

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Časovo kritická komunikácia

Základy TTEthernet a TSN

Učebný text

2023

Peter Drahoš

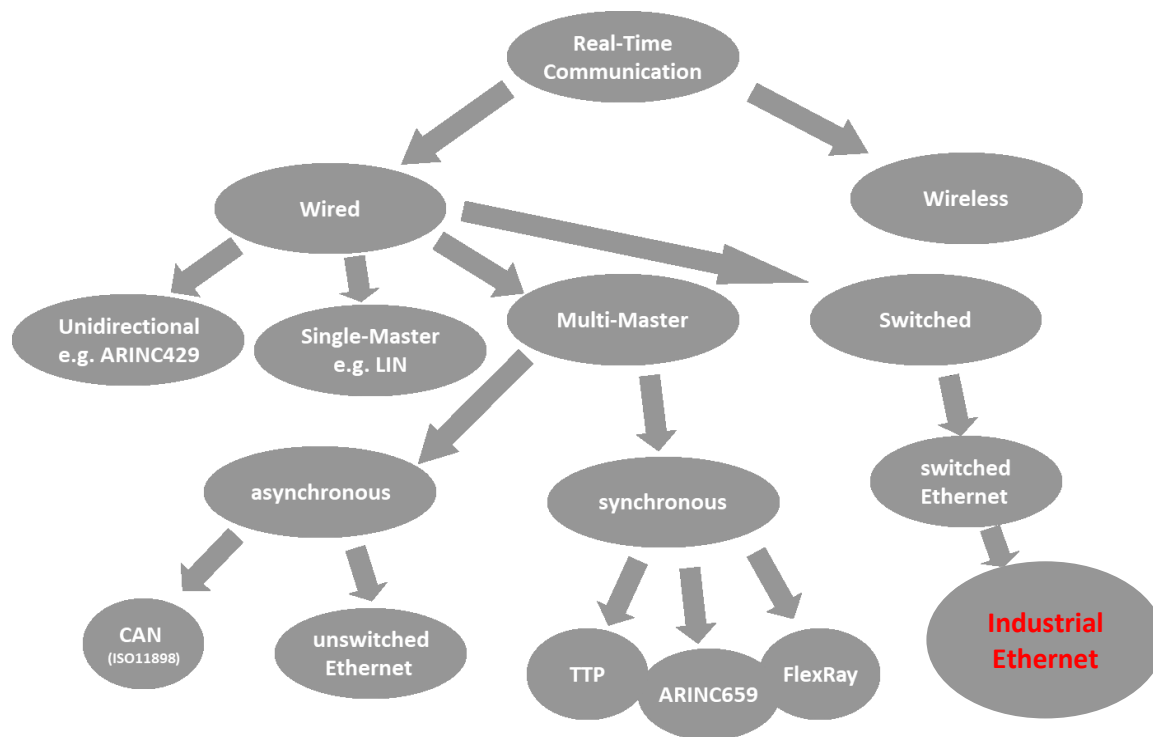
1. Úvod

Systémy riadiacich počítačov spojených do komunikačnej siete, ktoré pracujú v reálnom čase podľa potrieb aplikácie, ktorú riadia nazývame **systémy reálneho času alebo časovo kritické systémy**. Správanie systému reálneho času závisí nielen od správnosti logických výsledkov výpočtov, ale aj od fyzického času, kedy sa tieto výsledky vyprodukujú a kedy sú všetkým k dispozícii pre použitie a to aj v distribuovanej architektúre riadenia. Z tohto pohľadu môžeme rozdeliť komunikačné (aj riadiace systémy) na:

1. Riadené alebo spúšťané udalosťami: **Event – Triggered**. Tieto systémy sú veľmi flexibilné a komunikujú len vtedy, keď nastane udalosť (ako napr. autá, taxíky na cestách).
2. Riadené alebo spúšťané podľa časového plánu: **Time – Triggered**. Ich výhodou je predvídateľnosť - idú podľa plánu (ako vlaky na železnici).

Deterministický reálny čas je taký, pri ktorom všetci účastníci (komunikačné uzly) majú prístup na médium počas garantovaného stanoveného času (komunikačného cyklu). Samozrejme z tohto dôvodu musí byť počet účastníkov komunikácie (uzlov) známy a konečný a vtedy hovoríme o **uzavretých systémoch** na rozdiel od **internetu, ktorý je úplne otvorený systém**. Väčšina protokolov priemyselného Ethernetu umožňuje kombinovať telegramy časovo kritické aj „klasické“ alebo „štandardné“ telegramy pre možnosť pripojenia inžinierskych staníc tzv. HMI (Human Machine Interface) pre účely správy zariadení, konfigurácie, parametrizácie a diagnostiky.

Existuje veľké množstvo rôznych komunikačných systémov a protokolov, ktoré rôznym spôsobom vyriešili determinizmus a reálny čas. V niektorých prípadoch hovoríme o tzv. **soft Real Time**, tu obyčajne ide o určitú formu priority telegramov, ktorou je možné dosiahnuť komunikačné cykly na úrovni 5 – 10 ms pre Factory Automation.



Obr. 1. Prehľad komunikačných systémov reálneho času [1].

Poznámka: TTP = Time Triggered Protocol je štandard SAE AS6003. ARINC = Aeronautical Radio Incorporated, Annapolis, Maryland, USA.

