

## Priemyselné siete podporujúce reálny čas založené na Ethernete

Viszus Eugen · Elektrotechnika, Informačné technológie

05.05.2014



Cieľom tohto príspevku je urobiť prehľad a opísať funkcionality troch rýchlych priemyselných sietí založených na technológii priemyselného Ethernetu. Príspevok sa venuje sieťam EtherCAT, PROFINET a ETHERNET POWERLINK. Každá z týchto sietí ma vlastnosti vďaka ktorým spĺňa požiadavky pre hard real-time aplikácie ako je napríklad riadenie veľmi rýchlych pohonov. O každej z týchto sietí sú popísané základne informácie a špecifikácie, spôsob adresovania uzlov siete a spôsob komunikácie medzi uzlami.

### Úvod

Prvé priemyselné komunikačné zbernice začali vznikať už začiatkom 70-tych rokov minulého storočia. Skutočný rozmach nastal však až o 10 rokov neskôr, keď na trh vstúpilo viacero výrobcov s vlastnými riešeniami. Použitie komunikačnej zbernice poskytuje používateľovi veľa výhod, ako napríklad jednoduchšia rozšíriteľnosť systému, vzdialená konfigurácia, monitoring a diagnostika zariadenia a iné. Posledných niekoľko rokov ako aj v súčasnosti je v priemyselnej komunikácii trendom využívať sieť Ethernet. Zbernice založené na Ethernete využívajú na prenos údajov metalické alebo optické prenosové médium. Tieto zbernice využívajú až 5 vrstiev z referenčného ISO/OSI sieťového modelu a vďaka možnosti použitia smerovačov alebo prepínačov môžu byť zapojené v ľubovoľnej topológii.

Samotný Ethernet je pre potreby sieťového riadenia nevyhovujúci, keďže neposkytuje deterministické správanie. Pre prístup zariadenia na médium Ethernet používa protokol CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)[1]. Tento protokol nedokáže zaručiť rovnaký a dostatočne krátky čas pri každom prenose informácii cez sieť, teda nespĺňa požiadavky na real-time prenos. V extrémnych prípadoch sa taktiež môže stať, že sa uzol nedostane na prenosové médium, alebo naň pristupuje až po veľmi dlhom čase. Pri detekcii kolízie dochádza k strate rámca. Priemyselné komunikačné zbernice na báze Ethernet rôznymi spôsobmi riešia nedostatky spomenuté vyššie. Uvedieme si 3 často využívané a to EtherCAT, PROFINET a ETHERNET POWERLINK. V tomto príspevku budeme hovoriť len o troch vyššie spomenutých. Na svetovom trhu je však viacero výrobcov, ktorý ponúkajú vlastné riešenia pre deterministickú komunikáciu na sieti typu Ethernet.

## EtherCAT

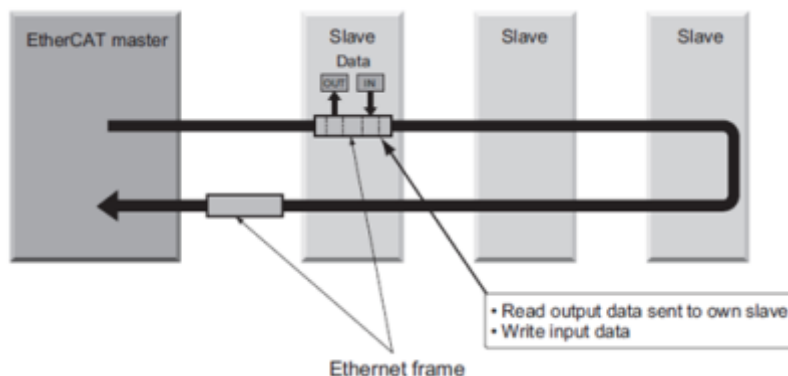
EtherCAT je vysoko výkonná priemyselná zbernica založená na Ethernete. Vďaka integrovanému mechanizmu synchronizácie založenému na báze distribuovaných hodín, má EtherCAT vynikajúce vlastnosti v reálnom čase. Vlastnosti protokolu EtherCAT:

- Procesné údaje sú prenášané priamo v Ethernetových rámcoch
- Možná komunikácia aj v rámci viacerých podsietí
- Podpora takmer všetkých topológií (čiara, strom, hviezda...)
- Takmer neobmedzená veľkosť siete (maximálna dĺžka média medzi dvoma uzlami je 100m, možnosť pripojiť až 65535 zariadení)
- Presná synchronizácia pomocou distribuovaných HW časovačov
- Pomerne vysoký výkon pri komunikácii v sieti, napr:
  - 256 distribuovaných I/O modulov má čas odozvy 0,01ms
  - 1000 distribuovaných I/O modulov má čas odozvy 0,03ms
  - 200 analógových I/O 16bit modulov má čas odozvy 0,05ms pri 20kHz
  - 100 servo osí, pričom každá má na vstupe a výstupe 8B dát a čas odozvy 0,1ms

Implementácia zbernice EtherCAT je jednoduchá predovšetkým pre malé a stredne veľké systémy. EtherCAT komunikuje maximálne 1486B distribuovaných procesných dát v jednom rámci. Tým pádom zväčša postačuje jeden či dva rámce v jednom cykle na zabezpečenie kompletnej komunikácie so všetkými uzlami. Vďaka tomu nie je potrebný dedikovaný komunikačný procesor. Okrem špecifických zariadení na to určených, môže byť Mastrom aj kancelársky počítač, ak je vybavený niektorým z podporovaných RTOS a potrebným softvérom[2].

