

Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision Time Protocol (PTP) podle IEEE 1588

Článek informuje o důvodech vzniku, základním principu, mechanismu a způsobu zavedení a užití výkonné, levné a velmi přesné metody synchronizace komponent distribuovaných řídicích systémů známé pod názvem *Precision Time Protocol* (PTP). Metoda je od roku 2002 standardizována jako norma IEEE 61588 a je používána v několika standardech skupiny IEC 61158-2 Industrial Ethernet, jako je např. Profinet, Powerlink, EtherNet/IP atd.

Jedním ze základních požadavků na činnost číslicových distribuovaných řídicích systémů pracujících v režimu reálného času je vysoký stupeň jejich synchronizace. Stupeň synchronizace je určen velikostí vzájemné časové odchylky akcí jednotlivých systémů od stanoveného okamžiku (tzv. časová nejistota, angl. *jitter*). Požadavky kladené při řízení současných rychlých soustav vyžadujících extrémně vysoký stupeň synchronizace, jako jsou např. elektrické pohony strojů a výrobních linek, vedou k přípustné časové nejistotě na úrovni jedné mikrosekundy. Tak vysokého stupně synchronizace lze dosáhnout např. synchronizací hodin reálného času spolupracujících řídicích členů prostřednictvím přídatného komunikačního kanálu (vodič nebo bezdrátový spoj ve vedlejší frekvenční pásmu, odděleném od kanálu pro přenos dat). Jinou možností je synchronizace s použitím přesného globálního času z vestavěných přijímačů systému GPS. Obě uvedená řešení jsou však nákladná a složitá. Efektivnější, cenově přístupnou a technicky jednoduchou metodu představuje standard IEEE 1588 označovaný PTP (*Precision Time Protocol*) [5], řešící rychlou a přesnou synchronizaci jednoduchým a levným mechanismem s využitím téhož komunikačního kanálu, který je použit pro přenos technologických dat.

Oblasti použití PTP

Protokol PTP se během poměrně krátké doby uplatnil ve zkušební a měřicí technice, v průmyslové automatizaci, v energetice i v telekomunikacích.

V mnoha měřicích a zkušebních systémech jsou ze zkoušených objektů vyžadována data metodou výzvy k vysílání (*polling*). Při této metodě okamžik vzorkování údajů ze snímačů velmi závisí na zpoždění vlivem dob potřebných na výpočet i samotnou komuni-

kaci, které navíc mohou být proměnné. Mnohem pružnější je vybavit snímače synchronizovanými vnitřními hodinami, takže je možné oddělit okamžik výpočtu od okamžiku přenosu měřenosného údaje (komunikace).

V oboru průmyslové automatizace je velmi přesná synchronizace procesů vyžadována zejména při řízení rychlých elektrických pohonů. Regulační smyčky jednotlivých pohonů musí pracovat synchronně. Například při řízení pohybu několika synchronizovaných os je vyžadována časová nejistota (*jitter*) mezi nimi v řádu jednotek mikrosekund. Je-li takto přesná časová informace k dispozici v koncových zařízeních, lze také přesně synchronizovat procesy decentralizovaně s použitím vestavných (*embedded*) systémů zabudovaných přímo v pohonech, provozních přístrojích a řídicích členech. Proto se takový mechanismus, jakým je přesný synchronizační proto-

chronizace zvláštním synchronizačním kanálem (zvláštní vodič), což znamená větší náklady na kabeláž.

V oboru telekomunikací jsou sítě přepínané a umožňují šířit časový signál prostřednictvím přenosového kanálu. Protože tyto sítě také migrují směrem k přepínání paketů, přetrvávají v nich všechny tradiční služby přepínání spoje [4].

Další oblastí uplatnění protokolu PTP v telekomunikacích jsou bezdrátové přenosy, kde kvalita systémových služeb u mnoha metod a funkcí také závisí na přesnosti synchronizace.