Najvyššie požiadavky na kritický reálny čas tiež označovaný ako **hard Real Time** (alebo izochrónny RT) spĺňajú komunikačné systémy so synchronizáciou hodín zariadení v sieti. Tieto sú vhodné pre riadenie pohybu (Motion Control) a dosahujú cyklus menší ako jedna milisekunda. Patria sem len niektoré protokoly „Industrial Ethernet“ a to sú Profinet iRT, Sercos, Powerlink a najrýchlejší protokol EtherCat (napr. za 0,1 ms obslúži 100 servo pohonov). Väčšinou používajú vlastný špeciálny HW (fyzická vrstva OSI) a na synchronizáciu Precision Time Protocol IEEE1588.

Na základe skúseností boli vyvinuté protokoly na báze Ethernetu, ktoré okrem deterministického reálneho času majú ďalšie kvalitatívne iné a nové vlastnosti. Sú to **TTEthernet - Time Triggered Ethernet** a **TSN - Time Sensitive Networking**. V oboch prípadoch ide o možnosti univerzálneho použitia v rôznych aplikačných oblastiach vrátane priemyslu, automobilu atď. TTEthernet má okrem determinizmu a flexibility zabudovanú funkčnú bezpečnosť a chybovo tolerantnú komunikáciu (aj pre letectvo a vesmír). TSN je otvorená (nie privátna) skupina spolupracujúcich protokolov. Vďaka tomu predstavuje nádej pre globálnu interoperabilitu pri garancii determinizmu v spínanej sieti Ethernet a kombinácii časovo kritickej komunikácie a dátových streamov (AVB – Audio Video Bridging) v priemysle aj automobile. Prvé komerčne dostupné produkty pre automatizáciu (PLC, RIO, switch TSN,...) s podporou TSN sa objavili na trhu v 2. polovici roku 2023.

Cieľom učebného textu je poskytnúť čitateľovi informácie o najnovších trendoch vo vývoji komunikačných systémov reálneho času.

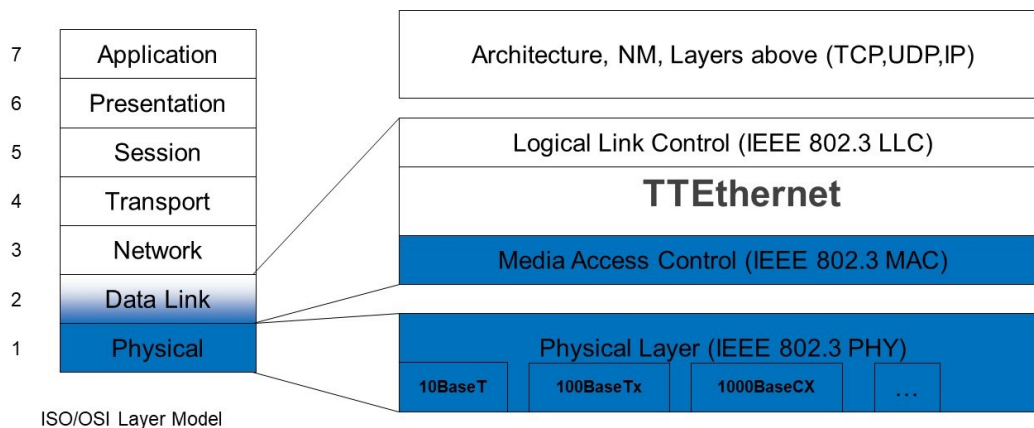
2. Time Triggered Ethernet

Keď bol Ethernet prvýkrát vyvinutý, nebrali sa do úvahy aplikácie s časovo kritickými, deterministickými alebo bezpečnostnými požiadavkami. TTEthernet priamo rieši tento problém a rozširuje klasický Ethernet o výkonné služby, ktoré spĺňajú požiadavky na plne deterministickú komunikáciu, poskytujú služby synchronizácie odolné voči poruchám, garantovanú konštantnú latenciu pre multi-komunikačné trasy v sieti, rozdelenie a ochranu sieťovej prevádzky. TTEthernet umožňuje realizovať bezpečnostne kritické aplikácie v reálnom čase ako sú Automotive & Aerospace.

TTEthernet kombinuje dva svety komunikácie založené na báze IEEE 802.3 Ethernetových štandardov a v SAE AS6802. TTEthernet je škálovateľná sieťová technológia, ktorá využíva časové plánovanie na poskytovanie deterministickej komunikácie v reálnom čase cez Ethernet, škálovateľná od malých po veľmi veľké systémy bez ohrozenia bezpečnosti, zabezpečenia alebo výkonu. Bol špeciálne navrhnutý pre bezpečné a vysoko dostupné aplikácie v reálnom čase kyber-fyzikálne systémy a jednotné siete. Je plne kompatibilný s IEEE 802.3 Ethernet a transparentne sa integruje s ethernetovými sieťovými komponentmi [2].

