájemná synchronizace jim umožňuje lepší fungování, což přispívá ke zvýšení kvality služby.



Obrázek 2.9: Funkce synchronního Ethernetu

Struktura a funkce síťového adaptéru u Synchronního Ethernetu je zobrazena na obrázku 2.9. Hlavním blokem je synchronizační jednotka, která dodává takt (nebo přijímá) do (nebo z) fyzického rozhraní síťového adaptéru. Tento signál může být brán z externího vstupu nebo z vnitřního oscilátoru. V případě hlavního zařízení je vyžadována vysoká stabilita oscilátoru, a proto jsou tyto oscilátory mnohem přesnější. Dále je nutné určitým způsobem řídit a nastavovat Synchronizační jednotku, a proto je nutné propojení s MAC (Medium Access Layer).

Velkou výhodou u Synchronního Ethernetu je možnost přenosu taktovacího signálu pro jiná zařízení. Například do hlavního zařízení pracujícího na Ethernetu může být zaveden synchronizační signál například ze sítě SDH a na konci je tento signál vyveden a připojen zase do jiné sítě SDH. Synchronní Ethernet může sloužit k překlenutí určité vzdálenosti, kde je potřeba přenést synchronizační informaci. Požadavky na časové charakteristiky jsou uvedeny v doporučeních G.813 [3] a G.8262 [8]

2.5 Porovnání jednotlivých protokolů

Všechny protokoly, kromě synchronního Ethernetu, jsou používány v prostředí internetu a jejich zprávy se přenášejí po paketových sítích. Hlavním problémem paketových sítí je proměnné zpoždění, které je dáno architekturou paketové sítě a nelze ho předvídat. Každé zařízení, které je vloženo do přenosové cesty, přidává k celkovému zpoždění určitou malou část a jednotlivé protokoly se snaží toto zpoždění změřit a korigovat.

Protokol NTP je jeden z nejstarších protokolů, který se stále vyvíjí a dokáže konkurovat i novým protokolům. Jeho hlavní výhodou je dostupnost po celém internetu. Přesnost tohoto protokolu není příliš vysoká. Mnohem lépe je na tom PTP protokol podle standardu IEEE 1588, který poskytuje mnohem větší přesnost. Přesnost tohoto protokolu je udávána v řádu desítek nanosekund při hardwarové implementaci [28] a okolo jedné mikrosekundy při softwarové implementaci [20]. PTP protokol ve své hardwarové verzi využívá ke své synchronizaci jednotlivá zařízení s podporou tohoto protokolu, a proto není zatížen zpožděním jiných síťových prvků, které by se v síti neměli vyskytovat.

2.6 Měření v reálné síti

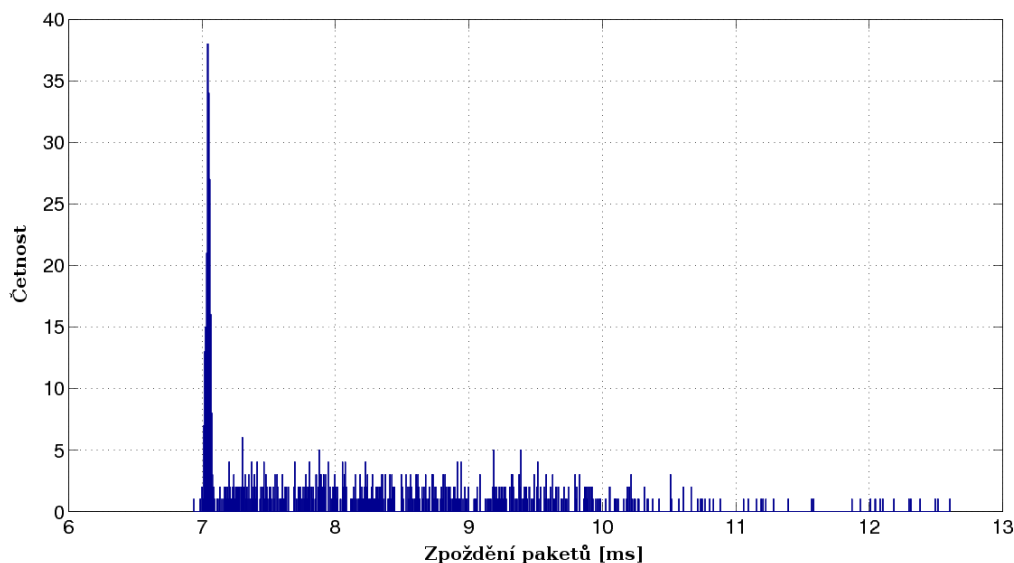
Základem práce byla analýza a měření zpoždění v paketové síti a měření přesnosti jednotlivých synchronizačních protokolů. Jednotlivá měření jsou uvedena v této části a umožnila získat přehled o principech fungování a možnostech dalšího vylepšení jednotlivých protokolů.

2.6.1 Zpoždění paketové sítě

Paketová síť byla navržena pro přenos paketů a to sebou přináší jisté výhody i nevýhody. Výhodou je rozdělení zpráv, které mohou být poslány různými cestami a tudíž lepší využití přenosových prostředků, ale zároveň to může být i nevýhodou, což je náš případ. Nelze zaručit, aby se paket šířil přes paketovou síť předem určenou cestou. Zpoždění paketu při průchodu sítí se mění vlivem změny zatížení jednotlivých bodů sítě nebo aktuální změnou topologie sítě například při výpadku určitého spojení.

Měření zpoždění sítě bylo prováděno pomocí protokolu NTP, kdy byl zjišťován čas zpoždění mezi klientem a serverem. Měření bylo prováděno v Ethernet síti ČVUT, kde klient byl umístěn na Bubenečské koleji v Praze a server byl umístěn na Strahovských kolejích v Praze. Jednalo se o veřejný NTP server. Každou sekundu byl vyslán dotaz na NTP server a bylo zjištěno zpoždění tam a zpět, které bylo zaznamenáno. Výsledky jsou zobrazeny ve formě histogramu (obr. 2.10). Detailní popis měření a způsoby vyhodnocení jsou uvedeny v Diplomové práci [24]. Ze zmíněného histogramu je vidět typické rozložení zpoždění jednotlivých paketů [19], které odpovídá logaritmicko-normálnímu rozložení [27][18].

Při měření jsme schopni přesně změřit obousměrné zpoždění. Z pohledu synchronizace je důležitější jednosměrné zpoždění (např. od serveru ke klientovi), které poté slouží ke korekci lokálních hodin klientské strany. Algoritmus předpokládá zpoždění v obou směrech



Obrázek 2.10: Četnost zpoždění paketů při propojení na NTP server

stejně. Další důležitý vliv na přesnost synchronizace mají jednotlivá koncová zařízení, která přidávají další zpoždění dané délkou zpracování jednotlivých požadavků. Je to dáno operačním systémem, který má vždy nějakou frontu úloh a jednotlivé priority jednotlivých procesů. Rozdíl mezi okamžikem, kdy je časové razítko vloženo do paketu a kdy je paket skutečně odeslán, je dáno zatížením systému a to může způsobovat velkou variabilitu zpoždění. Ke stejnému problému může docházet také na druhé straně při příjmu paketu. PTP protokol toto řeší hardwarovou implementací hodin popsanou v kapitole 2.3.1.

Hodnota rozptylu jednotlivých paketů, která nejvíce ovlivňuje přesnost synchronizace na straně klienta, je nejdůležitějším parametrem. Čím menší bude rozptyl zpoždění, tím větší bude přesnost synchronizace, protože je možné vypočítat přesnější čas. Nejvyšší hodnota četnosti zpoždění při měření na reálné síti (obr. 2.10) je okolo hodnoty zpoždění 7 ms. Velikost konstantního zpoždění není důležitá, protože ji můžeme z přijatých paketů vypočítat a eliminovat (kapitola 2.2.1). Naším úkolem je eliminovat rušivé působení paketů, které přicházejí s velkým zpožděním a negativně ovlivňují přesnost synchronizace.

2.6.2 Měření PTP

Precision Time Protocol (IEEE 1588) využívá hierarchickou topologii ve tvaru stromu, stejně jako je využívána základní topologie v Ethernet síti. To znamená, že v síti je dostupný jeden hlavní synchronizační server, který poskytuje přesný čas dalším síťovým zařízením jako jsou přepínače a koncové síťové karty v režimu klienta. Jak bylo popsáno v kapitole 2.3, mechanismus pro výběr nejpřesnějších hodin a vytvoření synchronizační hierarchie je implementován přímo v PTP.

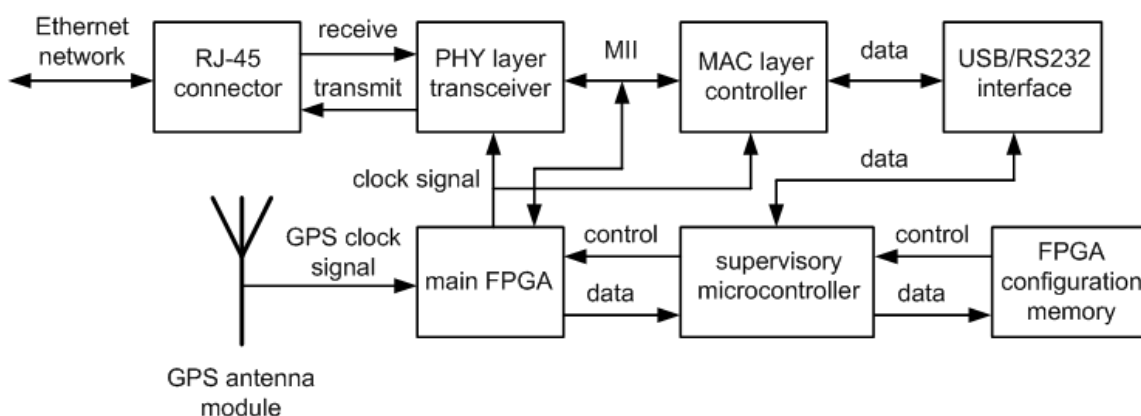
Při měření přesnosti tohoto protokolu byl použit jeden synchronizační server s GPS

přijímačem, jeden Ethernet přepínač a jeden počítač se síťovou kartou s podporou PTP. Dále byl použit jeden obyčejný přepínač a rozbočovač bez podpory PTP, který byl vložen do synchronizační cesty za účelem sledování vlivu na zhoršení přesnosti synchronizace.

2.6.2.1 Popis jednotlivých zařízení

Jako hlavní synchronizační server byl použit časový server od firmy Meinberg s označením LANTIME (Local Area Network Timeserver) M600/GPS. Tento server poskytuje velice přesný čas přes Ethernet (TCP/IP) síť. Jedná se o modulární koncepci serveru, a proto může být rozšiřován o další moduly či rozhraní. V naší konfiguraci server obsahuje čtyři základní 100Base-T Ethernetové rozhraní, které podporují NTP a SNTP protokol, jeden 100Base-T Ethernetové rozhraní s podporou PTP, několik výstupů vyvedených na BNC konektory s různou taktovací frekvencí, RS232 rozhraní a vstup na GPS anténu. Server poskytuje mnoho síťových služeb přes Ethernet rozhraní jako je například NTP v2, v3 a v4 (ve všesměrovém i vícesměrovém režimu), SNTP, FTP, HTTP a další.

Hlavní funkci PTP protokolu u serveru plní jednotka časového razítka, která je implementována na FPGA a stará se o kontrolu datových paketů na úrovni rozhraní MII (Media Independent Interface), které je mezi fyzickou vrstvou (PHY) a přístupovou vrstvou (MAC) (Obr. 2.4). Jestliže je v příchozích zprávách detekován PTP paket, jednotka časového razítka si zaznamená přesný čas příchodu a předá tuto informaci dále. Následně je tento čas použit k výpočtu zpoždění přenosové cesty a ke korekci místních hodin. V případě odchozího PTP paketu je určen přesný čas odeslání, který je následně poslán v následující zprávě (obr. 2.5). Tato zpráva je v angličtině nazývána jako follow up zpráva. Přesný čas hodin je určován z GPS modulu a pomocí fázového závěsu je udržován i při výpadku. Celý proces je popsán na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11: Blokové schéma synchronizační karty PTP serveru [9]

Nejdůležitějším obvodem synchronizačního serveru je interní oscilátor a jeho stabilita taktu. PTP server je osazen velice stabilním oscilátorem typu OCXO LQ, který má krátkodobou stabilitu okolo $1 \cdot 10^{-9}$ a dlouhodobou stabilitu přibližně $4 \cdot 10^{-7}$ v režimu

volného běhu bez synchronizace (free-running mode). Díky GPS modulu, který poskytuje velice přesný čas, je výsledná přesnost synchronizace při spolupráci s interním oscilátorem okolo hodnoty $1 \cdot 10^{-11}$. Všechny tyto charakteristiky jsou teplotně závislé a lze je nalézt v dokumentaci k PTP serveru [9]. Konfiguraci serveru je možné provádět pomocí konzole připojené přes RS232 port nebo pomocí Telnetu. Lze také využít jednoduchých www stránek dostupných přes libovolný webový prohlížeč.

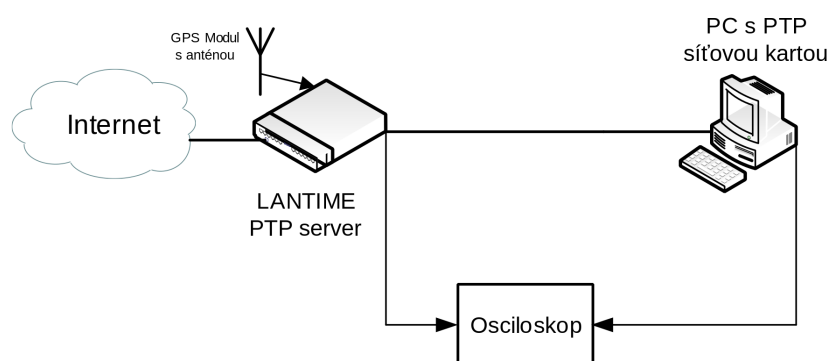
Další komponentou použitou při měření byl průmyslový přepínač od firmy Hirschmann s podporou PTP (IEEE 1588). Díky modulárnosti tohoto přepínače je možné přidávat další porty a rozšíření, nicméně postačuje základní konfigurace se 4 Ethernetovými porty, USB konektorem a s rozhraním V.24 pro správu přepínače. Konfigurace přepínače je samozřejmě možná více způsoby.

Poslední komponentou s podporou PTP je síťová karta PTP270PEX od firmy Meinberg. Tato karta využívá standardní sběrnice PCI-E (Express). Síťová karta pracuje typicky v režimu klient, kdy synchronizuje svůj čas na základě příchozích paketů. Síťová karta také obsahuje jednotku časového razítka, která je implementována v obvodu FPGA a která pracuje podobně jako u synchronizačního serveru uvedeného na obrázku 2.11. Síťová karta má také několik výstupů s různým taktem například 10MHz nebo PPS (každou sekundu jeden puls). Tyto výstupy budou použity při měření, abychom získali odchylku času serveru a klienta a tím pádem zjistili vliv jednotlivých zařízení na přesnost synchronizace.

Dále byl použit ještě jeden standardní rozbočovač a přepínač. Při měření byl zjišťován vliv těchto zařízení (bez podpory PTP) na přesnost výsledné synchronizace.

2.6.2.2 Síťové topologie a výsledky měření

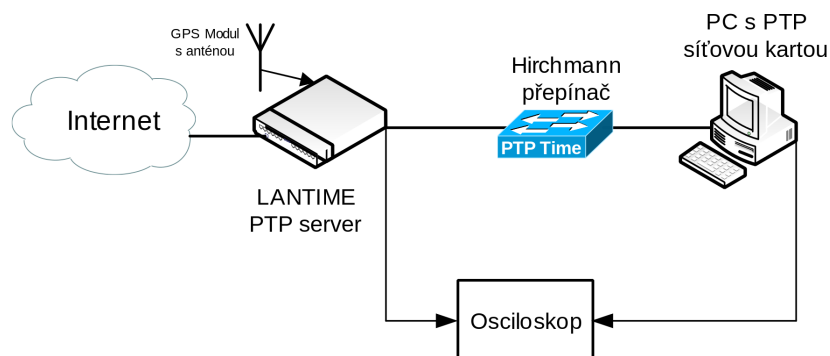
V předchozí podkapitole byla popsána jednotlivá zařízení, která budou využívána při měření. V každé měřené topologii musí být obsažen minimálně PTP server a počítač se síťovou kartou, která podporuje PTP protokol. Tedy nejjednodušší topologií je přímé propojení serveru a klienta (Obrázek 2.12).



Obrázek 2.12: Přímé propojení serveru a klienta

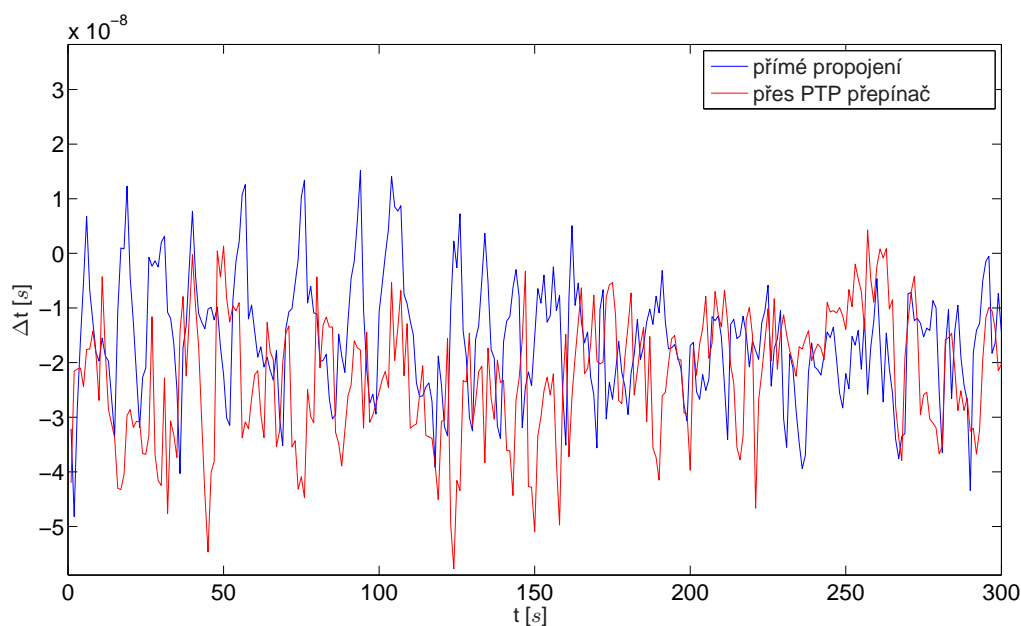
Měření je následně prováděno porovnáním náběžných hran sekundových pulzů (PPS - Pulse per Second) ze serveru a klienta pomocí osciloskopu. V případě, že je čas klienta a

serveru přesně synchronizován, není naměřen žádný rozdíl mezi PPS od serveru a klienta. Tedy každou sekundu je získána jedna hodnota, která vyjadřuje rozdíl času klienta od času serveru. Tyto hodnoty jsou zaznamenány a zobrazeny ve formě grafu (obr. 2.14) a statistických hodnot (tabulka 2.1).



Obrázek 2.13: Síťová topologie se serverem, PTP přepínačem a klientem

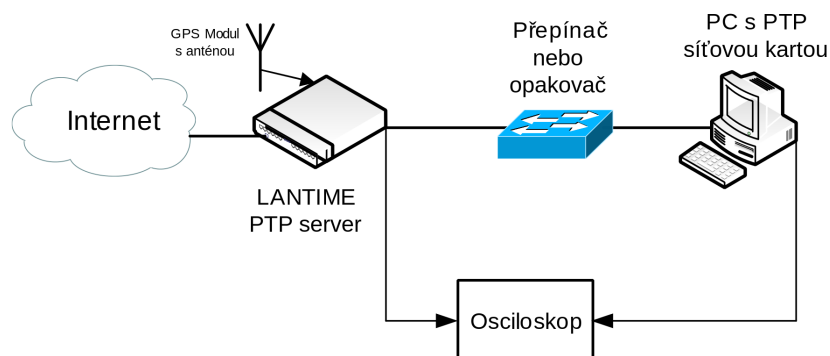
Velice podobných výsledků se dosáhlo i v topologii, kdy byl mezi serverem a síťovou kartou připojen ještě přepínač s podporou PTP od firmy Hirschmann. Topologie měření je zobrazena na obrázku 2.13.