Starší metody synchronizace

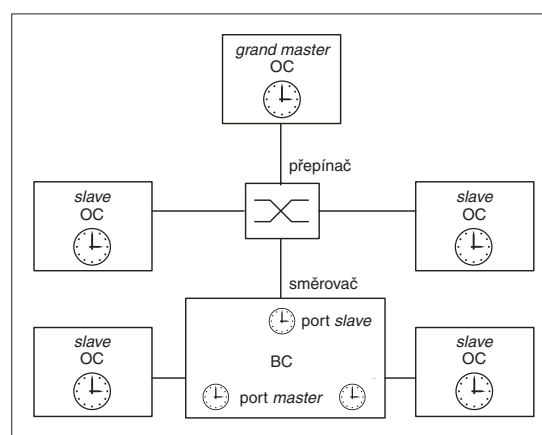
Vedle protokolu PTP a jeho standardizované podoby IEEE 1588 existují i jiné, starší metody synchronizace hodin reálného času v komunikujících stanicích sériových lokálních (LAN) i průmyslových sítí (viz [1], [4]). V sítích Ethernet a Internet se velmi často používají zejména *Network Time Protocol* (NTP) a z něj odvozený *Simple Network Time Protocol* (SNTP), umožňující synchronizovat procesy s časovou nejistotou řádu jednotek milisekund.

Jinou možnou metodou je již zmíněná synchronizace lokálních hodin prostřednictvím systému družicové navigace (GPS). K tomu je však nutné vybavit každou z komunikujících entit stále ještě relativně drahým přijímačem GPS včetně antény a navíc je nezbytné zajistit dostatečně intenzivní řídicí signál. Jde o metodu umožňující dosáhnout velmi přesné synchronizace; naráží se však na vysokou cenu.

Dalším způsobem, dosti rozšířeným, je posílat velmi přesně definované impulzy každému z účastníků přenosu zvláštním synchronizačním kanálem. To však vyžaduje náklady na vedení dalšího vodiče, popř. realizaci paralelního bezdrátového pojítka.

Nedostatky dosavadních metod vedly k vývoji protokolu podle normy IEEE 1588 [5], který je v současnosti znám jako PTP. Při vývoji tohoto mechanismu byly sledovány tyto cíle:

- přesnost (časová nejistota) řádu maximálně mikrosekund, ideálně stovek nanosekund,



Obr. 1. Jednoduchý systém podle IEEE 1588 s komponentami OC (*ordinary clock, obyčejné hodiny*) a BC (*boundary clock, hraniční hodiny*) v různých rolích

kol (PTP), mohl stát základem pro následné způsoby komunikace a řízení v reálném čase realizované v podobě protokolů a sítí Ethernet Powerlink, Profinet nebo CIPsync.

V energetice, v elektrárnách, rozvodnách a přenosové soustavě se nacházejí tisíce snímačů připojených k monitorovacím, řídicím a ochranným systémům. Podsystemy diagnostiky, chybových hlášení, lokalizace a analýzy chyb a jejich detailní registrace vyžadují velmi přesnou znalost času. Synchronní sběr dat, registrace událostí a další funkce, včetně nadřazených řídicích funkcí, navíc vyžadují velmi přesnou synchronizaci. Tradičně se v energetice používá metoda syn-

- minimální požadavky na hardware účastníků, složitost sítě a úroveň výpočetního výkonu tak, aby mechanismus byl efektivně použitelný jak ve složitých, tak i jednoduchých přístrojích,
- použitelnost s minimální správou i v menších systémech definovaných v jednoduchých podsítích nebo maximálně v několika málo přilehlých segmentech celého propojeného systému,
- použitelnost v rozšířených, levných sítích, včetně sítí Ethernet,
- použitelnost v heterogenních systémech vyžadujících co nejsnazší způsob vzájemné synchronizace lokálních hodin různého výkonu a přesnosti,
- přijetí mechanismu jako mezinárodního standardu, který by garantoval globální rozšíření tohoto způsobu synchronizace a umožnil efektivně zajistit potřebnou interoperabilitu zařízení.