Time-Triggered Ethernet zjednodušuje návrh riešení odolných voči chybám a vysokej dostupnosti pre letecké, automobilové a priemyselné aplikácie. Bezpečnosť a redundancia sú udržiavané na úrovni siete bez potreby zapojenia aplikácií. Funkcie na úrovni siete, ako je správa redundancie a synchronizácia hodín odolná voči chybám (ako je štandardizovaná v SAE AS6802), uľahčujú procesy návrhu aplikácií a umožňujú rýchlejšie uvedenie na trh. Je kompatibilný - integruje nainštalované priemyselné ethernetové protokoly vrátane Profinet a EtherNet/IP.

Štandard IEEE 802.3 sa zaoberá najnižšími vrstvami referenčného modelu ISO/OSI, niektoré vyššie vrstvy sú zastúpené inými časťami IEEE 802, obr. 2. Časovo riadený formát rámca Ethernet je kompatibilný so štandardným formátom rámca Ethernet (IEEE 802.3). Time-Triggered Ethernet pracuje na 2. vrstve modelu OSI a umožňuje používanie existujúcich protokolov 3. vrstvy a vyšších vrstiev nad Time-Triggered Ethernetom. Správy z protokolov vyšších vrstiev, ako sú IPv4/v6 alebo TCP/UDP, sa môžu posilať časovo spúšťaným spôsobom bez úpravy samotného obsahu správy [2].



Obr. 2. Reálny čas TTEthernet je realizovaný v linkovej vrstve.

Časovo spúšťaný Ethernet umožňuje komunikáciu aplikácií s rôznymi požiadavkami na kritickosť prostredníctvom siete Ethernet. Do rovnakej siete možno pripojiť bežné osobné počítače, kancelárske zariadenia, multimediálne systémy, systémy reálneho času a systémy kritické z hľadiska bezpečnosti, obr. 3. Aby sa to zaručilo, je TTEthernet navrhnutý tak, aby bol kompatibilný so štandardmi, ako je IEEE Ethernet 802.3.

TTEthernet =



Established Dominant Standard IEEE 802.3	Coordination Distributed control SAE AS6802 IEEE 1588	Real-time control (e.g. active & passive safety systems) Determinism	Audio/video streaming Sensor fusion ARINC 664	ISO 26262 ASIL D IEC 61508 SIL 4 DO 254 DAL A DO 178B DAL A DO 160F
--	---	--	---	---

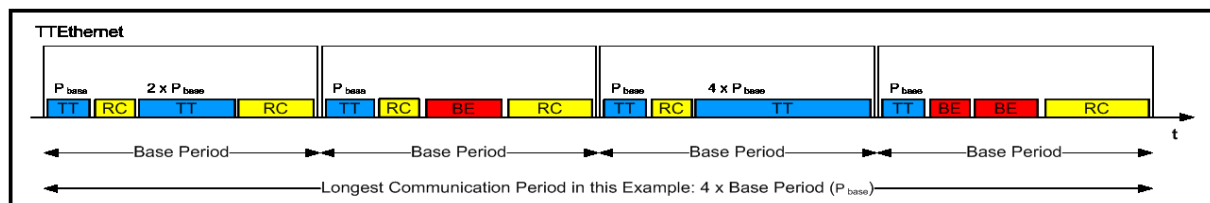
Obr. 3. TTEthernet integruje dátový tok do jedinej siete

Časovo riadený Ethernet poskytuje rôzne sieťové služby, ako napríklad deterministickú službu prenosu správ, službu synchronizácie hodín odolnú voči poruchám, službu spúšťania a služby detekcie porúch a diagnostiky. Keďže sa TTEthernet používa v aplikáciách kritických z hľadiska bezpečnosti, kritický mechanizmus TTEthernetu, ako je synchronizácia hodín a spúšťanie, sa formálne overuje.

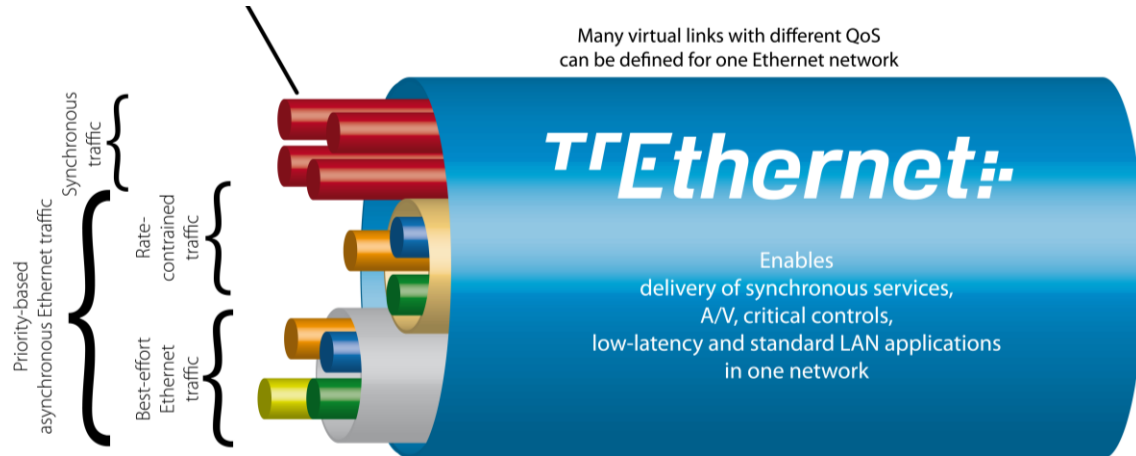
Časovo riadený Ethernet funguje na 2. vrstve OSI a môže podporovať rôzne fyzické vrstvy. Time-Triggered Ethernet môže pracovať s akoukoľvek fyzickou vrstvou, ktorá poskytuje konštantnú komunikačnú latenciu pre prenos dát cez fyzické spojenie. Bezdrôtová komunikácia nie je vhodnou voľbou, pretože oneskorenie prenosu na fyzickej úrovni závisí od rôznych faktorov pôsobiacich na rádiový signál.

