

TSN se standardními, komerčně dostupnými komponentami

Rozšíření standardu IEEE 802.1Q pro přepojování v ethernetových sítích, známé často pod obecně používaným názvem TSN (*Time Sensitive Networking*, časově citlivé síťování), umožňuje vytvářet automatizační systémy s homogenní síťovou architekturou od snímače po cloud. Ve srovnání s tím tradiční řešení používající na provozní úrovni řízení proprietární síťové standardy, jež zajišťují „tvrdý“ reálný čas, vždy představují určitou diskontinuitu síťové architektury. Síť TSN tuto diskontinuitu odstraňuje, protože dokáže zajistit tok informací z provozní úrovně řízení do vyšších pater řídicí hierarchie. Navíc uživatelé a výrobci zařízení získají výhodu unifikovaného hardwaru, který je flexibilní a cenově výhodný. Další výhodou je lepší využití instalovaných zařízení a běžné kabeláže množstvím různých aplikací bez rizika vzájemného ovlivňování.

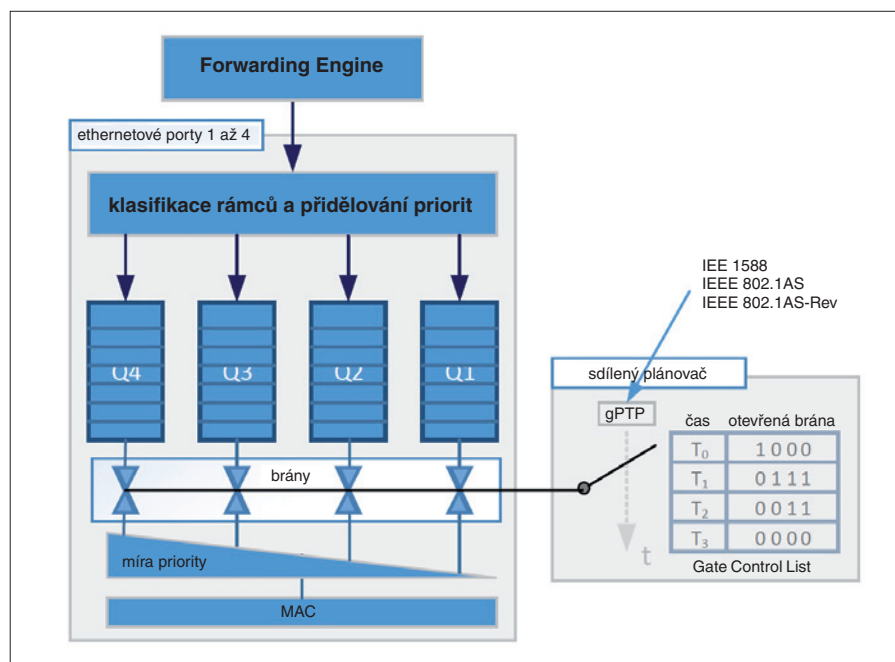
Vzhledem k očividným výhodám se o vstupu sítí TSN do světa automatizace již nediskutuje – stal se skutečností. Rozdíly ve strategiích používaných různými firmami se nejčastěji týkají jen časování a sekvencí kroků. Jednotliví výrobci již dodávají na trh první výrobky s TSN, mnohé jsou už vyvinu-

ty jsou rozhraní založená na FPGA, díky nimž lze do rozhraní produktů pružně implementovat nejnovější funkce. Cena tohoto řešení se skládá ze tří faktorů: relativně vysoké výrobní ceny, ceny za programování FPGA včetně otestování logických funkcí a certifikace a popř. ceny za licenci, použije-li se hotové řešení.