Princip PTP

Princip synchronizace hodin reálného času podle IEEE 1588 spočívá v zaslání speciálních zpráv s časovými značkami mezi entitami komunikujícími v rámci jedné domény. Synchronizace je založena na měření časového posunu hodin a zpoždění vlivem přenosu mezi zařízeními fungujícím jako zdroj přesného času (tzv. nadřazená stanice – *master*) a koncovými zařízeními označovanými jako podřízené stanice (*slave*). Díky tomuto mechanismu lze u každého účastníka komunikace zjistit odchylku jeho hodin reálného času od přesného času i dobu zpoždění zprávy v komunikačním kanálu (včetně zpoždění ve všech prvcích na trase). Takovýto mechanismus je velmi atraktivní pro síť typu Ethernet, přesněji pro systémy průmyslového Ethernetu, protože zaručuje vysoký stupeň synchronizace s časovou nejistotou menší než 1 μ s při současně vertikální průchodnosti komunikačním zásobníkem TCP/UDP/IP. Ukazuje se, že Ethernet TCP/IP se zavedeným mechanismem PTP dosahuje vyššího stupně synchronizace než tradiční průmyslové komunikační síť (typu *fieldbus*, viz [3]).

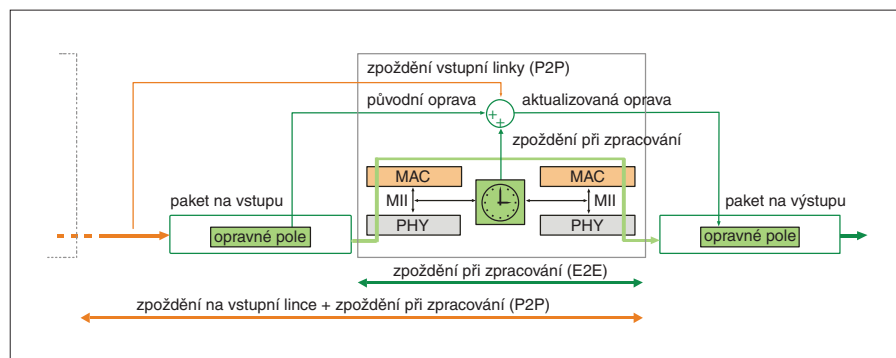
V roce 2002 byl organizací IEEE standardizován *Precision Time Protocol* v první verzi jako PTPv1. Tato verze velmi dobře vyhovuje potřebám menších sítí s menšími počty účastníků. Avšak rostoucí složitost zařízení i struktury sítí si vyžádaly další vývoj této metody. Vznikl standard PTPv2, který byl schválen v roce 2008 a je označován jako IEEE 1588-2008. Verze PTPv2 byla vyvinuta za účelem dosáhnout ještě větší přesnosti synchronizace. Definuje mnoho nových uspořádání sítí, komunikačních modelů a formátů zpráv. Nové požadavky vyplynuly jednak z průniku standardu do nových oblastí použití (telekomunikace, přenosové soustavy), vzniku standardu IEEE 802.1AS – *Timing and Synchronization* (určuje způsob použití IEEE 1588 v souvislosti se standardy IEEE 802.1D a 802.1Q)

a z nových funkčních požadavků (menší časová nejistota, nastavitelná perioda synchronizace, liniová topologie, rychlá rekonfigurace po změnách topologie a odolnost proti poruchám; viz [1], [2]).