Obrázek 2.14: Výsledky měření při přímém propojení a s PTP přepínačem

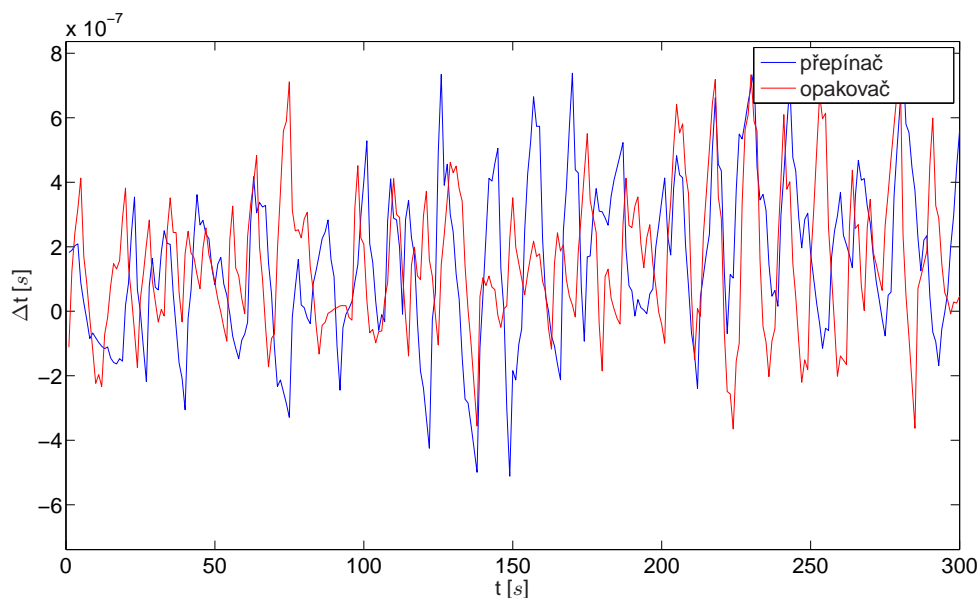
Obrázek 2.14 zobrazuje jednotlivé odchylky času serveru a času klienta (síťová karta v počítači). Graf zobrazuje výsledky měření na obou topologiích zmíněných výše. V grafu

je pro přehlednost zobrazeno jenom 300 hodnot, nicméně při každém měření bylo získáno více než 1000 hodnot. Střední hodnota rozdílu času serveru a klienta při přímém propojení byla okolo 15 nanosekund. Největší zaznamenaný rozdíl byl 54 ns. Topologie se serverem, PTP přepínačem a PC měla střední hodnotu nepřesnosti synchronizace 19,8 ns a největší zaznamenaný rozdíl časů byl 58 ns. Tyto výsledky opravdu potvrzují tvrzení, že přesnost synchronizace s hardwarovou implementací je v řádu desítek maximálně stovek nanosekund.



Obrázek 2.15: Topologie pro měření standardního přepínače a rozbočovače

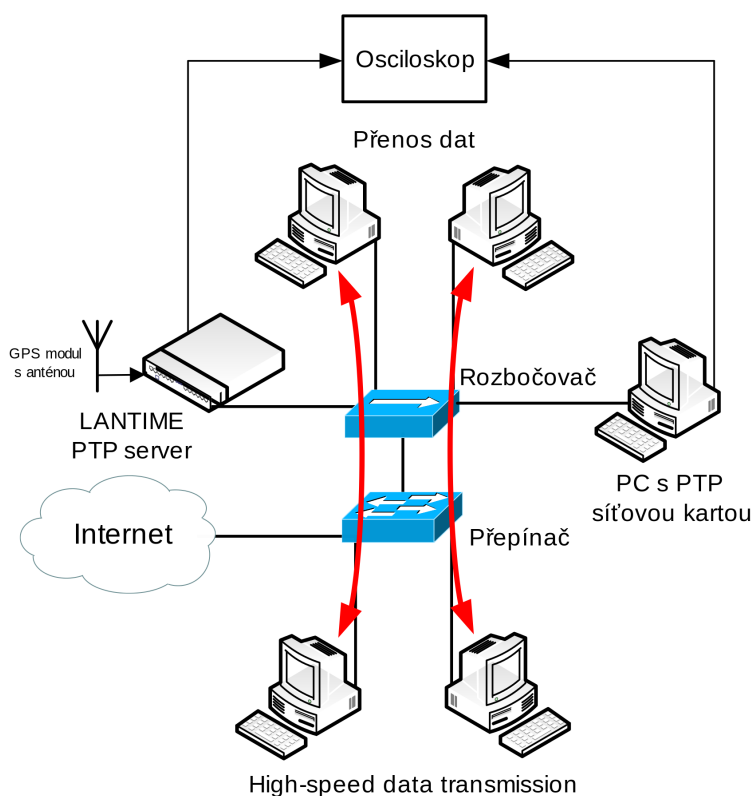
Dále byl měřen vliv standardního přepínače a rozbočovače na výslednou přesnost synchronizace. Topologie je uvedena na obrázku 2.15. Výsledná přesnost synchronizace se zhoršila přibližně desetkrát.



Obrázek 2.16: Výsledky měření při použití standardního přepínače a rozbočovače

Výsledná odchylka synchronizace času je u přepínače a rozbočovače velice podobná. Při synchronizaci se hodnoty odchylek pohybovaly v kladných i záporných číslech a výsledná střední hodnota při měření s rozbočovačem je 33 ns a s přepínačem je 106 ns. Maximální naměřená odchylka byla v případě rozbočovače 787 ns a v případě přepínače 820 ns (Obrázek 2.16). Lze tedy říci, že rozbočovač je dosahuje lepších výsledků než přepínač. Pravděpodobně to bude způsobeno funkcí jednotlivých zařízení, kdy rozbočovač okamžitě posílá všechny pakety všemi směry, zatímco přepínač rozhoduje jakým směrem se má daný paket poslat, což přináší větší zatížení a zpoždění jednotlivých paketů. Většina standardních přepínačů využívá metody uložit a poslat (store and forward) nebo i jiné metody, které mohou přidávat další variabilní zpoždění do přenosové cesty.

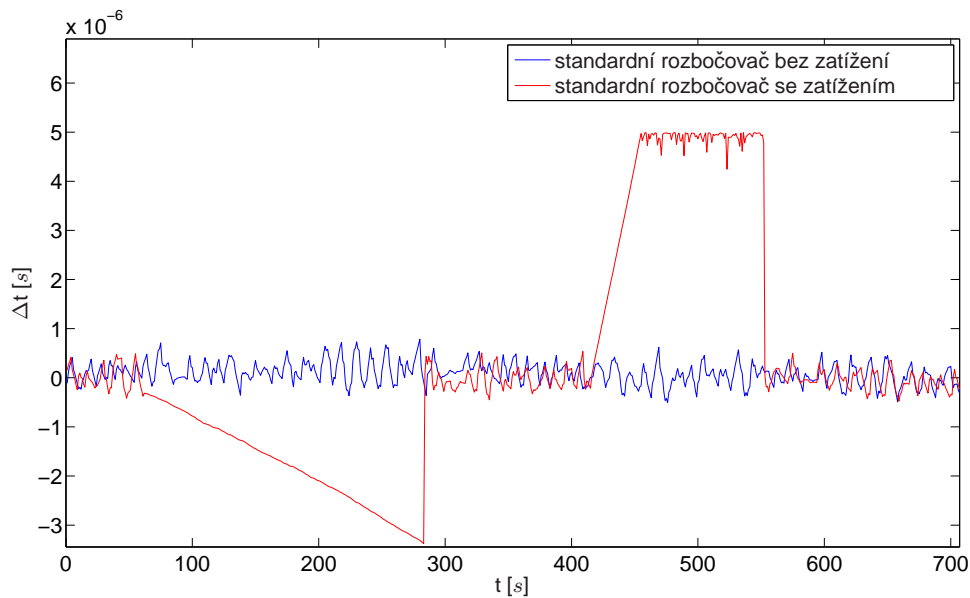
Při dalších měřeních byl zkoumán vliv zatížení sítě datovými přenosy na výslednou přesnost synchronizace času. Byla vytvořena topologie, kde bylo zapojeno více počítačů přes jeden přepínač či opakovací a mezi těmito počítači byly přenášeny velké soubory. Jelikož náš rozbočovač měl jenom pět portů, využili jsme ještě jeden přepínač, abychom mohli vytvořit dvě nezávislé cesty pro přenos souborů. Rychlost rozbočovače je 10 Mbit/s zatímco přepínač podporuje rychlost 100 Mbit/s. Topologie pro tento případ je zobrazena na obrázku 2.17.



Obrázek 2.17: Topologie pro měření rozbočovače se zatížením

Rozbočovač byl v tomto měření opravdu nejslabším článkem. Z obrázku 2.18 je názorně vidět velký rozdíl času serveru a klienta, ke kterému došlo při výpadku synchronizace.

Výpadek synchronizace byl nejspíše způsoben ztrátou synchronizačních paketů. V případě velkého zatížení dochází na rozbočovači k mnoha kolizím, které negativně ovlivní přesnost synchronizace. V průběhu měření byl rozpad synchronizace zaznamenán a byl zastaven datový tok mezi PC. Po chvílce byla synchronizace znovu navázána, a tak jsem znovu obnovil přenos dat. Situace s rozpadem synchronizace se opakovala (obrázek 2.18).

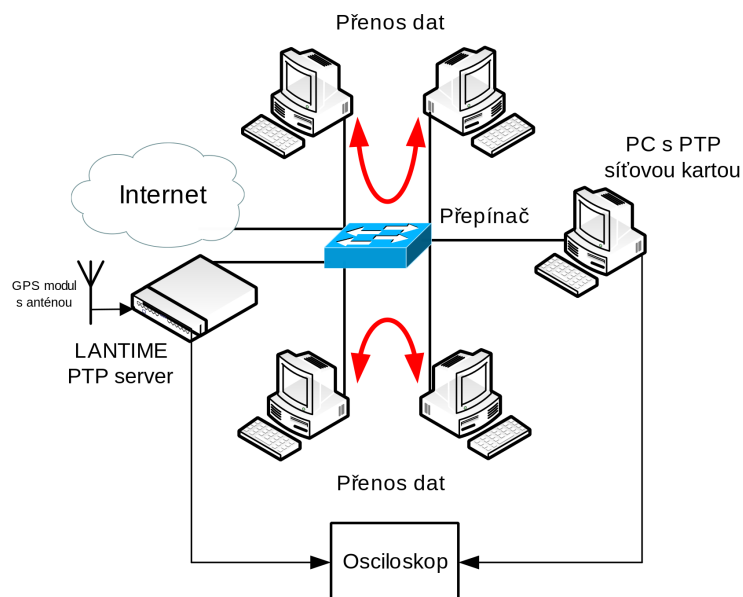


Obrázek 2.18: Výsledky měření při použití rozbočovače se zatížením a bez zatížení

Při použití Hirschmann přepínače s podporou PTP byla výsledná přesnost synchronizace se zatížením a bez zatížení velice podobná. Principy PTP protokolu, které byly popsány v předešlých kapitolách, zaručují určitou přesnost synchronizace, což se tímto měřením ověřilo. Výsledná přesnost synchronizace se tedy stále pohybuje pod hranicí 100 ns (Tabulka 2.1).

Standardní přepínač má horší přesnost synchronizace při zatížení datovým tokem, nicméně tento vliv není nějak výrazný (Obrázek 2.20). Při zatížení byla střední hodnota 238 ns a největší odchylka časů serveru a klienta byla $1,21 \mu\text{s}$.

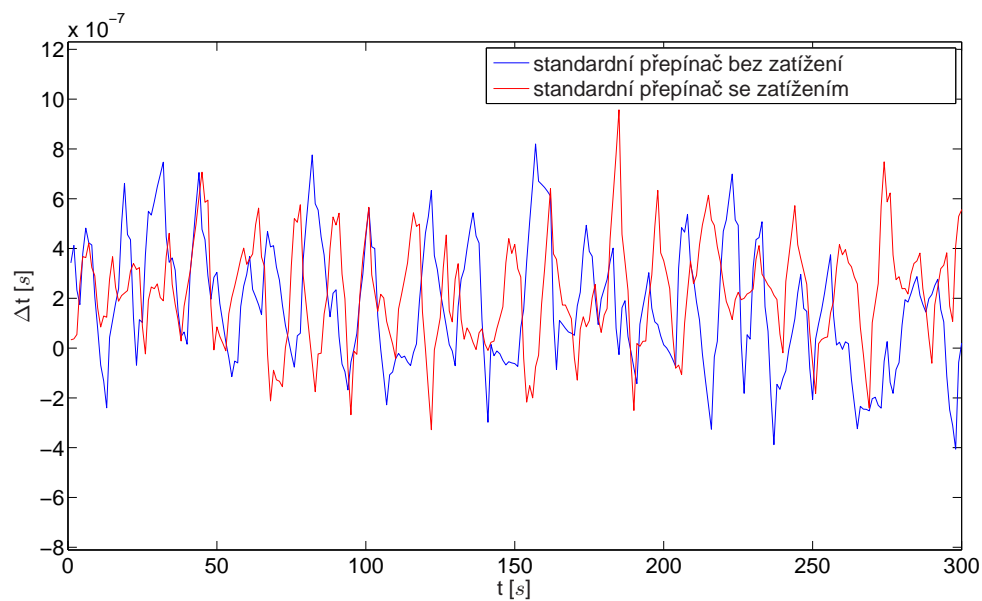
V případě, že porovnáme přesnost synchronizace standardního přepínače a přepínače s podporou PTP při zatížení těchto přepínačů, zjistíme větší rozdíl (přibližně 10 krát - obrázek 2.21)



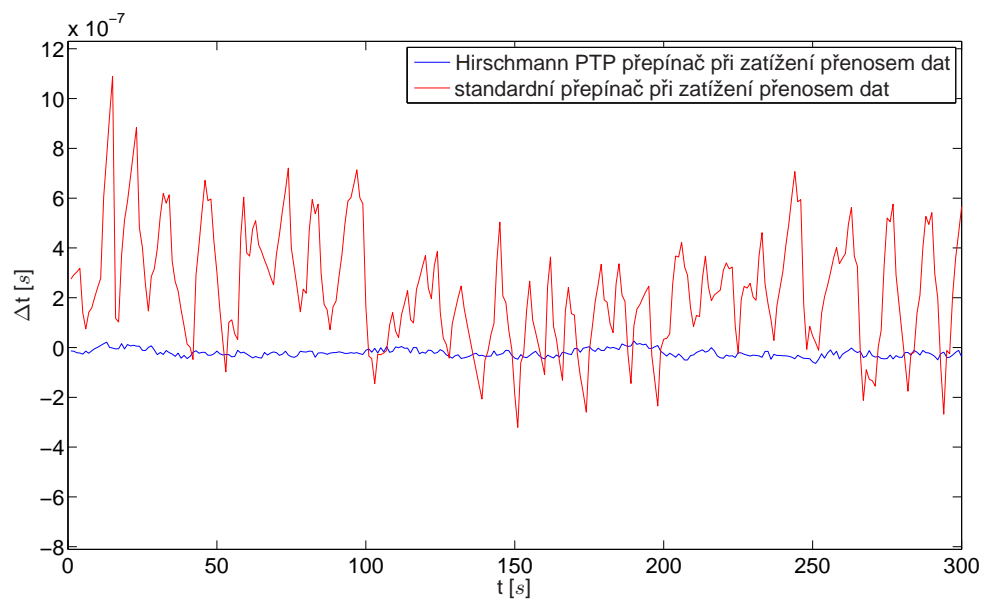
Obrázek 2.19: Topologie pro měření přepínače se zatížením

Byly provedeny další zkušební měření s pozměněnými topologiemi a s jinými standardními zařízeními, ale výsledky byly velice podobné měřenému přepínači a rozbočovači.

Všechny výsledky jsou přehledně zapsány v tabulce 2.1. Tabulka pro jednotlivé topologie zobrazuje střední hodnotu, směrodatnou odchylku, hodnotu rozptylu a maximální hodnoty. V případě měření topologie, kde měla všechna zařízení podporu PTP, byly výsledky v řádech nanosekund. Odchylka synchronizace času serveru a klienta nepřekročila hodnotu 100 ns a průměrné hodnoty se pohybovali v řádu desítek nanosekund. V případě použití standardních síťových prvků (v tabulce topologie Server - Hub - PC nebo Server - Switch - PC)) jsou hodnoty rozptylu a maximální hodnoty výrazně vyšší, což vypovídá o horší přesnosti synchronizace. V případě zatížení jednotlivých datových prvků v síti datovým provozem, dochází u prvků bez podpory PTP protokolu k dalšímu zhoršení přesnosti synchronizace, což je v tabulce nejvíce vidět u topologie Server - Hub - PC (se zatížením).



Obrázek 2.20: Výsledky měření standardního přepínače se zatížením a bez zatížení



Obrázek 2.21: Výsledky měření stand. přepínače a Hirschmann přepínače se zatížením

Topologie	Střední hodnota [s]	Rozptyl	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
Server – PC (obr. 2.12)	-1,48e-8	1,7e-16	1,29e-8	-5,4e-8	3,0e-8
Server – PTP switch – PC (obr. 2.13)	-1,96e-8	2,2e-16	1,49e-8	-5,8e-8	3,75e-8
Server – Hub – PC (obr. 2.15)	3,37e-8	5,5e-14	23,5e-8	-67,4e-8	78,7e-8
Server – Switch – PC (obr. 2.15)	10,6e-8	5,7e-14	23,9e-8	-72,4e-8	82e-8
Server – PTP switch – PC (se zatížením) (obr. 2.19)	-2,02e-8	2,7e-16	1,66e-8	-7,1e-8	3,2e-8
Server – Hub – PC (se zatížením) (obr. 2.17)	24,91e-8	4,9e-12	222e-8	-338e-8	499e-8
Server – Switch – PC (se zatížením) (obr. 2.19)	23,85e-8	5,5e-14	23,6e-8	-79,5e-8	121e-8
Server – PTP switch – switch – PC (zatížením)	12,6e-8	3,6e-14	18e-8	-46e-8	-86e-8

Tabulka 2.1: Výsledky měření pro různé topologie při různých podmínkách

2.7 Zhodnocení současného stavu

Synchronizace času pomocí paketových sítí je stále velice diskutovaným problémem. Princip časové synchronizace byl poprvé vymyšlen a použit před více než 20 roky u NTP protokolu. Mnoho zařízení vyžaduje stále větší přesnost synchronizace času, která ovlivňuje generování taktu jak pro vnitřní obvody zařízení, tak i jako externí zdroj pro další zařízení, a proto jsou synchronizační protokoly stále vylepšovány. PTP protokol (standard IEEE1588) je nyní nejpřesnějším protokolem pro synchronizaci času v lokálních sítích. Jeho nevýhodou je nutnost použití jednotlivých zařízení s podporou tohoto protokolu, což vyžaduje finanční investice. Přesnost PTP protokolu je v řádu desítek nanosekund. Dalším protokolem, který se dnes hojně využívá k synchronizaci času v počítačích, je protokol NTP. Přesnost NTP protokolu je v řádu jednotek milisekund. Přesnost časové synchronizace závisí na mnoha faktorech, které byly popsány v předešlých kapitolách. Hlavními faktory jsou rozptyl zpoždění v jednotlivých směrech při přenosu paketů a přesné určení času příchodu a odchodu paketu.

Díky jednotlivým měřením a prostudovaným článkům [20], [17], [23], [28], [15] byly zjištěny jednotlivé parametry, které nejvíce ovlivňují výslednou přesnost. Následující práce se zaměří na možnosti vylepšení synchronizačního algoritmu. Nabízí se několik různých možností, které budou analyzovány a pomocí simulací ověřeny.

Kapitola 3

Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je vytvořit algoritmus, který pomocí synchronizačního protokolu umožní zvýšit přesnost synchronizace času na straně klienta, což umožní i přesnější generování řídicího taktu pro samotné či další zařízení. Úkolem synchronizace času je nastavit čas klienta tak, aby byl totožný s časem serveru. Čas serveru je považován za referenční a je řízen z přesného časového zdroje.

Z obecného principu synchronizace (kap. 2.2.1), kdy dochází k výměně časových značek mezi serverem a klientem, jsme schopni velice přesně vypočítat celkové zpoždění průchodu paketu tam i zpět (zpoždění ve smyčce, RTT). Nicméně pro přesnou synchronizaci je důležité stanovit zpoždění jedním směrem, což nelze v praxi přesně určit. Většinou se předpokládá, že zpoždění jedním směrem je stejné jako druhým, a proto se zpoždění ve smyčce vydělí dvěma. Kolísání zpoždění je jedním z nejdůležitějších parametrů negativně ovlivňující synchronizaci.

Pro vlastní řešení disertační práce jsem si stanovil následující cíle:

1. Analýza a měření vlivu velikosti zpoždění sítě na přesnost synchronizace.
 - Různé zatížení přenosových cest způsobuje, že variabilní složka zpoždění se v jednotlivých směrech liší.
 - V případě hardwarové implementace PTP protokolu, kdy každé síťové zařízení má vlastní hodiny a synchronizují se navzájem, je kolísání zpoždění zanedbatelné. Ale i tak se sčítají nepřesnosti jednotlivých synchronizovaných síťových zařízení, které se nacházejí mezi hlavním PTP serverem a koncovým klientem.
2. Sestavení modelu a vytvoření simulačního programu, který bude provádět synchronizaci času klienta a reflektovat aktuální stav a funkci synchronizačního algoritmu.
 - Simulační program bude použit k porovnání simulovaných a naměřených hodnot při reálném měření. Tím dojde k ověření modelu a správné funkčnosti programu. Vstupními parametry budou hodnoty pro nastavení simulované sítě jako je minimální a maximální zpoždění paketů a rozptyl jednotlivých hodnot zpoždění paketů.