S cieľom podporiť integráciu aplikácií s rôznymi požiadavkami na reálny čas a bezpečnosť v jednej sieti podporuje Time-Triggered Ethernet tri rôzne triedy prevádzky:

- **TT – Time-Triggered traffic. Časovo spúšťaný prenos:** Ethernetové pakety sa posielajú cez sieť v preddefinovaných (plánovaných) časoch a majú prednosť pred všetkými ostatnými typmi prenosov. Výskyt, časové oneskorenie a presnosť časovo spúšťaných správ **sú preddefinované a zaručené**. **Synchronizované miestne hodiny** sú základným predpokladom pre časovo spúšťanú komunikáciu.
- **RC – Rate-Constrained traffic. Obmedzená prevádzka:** Ethernetové pakety sú nakonfigurované tak, aby udržali **maximálnu latenciu a jitter** v uzavretých systémoch. Používa sa na aplikácie s **menej prísny determinizmom** (priorita) a požiadavkami v reálnom čase. Táto trieda zaručuje, že **šírka pásma je preddefinovaná** pre každú aplikáciu a oneskorenia a časové odchýlky majú definované horné hranice.
- **BE – Best Effort traffic. Prevádzka s čo najlepším úsilím:** pakety sa posielajú cez fronty FIFO do priletových portov. Neexistuje absolútna záruka, či a kedy budú tieto správy prenášané, aké oneskorenia sa vyskytnú a či sa príjemcom dostane správa. Správy s najvyššou náročnosťou používajú zostávajúcu šírku pásma siete a **majú nižšiu prioritu ako ostatné dva typy**.

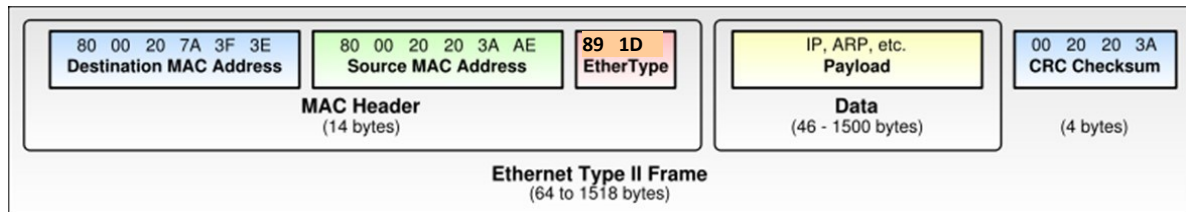
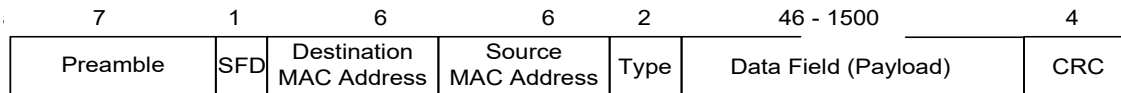


Obr. 4. TTEthernet podporuje tri rôzne triedy prenosu: TT, RC a BE.



Obr. 5. TTEthernet podporuje synchronný aj asynchronný prenos v jednej sieti.

- **Time-triggered (TT)** prevádzka - je odosiadaná časovo spínaným spôsobom, t. j. každý vysielač musí byť synchronizovaný a má vysielačský plán a každý TTE-Switch má plán prijímu a odovzdávania. Táto prevádzka sa posiela po sieti s konštantným komunikačným oneskorením a malým a obmedzeným jitterom (štandard SAE AS 6802).
- **Rate-constrained (RC)** prevádzka - je odosiadaná s ohraničeným oneskorením a jitterom zabezpečujúcou bezstratovú komunikáciu. Každý odosielačský uzol časovo riadeného ethernetu dostane vyhradenú šírku pásma na prenos správ s RC prevádzkou. Pri výmene RC správ sa nevyžaduje synchronizácia hodín (letecký štandard ARINC 664).
- **Best-effort (BE)** prevádzka – je prevádzka bez časových záruk. Trieda prevádzky BE je kompatibilná so štandardnou prevádzkou Ethernetu IEEE802.3.



