

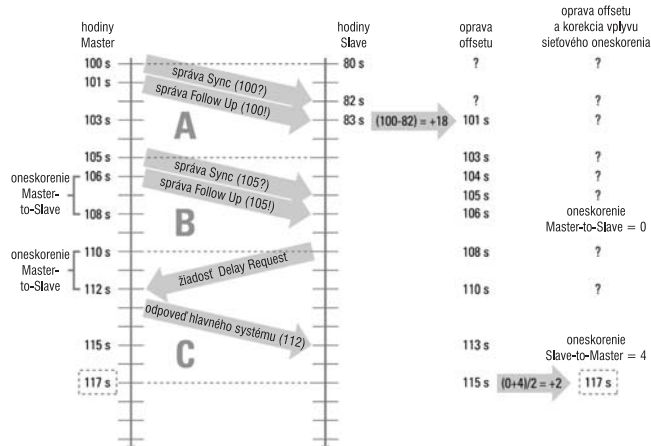
# Časování a synchronizace měření a řízení podle standardu IEEE1588

Měřicí a řídicí aplikace často vyžadují přesnou synchronizaci událostí nejen lokálně, ale i v celých distribuovaných sítích. Například synchronizované spuštění motorů v průmyslovém řídicím systému, synchronní snímání všech tenzometrů v měřicím systému, který analyzuje zatížení křídla letadla či synchronizace kamerového systému v různých sekcích tunelu. Norma IEEE1588 (precision time protocol – PTP) definuje standardizované metody pro takovéto aplikace, umožňuje synchronizovat více zařízení připojených do sítě s lepší než mikrosekundovou přesností. Protokol umožňuje sjednotit lokální hodiny každého systému na síti s hodinami hlavními a tím zaručí, že spouštěcí signály, události i časové značky u všech systému budou mít ve stejný okamžik stejný čas. IEEE1588 je optimalizovaná pro distribuované systémy – síť zatěžuje jen minimálně a strojový čas procesoru neznatelně. Tento článek popisuje výhody standardu IEEE1588 a srovnává jej s jinými protokoly pro synchronizaci.

## Princip

Dnes tak hojně využívaný Ethernet na běžné kabeláži se na první pohled zdá být nevhodným k přesné synchronizaci vzdálených uzlů. Zpoždění paketů a nejistoty v jejich doručování, které se v této kolizní síti trvale vyskytují, nejsou těmi správnými předpoklady. Přesto lze časovat připojená zařízení s přesností lepší než mikrosekunda. Synchronizace vzdálených uzlů probíhá ve dvou krocích. Nejprve je definována hlavní časová základna (master clock) a pak se opakovaně měří a opravuje časový posun různých lokálními hodin a zpožděním v přenosu po síti.

Při spuštění synchronizace si nejdříve protokol automaticky zjistí, které hodiny na síti jsou nejpřesnější a definuje je jako hlavní (master). Ostatní nastaví jako podřízené (slave) a synchronizuje jejich čas s hlavními. Jelikož časový rozdíl mezi hlavními a podřízenými hodinami je součtem offsetu hodin a přenosovým zpožděním sítě, probíhá synchronizace ve dvou fázích: oprava offsetu a korekce vlivu síťového zpoždění. Hlavní hodiny nejprve provedou opravu offsetu zprávami „sync“ a „follow-up“ (obr. 1). Hlavní hodiny pošlou zprávu „sync“ se svou časovou značkou, podřízené hodiny tuto zprávu po přijetí označí svou časovou značkou a spočítá se rozdíl mezi nimi. Tento rozdíl reprezentuje offset



Obr.1 Zjednodušené schéma synchronizace podle IEEE 1588

mezi hlavními a podřízenými hodinami včetně zpoždění způsobeného přenosem zprávy. Podřízené hodiny následně upraví svůj čas podle vypočteného rozdílu tak, aby měly stejný čas jako ty hlavní. Možné odchylky v rozdílu vlivem různého zpoždění při přenosu zpráv po síti se eliminují opakovaným posláním zpráv „sync“ a „follow-up“. V našem příkladu na obr. 1 se v bodě B zjistilo, že žádné variace ve zpoždění v této konkrétní síti nejsou (master-to-slave delay = 0). Dalším krokem je určení zpoždění přenosu mezi hlavními a podřízeným systémem. Podřízený systém vyšle žádost o časovou značku ve zprávě „Delay request“ v čase 108 s. Hlavní systém odpoví odesláním zprávy se svou časovou značkou o přijetí – 112 s. Podřízený systém si následně spočítá průměrnou hodnotu zpoždění z obou přenosů a opraví své hodiny do již finální a synchronní podoby s hlavním systémem. Jelikož se hlavní a podřízené hodiny postupem času mohou opět lišit, probíhá synchronizace opakovaně a neustále se tak všechny hodiny v systému sladí.