3. Snížení vlivu kolísání zpoždění na přesnost synchronizace a zvýšení přesnosti synchronizace času a generování taktu klienta.
 - Eliminaci vlivu je nutné provádět na straně klienta a jako nejjednodušší algoritmus lze použít například průměrování jednotlivých výsledků korekcí času zjištěných při synchronizaci času.
4. Sestavení modelu a vytvoření simulačního programu s vylepšenou synchronizací, který bude provádět synchronizaci času klienta a bude obsahovat vylepšení a rozšíření synchronizačního algoritmu.
 - Simulační program bude obsahovat nové algoritmy a vylepšení, které přinesou vyšší přesnost synchronizace času a generování taktu na straně klienta.
 - Jednou z možností je implementace sofistikovaných průměrovacích či filtračních algoritmů, které budou eliminovat kolísání zpoždění.
 - Další možností je přidání druhého generátoru hodin na stranu klienta, který nebude přímo řízen z časových korekcí vypočítaných po příchodu synchronizačních paketů, ale bude řízen fázovou smyčkou. Fázová smyčka by mohla porovnávat rozdíl mezi časem obou vnitřních hodin a jemně by korigovala výsledný čas na druhých hodinách. Využití dvou hodin by mělo přinést vyšší stabilitu času klienta.
 - Dalším způsobem zvýšení přesnosti synchronizace je přímé doladování oscilátoru, který řídí čas klienta a generuje takt. U většiny zařízení dochází ke zpomalování či ke zrychlování běhu času klienta a možnost jemného doladování oscilátoru přináší vysokou přesnost zejména z pohledu dlouhodobé stability času a generování taktu. Cílem je využití paketové sítě pro synchronizaci s následnou možností odvození taktu pro ostatní zařízení.

Kapitola 4

Návrh a simulace synchronizačního algoritmu

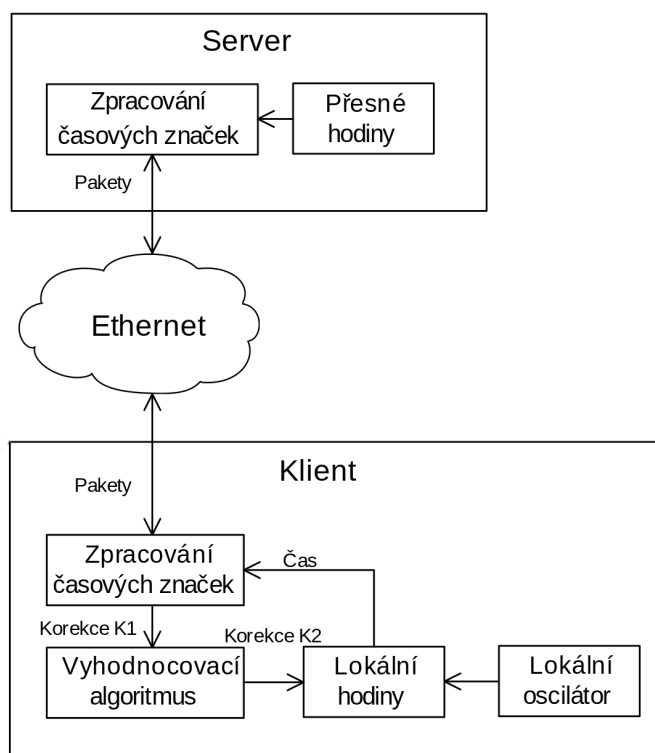
Principy a funkce synchronizačních protokolů byly vysvětleny v předchozích kapitolách. Tato kapitola se věnuje simulaci synchronizačního algoritmu tak, jak ho využívají jednotlivé synchronizační protokoly. Jedná se o výměnu časových zpráv a získání čtyřech časových značek, ze kterých určíme výslednou korekci času hodin klienta. Tento postup je popsán pro NTP protokol na obrázku 2.2 a pro PTP na obrázku 2.6 a je velice podobný. Jak bylo uvedeno, zásadní vliv na přesnost synchronizace času a generování taktu má rozdílné zpoždění v různých směrech přenosu dat po paketové síti a proměnlivost tohoto zpoždění.

4.1 Model synchronizačních obvodů - aktuální stav

Úkolem první části je vytvoření simulačního programu, který bude odpovídat reálnému chování synchronizačních protokolů v síti. Vstupní parametry, které budeme zadávat, budou ovlivňovat jednotlivé vlastnosti Ethernet sítě. Přes tuto síť bude probíhat komunikace mezi klientem a serverem. Základní blokové schéma, které zobrazuje strukturu serveru a klienta je zobrazen na obrázku 4.1.

Strana serveru (hlavního poskytovatele času) je poměrně jednoduchá. Ať už se jedná o NTP server nebo PTP server, základem je přesný čas, který musí splňovat určitou přesnost a stabilitu. Tento čas je předáván do jednotky „Zpracování časových značek“, která se stará o komunikaci s klienty a poskytuje jim přesný čas. Přenos paketů probíhá přes paketovou síť. Dnes je nejvíce rozšířena síť Ethernet. Zde může být zastoupen různý počet zařízení, což záleží na vzdálenosti mezi serverem a klientem. U PTP se předpokládá vzdálenost mnohem menší s adekvátním hardwarovým vybavením, aby bylo možné využít vyšší přesnosti synchronizace popsané v kapitole 2.6.2.

V případě klienta je situace složitější, protože na straně klienta musí být prováděno vyhodnocení, zda vypočtená korekce času je správná a o kolik se má upravit čas klienta. Hlavně u NTP protokolu jsou implementovány různé zpřesňující algoritmy a korekce času není prováděna ihned po výpočtu první korekce. Většinou je vypočítáno několik korekcí



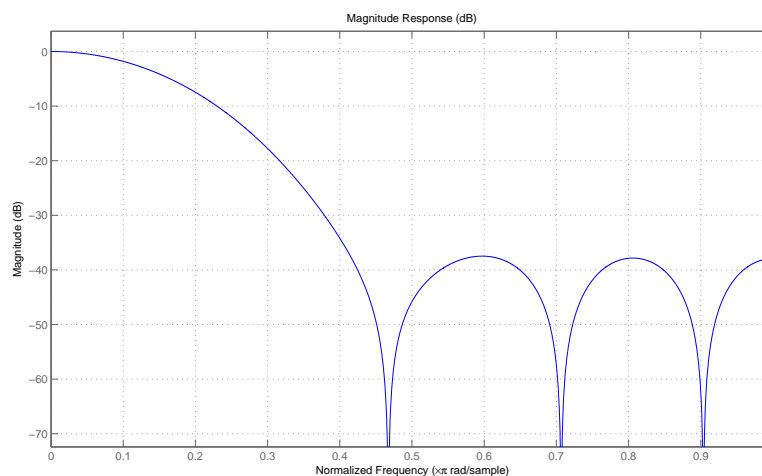
Obrázek 4.1: Blokové schéma synchronizace času

času, které se určitým způsobem průměrují, aby byla určena jedna přesnější korekce času klienta. Po každém příjmu synchronizačního paketu je vypočítán časový rozdíl klienta a serveru podle vzorce 2.4 a tento výsledek je dále zpracováván vyhodnocovacím algoritmem, který určí výslednou korekci hodin klienta. Dále klient obsahuje už jen hodiny, které jsou řízeny lokálním oscilátorem. Přesnost a stabilita lokálního oscilátoru je mnohem menší než u synchronizačních serverů, a proto může docházet ke zpoždování či ke zrychlování času klienta. Vyhodnocovací algoritmus může fungovat různými způsoby, a proto se mu budeme věnovat v následující podkapitole podrobněji.

4.1.1 Vyhodnocovací algoritmus klienta

Při vyhodnocení jednotlivých časových rozdílů serveru a klienta a určení výsledné korekce klienta je nutné určit průměrnou hodnotu, která se musí co nejvíce blížit přesné korekci hodin. Jako první vyhodnocovací algoritmus se nabízí obyčejná průměrná hodnota z několika přijatých časových rozdílů. Zde může být problém s tím, že budeme čekat než získáme potřebný počet hodnot. Jako výhodnější algoritmus se jeví využití filtrů. Existují různé druhy filtrů a každý filtr může mít jiný řád. Jako základní filtr byl použit FIR filtr (Finite Impulse Response) s řádem 10. Amplitudová charakteristika filtru je zobrazena na obrázku 4.2. Jako vstupní hodnoty pro filtr jsou použity časové korekce K1 vypočítané z přijatých paketů.

Výchozí parametry algoritmu pro vyhodnocování časové korekce byly stanoveny experimentálně. Při návrhu jsem zvolil dolní propust s mezním kmitočtem propustného pásma 0,03 Hz a vzorkovacím kmitočtem 1 Hz. Po průchodu hodnot filtrem jsou výsledné hodnoty ještě vyděleny číslem 5, aby velikost úpravy lokálních hodin byla pozvolná a aby nedošlo k rozkmitání celého systému. Hodnota 5 byla zvolena s ohledem na dostatečnou rychlost úpravy času lokálních hodin klienta, ale zároveň i přesnost času. Pokud zvolíme vyšší hodnotu (např. 10) budou výsledné hodnoty korekcí K2 po vydělení menší a úprava času hodin bude pozvolnější. V případě malé hodnoty máme naopak rychlý systém, který se v případě změny dokáže rychle přizpůsobit, ale tento systém je mnohem náchylnější na proměnlivé zpoždění v síti a může dojít i k nestabilitě systému. Volba parametru je závislá na požadavcích na systém a většinou se volí kompromis mezi rychlostí a přesností systému.

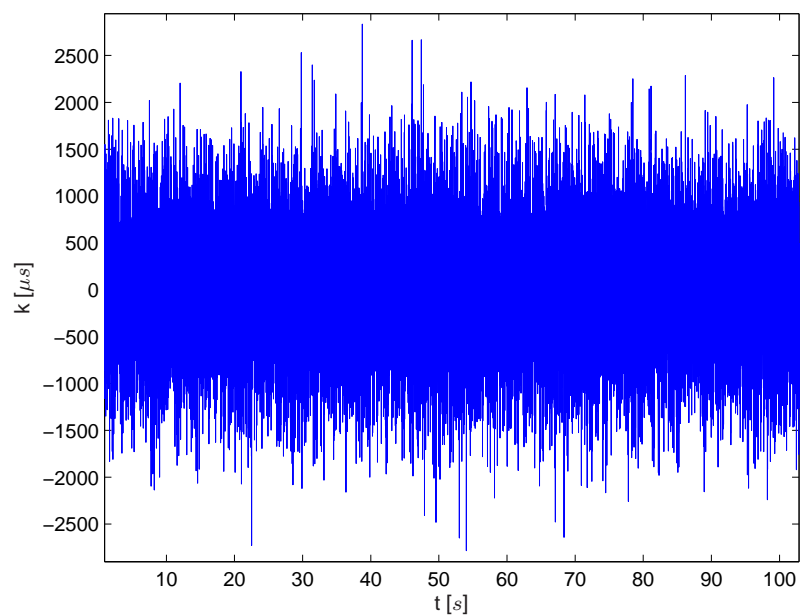
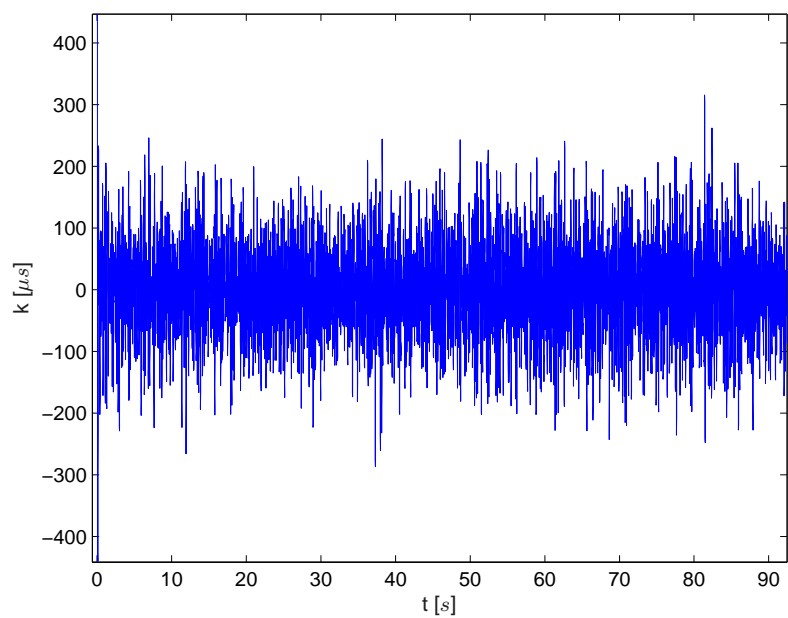


Obrázek 4.2: Fitr FIR s řádem 10

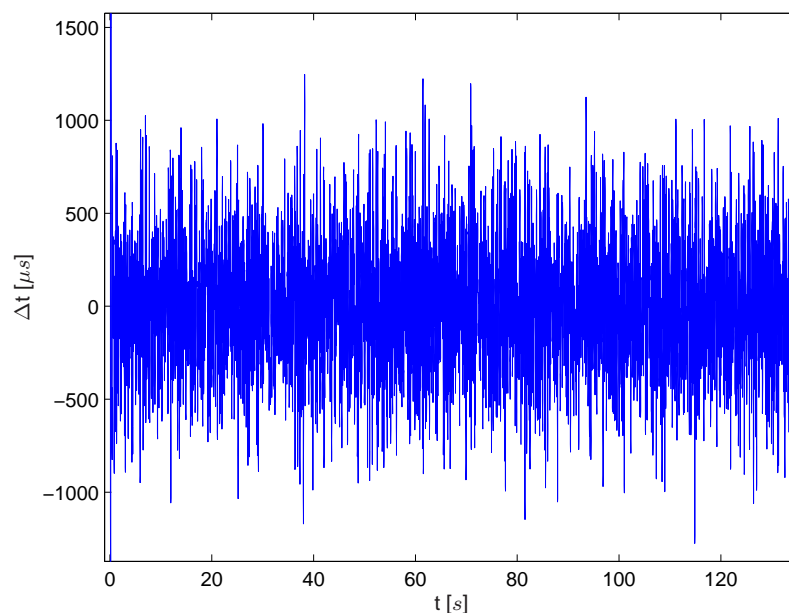
Bylo provedeno několik simulací s různými vstupními podmínkami. Vstupní veličiny definují chování Ethernetu. Při každé simulaci nastavujeme střední hodnotu zpoždění paketu v síti a dále k této hodnotě přičítáme určitý rozptyl. Byla provedena simulace a následně i měření s emulátorem sítě pro střední hodnotu zpoždění 3 ms a 10 ms a s rozptylem 1, 2 a 3 ms.

Jako příklad zde uvedu odsimulované hodnoty při nastavení střední hodnoty zpoždění sítě 3 ms a rozptylu hodnot do maximální velikosti ± 1 ms. Obrázek 4.3 zobrazuje korekce času klienta vypočtené z přijatých paketů (časových razítek). Z obrázku je vidět, že rozptyl zpoždění paketů v různých směrech průchodu sítí způsobí podobný rozptyl nepřesností vypočítaných korekcí. Samozřejmě největší četnost hodnot korekcí je do 1 ms, ale lze najít i výsledné korekce, které přesahují hodnotu 3 ms.

Korekce vypočtené z přijatých paketů K1 dále vstupují do filtru. Výstupní hodnoty filtru jsou znormovány (vyděleny 5). Výsledné korekce K2, které jsou použity k úpravě hodin klienta, jsou zobrazeny na obrázku 4.4 a jsou výrazněji nižší než vstupní korekce. Hodnoty korekcí času lokálních hodin jsou přibližně od - 200 do 200 μs .

Obrázek 4.3: Korekce K_1 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 msObrázek 4.4: Korekce K_2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

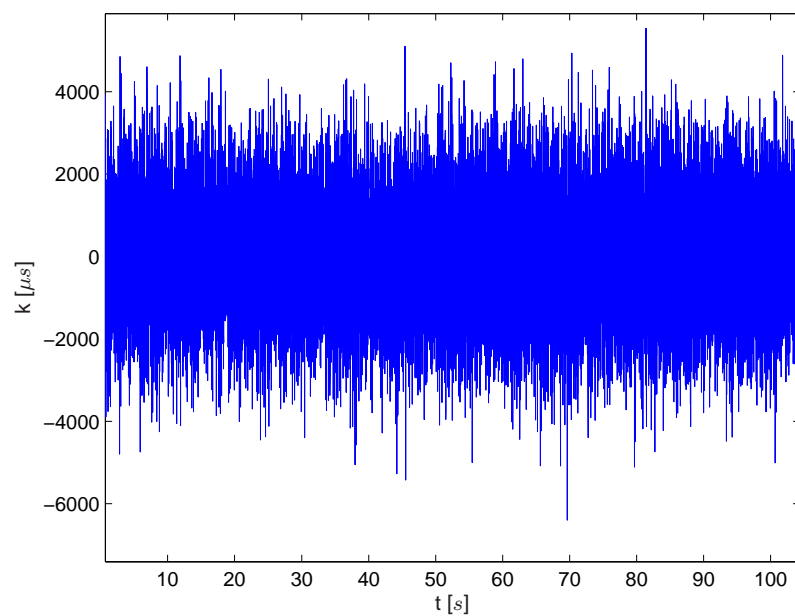
Jakým způsobem tato korekce ovlivní výslednou přesnost času klienta je zobrazeno na obrázku 4.5. Je patrné, že výsledná přesnost synchronizace času se pohybuje v rozmezí do ± 1 ms. Výsledek přesnosti přibližně odpovídá velikosti rozptylu zpoždění paketů v paketové síti, který byl v první simulaci zvolen 1 ms.



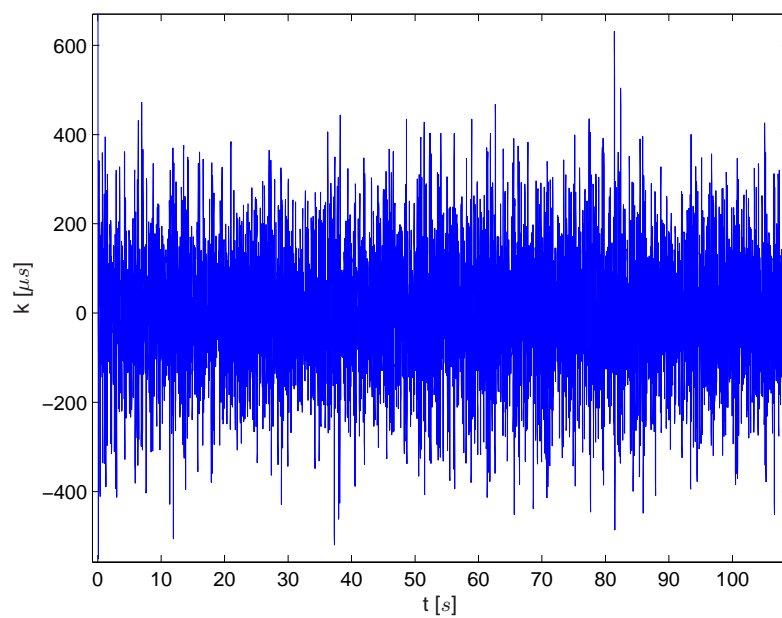
Obrázek 4.5: Odchylka času klienta od času serveru v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

Druhá simulace byla provedena s odlišnými parametry sítě. Střední hodnota zpoždění paketů v síti byla ponechána na 3 ms, ale rozptyl zpoždění, který se přičítá ke střední hodnotě byl zvětšen na 2 ms. Tedy zpoždění paketu v jednom směru se může pohybovat od 1 ms do 5 ms. Toto zvětšení rozptylu by mělo mít za následek zhoršení přesnosti synchronizace času na straně klienta.