Obr. 6. Formát rámca Ethernet a TTEthernet Type = 891D

Relevantný **Ethernet Type** určuje typ protokolu:

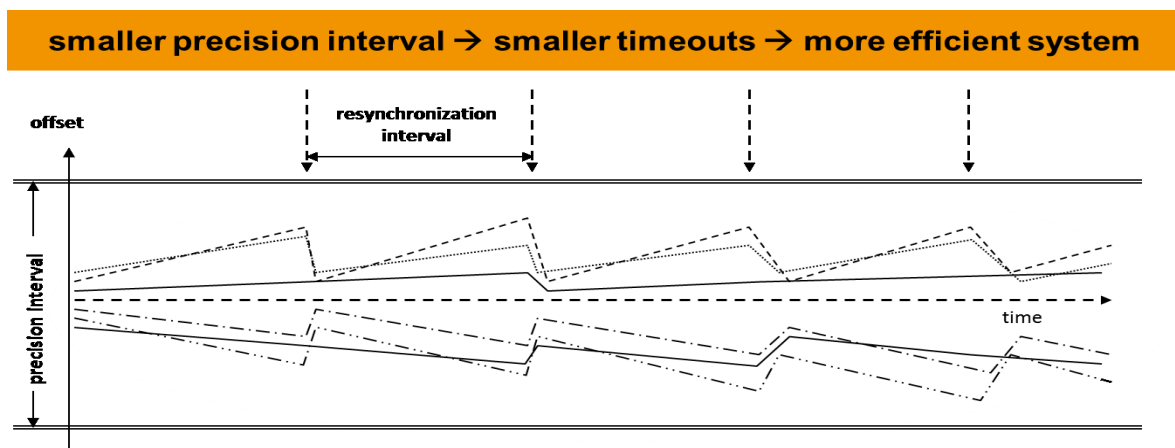
- **TTEthernet = 0x891D**
- Internet Protocol (IP) = 0x0800, Ethernet PAUSE frame = 0x8808
- EtherCAT = 0x88A4
- Profinet = 0x8892
- Ethernet Powerlink = 0x88AB

Prevádzka RC (Rate-constrained) je založená na virtuálnych linkách (VL). Virtuálny link je cesta medzi odosielateľom a prijímačom s jedinečným VL identifikátorom (VL ID). VL ID je zakódovaný do dvoch spodných bytov cieľovej adresy (Destination MAC address), obr. 6. Prepínače sú nakonfigurované tak, aby vedeli o definíciách VL (až 4096 VL ID na jeden prepínač).

Prevádzka TT (Time-triggered) si vyžaduje spoľahlivú a presnú **synchronizáciu lokálnych hodín všetkých zariadení** (uzlov) v sieti. Lokálne hodiny sú počítadlo spúšťané oscilátorom. Každý z oscilátor má určitý drift – posun frekvencie – spôsobený fyzikálnymi faktormi (teplota, vlhkosť, ...).

- Oscilátory s malým driftom (drift rate) $\sim 10^{-6}$ s/s – sú drahé (satelitné majú len 10^{-9} s/s)
- Standardný drift oscilátorov bežne dostupných na trhu je: 10^{-3} s/s to 10^{-5} s/s

Poznámka: Čo znamená 10^{-3} s/s drift? Chybu 1 sekundu za 1000 sekúnd, to je 10 min. odchýlka za víkend. A to si nemôžeme dovoliť.



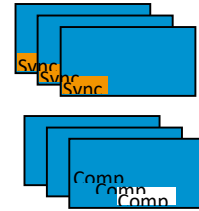
Obr. 7. TTEthernet využíva periodickú synchronizáciu lokálnych hodín všetkých uzlov.

Chybovo tolerantná synchronizácia u TTEthernet je založená na dvoch triedach Mastrov:

1. Synchronization Masters

2. Compression Masters

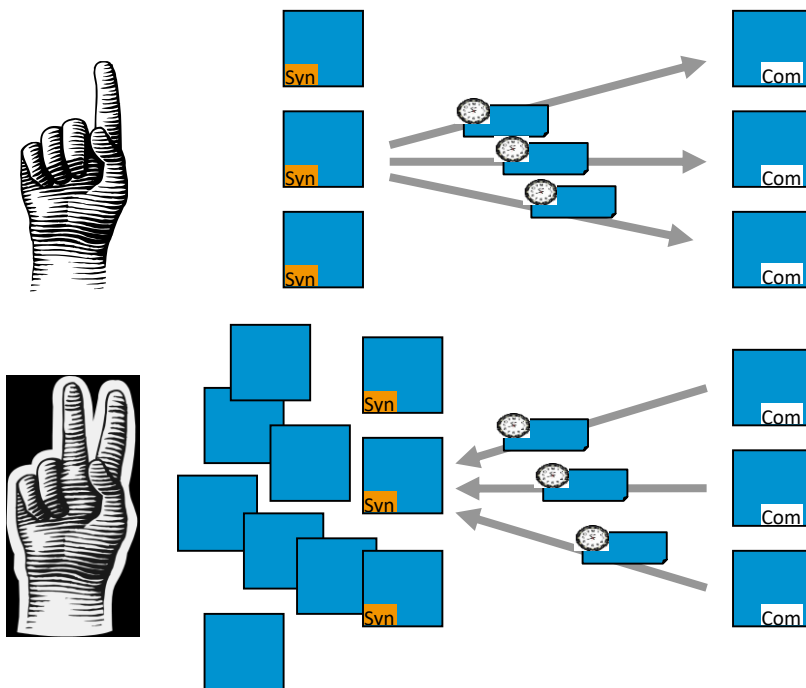
V každom integračnom cycle tieto komponenty vykonávajú synchronizačný protokol TTEthernet.