## Dosahovaná přesnost

Většina implementací standardu IEEE1588 bude podporovat lepší než mikrosekundovou přesnost, ale skutečné parametry synchronizace se mohou významně lišit v závislosti na konkrétní

	PXI sběrnice	Propojení kabelem z PXI časovacího slotu	IEEE 1588	NTP přes IP
rozdílení	~0,01 ns	~50 ns	~50 ns <sup>1)</sup>	<1 x 10 <sup>7</sup> ns
nejistota	~0,002 ns	~0,5 ns	~100 ns <sup>1)</sup>	~3 x 10 <sup>6</sup> ns
vzdálenost	~0,5 m	<200 m	<400 m <sup>2)</sup>	celosvětově
vzorkovací frekvence	100ky MHz	100ky MHz	<100 kHz	<10 Hz
asynchronní trigger			–	– <sup>3)</sup>
propojení	vnitřní sběrnice	koaxiální kabel	Ethernet CAT 5	Ethernet, atd.
topologie	uživatelé definovaná	uživatelé definovaná	automatická volba master/slave	Peer-to-peer

<sup>1)</sup> v ideálním případě (závisí na topologii a zatížení sítě)

<sup>2)</sup> větší vzdálenost možná při použití dalších hodin

<sup>3)</sup> UDP podporuje asynchronní události

Tab.1 Srovnání parametrů nejčastějších synchronizačních protokolů

aplikaci. Není například definována frekvence časové základny hlavních ani podřízených hodin. V systémech s nízkou frekvencí časové základny hodin nemusí být dosažena výše uvedená přesnost. Stabilita zdroje frekvence je další důležitý parametr, který může způsobit odchylky např. při změně teploty okolí. Je-li jako zdroj frekvence použit krystal OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator), výrazně se tím dosahovaná přesnost zvýší. OCXO patří mezi vůbec nejstabilnější zdroje vysoké frekvence. Odchylka se u něj pohybuje v řádu jednotek miliardtin. Pro srovnání – běžné krystalové oscilátory mají přesnost o řád nižší a při větších změnách teploty okolí se dále zhoršuje. Dalším faktorem, která má vliv na přesnost je topologie sítě. Dvě zařízení přímo propojená kabelem mají daleko menší jitter, než několik zařízení propojených mezi sebou rozbočovači a prepínači. Pokud je v rozsáhlém systému nutné použít více podsítí propojených mezi sebou uzlem (prepínačem), bude tento uzel, pokud je vybaven přesnými hodinami a IEEE1588 kontrolérem, sloužit jako zdroj hlavních hodin. Podle něj se synchronizují všechny podřízené systémy v přidružených podsítích. Dalším činitelem, který může negativně ovlivňovat synchronizaci je běžný provoz v síti. Vzhledem k několika možným vlivům na přesnost, je tedy proces synchronizace v pravidelných intervalech opakován.

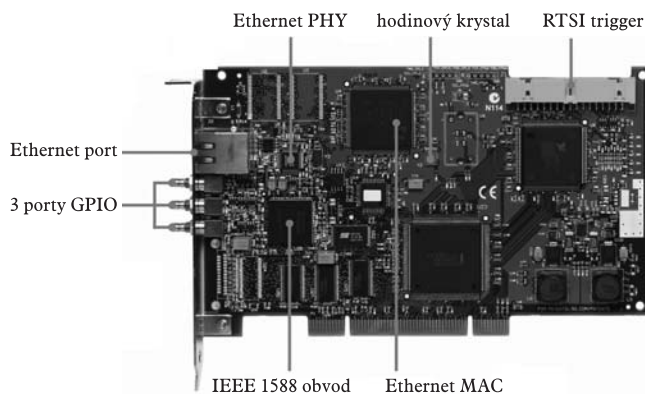
### Srovnání synchronizačních mechanismů

Standard IEEE1588 není jediný, který definuje synchronizaci mj. i měřících a řídicích systémů. Tab. 1 shrnuje parametry nejčastěji používaných technologií. Jsou to např. synchronizace v systému PXI, mechanismus synchronizace mezi více skříněmi PXI, synchronizace podle IEEE1588 a synchronizace protokolem po běžně používaných sítích TCP/IP protokolem NTP (Network Time Protocol).