Komponenty systému IEEE 1588

Hodiny (*clock*), tj. zdroj časového údaje v zařízení, mohou mít podle standardu IEEE 1588 statut podřízené stanice (*slave clock*) nebo nadřazené stanice (*master clock, grand*

protokolu PTPv2 zavedeny jako další typ hodiny tzv. propustné hodiny (*transparent clock* – TC, viz [2]). Hodiny TC nejsou samy synchronizovány a používají se ke kompenzaci proměnlivého zpoždění při průchodu zpráv protokolu PTP. V principu měří a kompenzují zpoždění, jež vzniká při průchodu synchronizačního paketu přes blok hodin TC. Podřízené stanice poté využívají kumulovanou hodnotu zpoždění ke zpřesnění výpočtu časového posunu vzhledem k hodinám v nadřazené jednotce. Hodiny TC jsou definovány ve dvou



Obr. 2. IEEE 1588 Transparent Clock: rozdíl mezi variantami E2E a P2P (MAC – Media Access, MII – Media Independent Interface, PHY – fyzická vrstva sítě)

master clock). Standard IEEE 1588 definuje dva typy hodin: hodiny obyčejné (*ordinary clock* – OC) a hodiny hraniční (*boundary clock* – BC). Ve verzi PTPv2 jsou k těmto dvěma přidány ještě hodiny typu *transparent clock* (TC).

Základním typem hodin jsou obyčejné hodiny OC, které v doméně PTP mají pouze jeden port. Hraniční hodiny BC mají několik portů v různých doménách PTP a jsou určeny k omezení vlivu proměnlivých časových zpoždění v jednotlivých prvcích sítě, zejména směrovačích (*router*). Hodiny BC nepřenášejí žádné zprávy protokolu PTP. Z hlediska synchronizace podle PTP tudíž síť segmentují. Uvnitř používají hodiny BC pouze jeden lokální čas. Blok hodin BC na jednom ze svých portů zpravidla funguje jako podřízená stanice a synchronizuje svůj lokální čas s nadřazenou stanicí. Z tohoto lokálního času odvozuje na ostatních portech čas fungující jako čas nadřazené stanice v připojených doménách. Vzhledem ke každé z připojených domén se hodiny BC chovají jako obyčejné hodiny OC. Název „hraniční“ (*boundary*) je použit k vyjádření toho, že hodiny BC nikdy nepřevádějí zprávy z nadřazené stanice, ale místo toho zaujímají funkci podřízené nadřazené stanice (viz [2], [3]). Princip uspořádání hodin podle IEEE 1588 je ukázán na obr. 1.

Používání hodin BC v hierarchické topologii vede ke kumulaci chyb. Z tohoto hlediska jsou nejméně výhodné liniové topologie, které jsou ale např. v automatizačních systémech velmi rozšířené. Proto jsou ve verzi

variantách, a to jako *End-to-End Transparent Clock* (E2E TC) a *Peer-to-Peer Transparent Clock* (P2P TC). Hodiny E2E TC kompenzují pouze dobu zpracování uvnitř bloku, zatímco P2P TC kompenzují také zpoždění na připojené lince (obr. 2). Používají k tomu předem zjištěné hodnoty zpoždění, což umožňuje, aby se síť po změně topologie rychleji zotavila (viz [2], [4]).

Synchronizace s použitím PTP

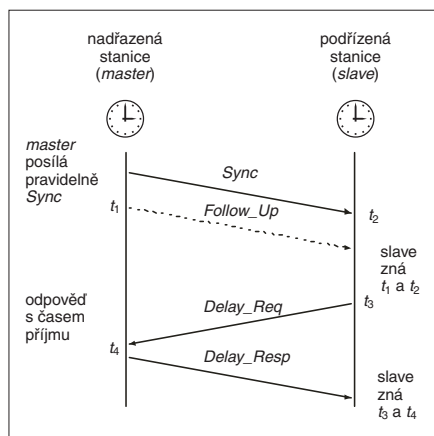
Jednou z vlastností protokolu PTP je snadná instalace nevyžadující zásahy ze strany uživatele. Proces zkonfigurování systému synchronizace probíhá autonomně ve dvou základních fázích, jimiž jsou výběr hlavních hodin a následující synchronizace všech hodin v systému.

Výběr hlavních hodin (algoritmus BMC)

V první fázi se jednotlivé stanice (zařízení) podporující protokol PTP na základě vlastností svých hodin uspořádají do hierarchické struktury charakteru *master-slave*. Nadřazenou stanicí (*master*) pro danou doménu automaticky vybere algoritmus označený jako *Best Master Clock* (BMC, viz [2]).