- Každá skupina musí obsahovať aspoň jedného synchronizačného Mastra;
- **Na synchronizáciu odolnú voči chybám sú potrební viacerí Mastri = to je podstata chybovo tolerantnej synchronizácie**
- Funkcia Synchronization Master sa zvyčajne nachádza v koncových systémoch (uzloch) a funkcia Compression Master sa nachádza v prepínačoch (switchs).

Protokol nazývaný “Integration Frames” sa používa na vykonávanie všetkých synchronizačných funkcií. Podľa toho sa synchronizácia realizuje v dvoch krokoch:

- 1) **Synchronization Masters** odosielajú integračné rámce na začiatku každého integračného cyklu. Načasovanie týchto rámcov sa používa na „hlasovanie“.
- 2) **Compression Masters** posielajú **integračné rámce všetkým uzlom** a načasujú ich špeciálne tak, aby si každý mohol opraviť svoje hodiny.
- 3) Poznámka: Pre synchronizáciu sa nemusí požiť centrálny/globálny čas (Grand clock). Dohodnú sa na jednotnom čase v „ostrovnej prevádzke“.



Obr. 8. TTEthernet využíva chybovo tolerantnú synchronizáciu v dvoch krokoch.

Time-Triggered Ethernet kombinuje vysokú flexibilitu systémov voľnejších foriem komunikácie a spoľahlivosť a determinizmus staticky nakonfigurovaných systémov. Kombinuje overené mechanizmy odolnosti voči chybám a v reálnom čase časovo spúšťanej technológie. Podporuje najvyššie formy funkčnej bezpečnosti (SIL4, ASIL D, ...) a chybovo tolerantnú komunikáciu s redundanciou. Preto je vhodný pre rôzne typy aj tých najnáročnejších aplikácií ako sú automobilový, letecký a kozmický priemysel.

3. Time Sensitive Networking

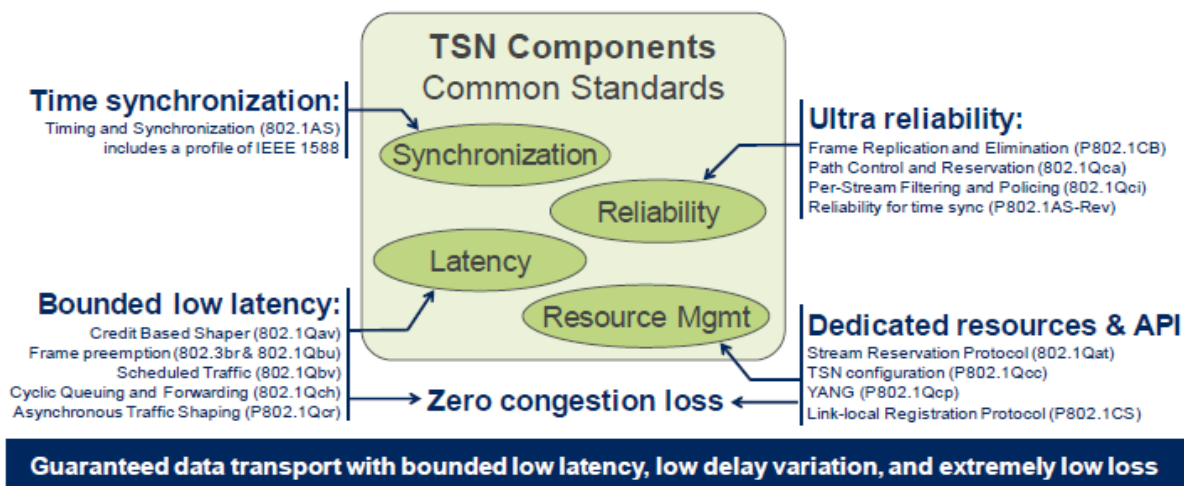
Časovo citlivé siete (TSN) sú kľúčové pre priemyselné aplikácie, ako sú procesné a riadenie strojov, kde je malé komunikačné oneskorenie a minimálny jitter, oba kritické pre splnenie požiadaviek na automatické riadenie v uzavretej spätnoväzobnej slučke. TSN je prvý úplne otvorený štandard a interoperabilný spôsob, ako splniť tieto požiadavky.

TSN umožňuje jednotnú otvorenú sieťovú infraštruktúru, ktorá podporuje interoperabilitu viacerých výrobcov prostredníctvom štandardizácie. TSN umožňuje konvergenciu IT a OT vďaka garantovanej latencii a spoľahlivej komunikácii. Ide o skupinu „sub-noriem/ sub-protokolov“, ktoré veľmi dobre navzájom spolupracujú, Tab. 1 , Obr. 9.

Tabuľka 1. Vybrané základné sub-štandardy TSN [5].