Obrázek 4.6 zobrazuje korekci času K1 vypočítanou z časových razítek NTP paketů. Obrázek 4.7 dále zobrazuje vyfiltrovanou korekci K2, která slouží k úpravě času klienta. Výsledné korekce v porovnání s předešlou simulací jsou přibližně dvakrát větší, což odpovídá předpokladu. **Rozptyl paketů přímo ovlivňuje výslednou přesnost synchronizace času klienta.**

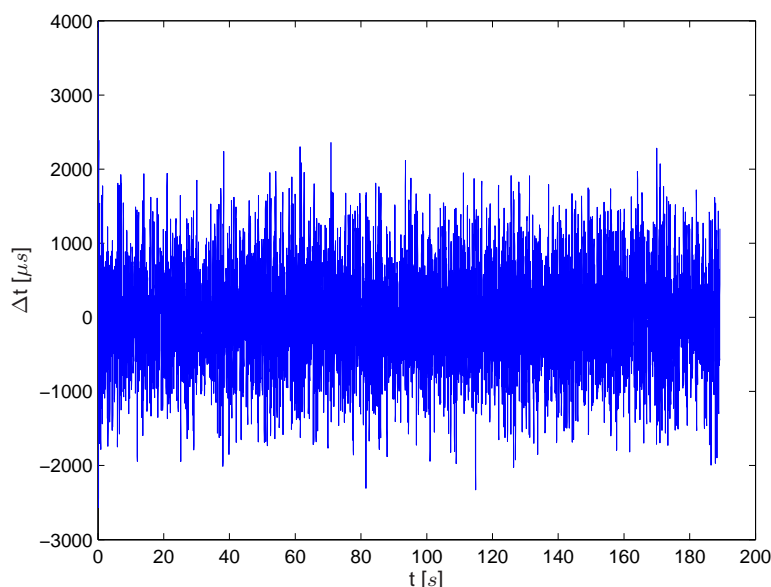


Obrázek 4.6: Korekce K_1 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms



Obrázek 4.7: Korekce K_2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms

Rozdíl časů klienta a serveru zobrazuje obrázek 4.8. Výsledná přesnost synchronizace času klienta je přibližně dvakrát horší a rozdíl časů dosahuje hodnot 2 ms.



Obrázek 4.8: Odchylka času klienta od času serveru v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms

Zpoždění sítě		Výsledná přesnost synchronizace			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	5,5e-6	3,5e-4	-1,3e-3	1,5e-3
3e-3	2e-3	9,5e-6	6,6e-4	-2,3e-3	2,4e-3
3e-3	3e-3	-6,8e-6	9,2e-4	-3,3e-3	3,6e-3
1e-2	1e-3	2,6e-6	3,4e-4	-1,2e-3	1,2e-3
1e-2	2e-3	5,1e-6	6,9e-4	-2,3e-3	2,5e-3
1e-2	3e-3	9,9e-6	1,1e-3	-3,8e-3	3,7e-3

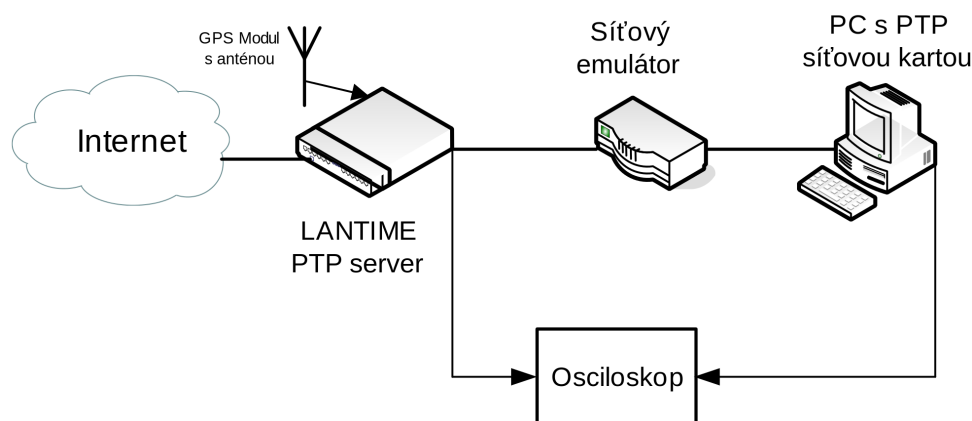
Tabulka 4.1: Výsledky simulací při různých podmínkách nastavení sítě

Simulací bylo provedeno několik i s jinými středními hodnotami zpoždění. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.1. Statistické hodnoty byly vypočítány až po stabilizaci hodin klienta. Vliv změny střední hodnoty zpoždění paketů v simulované síti na výslednou přesnost synchronizace je zanedbatelný. Hlavním faktorem, který má vliv na přesnost synchronizace času klienta, je proměnlivé zpoždění paketů v jednotlivých směrech přenosu. **Čím větší rozptyl zpoždění, tím horší přesnost synchronizace času klienta.**

4.2 Měření synchronizace v reálném prostředí

Předchozí podkapitola se zabývala simulací funkce synchronizačního protokolu. V této kapitole se pokusíme vytvořit stejné podmínky, jaké byly použity při simulaci a provést reálné měření v reálné síti. Abychom mohli upravovat zpoždění jednotlivých paketů v reálné síti, potřebujeme zařízení, které bude změnu zpoždění umožňovat. Byl použit síťový emulátor Simena [10], který byl zapojen mezi synchronizační kartu a synchronizační server.

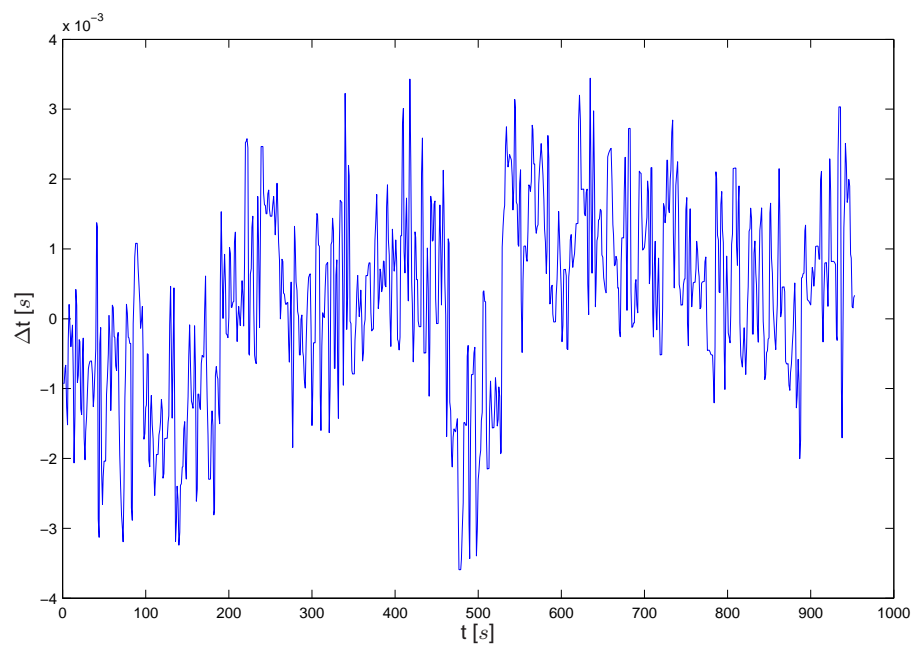
Jako synchronizační server byl využit PTP server LANTIME M600 a jako síťová karta byla využita karta PTP270PEX stejně jako při měření PTP sítě popsané v kapitole 2.6.2. Základní princip synchronizace času v síti PTP i NTP je stejný, a proto můžeme naměřené výsledky použít pro porovnání s předešlými simulacemi. Blokové schéma způsobu měření je uvedeno na obrázku 4.9.



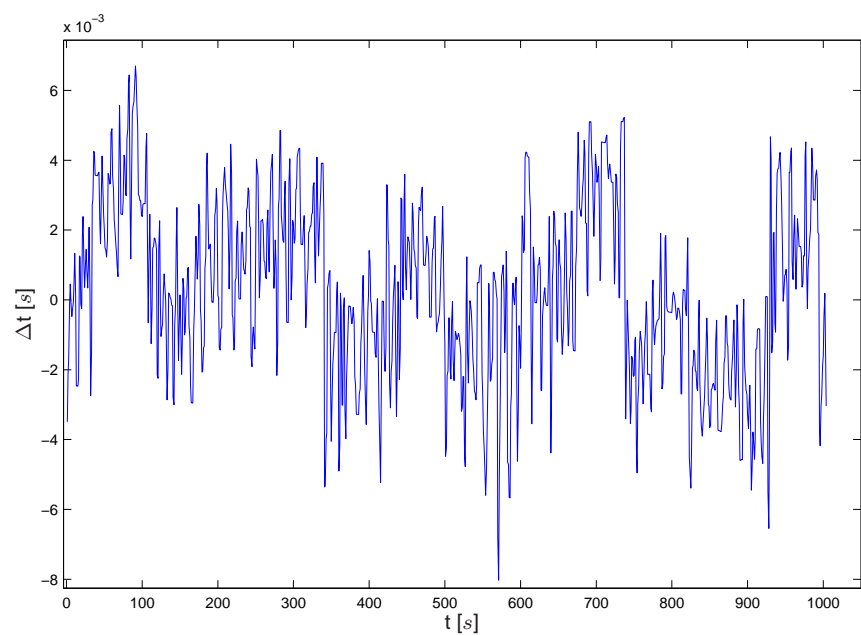
Obrázek 4.9: Blokové schéma měření s emulátorem sítě

Síťový emulátor Simena má několik síťových portů a umožňuje nastavovat jednotlivá zpoždění mezi porty. Je možné nastavit konstantní zpoždění a nebo přidat další variabilní složku, což v našem případě potřebujeme. Emulátor umožňuje definovat, jak velká variabilní složka (rozptyl hodnot zpoždění) se má generovat a dále je možné zvolit, podle jakého rozložení se budou generovat. Bylo zvoleno normální rozložení, které odpovídá skutečnému chování v paketových sítích (viz. analýza zpoždění v kapitole 2.6.1). Jednotlivá zpoždění jsme nastavovali stejně jako u předchozích simulací.

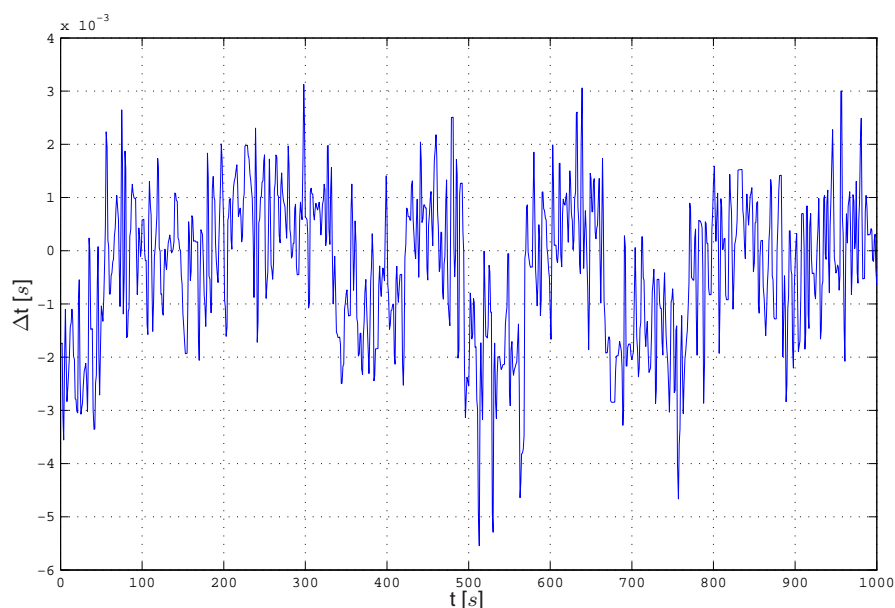
Výsledkem prvního měření, kdy emulátor měl nastavenou střední hodnotu zpoždění na 3 ms a rozptyl hodnot byl nastaven na 1 ms, je přesnost času klienta zobrazena na obrázku 4.10. Výsledný rozdíl času klienta a serveru dosahuje hodnot až 3 ms, což je horší výsledek než za stejných podmínek při simulaci. V případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms (obrázek 4.11) je také nepřesnost synchronizace času větší. Pravděpodobně to bude dáno tím, že síťová karta s PTP protokolem nevyužívá žádných statistických výpočtů ke zlepšení přesnosti. Z principu PTP protokolu se provádí synchronizace jen mezi dvěma body sítě, a proto se nepředpokládá velké kolísání zpoždění paketů. Z toho vyplývá, že využití filtračních algoritmů zlepšuje výslednou přesnost synchronizace.



Obrázek 4.10: Odchylka času klienta od času serveru v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms



Obrázek 4.11: Odchylka času klienta od času serveru v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms



Obrázek 4.12: Odchyloka času klienta od času serveru v případě střední hodnoty zpoždění 10 ms a rozptylu 1 ms

U měření (obr. 4.12), kde byla nastavena střední hodnota zpoždění na 10 ms a rozptyl na 1 ms, jsou výsledky podobné předchozímu měření se střední hodnotou 3 ms a rozptylem 1 ms. To potvrzuje předpoklad, že přesnost synchronizace času závisí na variabilní složce zpoždění. Veškerá jednotlivá měření shrnuje tabulka 4.2, kde jsou uvedeny jednotlivé výsledky. Tabulka obsahuje také měření, kde bylo nastaveno nulové zpoždění. Emulátor sítě i při tomto nastavení ovlivňuje procházející pakety a tím pádem i výslednou přesnost synchronizace času klienta.

Zpoždění dané emulátorem		Výsledná přesnost synchronizace			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	2,3e-4	1,3e-3	-3,6e-3	3,4e-3
3e-3	2e-3	2,6e-4	2,5e-3	-8,0e-3	6,7e-3
1e-2	1e-3	-3,1e-4	1,3e-3	-5,5e-3	3,2e-3
1e-2	3e-3	1,3e-3	3,7e-3	-9,9e-3	9,9e-3
0	0	9,8e-5	1,2e-4	-1,6e-4	3,5e-4

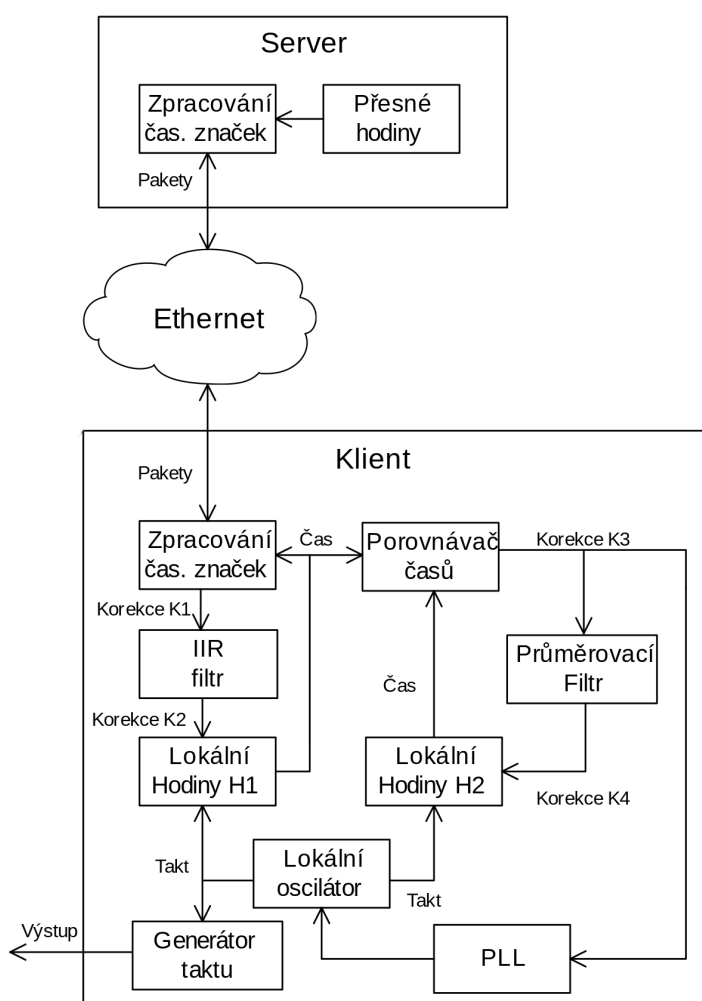
Tabulka 4.2: Výsledky měření s emulátorem sítě při různých podmínkách nastavení sítě

Výsledná přesnost synchronizace je poměrně nízká a je závislá na variabilitě zpoždění paketů. PTP protokol je navržen pro přesnou synchronizaci a pravděpodobně nepočítá s

velkým variabilním zpožděním paketů v síti. Další část práce se zabývá možnostmi vylepšení výsledné přesnosti synchronizace času na straně klienta.

4.3 Návrh na zlepšení synchronizace

Kapitola 4.1 a 4.2 se věnovala simulaci a měření v reálné síti. Cílem této kapitoly je navrhnout vylepšený synchronizační algoritmus tak, aby došlo ke zvýšení přesnosti času na straně klienta. Jednou z metod je využití optimalizovaného filtru, aby byla přesnější korekce času klienta. Další možností je využití několika hodin na straně klienta, které se budou vzájemně dolaďovat. Bylo navrženo rozšíření standardního blokového schématu uvedeného na obrázku 4.1 a nové blokové schéma je uvedeno na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13: Rozšířené blokové schéma synchronizace času

Z blokového schématu je patrné značné rozšíření strany klienta. Došlo k přidání druhých lokálních hodin označených jako H2 a k nim příslušejících obvodů. Smyčka lokálních hodin

H1 zůstala stejná jako u základního stavu (kap. 4.1). Při hledání vhodného filtru je potřeba se zabývat stabilitou celého obvodu. Stabilita a jednotlivá rizika jsou popsána v kapitole 4.3.1, kde výsledkem bylo nahrazení FIR filtru IIR filtrem, který dosahoval lepších výsledků. Vlastnostem a nastavení filtru se věnuje podrobněji kapitola 4.3.1.2.

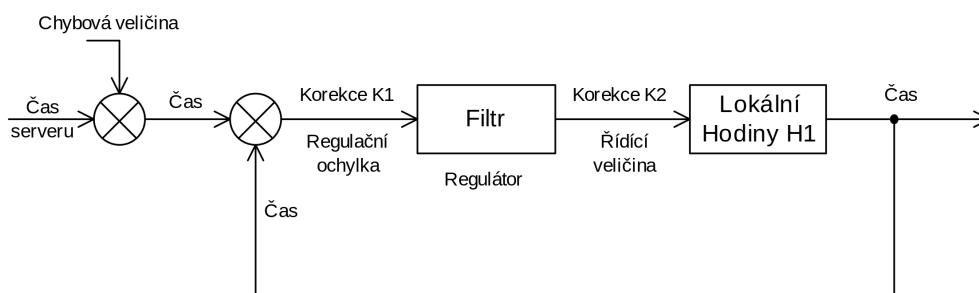
Za účelem vyšší přesnosti synchronizace času je výsledný čas hodin H1 porovnáván s časem hodin H2. Čas lokálních hodin H2 je zpřesňován pomocí korekcí K4, které jsou vypočítávány s menší frekvencí než v případě hodin H1, které jsou řízeny korekcí K2. O určení výsledné korekce K4 se stará průměrovací filtr, který shromažďuje časové rozdíly jednotlivých hodin H1 a H2 (Korekce K3).

Další a zároveň poslední smyčka se stará o doladování lokálního oscilátoru a v blokovém schématu je označena jako PLL. Pokud lokální oscilátor není zcela přesný, bude se čas klienta a serveru postupně rozcházet a výsledné korekce jednotlivých hodin budou stále kladné či záporné. Stabilita lokálního oscilátoru je velice důležitá i v případě využití taktovacího signálu pro další zařízení a vytvoření přesného generátoru taktu. Fázová smyčka lokálního oscilátoru má za úkol určit výslednou nepřesnost z korekcí K3 a doladit lokální oscilátor na co nejpřesnější hodnotu z pohledu dlouhodobé stability.

Jednotlivým blokům a výsledkům přesnosti synchronizace času klienta se věnují následující části této kapitoly.

4.3.1 Návrh vhodného filtru - stabilita obvodu

Při návrhu vhodného filtru jsem narazil na problém se stabilitou celého obvodu. Je potřeba si uvědomit, že část s filtrem a lokálními hodinami H1, představuje uzavřenou smyčku. Blokové schéma smyčky je uvedeno na následujícím obrázku 4.14. Z obrázku je patrné, že filtr v této smyčce pracuje jako regulátor, který vyhodnocuje odchylky časů a pomocí korekce K2 řídí lokální hodiny H1. Problematiku řízení a stability jednotlivých obvodů můžeme najít detailně rozpracovanou například v knize [11].



Obrázek 4.14: Regulační smyčka

Při řešení regulačního obvodu uvažujeme jako vstupní veličinu čas (označený jako W) a výstupní veličinu regulačního obvodu také čas (označený jako Y). Z poměru mezi žádanou veličinou Y a regulovanou veličinou W můžeme určit přenos řízení (vztah 4.1).

$$G_W = \frac{Y}{W} = \frac{G_F \cdot G_H}{1 + G_F \cdot G_H} \quad (4.1)$$

kde G_W je přenos řízení, W je vstupní veličina (čas), Y je výstupní veličina (čas), G_F je přenos filtru (regulátoru), G_H je přenos hodin (regulované soustavy).