TSN v automatizaci

Požadavky na komponenty sítí, zvláště na koncové uzly a switche, se liší podle jejich funkce a konfigurace v síti. Síťové rozhraní PLC nebo rozhraní uzlu edge musí být jiné než rozhraní jednoduchého provozního zařízení. Podobně se musí switche na úrovni provozního řízení vypořádat s mnohem větším zatížením sítí než jejich protějšky na nižších úrovních snímačů a akčních členů. To se odráží v minimálních požadavcích na odpovídající komponenty zvláště v oblasti jednoduchých provozních zařízení, kde se zpravidla používá liniová nebo kruhová topologie s jedním nebo dvěma externími ethernetovými porty. Skupina substandardů TSN nabízí dvě hlavní metody, jak zajistit časově deterministický přenos dat: zaprvé přidělování priorit a preemptivní rámce (asynchronní) a za druhé časově řízený přenos ve vyhrazených časových slotech (metoda TDMA – *Time Division Multiple Access*, synchronní). Obě metody je možné kombinovat. V současné době je v oblasti průmyslové automatizace kladen důraz zvláště na časově řízenou komunikaci TSN a přenos dat v tvrdém reálném čase. Tento princip se již osvědčil u standardů, jako jsou Profinet IRT, Sercos III, EtherCAT nebo Powerlink. Standard TSN IEEE 802.1Qbv (*Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic*) rozšiřuje a zobecňuje existující proprietární mechanismy, aby se rozšířila oblast potenciálního využití a umožnila koexistence různých systémů reálného času ve společných sítích bez vzájemné interakce. Časové řízení přenosů dat v sítích Qbv zabraňuje nežádoucím kolizím mezi různými datovými proudy opouštějícími switch na společném portu. Jestliže jde o komponentu, která je koncovým zařízením s jedním ethernetovým portem, a tedy nemá vestavěnou funkci switche pro přeposílání telegramů, je pro účast v časově řízené komunikaci TSN postačující přesné řízení času přenosu jednotlivých ethernetových rámců.

Pro efektivní použití časově řízeného přenosu je nezbytnou podmínkou přesná synchronizace všech účastníků v síti s přesností ve zlomcích mikrosekund. Zavedené procedury v souladu s normami IEEE 1588 (*Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*) a IEEE 802.1AS (*Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Timing and Synchronization for Ti-*



Obr. 1. Bloková struktura funkce TDMA ve switchích RZ/N1

ty a další budou postupně následovat. Hlavní otázkou při zavádění TSN je široká dostupnost vhodného hardwaru. Standardy TSN jsou stále relativně nové a jejich implementace do odpovídajících polovodičových zařízení vyžaduje čas. Naproti tomu jen malá, avšak nevyhnutelná část standardů TSN vyžaduje podporu specializovaného hardwaru. Mnoho funkcí, které se vztahují k TSN, např. správa sítě, je čistě softwarových a mohou být snadno implementovány na libovolný hardware.

V současné době mají výrobci zařízení k dispozici dvě hlavní možnosti, jak zavést funkce TSN do svých výrobků. Na jedné straně

Na druhé straně jsou na trhu k dispozici běžná polovodičová zařízení, která za nízkou cenu nabízejí verifikované funkce TSN. Nízké ceny se dosahuje mj. tím, že není třeba znovu vyvíjet to, co už bylo jedno vyvinuto: standardy TSN jsou založeny na osvědčených konceptech, které se jen dále vyvíjejí a zevšeobecňují. Tato polovodičová zařízení vybraná podle specifických požadavků aplikace je možné použít jako základ pro využití komunikace TSN. V současné době je již obvyklou praxí, že výrobci zařízení implementují funkce TSN do automatizačních prostředků s využitím standardních, komerčně dostupných komponent.

Tab. 1. Srovnání mezi Qbv a Qav + TDMA

Vlastnost	IEEE 802.1Qbv	IEEE 802.1Qav + TDMA ¹⁾
komunikační fronty	8	4
časové sloty	>8 ²⁾	4
plánovač	individuální pro každý port	globální pro všechny porty
kritéria klasifikace	VLAN PCP, defaultní pro neoznačené rámce	VLAN PCP, určený MAC, IPv4 (DiffServ), Ipv6 (Class of Service), programovatelný Pattern Matcher, typ ethernetových rámců, defaultní fronta Queue pro neoznačené rámce
řízení kongescí	Guard Window	není ³⁾

1) jako příklad se používá Renesas RZ/N1

2) specifické podle aplikace, není definováno ve standardu Qbv

3) Je-li to nezbytné, vloží se „prázdný“ časový slot, který odpovídá maximální délce rámce v daném čase.

Tab. 2. Třídy a jejich namapování na dostupný hardware switchů řady RZ/N1

Priorita	Třída	Příklad	Fronta	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
7	data v reálném čase	I/O data	4	1	0	0	0
5	řízení sítě	synchronizace	3	0	1	0	0
3	přiřazena priorita	OPC UA	2	0	1	1	0
1	jiné	http, stav, diagnostika	1	0	1	1	0

T₀: časový slot výhradně pro data v reálném čase; zabránění kolizi s jinými třídami

T₁: časový slot pro všechny zbývající třídy

T₂: časový slot pro data s nízkou prioritou, pro zajištění minimální propustnosti

T₃: vyhrazené pásmo, zaručující volný výstupní port okamžitě na začátku T₀ následujícího cyklu

me-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks) kladou na hardware stejné požadavky jako Qbv. Odpovídající zařízení musí být vybavena hardwarovým časovačem protokolu PTP, od něž se při odesílání a příjmu synchronizovaných zpráv generují časové značky. Frekvence a fáze časovače PTP musí být nastavitelná synchronizačními hodinami¹⁾.