STANDARD	DESCRIPTION
IEEE 802. 1ASrev, IEEE 1588	Timing & Synchronization
IEEE 802. 1Qbu & IEEE 802. 3br	Frame Preemption
IEEE 802. 1 Qbv	Enhancements for Scheduled Traffic
IEEE 802. 1 Qca	Path Control & Reservation
IEEE 802. 1 Qcc	System Configuration
IEEE 802. 1Qci	Per-Stream Filtering & Policing
IEEE 802. 1 CB	Seamless Redundancy

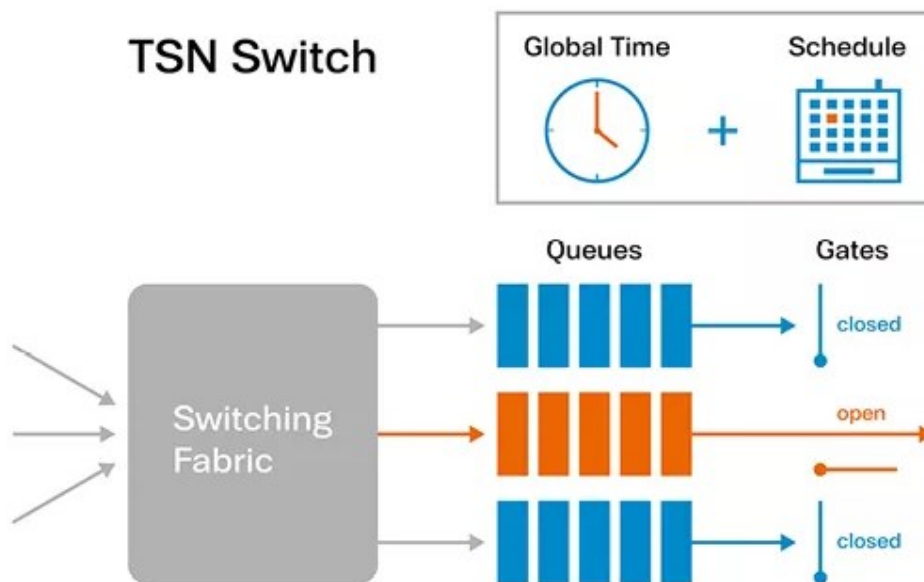
TSN definuje prvý štandard IEEE 802.1 pre časovo spúšťané (Time Triggered) smerovanie správy v spínanej sieti Ethernet a teda plne deterministickú komunikáciu v reálnom čase. TSN dosahuje determinizmus na Ethernete pomocou časovej synchronizácie a rozvrhu (plánovača), ktorý je zdieľaný medzi sieťovými komponentmi (TSN switches). Práve aktívna účasť prepínačov na plánovaní a potom na realizácii komunikácie v sieti TSN, je zásadnou pridanou hodnotou oproti iným komunikačným systémom RT. Táto technológia sa bude používať na podporu riadenia a synchronizácie v reálnom čase u vysoko výkonných systémov prostredníctvom jediného štandardného ethernetového pripojenia.



Obr. 9 TSN má výborné vlastnosti vďaka previazanosti rôznych protokolov IEEE 802.1 [4].

Pre synchronizáciu zariadení v sieti TSN používa Precision Time Protocol IEEE1588. Vďaka koncepcii plánovača času komunikácie- time-aware shaper (802.1Qbv) je možné riadiť tok komunikácie vo fronte s aktívnym TSN prepínačom, obr.10. TSN implementuje plánovač do 2. vrstvy ISO OSI (namiesto do 4.) a tým dosahuje garantovanú nízku latenciu.

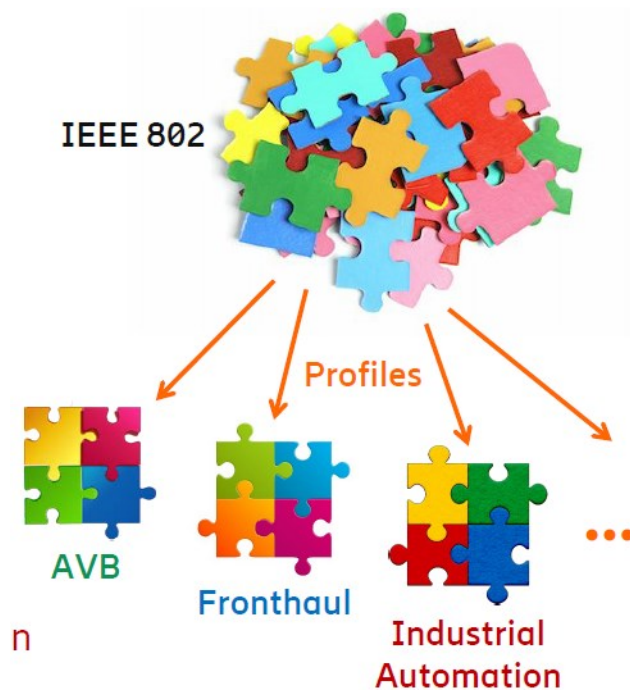
Rámce siete Ethernet sú identifikované a priradené k frontám (Queues) založeným na prioritnom poli značky VLAN. Každá fronta je definovaná v rozvrhu a prenos správ v týchto frontoch sa potom vykoná na výstupných portoch počas naplánovaných časových okien. Ostatné fronty budú zvyčajne počas týchto časových okien zablokované prenosom, čím sa odstráni pravdepodobnosť, že plánovaná prevádzka bude obmedzená nepravidelnou prevádzkou. To znamená, že oneskorenie prostredníctvom každého prepínača je deterministické a že je zaručená latencia správy prostredníctvom siete komponentov s funkciou TSN.



Obr. 10 Prepínače sa aktívne zúčastňujú plánovania komunikácie [3].