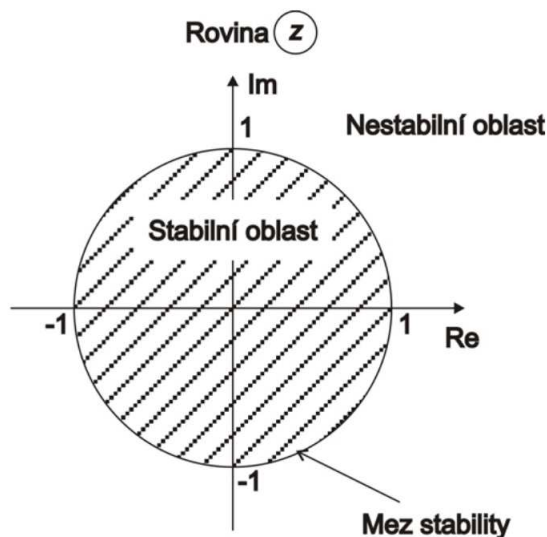
Součin všech členů ve smyčce představuje přenos otevřeného regulačního obvodu (ORO) a označuje se jako G_O (vztah 4.2).

$$G_O = G_F \cdot G_H \quad (4.2)$$

Charakteristický mnohočlen $1 + G_O$ představuje výraz ve jmenovateli u přenosu řízení a vlastně i u všech ostatních přenosů regulačního obvodu a je velice důležitý pro stabilitu obvodu. Pokud charakteristický mnohočlen položíme rovný 0 získáme **charakteristickou rovnici** (4.3).

$$1 + G_O = 0 \quad (4.3)$$

Při vyšetřování stability diskretních obvodu je potřeba vycházet z charakteristického mnohočlenu, resp. charakteristické rovnice. Pro diskretní regulační obvod se používá Z-transformace. **Diskretní RO je stabilní právě tehdy, když velikost všech kořenů charakteristického mnohočlenu bude menší než 1** [30].

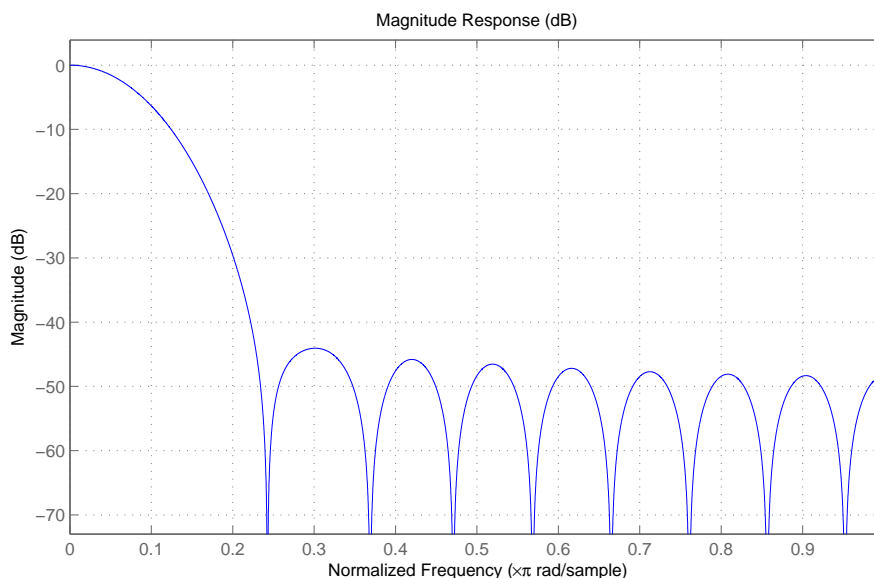


Obrázek 4.15: Oblast stability diskretních regulačních obvodů

V mém případě je stabilita obvodu závislá hlavně na přenosu regulátoru (filtru) a přenos hodin lze považovat za jednotkový. Proto se zaměřím na vyšetření filtru. Dalším hlavním aspektem, na který dále narazíme, je zpoždění jednotlivých druhů filtrů.

4.3.1.1 Vlastnosti a výsledky FIR filtru

FIR filtry se mohou zdát jako ideální pro realizaci regulátoru, protože jsou vždy stabilní a všechny póly mají umístěny v nule.



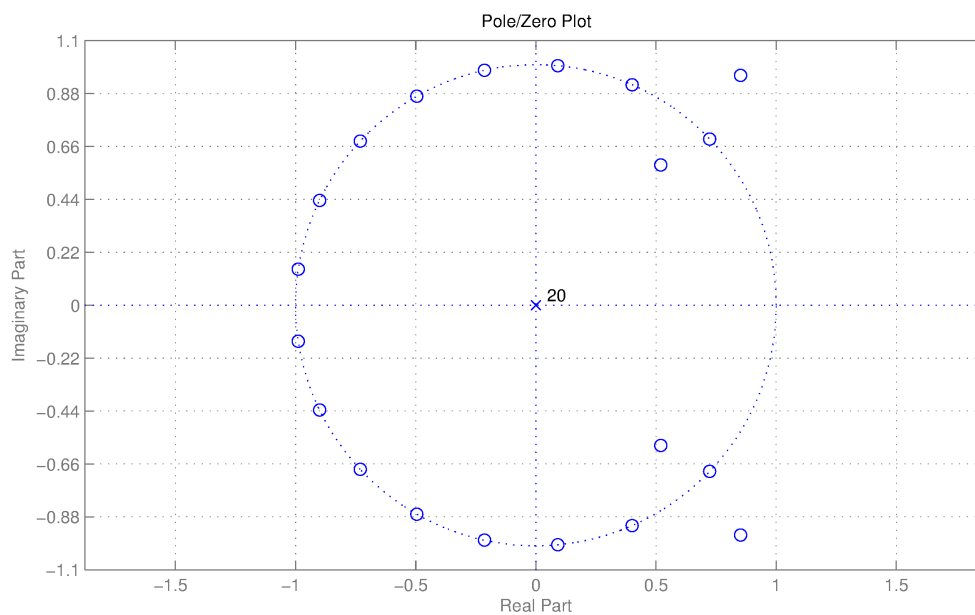
Obrázek 4.16: Amplitudová charakterist. filtru FIR řádu 20 s mezním kmitočtem 0,03 Hz

Byl proveden návrh filtru FIR stejného typu, jako byl uveden v předchozí kapitole na obrázku 4.2, ale došlo ke zvýšení stupně filtru na 20. Kmitočet propustného pásma FIR filtru byl ponechán na 0,03 Hz a vzorkovací kmitočet 1 Hz. Provedeme návrh filtru a získáme přenosovou funkci (4.4). Získaná přenosová funkce má následující tvar:

$$\begin{aligned}
 H[z] = \frac{Y[z]}{X[z]} = & 0,004085 + 0,006067z^{-1} + 0,01124z^{-2} + 0,02003z^{-3} + \\
 & 0,03221z^{-4} + 0,04691z^{-5} + 0,06268z^{-6} + 0,07771z^{-7} + \\
 & 0,09014z^{-8} + 0,09834z^{-9} + 0,1012z^{-10} + 0,09834z^{-11} + \\
 & 0,09014z^{-12} + 0,07771z^{-13} + 0,06268z^{-14} + 0,04691z^{-15} + 0,03221z^{-16} + \\
 & 0,02003z^{-17} + 0,01124z^{-18} + 0,006067z^{-19} + 0,004085z^{-20} \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

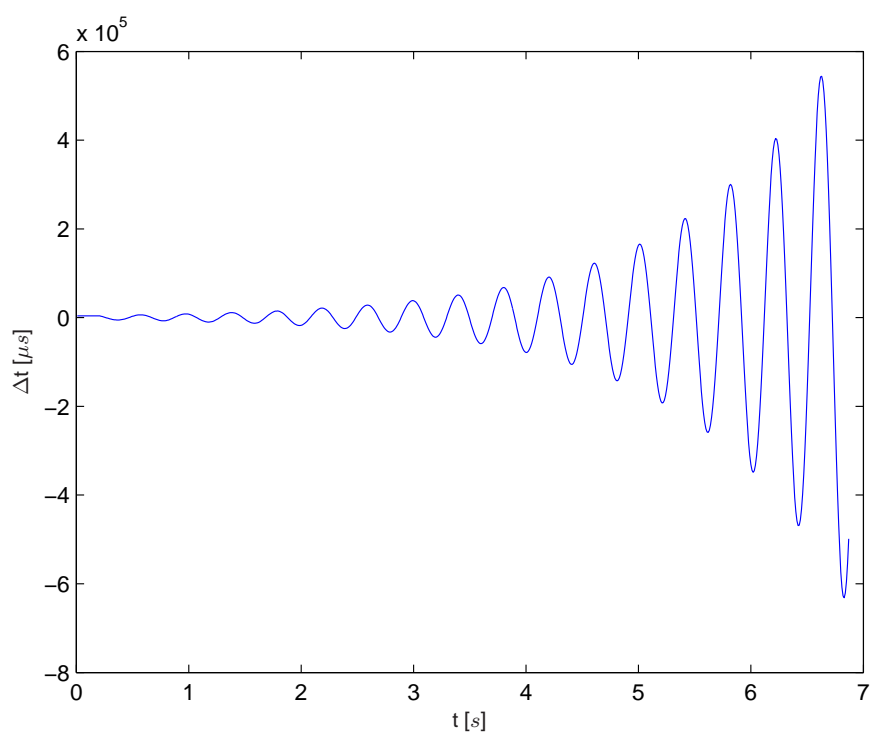
Amplitudová charakteristika filtru je zobrazena na obrázku 4.16 a zobrazení nul a pólů je uvedeno na obrázku 4.17. Z amplitudové charakteristiky je zřejmé, že se zvětšila strmota daného filtru. Stabilita filtru je také vyhovující, všechny póly jsou v nule.

Podívejme se na výsledek synchronizace času v navrženém systému (obrázek 4.18). Z obrázku je patrné rozkmitání celého systému. Důvodem je velké zpoždění filtru, které způsobuje velmi pomalou reakci výstupní veličiny na vstupní (překmitnutí změny času hodin do větších odchylek s opačným znaménkem než byla původní chyba). Důvodem



Obrázek 4.17: Zobrazení nul a pólů filtru FIR řádu 20 s mezním kmitočtem 0,03 Hz

je i chyba daná zpožděním sítě, která je na blokovém schématu 4.14 označena jako chybová veličina. **Z toho vyplývá, že celý systém je potřeba řešit jako systém se zpožděním a jedním z hlavních požadavků je minimalizace zpoždění.** Samotná stabilita filtru nestačí. Proto je v následující sekci uveden návrh realizace pomocí IIR filtru.

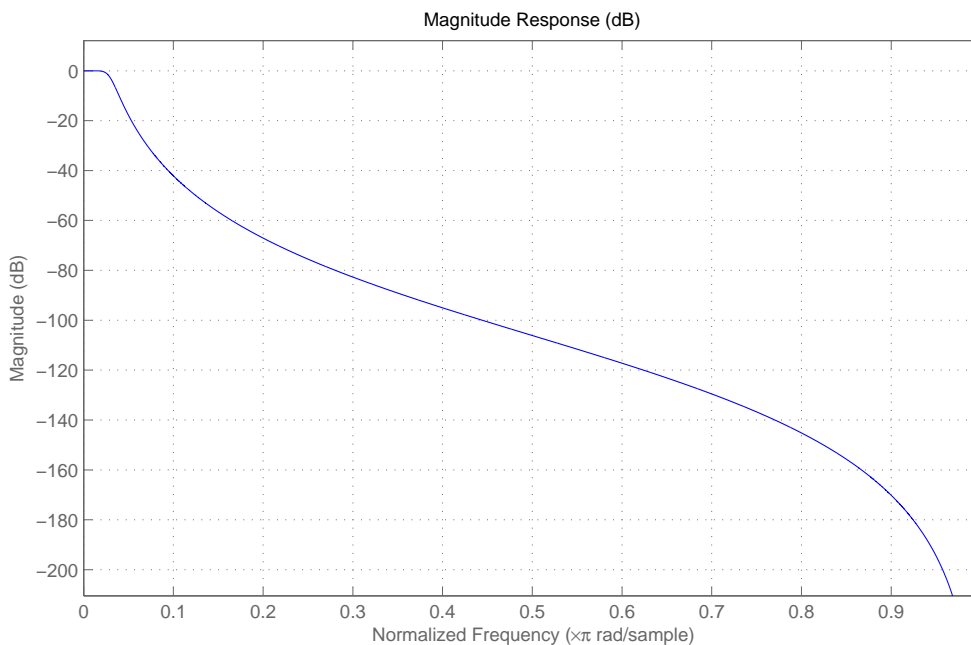


Obrázek 4.18: Výsledek synchronizace času klienta s filtrem FIR řád 20

4.3.1.2 Vlastnosti a výsledky IIR filtru

IIR filtry mají oproti FIR filtrům mnohem větší strmost při nižším stupni filtru. To je velice výhodné, jelikož čím nižší stupeň filtru, tím nižší je i zpoždění celého filtru. V případě návrhu IIR filtru je potřeba větší kontroly návrhu, protože IIR filtr může být nestabilní, zatímco FIR filtr je vždy stabilní.

Při návrhu IIR filtru byla zvolena dolní propust s mezním kmitočtem propustného pásma 0,03 Hz a vzorkovacím kmitočtem 1 Hz (stejně jako u FIR filtru) a byla využita Butterworthova aproximace. Byl použit IIR filtr řádu 4, který má dostatečnou strmost a dostatečně rychlou odezvu v regulační smyčce. Amplitudová charakteristika IIR filtru řádu 4 je uvedena na obrázku 4.19.

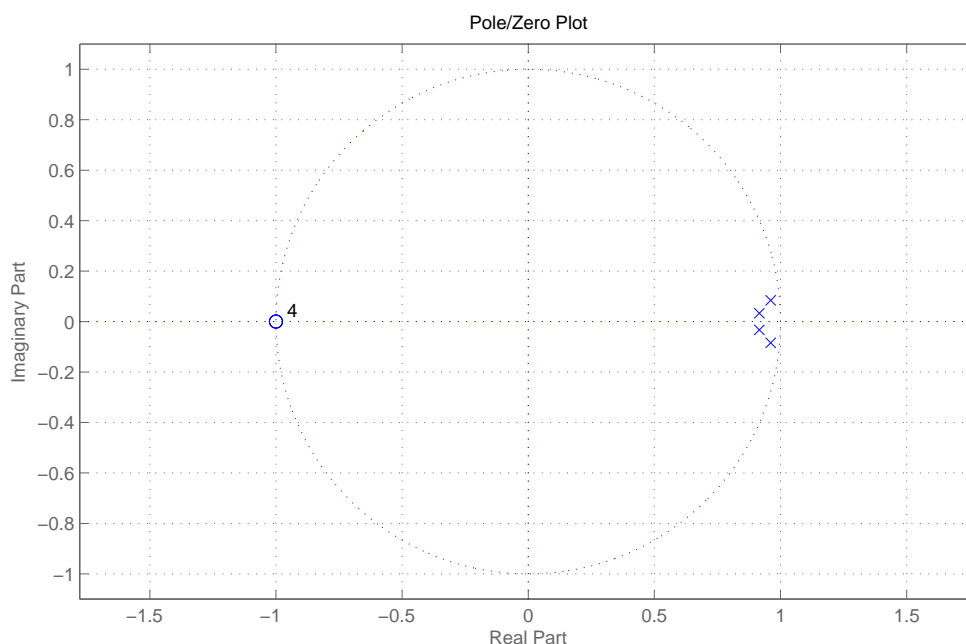


Obrázek 4.19: Filtr IIR s řádem 4

Zobrazení nul a pólů je uvedeno na obrázku 4.20 a filtr IIR je stabilní (Póly označené křížkem). Přenosová funkce je dána vztahem 4.5.

$$H[z] = \frac{4,373e^{-6}z^{-4} + 1,749e^{-1}z^{-3} + 2,624e^{-5}z^{-2} + 1,749e^{-5}z^{-3} + 4,373e^{-6}z^{-4}}{1 - 3,754z^{-1} + 5,291z^{-2} - 3,319z^{-3} + 0,7816z^{-4}} \quad (4.5)$$

V případě použití IIR filtru při synchronizaci času se systém choval korektně a k rozkmitání soustavy nedošlo. Z pohledu řešení stability zmíněného systému se zpožděním můžeme využít Nyquistovo kritérium stability [11]. Toto kritérium umožňuje ověřit stabilitu regulačního obvodu na základě kmitočtové charakteristiky. Nyquistův diagram je uveden na obrázku 4.21. Kritérium stability říká, že regulační obvod bude stabilní tehdy



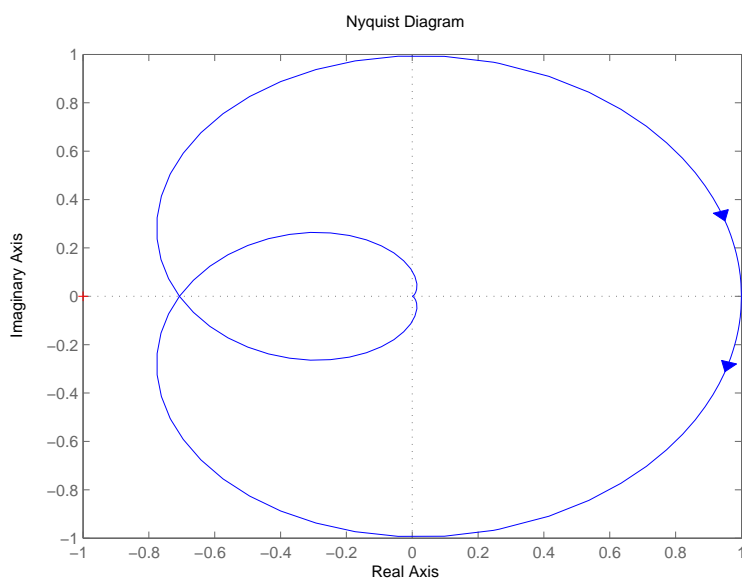
Obrázek 4.20: Zobrazení nul a pólů filtru IIR řádu 4 s mezním kmitočtem 0,03 Hz

a jen tehdy, když amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika otevřeného regulačního obvodu neobklopuje kritický bod $[-1; j0]$. Z uvedených výsledků vyplývá, že samotný systém s IIR filtrem je stabilní.

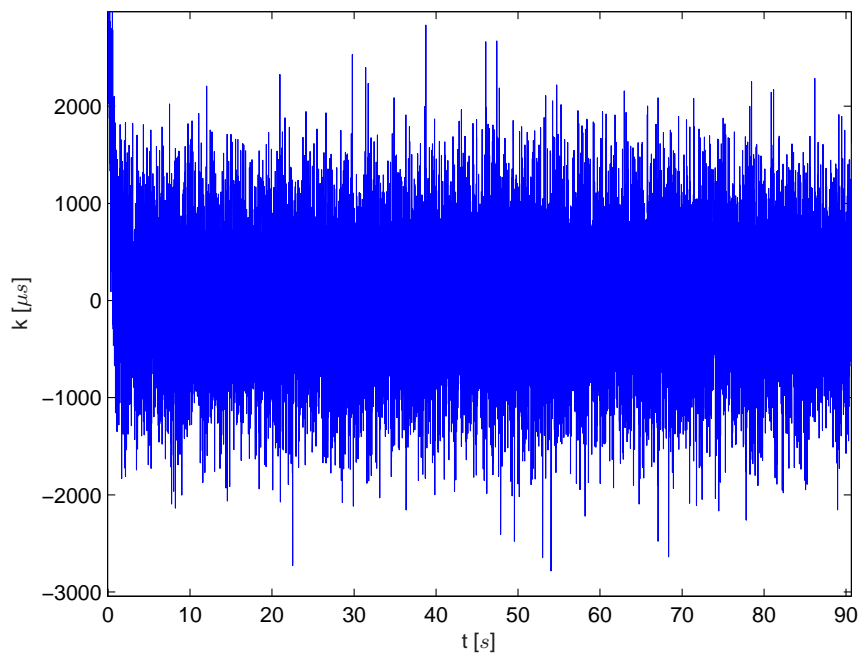
Z pohledu vstupní hodnoty filtru je ale také nutné počítat s chybovou veličinou (obr. 4.14), která zde reprezentuje nepřesnost zpoždění v reálné paketové síti. V případě správné funkce časového protokolu se bude korekce $K1$ blížit nule, ale v případě chyb (například při výpadku spojení) může dojít k nekorektním hodnotám časů (případně korekcí), které je potřeba předem odstranit. Při návrhu je proto dobré provést simulace pro různé hodnoty zpoždění sítě a ověřit si tak stabilitu systému.