TSN ve stávajících zařízeních

Některá polovodičová zařízení, např. switche řady RZ/N1 od firmy Renesas, již nabízejí mechanismy jako vysoce přesnou synchronizaci a přenosy dat řízené časem s využitím TDMA.

Sítě TSN budou využívat nový protokol PTP podle IEEE 802.1AS-Rev založený na metodách popsaných v IEEE 1588, který nemá žádné dodatečné požadavky na hardware. Jako alternativa se již dnes používají mechanismy podle dosud užívaných norem IEEE 802.1AS a IEEE 1588. Rozdíl v implementaci obou standardů je výhradně v softwaru.

Metoda TDMA je již implementována v mnoha dostupných zařízeních jako rozšíření specifikace Qav. V tomto případě jsou ethernetové rámce klasifikovány podle Qav a jsou jim v jednom cyklu komunikace přiděleny individuální časové sloty. Tento mechanismus je předchůdcem specifikace Qbv, která se využívá v TSN. Čip s podporou IEEE 1588/1AS

a Qav + TDMA je tedy vhodný i pro realizaci zjednodušené funkce Qbv pro TSN. To umožňuje využívat výhody TSN v jednoduchých koncových zařízeních na provozní úrovni v hvězdicové, liniové i kruhové topologii, stejně jako v hybridních topologiích.

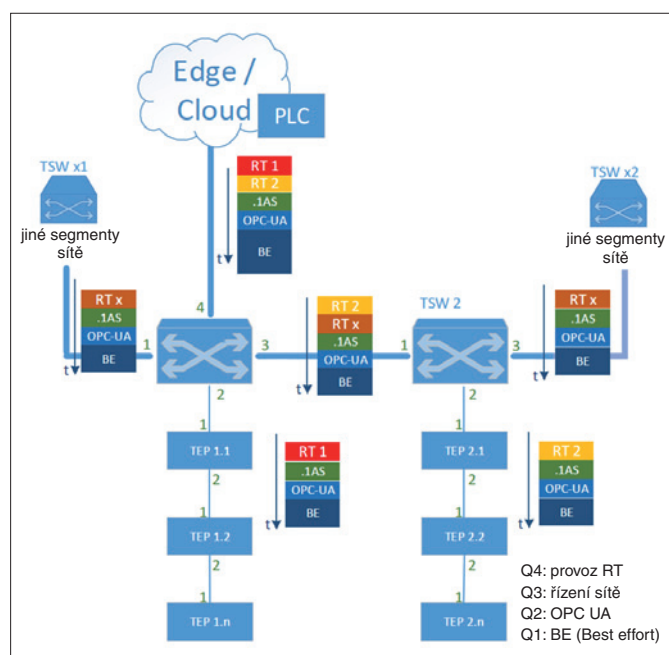
Na obr. 1 je bloková struktura funkce TDMA ve switcích RZ/N1. Nahoře jsou při-

cházející ethernetové rámce blokem Forwarding Engine přepojovány na své cílové porty. Tam je každý rámeček klasifikován podle konfigurovatelných kritérií a umístěn do jedné ze čtyř výstupních front (Queues). Hardwarový časovač gPTP je synchronizován s časem sítě v příslušné doméně TSN. Od něj se odvozuje všechny časové sloty mechanismu TDMA. Časové sloty s individuálně konfigurovatelnou délkou jsou specifikovány centrálně pro všechny ethernetové porty zařízení v seznamu Gate Control List se čtyřmi vstupy.

V každém časovém slotu mohou být otevřeny libovolné fronty výstupního portu, řízené prostřednictvím funkce Bitmasks. V tomto kontextu „otevřené“ znamená, že ethernetové rámce, které jsou ve frontě, mohou být prostřednictvím řízení priorit zpracovány v linkové vrstvě MAC (Media Access Control) a tím připraveny k odeslání po kabelu. Systém řízení priorit pro přeposílání vždy vybírá ethernetové rámce s nejvyšší prioritou fronty. Ovšem ethernetové rámce v „uzavřených“ frontách nejsou v odpovídajícím časovém slotu přeposlány.