Aplikačné oblasti TSN sú veľmi široké a sú pokryté množstvom štandardov [4]. Charakterizujú ich najmä publikované a pripravované profily, obr. 11, z ktorých tie hlavné sú :

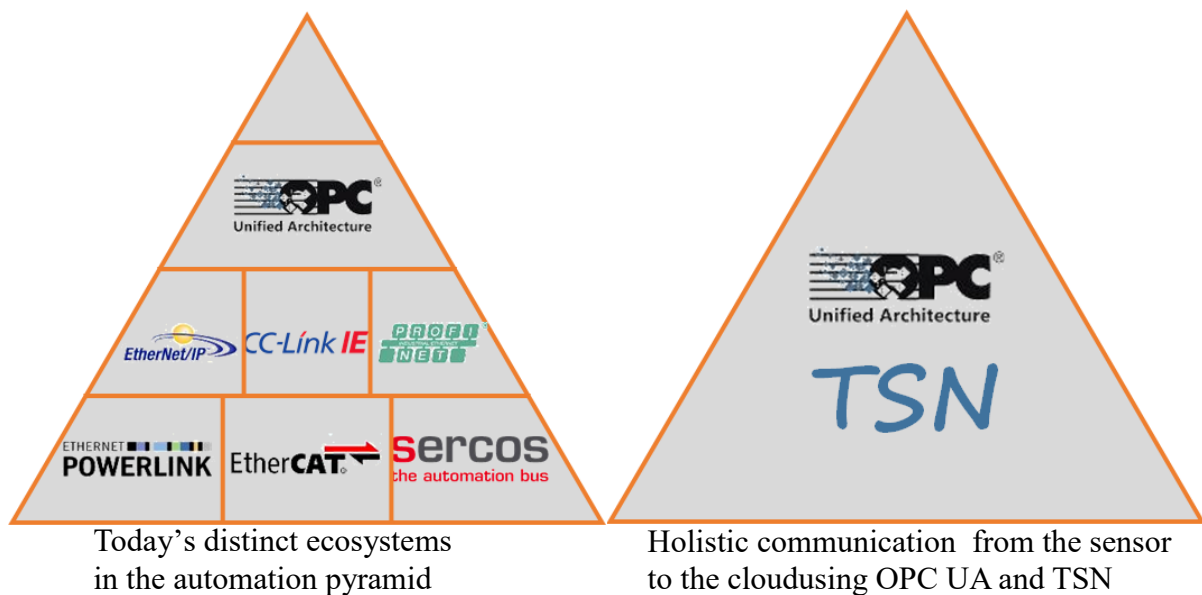
- IEEE Std802.1BA for Audio-Video Bridging (AVB) networks
- IEEE Std802.1CM TSN for Fronthaul (for cellular networks)
- IEC/IEEE 60802 TSN Profile for Industrial Automation
- P802.1DG – TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications
- P802.1DP – TSN for Aerospace Onboard Ethernet Communications



Obr. 11 Štandardizované profily TSN pre rôzne aplikačné oblasti.

TSN podporuje funkcionalitu „Plug-and-Produce“. Keď sa nové zariadenie (bezproblémovo) pripojí do siete, je hneď registrované centrálnym sieťovým konfigurátorom - Central Network Configurator, ktorý zabezpečí a nadviaže jeho spojenie s ostatnými zariadeniami a prekonfiguruje podľa toho štruktúru siete a nastavenie switchov. Ide o dynamickú konfiguráciu siete tak, ako je uvedená v štandarde IEEE 802.1 Qcc.

Veľké očakávania v priemysle sú od spojenia dvoch otvorených globálnych štandardov OPC UA a TSN, ktoré zabezpečia interoperabilitu v reálnom čase. Označuje sa to ako „OPC UA over TSN“ (OPC UA FX). Automatizačná pyramída sa v budúcnosti môže zmeniť podľa obr. 12.



Obr. 12. Vízia budúcej celosieťovej interoperabilnej komunikácie v reálnom čase.

Záver

Niet pochýb o tom, že normy TTEthernet a najmä TSN sú kľúčovým, základným stavebným kameňom pre víziu Priemyslu 4.0 a mnohých aplikácií, ktoré vyžadujú deterministický reálny čas a vysokú spoľahlivosť, ktorý zmení - vnesie do novej generácie technológií revolúciu do spôsobu práce a fungovania výrobcov. Je to však len jeden z prvkov širšieho ekosystému, ktorý budujeme na uvedenie štvrtej priemyselnej revolúcie do života.

Referencie:

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/TTEthernet>
- [2] Deterministic Real-Time Ethernet platform. Ethernet Technical Whitepaper Tttech.pdf <https://www.tttech.com/explore/time-triggered-ethernet>
- [3] Time-Sensitive Networking. TTEch Home -Explore <https://www.tttech.com/explore/time-sensitive-networking-tsn>
- [4] IEEE Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group <https://1.ieee802.org/tsn/>
- [5] Time-Sensitive Networking: A Technical Introduction White Paper.pdf <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>
- [6] TSN: five ways IEEE standards will advance Industry 4.0 <https://iebmedia.com/technology/tsn/tsn-five-ways-ieee-standards-will-advance-industry-4-0/>
- [7] Industrial Internet Consortium. Testbed: TIME SENSITIVE NETWORKS FOR FLEXIBLE MANUFACTURING <https://hub.iiconsortium.org/time-sensitive-networks>