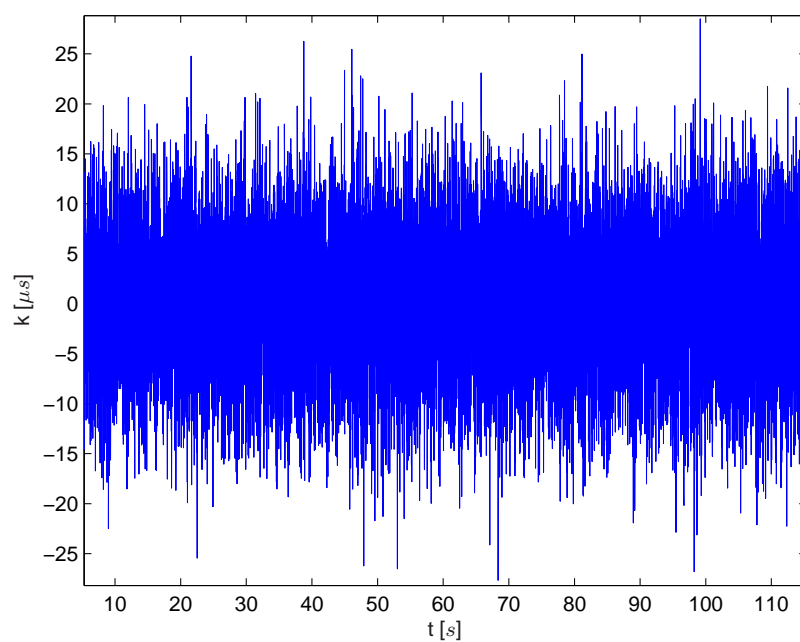
Navržené filtry byly podrobeny důkladnému testování pomocí simulací. Při každé simulaci je nastavována střední hodnota zpoždění paketů v síti a rozptyl zpoždění paketů, který je přičítán ke střední hodnotě zpoždění. Simulace byly prováděny pro střední hodnotu zpoždění 3 ms a 10 ms a s rozptylem 1, 2 a 3 ms. Výsledky jsou jako příklad uvedeny pro střední hodnotu zpoždění 3 ms s rozptylem 1 ms.

Na prvním obrázku 4.22 je zobrazen výsledek výpočtu korekce vypočítané z přijatých paketů (v blokovém schématu je označena jako $K1$). Tato korekce je následně vyhodnocována IIR filtrem. Výsledné vypočítané korekce získané po průchodu hodnot filtrem (v blokovém schématu označené jako $K2$) jsou zobrazeny na obrázku 4.23. Výsledné hodnoty korekcí v porovnání s běžným stavem, kde byl použit FIR filtr zobrazený na obrázku 4.4, jsou mnohem nižší. Jedná se přibližně o desetinásobné zmenšení hodnoty korekcí, které z IIR filtru získáváme. To má i významný vliv na výslednou přesnost synchronizace, která je uvedena na obrázku 4.24.

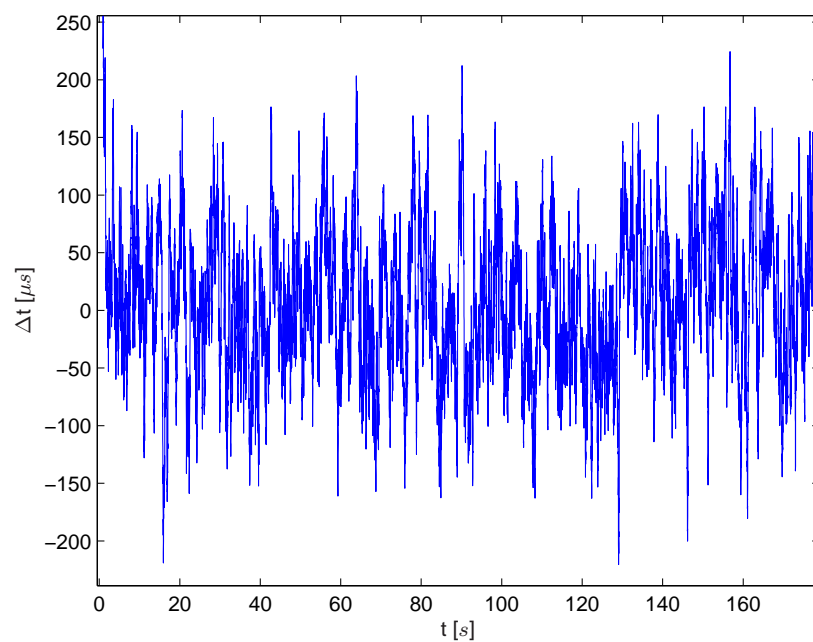


Obrázek 4.21: Nyquistův diagram pro filtr IIR s řádem 4

Obrázek 4.22: Korekce K_1 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms



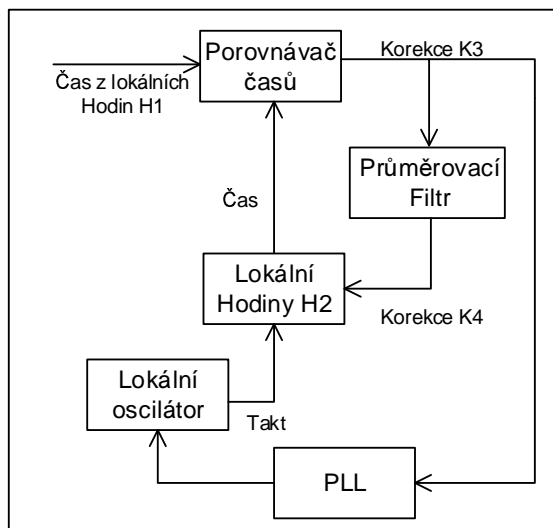
Obrázek 4.23: Korekce K_2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms



Obrázek 4.24: Odchylka času serveru od času klienta v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

4.3.2 Simulace a výsledky druhých hodin

V této podkapitole je uvedeno vylepšení výsledné synchronizace času v podobě přidání dalších hodin. Účelem těchto hodin je zamezit velkému kolísání přesnosti času, a proto bude řízení probíhat mnohem pomaleji než je tomu v případě prvních hodin. Jak je uvedeno v blokovém schématu principu synchronizace (obr. 4.13), jsou druhé hodiny nastavovány a doladovány z prvních hodin. Část blokového schématu je uvedena na obrázku 4.25.



Obrázek 4.25: Část blokového schématu s hodinami H2

Stejně jako hodiny H1 jsou i hodiny H2 řízeny stejným taktem. V reálném prostředí se používá oscilátor, který má určitou míru stability. Během simulace jsem zvolil takt 1 MHz (perioda $1 \mu\text{s}$), který jsem také definovaným způsobem na počátku zpřesnil (typicky řádově odchylka 2 Hz) a analyzoval jsem správnou funkci doladování oscilátoru. Podrobněji to bude rozepsáno dále.

Hodiny H2 se chovají stejně jako hodiny H1. Úprava času hodin je prováděna pomocí korekce K4, která vychází z průměrovacího filtru. Samozřejmě na začátku jsou hodiny H2 nastaveny přímo z hodin H1 a to po dostatečném ustálení času hodin H1. V případě simulace dojde k ustálení hodin H1 během 1 s. Cyklus synchronizace se provádí jednou za 10 ms, tedy každých 10 ms je vyslán nový dotaz na server a po zaslání odpovědi jsou vypočítány jednotlivé korekce. Výsledný čas hodin H2 a hodin H1 je porovnáván v bloku nazvaným jako Porovnávač časů. Výsledkem je rozdíl časů hodin H1 a H2. Tento rozdíl je dále propagován jako korekce K3, která vstupuje do průměrovacího filtru a také do fázového závěsu, který řídí doladování oscilátoru.

4.3.2.1 Průměrovací filtr

Průměrovací filtr slouží k ukládání hodnot jednotlivých korekcí K3 a po získání dostatečného počtu hodnot určí výslednou korekci K4 pro hodiny H2. Jelikož je potřeba

získat korekci jednou za určité delší období, nebylo možné použít žádný standardní filtr, protože stupeň filtru by byl extrémně veliký. Také by docházelo ke korekci při každé vstupní hodnotě, což je nežádoucí. Pro průměrovací filtr zavedeme obecnou veličinu δ (delta), která bude určovat počet průměrovaných vzorků. Tato δ také určuje dobu, za kterou jsou hodiny korigovány. Průměrovací filtr provádí prostý průměr hodnot, který vypočítá jednu hodnotu z δ předchozích hodnot. Hlavním cílem je zamezit nežádoucím výchytkám, které můžou negativně ovlivnit přesnost času hodin H2. Na základě provedených simulací s různou hodnotou δ , byla jako optimální hodnota zvolena hodnota 50. V případě větší hodnoty δ je potřeba si uvědomit, že tato hodnota má vliv na rychlost úpravy času hodin H2. Čím větší počet průměrovaných hodnot, tím delší bude čas potřebný k přesnému doladění hodin z chybného počátečního stavu. Proto je vhodné zachovat hodnotu δ v mezích stanovených následujícím vztahem (4.6):

$$30 \leq \delta \leq 100 \quad (4.6)$$

V závislosti na velikosti rozdílu času hodin H1 a H2 bylo zvoleno odstupňování velikostí jednotlivých výsledných korekcí K4. Samotný průměr \bar{x} rozdílu časů H1 a H2 získaných z počtu hodnot δ nelze přímo použít jako korekci K4. Důvodem je neměnicí se čas hodin H2, které se korigují jednou za delší časový úsek daný hodnotou δ . Proto je korekce K4 určována podle následujících vztahů:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{\delta} H1_i - H2_i}{\delta} \quad (4.7)$$

Výsledná korekce K4 je pro jednotlivé případy vypočítána takto:

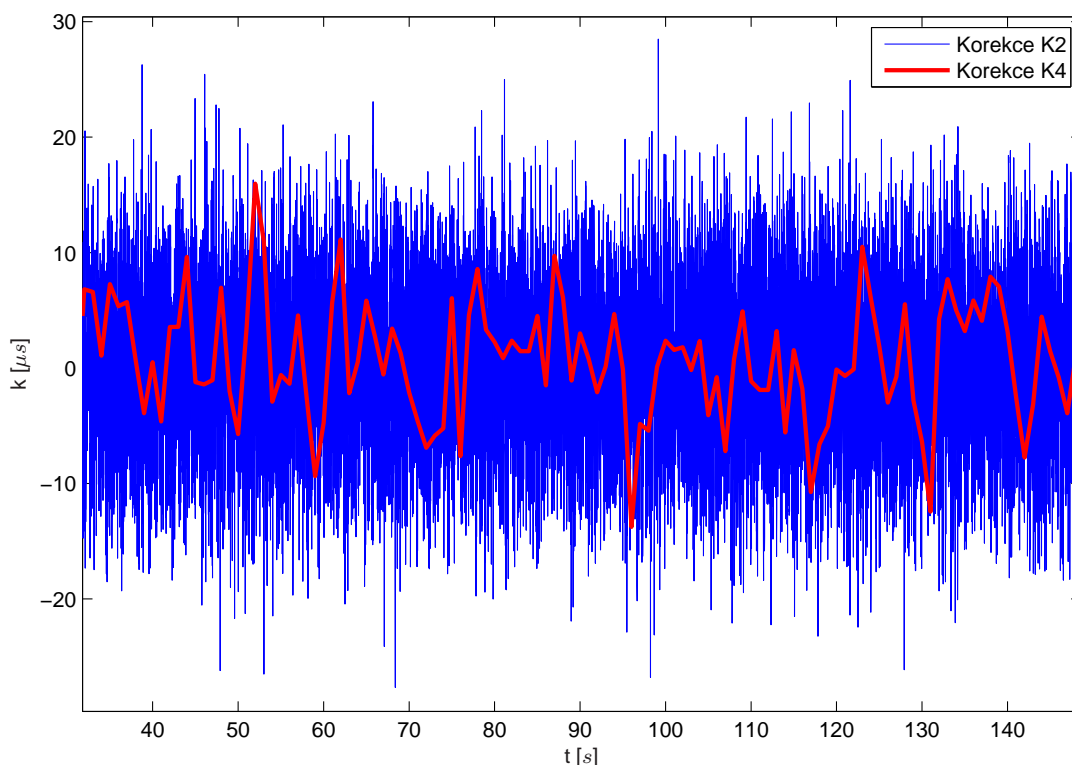
$$\text{Pokud } \bar{x} > 5\mu s \text{ nebo } \bar{x} < -5\mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} \cdot 10 \quad (4.8)$$

$$\text{Pokud } 5\mu s \geq \bar{x} > 2\mu s \text{ nebo } -5\mu s \leq \bar{x} < -2\mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} \cdot 4 \quad (4.9)$$

$$\text{Pokud } 2\mu s \geq \bar{x} > 1\mu s \text{ nebo } -2\mu s \leq \bar{x} < -1\mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} \cdot 2 \quad (4.10)$$

$$\text{Pokud } 1\mu s \geq \bar{x} \geq -1\mu s \text{ tak } K4 = \frac{\bar{x}}{\delta} \quad (4.11)$$

Skutečné hodnoty jednotlivých korekcí K4 jsou uvedeny na následujícím obrázku 4.26 společně s korekcemi K2, které jsou určovány IIR filtrem. Při porovnání je výsledná velikost korekce K4 menší a pozvolnější, což bylo hlavním cílem. To výrazným způsobem ovlivní výslednou přesnost hodin H2.

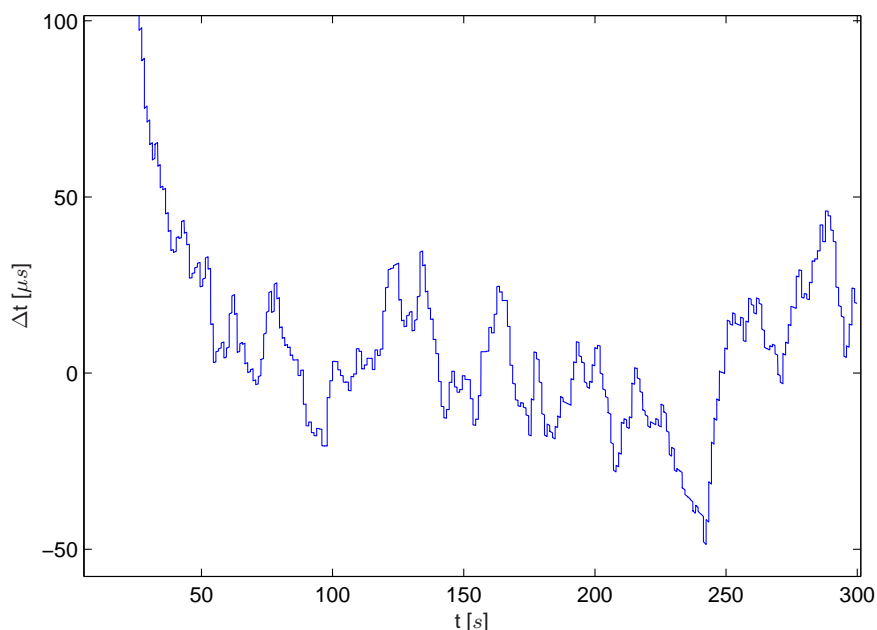


Obrázek 4.26: Výsledné korekce K4 a K2 při střední hodnotě zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

4.3.2.2 Výsledná přesnost hodin H2

Hodiny H2 jsou řízeny stejným lokálním oscilátorem jako hodiny H1, ale čas hodin H2 je upravován a zpřesňován pomocí korekcí K4 (blokové schéma na obrázku 4.25). Hodnoty korekcí K4 byly uvedeny na obrázku 4.26 v předešlé podkapitole. Tyto korekce jsou přičítány k času hodin H2 a postupně dochází ke zpřesňování času H2 tak, aby se co nejvíce blížil času serveru. Rozdíl času serveru a hodin H2 zobrazuje následující obrázek 4.27. Je zde vidět, že po stabilizaci je maximální rozdíl času mezi hodinami H2 a serverem okolo $50 \mu s$.

Pokud porovnáme tento výsledek s hodinami H1 na straně klienta (obr. 4.24) nebo pokud si hodiny H1 a H2 dáme do stejného grafu, ukáže se nám výsledný efekt zpřesnění času. Toto porovnání je uvedeno na obrázku 4.28. Modrá křivka reprezentuje rozdíl času hodin H1 a serveru, červená křivka ukazuje rozdíl času hodin H2 a serveru. Na začátku je čas hodiny H2 úmyslně posunut a je zde vidět postupné zpřesnění času hodin H2. Hodiny H1 jsou samozřejmě v tomto ohledu rychlejší, protože jsou řízeny z přijatých paketů a IIR filtru, jak už bylo zmíněno dříve v kap. 4.3.1.2. Výsledný průběh rozdílu času hodin H2 a serveru je vyrovnaný a přesnější. Výsledky simulace potvrdily předpoklad chování celého



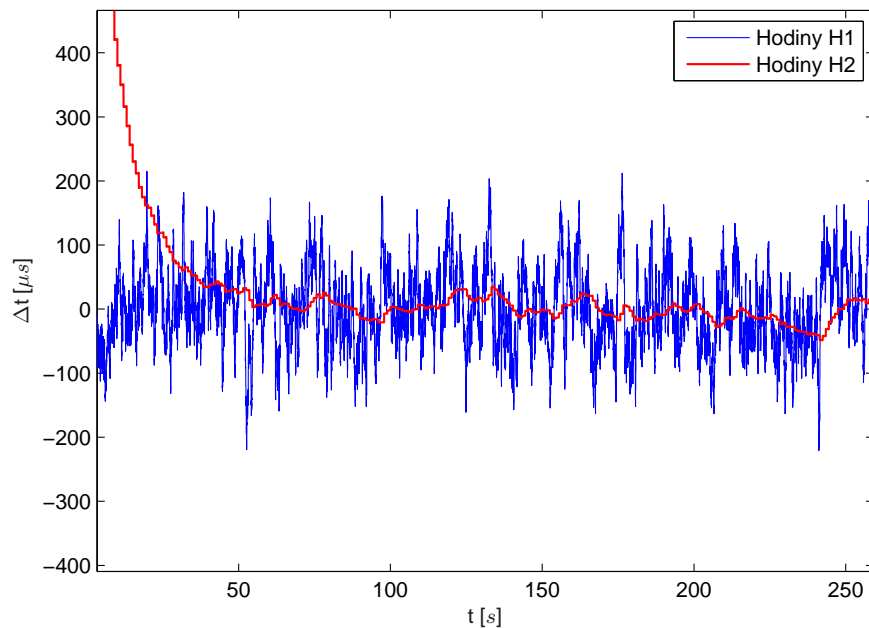
Obrázek 4.27: Rozdíl času serveru a hodin H2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

systému. Pokud porovnáme maximální odchylky časů hodin H1 a H2 oproti serveru (H1 max okolo 200 μs a H2 max okolo 50 μs), tak se výsledná přesnost zlepšila 4x. Přesnost v řádu desítek mikrosekund při průměrném zpoždění sítě 3 ms a rozptylem paketů 1 ms je velice dobrá.

Všechny výsledky, které byly v této podkapitole uvedeny, byly simulovány za stejných podmínek nastavení sítě. Jedná se o případ, kdy střední hodnota zpoždění sítě byla nastavena na 3 ms a rozptyl tohoto zpoždění byl 1 ms. Z toho vyplývá, že zpoždění jedním směrem bylo generováno v rozmezí od 2 ms do 4 ms. Simulace byly prováděny i pro ostatní hodnoty zpoždění, stejně jako při simulaci aktuálního stavu v kapitole 4.1, abychom mohli jednotlivé výsledky porovnat. Následující tabulky 4.3 a 4.4 zobrazují výsledky přesnosti času klienta oproti času serveru pro jednotlivé simulace.

Tabulka 4.3 zobrazuje výslednou přesnost času hodin H1 pro jednotlivé varianty simulací. Rozdíl výsledných hodnot oproti tabulce 4.1, kde při simulacích byl použit jiný filtr, je znatelný. Podle vypočítaných statistických hodnot přináší použití IIR filtru zlepšení přesnosti synchronizace času o necelý jeden řád.