Algoritmus BMC běží po celou dobu ve všech zařízeních s protokolem PTP a zajišťuje výběr nadřazené stanice pro danou doménu i při změnách topologie nebo poruchách. Činnost algoritmu spočívá v porovnávání vlastností příslušných hodin a výběru těch „nejlepších“. Nadřazená stanice vysílá s pra-

videlnou periodou zprávu *Sync*, která se používá k synchronizaci hodin a obsahuje také údaje charakterizující způsob měření času (hodiny) v dané nadřazené stanici. Ve verzi PTPv2 je pro tento účel vyhrazena zpráva *Announce*, která je určena pouze pro rozhodování podle algoritmu BMC. Podřízené stanice (stanice, které jsou aktuálně ve stavu *slave*), se podle těchto údajů rozhodují, zda mají převzít roli nadřazeného zařízení. Obdobně se stanice, které jsou ve stavu *master* a obdrží zprávu *Sync* od jiné nadřazené stanice, rozhodují, zda mají přejít do stavu *slave*.



Obr. 3. Posloupostv zpráv předaných v průběhu synchronizace mezi nadřazenou a podřízenou stanicí

ve. Algoritmus je ve všech stanicích shodný a při rozhodování nevznikají konflikty. K jednotlivým údajům se při rozhodování přihlíží v tomto pořadí:

- preference (určitá zařízení mohou být označena jako preferovaná),
- primární zdroj času (GPS, atomové hodiny, oscilátor atd.),
- přesnost časové základny,
- stabilita a šum časové základny,
- vzdálenost hodin v rámci sítě,
- UUID (*Universal Unique Identifier*; unikátní identifikátor portu určený k zabránění případným konfliktům).

Výsledkem činnosti algoritmu BMC je doporučení stanici, zda má vykonávat roli nadřazeného zařízení (*master*) nebo podřízenou roli (*slave*).

Synchronizace hodin

Další fází je synchronizace hodin v jednotlivých podřízených stanicích s hodinami nadřazené stanice. Samotná synchronizace probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku podřízená stanice na základě zprávy *Sync* přijaté nadřazené stanici určí posun vlastních hodin. Zprávy *Sync* jsou nadřazenou stanicí vysílány v pravidelných intervalech. Jestliže to hardware nadřazené stanice umožňuje, je čas odeslání zprávy *Sync* vložen přímo do této zprávy. Není-li to možné, je zpráva *Sync* následována ještě zprávou

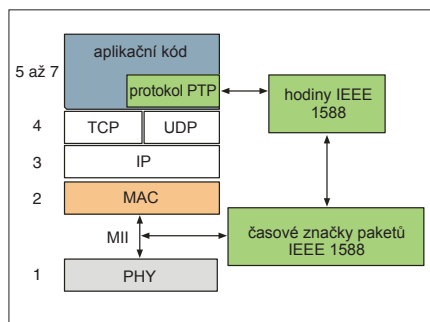
Follow_Up, obsahující změřený čas odeslání zprávy *Sync*.

Protože synchronizace provedená tímto způsobem nebere v úvahu zpoždění v přenosovém kanálu, je nezbytný druhý krok, který toto zpoždění vyloučí. V tomto druhém kroku žádá podřízená stanice svou nadřazenou stanicí zprávou *Delay_Req* o změření zpoždění při přenosu. Nadřazená stanice odpovídá zprávou *Delay_Resp*, která obsahuje čas přijetí požadavku od podřízené stanice. Ze znalosti času odeslání a času přijetí zprávy *Delay_Req* poté podřízená stanice určí hodnotu zpoždění vlivem přenosu. Toto měření vykonává podřízená stanice v časových intervalech delších, než je perioda vysílání zprávy *Sync*.