Chceme-li synchronizovat měření a generování signálu, měla by být odchylka mezi časovými základnami co nejmenší. Vzorkovací perioda je nejmenším dopředu známým časovým intervalem použitelným pro spuštění (trigger), resp. pro zjištění přesného času, kdy došlo k určité události. Zákazníci obvykle vyžadují co nevyšší vzorkovací frekvenci. Na rozdíl od jinak synchronizovaných měření (PXI, atd.) a generování, kdy bývá nejistota (jitter) mnohem menší, než vzorkovací perioda, při synchronizaci podle normy IEEE1588 nelze vzorkovací frekvenci zvyšovat do nekonečna, protože by nejistota přesáhla vzorkovací periodu a mohlo by dojít k chybnému určení času měření určitého vzorku (posunutí o vzorek nebo vzorky). Při využití standardu IEEE1588 lze tedy obecně počítat s přesností pod jednu mikrosekundu, což umožňuje vzájemně synchronizovat vzorkovací frekvence měření a generování řádově v jednotkách MSA/s.

Zpoždění (latence) mezi událostmi je dalším důležitým parametrem při porovnávání metod. Latence udává časový rozdíl mezi okamžikem, kdy řídicí systém vyšle požadavek a kdy podřízený systém požadavek přijme. Protože oba standardy, jak IEEE1588, tak i NTP používají IP (internet protocol), je latence mezi událostmi daná mj. i latencí paketů. Ta bývá v řádu milisekund. Z tohoto důvodu jsou synchronizační mechanismy založené na IP protokolu méně přesné, ve srovnání se systémy založenými na zásuvných kartách do společné sběrnice. V PXI systému, který se skládá ze zásuvných modulů, je latence v řádu pikosekund. Tento parametr prakticky znemožňuje použití standardu IEEE1588 pro zpracování rychlých asynchronních událostí.

Vysoká přesnost synchronizace u systémů PXI a velké vzorkovací frekvence při velkém rozlišení předurčují právě tyto systémy pro pokročilá měření. Lze samozřejmě provést i propojení několika PXI skříní na větší vzdálenosti a vzájemně je synchronizovat. Standard NTP umožňuje synchronizaci v řádech milisekund, která je dostatečná pro pomalé děje, u kterých není přesnost časování



Obr.2 Karta NI PCI-1588 pro přesnou synchronizaci času

sování tím nejdůležitějším parametrem. Standard IEEE1588 je vhodný i pro synchronizaci geograficky vzdálených systémů v různých zemích, které vyžadují přesnost pod 1 ms. Možnost využití tolik rozšířeného Ethernetu společně se skvělými parametry synchronizace při téměř nulovém zatížení jak procesoru tak i sítě jsou velkými výhodami pro široké nasazení v průmyslových aplikacích, při měření a testování, komunikaci, apod.

### NI PCI-1588 – karta pro přesnou synchronizaci času

Zásuvná karta do PCI sběrnice od firmy National Instruments využívá protokol IEEE1588-2002 pro synchronizaci s dalšími systémy založenými na stejném standardu – ať už jde o zásuvné kary do PCI nebo externí přístroje připojené přes GPIB, RS232, USB, Bluetooth, atd. Karta je vybavena konektorem RJ-45 pro připojení běžného Ethernet kabelu a umí pracovat jak v režimu master tak i slave. FPGA obvod na kartě je dostatečně rychlý, přesný i teplotně stabilní, aby mohl sloužit k nastavení frekvence a fáze zabudovaných hodin a definici časových značek vysílaných nebo přijímaných paketů. Karta umožňuje synchronizovat zařízení jak přes Ethernet, tak i 3 PFI linky (Programmable Function Interface) a RTSI (Real-Time System Integration). Po Ethernetu se karta synchronizuje s ostatními zařízeními podporujícími IEEE1588, přes PFI se pak může synchronizovat s přístroji nepodporujícími IEEE1588 jako jsou např. PLC nebo externí přístroje. PFI linky mají konektor typu SMB. RTSI rozhraní umožňuje synchronizovat měřící moduly ve sběrnici PCI v rámci jednoho počítače. Rozhraní NI PCI-1588 je kompatibilní i s připravovanými LXI zařízeními třídy A a B pro sběr dat. Veškeré synchronizační mechanismy jsou přístupné softwarově ovladačem NI-SYNC API.

Protože většina komplexních automatizačních systémů a systémů na bázi PAC (Programmable Automation Controller) využívá PC jako jádro systému, je karta PCI-1588 ideálním prostředkem jak implementovat synchronizaci do systému. Stane se výchozím centrálním bodem pro přesné časování, synchronizaci a časové značky všech okolních přístrojů bez ohledu na způsob připojení.

Další informace o synchronizaci řídicích systémů přes Ethernet a o kartě NI PCI-1588 vám poskytne česká pobočka firmy National Instruments.

**Pavel Kmit**

**National Instruments (Czech Republic), s.r.o.**  
e-mail: [ni.czech@ni.com](mailto:ni.czech@ni.com)