V případě porovnání přesnosti hodin H1 a H2 na straně klienta je vidět rozdíl přibližně o jeden řád. Hodiny H2 vykazují vyšší stabilitu, která již byla ukázána na obrázku 4.28, kde je zobrazeno porovnání přesnosti synchronizace času hodin H1 a H2. Výsledky simulací potvrdily předpoklad, kdy výsledná přesnost času hodin H2 dosahuje nejvyšších hodnot. Pro názornost zde uvedu i graf porovnání času hodin H1 a H2 pro simulace se střední



Obrázek 4.28: Rozdíl času serveru a času hodin H1 a H2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

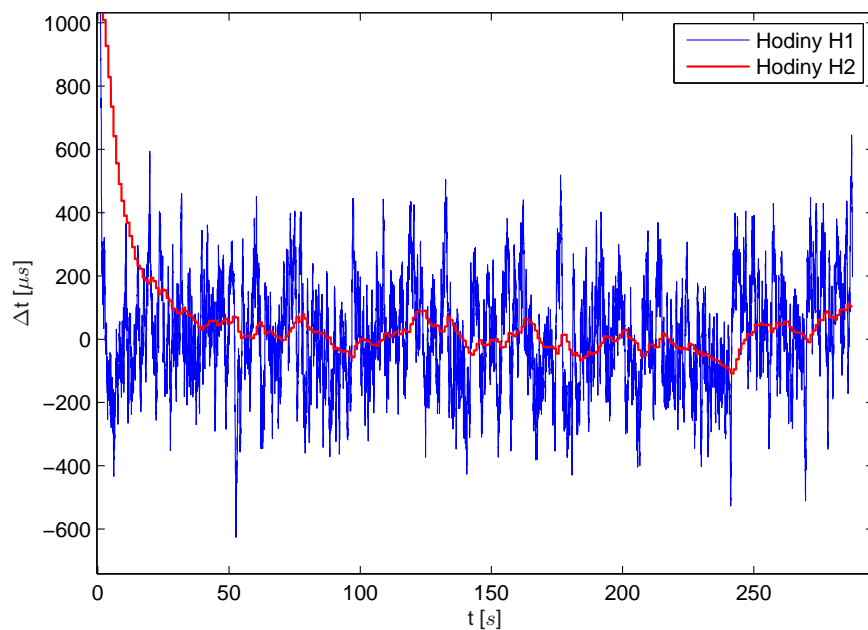
hodnotou zpoždění 3 ms a rozptylem 3 ms (Obr. 4.29) a se střední hodnotou zpoždění 10 ms a rozptylem 1 ms (Obr. 4.30). Jak už bylo řečeno dříve, střední hodnota zpoždění nemá zásadní vliv na výslednou přesnost synchronizace, což je názorně vidět jak v tabulkách, tak i v případě porovnání obrázků 4.28 a 4.30.

Zpoždění sítě		Výsledná přesnost synchronizace hodin H1			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	4,2e-6	6,4e-5	-2,2e-4	2,2e-4
3e-3	2e-3	8,6e-6	1,2e-4	-4,4e-4	4,6e-4
3e-3	3e-3	1,2e-5	1,6e-4	-6,3e-4	6,4e-4
1e-2	1e-3	-7,9e-6	5,8e-5	-2,2e-4	1,8e-4
1e-2	2e-3	7,2e-6	1,2e-4	-4,3e-4	4,1e-4
1e-2	3e-3	1,1e-5	1,8e-4	-6,5e-4	6,1e-4

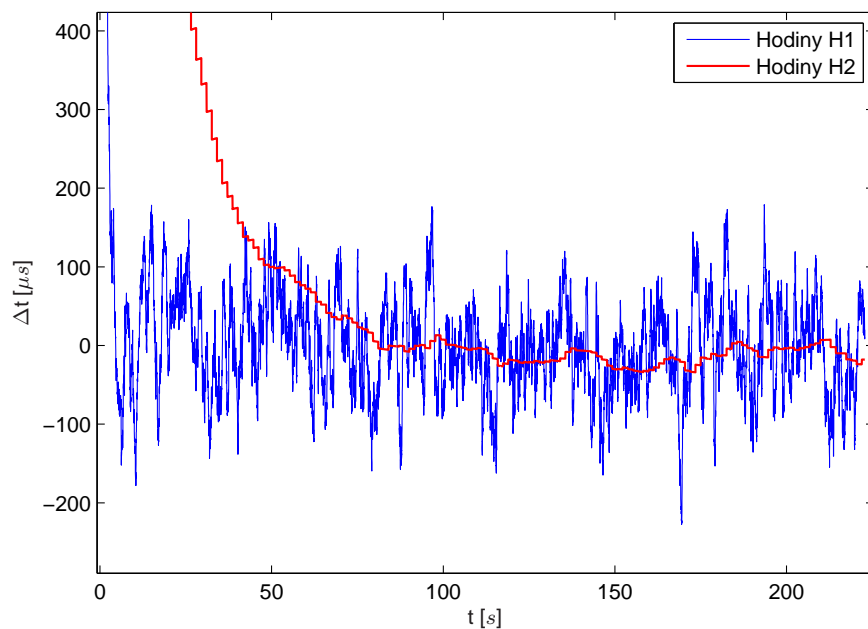
Tabulka 4.3: Výsledky přesnosti synchronizace hodin H1 při různých podmínkách nastavení sítě

Zpoždění sítě		Výsledná přesnost synchronizace hodin H2			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	3,8e-6	1,8e-5	-4,8e-5	4,6e-5
3e-3	2e-3	8,8e-6	3,2e-5	-8,3e-5	9,2e-5
3e-3	3e-3	8,5e-6	4,2e-5	-1,1e-4	1,1e-4
1e-2	1e-3	-5,2e-6	2,1e-5	-3,4e-5	7,2e-5
1e-2	2e-3	1,2e-5	3,1e-5	-5,2e-5	8,6e-5
1e-2	3e-3	2,2e-5	4,3e-5	-7,1e-5	1,1e-4

Tabulka 4.4: Výsledky přesnosti synchronizace hodin H2 při různých podmínkách nastavení sítě



Obrázek 4.29: Rozdíl času serveru a času hodin H1 a H2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 3 ms



Obrázek 4.30: Rozdíl času serveru a času hodin H1 a H2 v případě střední hodnoty zpoždění 10 ms a rozptylu 1 ms

4.3.2.3 Lokální oscilátor a jeho doladování

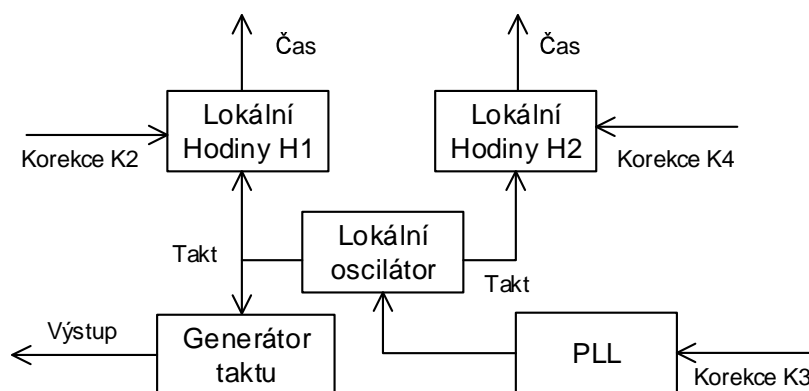
Dalším důležitým bodem, který byl řešen v rámci disertační práce, je stabilizace a doladění lokálního oscilátoru, který řídí jak hodiny H1 tak i hodiny H2. V případě jednotlivých zařízení a výrobků se stabilita použitých oscilátorů značně liší. Kvalitativně vyšší třída zařízení využívá lepších oscilátorů, což je ale vykoupeno vyšší cenou celého zařízení a i u těchto zařízení je potřeba určité doladování daného oscilátoru (nucená synchronizace).

Pokud má lokální oscilátor na straně klienta určitou odchylku (Δt), bude docházet k nepřetržitému předbíhání či zpoždování hodin klienta H.

$$H_{t+1} = H_t + \Delta t \quad (4.12)$$

Z pohledu synchronizačního algoritmu budou mít výsledné korekce stále stejnou nenulovou hodnotu (buď stále kladnou či zápornou). Synchronizační algoritmus bude stále korigovat čas klienta, který se bude držet v určitém rozmezí, ale výsledná přesnost (při porovnání rozdílu času serveru a klienta) bude horší.

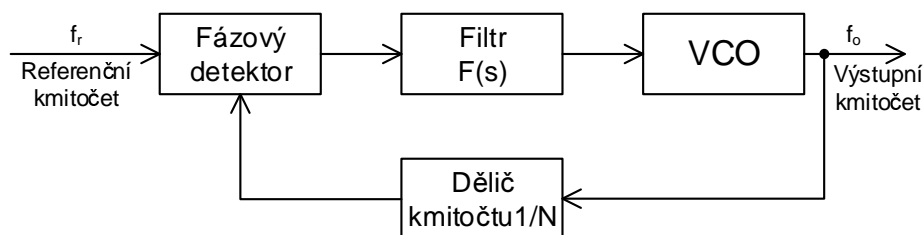
Princip řízení oscilátoru je znázorněn na obrázku 4.31, který představuje výřez z celkového blokového schématu na obrázku 4.13. Lokální oscilátor udává takt, který řídí jednotlivé hodiny a ty si na základě taktu počítají svůj vnitřní čas. Čas jednotlivých hodin je upravován jednotlivými korekcemi K2 nebo K4, které provádějí buď přičtení nebo odečtení malého času (řády mikrosekund) tak, aby došlo k celkovému zpřesnění jednotlivých hodin.



Obrázek 4.31: Část blokového schématu s oscilátorem

Lokální oscilátor bývá řízen pomocí napětí a celý systém pro řízení kmitočtu oscilátoru či fáze se nazývá fázový závěs (PLL - Phase Lock Loop). Teorie okolo fázových závěsů je velice důkladně propracovaná [26] a existují různé varianty řešení analogových či digitálních fázových závěsů.

Pro doladění kmitočtu lokálního oscilátoru nám stačí základní princip fázového závěsu uvedeného na obrázku 4.32. Pokud si promítneme tento obrázek do předchozího blokového schéma 4.31 představuje blok VCO (Voltage-controlled oscillator) Lokální oscilátor, který je řízen napětím. Frekvence f_0 je v našem případě takt, který vstupuje do jednotlivých



Obrázek 4.32: Fázový závěs

hodin H_1 a H_2 . Blok dělič kmitočtu není ve všech případech nutný a může být vynechán. Výsledná frekvence f_0 je dána vztahem 4.13.

$$f_0 = N \cdot f_r \quad (4.13)$$

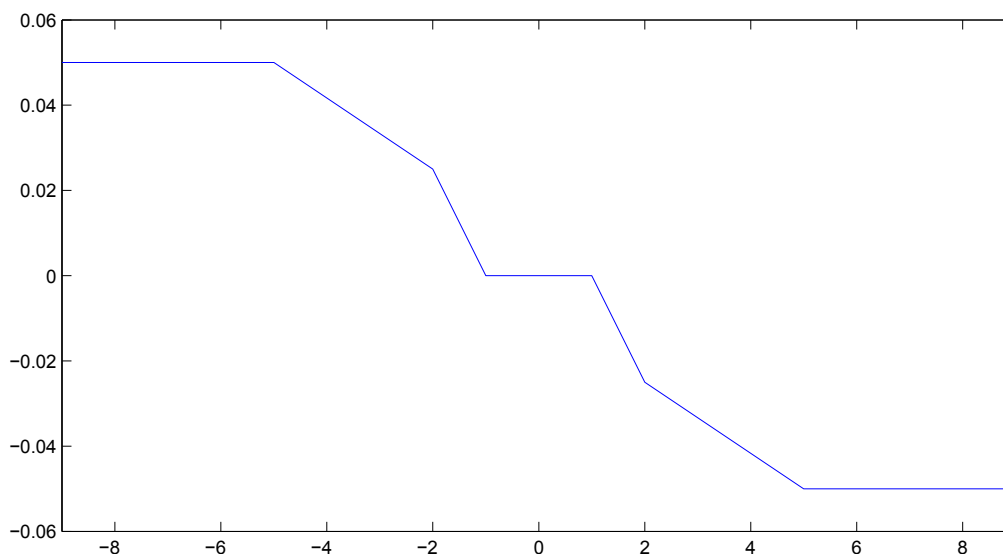
Důležitým blokem je Fázový detektor, který porovnává výstupní kmitočet s referenčním kmitočtem. Úprava referenčního kmitočtu musí být v našem případě řízena na základě korekcí K_3 , které přicházejí na vstup obvodu PLL. Tyto korekce mohou být vyhodnocovány různě a jeden z možných postupů, který byl využit při simulaci, je popsán dále. Výstup z fázového detektoru prochází filtrem a výsledná velikost napětí řídí kmitočet oscilátoru.

Během simulace je řízení oscilátoru zjednodušeno a blok PLL se také chová jako průměrovací filtr (podkapitola 4.3.2.1). Provádí se dlouhodobé vyhodnocování korekce K_3 , která udává rozdíl hodin H_1 a H_2 a následně dochází k výpočtu průměru těchto dat. Simulační program provádí průměrování s velikostí okna 100 vzorků. Tato hodnota je optimální vzhledem k rychlosti odezvy celého systému. V případě bloku PLL je potřeba získat jednu průměrnou hodnotu korekce k , která stanoví, jakým směrem je potřeba lokální oscilátor doladit. Výsledná korekce k ovlivňuje doladování lokálního oscilátoru podle následujících podmínek (tabulka 4.5) a převodní charakteristika je uvedena na obrázku číslo 4.33.

Výsledná korekce [μs]	Úprava oscilátoru [Hz]
$k > 5$	$\Delta f = -0,05$
$5 \geq k > 2$	$\Delta f = \frac{k}{120} - \frac{1}{120}$
$2 \geq k > 1$	$\Delta f = \frac{k}{40} + \frac{1}{40}$
$1 \geq k \geq -1$	+ 0
$-1 > k \geq -2$	$\Delta f = \frac{k}{40} - \frac{1}{40}$
$-2 > k \geq -5$	$\Delta f = \frac{k}{120} + \frac{1}{120}$
$-5 > k$	$\Delta f = +0,05$

Tabulka 4.5: Funkce doladění oscilátoru při simulaci

Výsledná závislost úpravy frekvence na velikosti korekce (tabulka 4.5) byla vytvořena experimentálně při simulacích a jejich výsledcích. V případě velké korekce, která je větší



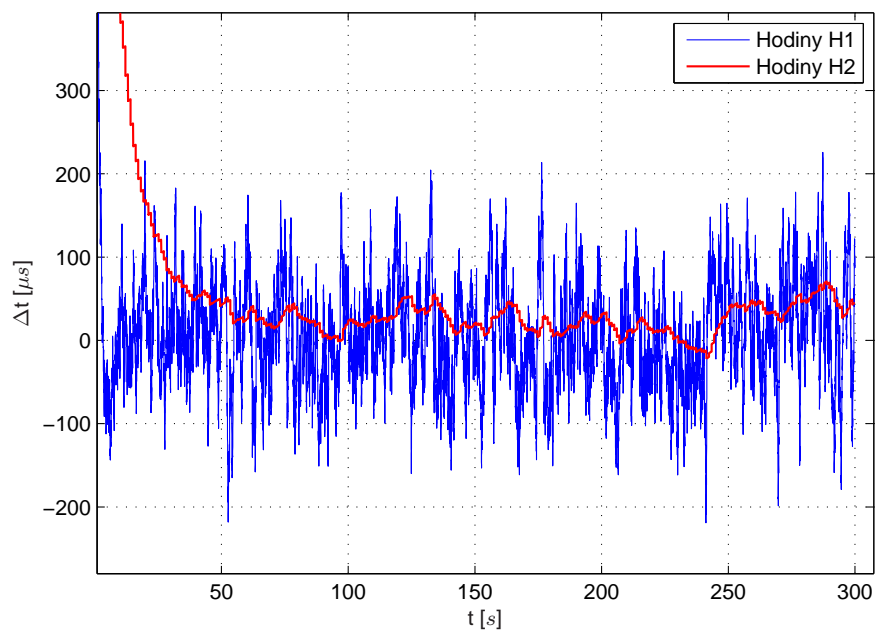
Obrázek 4.33: Převodní charakteristika doladění oscilátoru

než $\pm 5 \mu s$ je stanoven krok doladění na $\pm 1/20$ Hz. Důvodem této limitní hodnoty je požadavek, aby nedošlo k velkému rozladění oscilátoru například při chybě, a proto tato hodnota není závislá na korekci k . Pokud je korekce mezi ± 5 a $\pm 1 \mu s$, je oscilátor doladěn podle vztahů uvedených v tabulce 4.5, které jsou závislé na hodnotě výsledné korekce k . Pokud je výsledná korekce menší než $1 \mu s$, považujeme lokální oscilátor a časy jednotlivých hodin za stabilizované a nedochází k dalšímu doladění oscilátoru.

Simulace je realizována s oscilátorem o frekvenci 1 MHz. Na začátku simulace byla nepřesnost lokálního oscilátoru nastavena na +2 Hz. Tato nepřesnost způsobí předbíhání hodin, což zapříčiní převážně kladnou korekci, která je zobrazena na obrázku 4.34. Z tohoto obrázku je patrné, že výsledné korekce hodin H2 (červená křivka) je převážně nad hodnotou 0 čemuž odpovídá i střední hodnota $26 \mu s$ uvedená v tabulce 4.6. Tato hodnota se významně liší oproti výsledku simulace uvedené v tabulce 4.4, kdy byla fázová smyčka a doladění oscilátoru funkční. V případě funkčního doladění je střední hodnota odchylky času serveru a hodin H2 $3,8 \mu s$.

V případě funkčního doladění oscilátoru můžeme simulaci vidět na následujícím obrázku 4.35. Na začátku byla odchylka nastavena o 2 Hz a následně jsme sledovali schopnost zpětného doladění k hodnotě nula, kdy je takt oscilátoru 1 MHz a kdy čas hodin je počítán přesně. Výsledek v případě simulace s jinými vstupními parametry je zobrazen na obrázku 4.36. Jedná se o simulaci, kde střední hodnota zpoždění je 3 ms a rozptyl 2 ms.

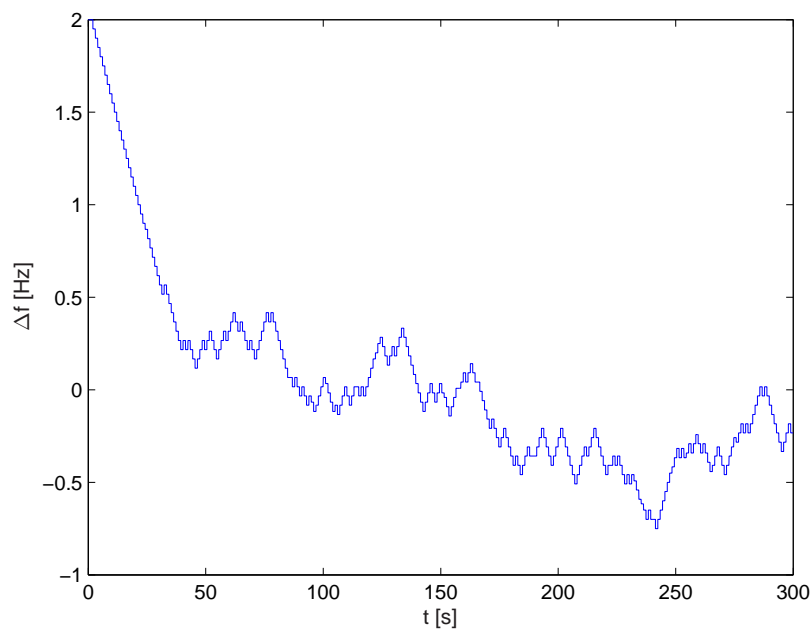
Lze tedy říci, že doladění oscilátoru má významný vliv na celkovou přesnost synchronizace a to zejména na rozdíl střední hodnoty času klienta oproti času serveru.



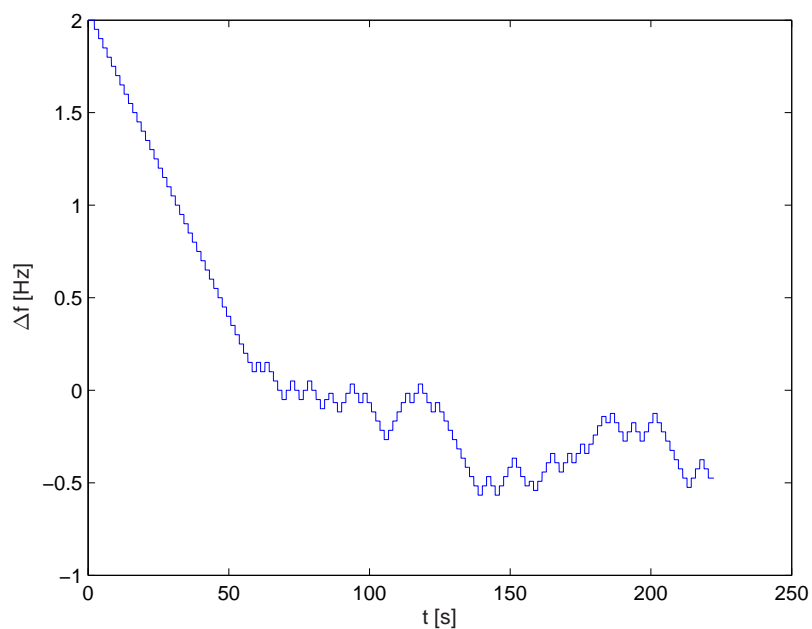
Obrázek 4.34: Rozdíl času serveru a času hodin H1 a H2 při chybě lokálního oscilátoru o 2 Hz v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylem 1 ms

Zpoždění sítě			Výsledná přesnost synchronizace hodin H2			
Střední hodnota [s]	Rozptyl	Dolad'. oscilátoru	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]	Min [s]	Max [s]
3e-3	1e-3	ne	2,6e-5	1,7e-5	-2,2e-5	7,1e-5
3e-3	1e-3	ano	3,8e-6	1,8e-5	-4,8e-5	4,6e-5
3e-3	2e-3	ne	2,9e-5	2,6e-5	-2,3e-5	9,9e-5
3e-3	2e-3	ano	8,8e-6	3,2e-5	-8,3e-5	9,2e-5

Tabulka 4.6: Výsledky přesnosti synchronizace hodin H2 v závislosti na doladění oscilátoru



Obrázek 4.35: Doladování lokálního oscilátoru s počáteční chybou 2 Hz v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms



Obrázek 4.36: Doladování lokálního oscilátoru s počáteční chybou 2 Hz v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 2 ms

Kapitola 5

Závěr

Hlavním tématem této disertační práce je synchronizace času v paketových sítích, a to zejména možnosti rozšíření a vylepšení stávajících metod synchronizace času a jejich algoritmů. V rámci disertační práce bylo postupováno systematicky od základní analýzy problému přes jednotlivá měření parametrů sítě až po modelování synchronizace času, návrhy na zlepšení činnosti algoritmu synchronizace času a prokázání jeho účinnosti. Jednotlivé výsledky a cíle disertační práce jsou uvedeny dále včetně postupu prací prováděných během řešení disertační práce.