Sekvence zpráv, které si mezi sebou při synchronizaci vymění nadřazená a podřízená stanice, je ukázána na obr. 3. Po ukončení sekvence zpráv podřízená stanice zná čas odeslání t_1 a čas příjmu t_2 zprávy *Sync* a čas odeslání t_3 a příjmu t_4 zprávy *Delay_Req*. Za předpokladu, že:

- posun hodin je po dobu výměny zpráv konstantní,
- zpoždění vlivem přenosu je stejné v obou směrech,
- nadřazená i podřízená stanice mohou přesně určit čas příjmu i odeslání zprávy,

je ze známých časů t_1 až t_4 a zpoždění z při přenosu mezi nadřazenou a podřízenou jednotkou určen posun p hodin (*offset*). Výsledná přesnost synchronizace se odvíjí od míry, do jaké jsou splněny již uvedené před-



Obr. 4. Struktura Ethernetu s protokolem PTP

poklady.

Ideálně platí $p + z = t_2 - t_1 + t_4 - t_3 = z - p$ a podřízená jednotka určí posun svých hodin vzhledem k hodinám nadřazené jednotky podle rovnice [1]

$$p = \frac{t_2 - t_1 + t_3 - t_4}{2} \quad (1)$$

O takto získanou hodnotu p si podřízená jednotka opraví vlastní aktuální čas.

Zavedení PTP

Standard IEEE 1588 přímo nepopisuje, jak definované postupy zavést. Obsahuje pouze doporučení. Příklad zavedení pro-

tokolu PTP do prostředí Ethernetu je ukázán na obr. 4. Příslušná struktura se skládá z rozhraní pro detekci a časové známkování paketů PTP, lokálních hodin a aplikačního kódu, který poskytuje přístup k aplikačnímu programu na jedné straně a přes UDP/IP k síťovému rozhraní na straně druhé. Časové značky jsou vkládány mezi fyzickou a linkovou vrstvou v rozhraní zvaném *Media Independent Interface* (MII), definovaném ve standardu IEEE 802.3 jako součást Ethernetu. Vkládání značek v tomto místě vyžaduje hardwareovou podporu v síťovém rozhraní, ale zato umožňuje dosáhnout velké přesnosti synchronizace, protože zamezuje vzniku odchylek způsobených průchodem zpráv vrstvami protokolu.

Závěr

Mechanismus pro levnou a přesnou synchronizaci hodin reálného času v komponentách distribuovaných řídicích systémů *Precision Time Protocol* (PTP) podle IEEE 1588 nevyžaduje žádný další fyzický synchronizační kanál. Synchronizace se uskutečňuje periodickými synchronizačními zprávami vysílanými přímo základním kanálem určeným k přenosům technologických dat. Vynikající přesnost synchronizace, nízká cena a spolehlivost funkce jsou zárukou správného fungování decentralizovaných řídicích systémů i při těch nejvyšších požadavcích na činnost v reálném čase.

Literatura:

- [1] EIDSON, J.: *IEEE-1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems – A Tutorial*. In: Proceedings of the Workshop on IEEE 1588, 2005.
- [2] EIDSON, J.: *IEEE-1588 Standard Version 2 – A Tutorial*. In: Conference on IEEE 1588, Gaithersburg, MA, October 2 to 4, 2006.
- [3] LUEDER, A. – LORENTZ, K.: *IAONA Handbook Industrial Ethernet*. 3rd edition. Magdeburg, 2005, ISBN 3-00-016934-2.
- [4] LEMBRE, P.: *How Do Synchronous Ethernet And Precision Time Protocol Work? Part 2: Precision Time Protocol (PTP)* [online]. *EnGenius Network* [cit. prosinec 2009]. Dostupné z <http://www.en-genius.net/site/zones/networkZONE/technical_notes/nett_101909>
- [5] IEEE 1588-2002: *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*. IEEE, 2002.

prof. Ing. František Zezulka, CSc.
(zezulka@feec.vutbr.cz),

Ing. Ondřej Hynčica
(hyncica@feec.vutbr.cz),

ústav automatizace a měřicí techniky,
Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií VUT v Brně