Tak to funguje i podle starších standardů. Qbv se liší primárně v počtu front a časových slotů, tj. v diverzifikaci řízení jednotlivých ethernetových rámců. Detailní srovnání je v tab. 1. Například switche řady RZ/N1 od firmy Renesas podporují čtyři fronty a čtyři časové sloty. Pro srovnání: standard TSN Qbv definuje osm front, zatímco počet časových slotů nechává neurčený. Switch podle standardu Qbv má centrální časovač gPTP a seznam Gate Control List je specifický pro každý port, takže každý port switche může mít vlastní plánování komunikace.

Pro provozní zařízení s jedním ethernetovým portem a provozní zařízení v jednoduché liniové nebo kruhové topologii využívající vestavěný switch jsou uvedené omezení často akceptovatelná. Je to proto, že se v reálném čase přenáší jen několik různých streamů a rozvrh komunikace je pro všechny porty stejný, což umožňuje ethernetovým rámcům bez zdržení procházet jednotlivými komponentami, a tím celou liniovou nebo kruhovou síť. Ilustruje to následující příklad použití TSN.



Obr. 2. Ukázkový systém TSN

¹⁾ Pozn. red.: Blíže viz článek Zesulka, František, Ondřej Hynčica. Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision Time Protocol (PTP) podle IEEE 1588. Automa. 2010, (2), 17–19.

Příklad použití TSN

Jednoduchá konfigurace na obr. 2 ilustruje, jak může být vytvořen automatizační systém využívající TSN prostřednictvím funkcí dostupných ve switchích RZ/N1.

Programovatelný automat (PLC) schopný komunikovat v sítích TSN, fyzicky instalovaný v provozu nebo virtuálně v průmyslovém počítači *edge*, řídí velký počet I/O komponent (označených TEP n.m), které jsou uspořádány do dvou liniových sítí. Alternativně lze v tomto případě použít i kruhovou síť. Provoz v síti je řízen časem a synchronizován s řídicími cykly PLC. Řídicí cykly PLC mají tři fáze: čtení hodnot z I/O zařízení, výpočet nových

802.1AS a pro zabránění nežádoucím kolizím využívají časově řízený přenos. Komunikace se uskutečňuje v časových rámcích s pevným rastrem, který se cyklicky opakuje. V tab. 2 je také znázorněno přiřazení tříd do časových slotů tohoto rastru pro koncová zařízení v liniových subsítích. Doba cyklu a délka individuálních časových slotů závisí na aplikaci. Časový slot T_3 je vždy prázdný, tj. v této době se neodesílá žádná fronta, a měl by mít délku nejdelšího ethernetového rámce, který se v síti vyskytuje. To zaručuje, že výstupní port je na začátku okna reálného času T_0 vždy volný a není obsazen předchozím rámcem, což by vedlo k nežádoucímu zpoždění odeslání rámce reálného času.

tích musí být dostatečně dlouhý, aby umožnil přeposlání všech výstupních proměnných. Simultánní přenos aktuálních a nových výstupních hodnot je bezkolizní a nevyžaduje žádná dodatečná opatření, protože data proudí v opačných směrech.

Poté, co jsou všechny aktuální hodnoty přeneseny do PLC ve svém definovaném přenosovém okně a nové výstupní hodnoty přeneseny do všech koncových uzlů, začne PLC zpracovávat svůj vlastní program, který vypočítává nové výstupní hodnoty z aktuálních hodnot.

Výstupní uzly zpracovávají své nové žádané hodnoty synchronně na základě synchronizovaného síťového času, takže všech-

		Cycle		Cn				Cn+1				Cn+2
		SPS State	Data I/O	Computing		RT.out for tn+1		Data I/O	Computing		RT.out for tn+1	...
Link (Port to Port)												
SPS/Cloud	E	TSW 1	4.I	RT.out.2.tn	RT.out.1.tn	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.out.2.tn+1	RT.out.1.tn+1	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	I		4.E	RT.in.2.tn	RT.in.1.tn	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.in.2.tn+1	RT.in.1.tn+1	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
TSW 1	1.E	TSW x1		Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort		Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort
	1.I			Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort		Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort
	2.E	TEP 1.n	1.I		RT.out.1.tn	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort		RT.out.1.tn+1	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	2.I		1.E	RT.in.1.tn		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.in.1.tn+1		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	3.E	TSW 2	1.I	RT.out.2.tn	other RT	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.out.2.tn+1	other RT	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	3.I		1.E	RT.in.2.tn	other RT	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.in.2.tn+1	other RT	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
TSW 2	2.E	TEP 2.n	1.I		RT.out.2.tn	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort		RT.out.2.tn+1	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	2.I		1.E	RT.in.2.tn		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.in.2.tn+1		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	3.E	TSW x2		Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort		Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort
	3.I			Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort		Net Ctrl	other RT	OPC-UA & Best effort
TEP 1.n	2.E	TEP 1.n+1	1.I	RT.in.1.tn		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.in.1.tn+1		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	2.I		1.E		RT.out.1.tn	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort		RT.out.1.tn+1	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
TEP 2.n	2.E	TEP 2.n+1	1.I	RT.in.2.tn		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	RT.in.2.tn+1		Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
	2.I		1.E		RT.out.2.tn	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort		RT.out.2.tn+1	Net Ctrl	OPC-UA & Best effort	...
		TEP Scheduler										...
				T_0	T_1	T_2	T_3	T_0	T_1	T_2	T_3	...