5.1 Splnění cílů disertační práce

V této části jsou uvedeny výsledky a způsoby dosažení vytyčených cílů disertační práce. Na základě toho lze konstatovat, že vytyčené cíle byly beze zbytku splněny.

5.1.1 Analýza a měření vlivu velikosti zpoždění sítě na přesnost synchronizace

Zpoždění v paketových sítích a hlavně kolísání zpoždění v jednotlivých směrech přenosu mají zásadní vliv na výslednou přesnost synchronizace. Všechny synchronizační algoritmy založené na přenosu časových razítek přes paketovou síť (podrobně popsáno v kapitole 2) předpokládají stejné zpoždění paketu v obou směrech přenosu. Na základě tohoto předpokladu se dá vypočítat odchylka času klienta a serveru (vztah 2.4). Problémem paketových sítí je zpoždění paketů v jednotlivých směrech, které není v obecném případě stejné. Proto prvním cílem bylo analyzovat zpoždění mezi dvěma body v síti.

Měření zpoždění paketů v reálné síti se věnuje kapitola 2.6.1, kde bylo prováděno měření napříč sítí ČVUT. Výsledky jsou zobrazeny ve formě histogramu (obr. 2.10). Ze zmíněného histogramu je vidět rozložení dob zpoždění jednotlivých paketů. Výsledky těchto zpoždění odpovídají logaritmicko-normálnímu rozdělení. Tyto výsledky byly očekávány a potvrzují předpoklad při přenosu paketů v síti.

Dále bylo provedeno měření při použití synchronizačního protokolu PTP (kapitola 2.3), který disponuje hardwarovým vylepšením pro přesné určení příchodu synchronizačních paketů. Protokol PTP je určen pro menší sítě a v nich dosahuje vysoké přesnosti synchronizace. Jednotlivé síťové prvky musí mít implementovanou hardwarovou podporu tohoto protokolu, a proto cílem vybraných měření bylo vyhodnocení vlivu standardních síťových prvků na výslednou přesnost synchronizace. Měření na různých topologiích sítí jsou popsána v kapitole 2.6.2. Výsledná přesnost synchronizace (rozdíl času klienta od času serveru) pro jednotlivá měření je přehledně shrnuta v tabulce 2.1. V případě využití síťových zařízení bez hardwarové podpory synchronizačního protokolu PTP klesne přesnost synchronizace z desítek nanosekund až na stovky nanosekund či jednotky mikrosekund.

5.1.2 Simulační program s aktuálním stavem a funkcí synchronizačního algoritmu

Cílem bylo nasimulovat reálný stav, tak jak je dnes protokol pro synchronizaci času v paketových sítích používán. Jelikož dnes existuje několik různých protokolů (kapitola 2), tak nebylo možné implementovat a simulovat všechny vlastnosti jednotlivých protokolů, a proto se simulace zaměřují na společné vlastnosti vyplývající z podstaty přenosu paketů v paketové síti. Základní princip a přenos časových značek v jednotlivých paketech je pro všechny synchronizační protokoly stejný.

Základní simulace, popsaná v kapitole 4.1, vychází ze znalosti fungování synchronizačního algoritmu. Strana klienta provádí výpočet korekce času lokálních hodin na základě přijatých časových značek. Jednotlivé korekce jsou zpracovány algoritmem, který provádí průměrování hodnot jednotlivých korekcí a výsledkem je korekce K2 pro lokální hodiny klienta. Tento cyklus se stále opakuje a účelem je co největší zpřesnění času lokálních hodin klienta.

Hlavním proměnným parametrem při simulaci je proměnná doba zpoždění přenosu paketů v síti Ethernet. Byl zkoumán vliv nastavení zpoždění v jednotlivých směrech přenosu na celkovou přesnost synchronizace času na straně klienta. Výsledky pro jednotlivé simulace jsou přehledně zobrazeny v tabulce 4.1.

Tyto výsledky byly porovnány s výsledky zjištěnými při měření v reálné síti popsanými v kapitole 4.2. Při měření bylo využito síťového emulátoru, který byl připojen mezi synchronizačním serverem a klientem. Výsledná přesnost synchronizace času při měření v reálné síti s emulátorem byla o řád nižší než v případě simulací.

5.1.3 Snížení vlivu kolísání zpoždění na přesnost synchronizace a zvýšení přesnosti synchronizace

Za účelem vylepšení synchronizačního algoritmu byly zkoumány možnosti zvýšení přesnosti synchronizace času a generování taktu v závislosti na kolísání zpoždění jednotlivých paketů. První vylepšení spočívá v analýze a návrhu filtru (kapitola 4.3.1), který

zajišťuje filtraci korekcí vypočítaných na základě časů přenášených v jednotlivých pake-tech.

Pro další vylepšení stability a přesnosti synchronizace času a generování přesného taktu byl navržen systém dvou lokálních hodin a systém zpětného doladování lokálního oscilátoru (kapitola 4.3.2.3). Tento systém má významný vliv na zamezení krátkodobých výkyvů a zajišťuje dlouhodobou stabilitu generování taktu.

Jednotlivá vylepšení jsou implementována do simulačního programu (kapitola 4.3), který byl dalším cílem této disertační práce, jak je uvedeno dále.

5.1.4 Vytvoření simulačního programu s vylepšenou synchronizací

Hlavním úkolem této disertační práce bylo zkoumat možnosti vylepšení přesnosti synchronizace hodin na straně klienta s návazností na generování přesného taktu klientem. Bylo postupně vytvořeno a testováno několik postupů, které vedly k vytvoření konceptu využívajícího dvou lokálních hodin. Popis a řešení problému je detailně rozebráno v kapitole 4.3 a hlavní blokové schéma systému na straně klienta je uvedeno na obrázku 4.13.

Hlavní princip vylepšení spočívá v přidání druhých lokálních hodin H2, které jsou doladovány smyčkou s průměrováním odchylky času, a dále zavedení zpětné vazby na doladění lokálního oscilátoru, který udává takt pro lokální hodiny H1, H2 a zároveň slouží pro generování externího taktu pro případná další zařízení. Výsledky simulací jsou uvedeny v kapitole 4.3 včetně porovnání přesností vnitřních hodin H1 a H2 při simulaci se střední hodnotou zpoždění v síti 3 ms a rozptylem 1 ms (obrázek 5.1, 4.28).

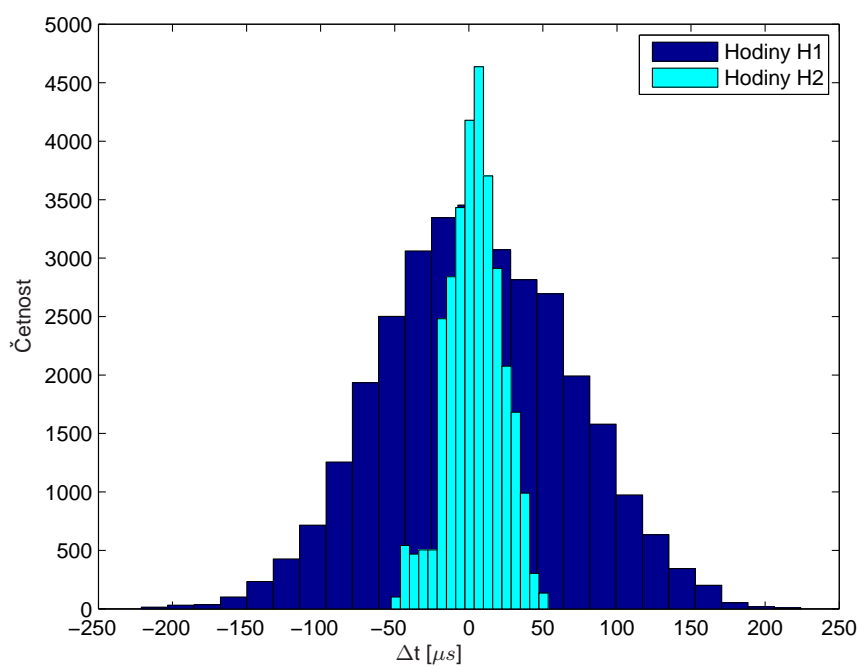
V případě porovnání přesnosti hodin H1 a H2 na straně klienta je patrný rozdíl přibližně o jeden řád, přičemž hodiny H2 vykazují vyšší stabilitu (obrázek 5.1). Výsledky simulací potvrdily předpoklad, že výsledná přesnost času hodin H2 dosahuje vyšší stability oproti hodinám H1. Jak už bylo řečeno dříve, střední hodnota zpoždění nemá zásadní vliv na výslednou přesnost synchronizace, což je názorně vidět jak v tabulkách 4.3 a 4.4, tak i v případě porovnání grafů v kapitole 4.3.2.2.

Další vliv na výslednou přesnost synchronizace má stabilita a doladování lokálního oscilátoru. Lokální oscilátor udává takt pro lokální hodiny H1, H2 a pro generátor externího taktu. Problematika doladění je řešena v kapitole 4.3.2.3. Doladění oscilátoru má významný vliv na celkovou přesnost synchronizace.

5.2 Využití pro praxi a budoucí práce

Tato disertační práce byla vypracována na úrovni teorie a simulací, které vycházejí z reálných naměřených dat. Dalším úkolem by měla být implementace navržených vylepšení do reálného zařízení klienta, aby bylo možné experimentálně ověřit očekávané výsledky. Mělo by dojít k vylepšení přesnosti synchronizace tak, jak bylo ukázáno v simulacích.

Další možnou oblastí výzkumu je využití adaptivních filtrů, které mohou ovlivnit výslednou přesnost synchronizace času a stabilitu času klienta.



Obrázek 5.1: Histogram četností rozdílu času serveru a času hodin H1 a H2 v případě střední hodnoty zpoždění 3 ms a rozptylu 1 ms

Literatura

- [1] *RFC 1305, Network Time Protocol (Version 3)*, 1992.
- [2] *RFC 2030, Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4*, 1996.
- [3] *Recommendation ITU-T G.813, Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC)*, 2003.
- [4] *IEEE 802.3, Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*, 2005.
- [5] *Recommendation ITU-T G.8261, Timing and synchronization aspects in packet networks*, 2006.
- [6] *IEEE 1588, Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, 2008.
- [7] *Recommendation ITU-T G.8264, Distribution of timing information through packet networks*, 2008.
- [8] *Recommendation ITU-T G.8262, Timing characteristics of a synchronous Ethernet equipment slave clock (EEC)*, 2010.
- [9] Server lantime m600/gps/ptp. [online], 2012.
Dostupný z WWW: <<http://www.meinberg.de/english/products/lantime-m600-gps-ptpv2.htm>>.
- [10] Simena network emulator. [online], 2012.
Dostupný z WWW: <<http://www.hywire.biz/img/131108.pdf>>.
- [11] J. Balátě. *Automatické řízení*. BEN, 2003, 663 s, ISBN 80-7300-020-2.
- [12] S. Bregni. *Synchronization of Digital telecommunications Networks*. Wiley, 2002.
- [13] J. Burch, K. Green, J. Nakulski, and D. Vook. Verifying the performance of transparent clocks in ptp systems. In *Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2009. ISPCS 2009. International Symposium on*, pages 1–6, oct. 2009.

- [14] J. C. Eidson. *Measurement, Control and Communication Using IEEE1588*. Springer, 2006.
- [15] D. Fontanelli and D. Macii. Accurate time synchronization in ptp-based industrial networks with long linear paths. In *Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), 2010 International IEEE Symposium on*, pages 97–102, Sept 2010.
- [16] G. M. Garner, M. Ouellette, and M. J. Teener. Using an ieee 802.1as network as a distributed ieee 1588 boundary, ordinary, or transparent clock. In *Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), 2010 International IEEE Symposium on*, pages 109–115, 2010.
- [17] J. Han and D. Jeong. A practical implementation of ieee 1588-2008 transparent clock for distributed measurement and control systems. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 59(2):433–439, 2010.
- [18] P. Jareš and J. Vodrážka. Modelling of data stream time characteristics for use of inverse multiplexer. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 12(4), 2014.
- [19] D. Jarušková. *Pravděpodobnost a matematická statistika*. Vyd. 2. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. 138 s. ISBN 80-01-03427-5.
- [20] T. Kovacshazy and B. Ferencz. Performance evaluation of ptpd, a ieee 1588 implementation, on the x86 linux platform for typical application scenarios. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, pages 2548 –2552, may 2012.
- [21] Q. Mingzhu, W. Xiaoli, and Y. Zhiqiang. Design and implementation of ieee1588 time synchronization messages timestamping based on fpga. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, pages 1566 –1570, july 2011.
- [22] C. D. Murta, P. R. Torres, and P. Mohapatra. Qrpp1-4: Characterizing quality of time and topology in a time synchronization network. In *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, pages 1 –5, 27 2006-dec. 1 2006.
- [23] T. Neagoe, V. Cristea, and L. Banica. Ntp versus ptp in computer networks clock synchronization. In *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, volume 1, pages 317 –362, july 2006.
- [24] M. Pravda. Simulační model obnovy synchronizace z paketů. Master's thesis, ČVUT, FEL, Katedra telekomunikační techniky, Praha, 2008.
- [25] R. L. Scheiterer, N. Chongning, D. Obradovic, G. Steindl, and F. J. Goetz. 1 microsecond-conform line length of the transparent clock mechanism defined by the

- precision time protocol (ptp version 2). In *Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2008. ISPCS 2008. IEEE International Symposium on*, pages 92–97, 2008.
- [26] J. L. Stensby. *Phase-Locked Loops: Theory and Applications*. CRC Press, 1997, 400 s, ISBN: 0849394716,.
- [27] J. Vodrazka and P. Lafata. Transmission delay modeling of packet communication over digital subscriber line. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 11(4), 2013.
- [28] H. Weibel. High precision clock synchronization according to iee 1588 implementation and performance issues. Dostupný z WWW: http://www.engineering.zhaw.ch/fileadmin/user_upload/engineering/_Institute_und_Zentren/INES/Documents/IEE1588/embedded_World_05_Contribution_final_02.pdf, 2005.
- [29] F. Zezulka. Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision time protocol (ptp) podle iee 1588. In *Automa. – ISSN 1210-9592.*, pages 17–19, únor 2010.
- [30] P. Zítek, M. Hofreiter, and J. Hlava. *Automatické řízení*. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2004. 148 s. ISBN 80-01-03020-2.

Publikace autora

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Spoluautorský podíl je u všech publikací stejný.

Publikace v recenzovaných časopisech

- [A1] Pravda, M. - Vodrážka, J. Designing of Method for Improving Synchronization Accuracy in Packet Networks In: *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*. 2013, vol. 3, p. 244-249. Available from WWW: <<http://iasir.net/IJETCASpapers/IJETCAS12-378.pdf>> ISSN 2279-0055. Podíl doktoranda 50%
- [A2] Pravda, M. - Lafata, P. - Vodrážka, J. Time Synchronization in Packet Networks and Influence of Network Devices on Synchronization Accuracy In: *Elektrorevue*. 2010, vol. 13, no. 2010/84, p. 84-1-84-6. Available from WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/en/articles/analogue-technics/105/time-synchronization-in-packet-networks-and-influence-of-network-devices-on-synchronization-accuracy/>> ISSN 1213-1539. Podíl doktoranda 33%
- [A3] Pravda, M. Protokoly k synchronizaci času pro paketovou síť In: *Access server*. 2008, roč. 6., č. 2008100001, s. 1-6. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100001>> ISSN 1214-9675. Podíl doktoranda 100%
- [A4] Pravda, M. Synchronizační jednotka pro paketovou síť In: *Access server*. 2008, roč. 6., č. 2008100004, s. 1-5. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100004>>. ISSN 1214-9675. Podíl doktoranda 100%

Publikace ve sbornících konferencí evidovaných ve Web of science

- [A5] Pravda, M. - Lafata, P. - Vodrážka, J. Precise Time Protocol in Ethernet over SDH Network In: *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011, p. 170-174. ISBN 978-1-4577-1409-2. Podíl doktoranda 33%

- [A6] Pravda, M. - Vodrážka, J. - Lafata, P. Simulations and Measurements of Packet Network Synchronization by Precision Time Protocol In: *35th International Conference Telecommunications and Signal Processing*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, art. no. 0203, p. 116-120. ISBN 978-1-4673-1118-2. Podíl doktoranda 33%
- [A7] Pravda, M. - Kocur, Z. Time Synchronization through Network Time Protocol and Improvement of Its Accuracy In: *TSP - 32nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2009, ISBN 978-963-06-7716-5. Podíl doktoranda 50%
- [A8] Pravda, M. - Lafata, P. - Vodrážka, J. Precision Clock Synchronization Protocol and Its Implementation into Laboratory Ethernet Network In: *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2010, p. 286-291. ISBN 978-963-88981-0-4. Podíl doktoranda 33%

Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [A9] Kocur, Z. - Pravda, M. - Vodrážka, J. Enhancement Ethernet Network Emulator In: *Digital Technologies 2009*. Žilina: TU v Žilině, 2009, vol. 1, ISBN 978-80-554-0150-8. Podíl doktoranda 33%

Ostatní publikace

- [A10] Pravda, M. Transmission of Synchronization across Packet Network. In: *Workshop 2010*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, p. 132-133. ISBN 978-80-01-04513-8. Podíl doktoranda 100%

Publikace nevztahující se k tématu disertační práce

Skripta

- [A11] Lafata, P. - Hampl, P. - Pravda, M. Digitální technika 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2011. 164 s. ISBN 978-80-01-04914-3. Podíl doktoranda 33%

Publikace ve sbornících konferencí evidovaných ve Web of science

- [A12] Lafata, P. - Pravda, M. Analyzing and Modeling of Far-End Crosstalk in Twisted Multi-Pair Metallic Cables In: *2011 International Conference on Applied Electronics*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011, p. 223-226. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-7043-987-6. Podíl doktoranda 50%

- [A13] Pravda, M. - Zavrtálek, J. - Nemčík, M. Voice Transmission Quality Testing and the Design of Measuring Unit In: *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2010, p. 397-401. ISBN 978-963-88981-0-4. Podíl doktoranda 33%
- [A14] Pravda, M. - Nemčík, M. Voice Transmission Quality Tester In: *Applied Electronic 2010*. Pilsen: University of West Bohemia, 2010, p. 277-280. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-7043-865-7. Podíl doktoranda 50%

Ostatní publikace

- [A15] Nemčík, M. - Pravda, M. - Vodrážka, J. Měřič kvality přenosu řeči In: *Access server*. 2010, roč. 8, č. 1, s. 1-4. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2010010001>> ISSN 1214-9675. Podíl doktoranda 33%

Funkční vzorky

- [A16] Pravda, M. Synchronizační jednotka pro paketovou síť [Funkční vzorek]. 2008. Vlastník: STROM telecom s.r.o.
- [A17] Nemčík, M. - Pravda, M. Měřič kvality přenosu řeči [Funkční vzorek]. 2009. Vlastník: ČVUT FEL
- [A18] Pravda, M. - Vodrážka, J. - Zavrtálek, J. Měřič kvality hovoru (VTQ tester) [Funkční vzorek]. 2010. Vlastník: ČVUT FEL

Projekty

- [A19] Interní grant ČVUT CTU0904113 - Pravda, M. Přenos synchronizace přes paketovou síť Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2009
- [A20] Interní grant ČVUT SGS10/182/OHK3/2T/13 - Pravda, M. Metody měření kvality přenosu řeči v různých typech sítí a možné způsoby synchronizace Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2010
- [A21] FRVŠ Projekt G1 830 - Pravda, M. Implementace nových technologií a pomůcek do laboratorní výuky předmětu Přenosové systémy Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2010
- [A22] FRVŠ Projekt G1 2211 - Pravda, M. Vytvoření nových výukových materiálů a pomůcek do laboratorní výuky předmětu Digitální technika Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, 2011