Obr. 3. Plánování v síti TSN

výstupních hodnot prostřednictvím programu v PLC a výstup nově vypočítaných výstupních hodnot na terminálová zařízení. Fáze 1 a 3 se v čase překrývají. Páteřní síť TSN, která se skládá ze switchů TSW 1 a TSW 2, si musí poradit s veškerou komunikací mezi PLC a subsítmi, a jestliže je to nutné a je to indikováno prostřednictvím switchů TSW x1 a TSW x2, také s další komunikací se sousedními segmenty sítě. To vyžaduje v páteřních switchích TSW 1 a TSW 2 plnou podporu standardu TSN Qbv, a je-li to požadováno, také Qbu.

Požadavky v liniových podsítích jsou mnohem menší. Komponenty označené TEP n.m jen přeposílají komunikaci mezi sousedními uzly. Jejich role jako koncových bodů TSN je omezena na jednoduchý stream v reálném čase pro komunikaci s PLC a další časově nekritickou komunikaci, jako je synchronizace nebo komunikace se serverem OPC UA. V tab. 2 jsou ukázány různé třídy a jejich namapování na dostupný hardware switchů řady RZ/N1, které splňují požadavky na funkce TSN v tomto uspořádání.

V uvedeném případě jsou všechny síťové komponenty, switche a koncové uzly, synchronizovány navzájem prostřednictvím synchronizačního protokolu popsaného v IEEE

Schéma komunikace

Všechna koncová zařízení TEP n.m na začátku každého komunikačního cyklu posílají do PLC své aktuální hodnoty jako vstupní proměnné. PLC v této části současně posílá nové výstupní hodnoty vypočítané z předchozích hodnot získaných z koncových uzlů.

Pro to je v každé subsíti i v páteřní síti vyhrazen časový slot T_0 , v němž jsou přenášena jen data v reálném čase mezi koncovými zařízeními TEP n.m a PLC. Kolize s jiným provozem na síti není možná, takže je garantována maximální doba přenosu z každého koncového uzlu a do něj. Koncové uzly přenášejí své aktuální hodnoty do svých nadřazených switchů páteřní sběrnice TSW 1 a TSW 2 simultánně. Switche sbírají data a odesílají je do PLC. Také zde je kolize při komunikaci vyloučena, protože páteřní switche přenášejí data z každé podsítě v oddělených časových slotech. To vyžaduje mít odpovídající zdroje ve switchích páteřní sítě.

Výstupní hodnoty jsou přenášeny ve dvou krocích, aby se tak dosáhlo téměř simultánního příchodu výstupních hodnot PLC do každého uzlu TEP n.m; nejprve v subsíti 2, potom v subsíti 1. Časový slot T_0 v subsíti

ny komponenty změni svůj výstupní stav najednou.

Potom, co PLC ukončí své výpočty, bez přerušení následuje další cyklus komunikace.

Další data mohou být přenášena mimo vyhrazené časové sloty na páteřní síti TSN i v obou subsítích 1 a 2 bez nutnosti starat se o vliv na komunikaci v reálném čase. Například data reálného času RT x mohou být přenášena mezi dvěma přilehlými segmenty sítě a uzavřena v individuálních časových slotech tak dlouho, jak to umožňuje zbývající šířka přenosového pásma. Další důležité datové streamy jsou používány pro synchronizaci nebo pro dotazování objektů OPC UA.

Závěr

Standard TSN je stále ještě mladý a potřebná hardwarová podpora se postupně rozvíjí. Ovšem i s běžnými, komerčně dostupnými produkty, jako jsou switche RZ/N1 od firmy Renesas, které jsou založeny na obecně rozšířených standardech předchozí verze, je možné již nyní využívat výhody metod TSN, jsou-li v dané aplikaci přijatelná jejich omezení.

Arno Stock, Renesas Electronics Europe