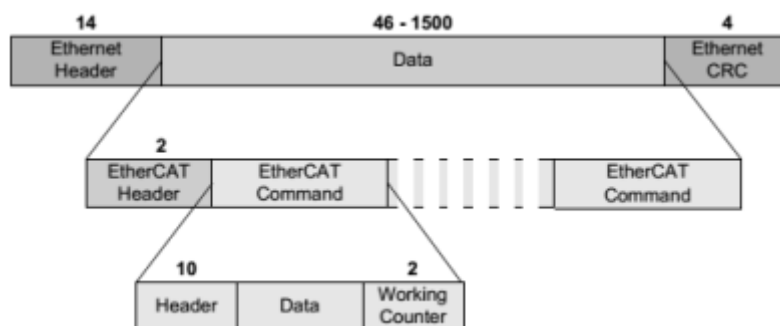
### Komunikácia v sieti EtherCAT

V porovnaní s klasickým Ethernetom je EtherCAT navrhnutý tak aby na médiu nedochádzalo ku žiadnym kolíziám rámcov. Vďaka tomu je prenos rámcov deterministický a zbernica spĺňa hard real-time požiadavky. Komunikácia prebieha nasledovne. EtherCAT Master pošle Broadcast rámeč, ktorý prechádza všetkými Slave zariadeniami, ktoré ho spracovávajú. Posledné Slave zariadenie na zbernici pošle rámeč späť zariadeniu Master. Rámeč na ceste späť ide priamo Master zariadeniu bez toho aby ho Slave zariadenia spracovávali. Dáta určené pre Slave zariadenia sa nachádzajú v takzvanom EtherCAT rámci. Spracovanie týchto dát prebieha na základe metódy „on the fly“. Každý uzol si z rámca prečíta len tie dáta, ktoré sú adresované jemu a v rovnakom čase do rámca zapíše svoje výstupné dáta. Táto metóda spracovania rámcov umožňuje zdržanie rámca na uzle len niekoľko nanosekúnd.



Obr. 1: Metóda „on the fly“.

Ako môžeme vidieť na obrázku 2, EtherCAT rámec je prenášaný v štandardnom Ethernet II rámci. Samotný EtherCAT rámec sa skladá z hlavičky, ktorá obsahuje informácie o rámci a z 1 až n dátových segmentov. Každý dátový segment obsahuje vlastnú hlavičku, samotné dáta a takzvaný „working counter“(WKC).



Obr. 2: EtherCAT rámec[3].

WKC je počítadlo prístupu uzlov k segmentu. Každé Slave zariadenie, ktoré úspešne spracuje dátový segment zvýši toto počítadlo o jeden. V každom cykle Master určí očakávanú hodnotu WKC a pošle rámec do siete. Po prijatí rámca späť skontroluje, či sa očakávaná hodnota rovná tej, ktorá bola prijatá v dátovom segmente. Ak je hodnota WKC menšia ako je očakávaná Master zistí, že neboli dosiahnuté všetky uzly a zaznamená chybu [4].

### Adresovanie uzlov

Systémy využívajúce EtherCAT používajú dva typy adresovania Slave zariadení [5].

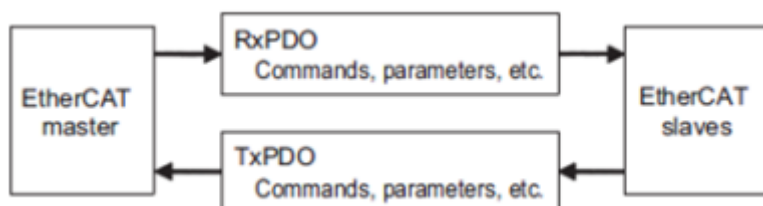
- Auto-increment adresovanie - Toto adresovanie používa Master zariadenie počas inicializácie zbernice. Keď Slave zariadenia dosiahnu stav Pre-Operational, Master začne používať druhý spôsob adresovania.
- Fixed-address adresovanie - Slave zariadenia sú adresované pomocou adries, ktoré im prideliť Master počas inicializačnej fázy.

Každé Slave zariadenie obsahuje takzvaný EtherCAT Slave Information File (ESI File). V tomto súbore sú uložené všetky informácie o Slave zariadení.

### Typy komunikácie

EtherCAT dokáže komunikovať dvoma spôsobmi:

- komunikácia procesnými dátami (PDO communication) - Jedná sa o cyklickú vstupno-výstupnú komunikáciu medzi zariadeniami Master a Slave. Master má pri tejto komunikácii namapované PDO miesta každého Slave zariadenia. Z pohľadu Slave zariadenia:
  - procesné dáta smerujúce zo Slave zariadenia - Tx PDO dáta
  - procesné dáta smerujúce do Slave zariadenia - Rx PDO dáta



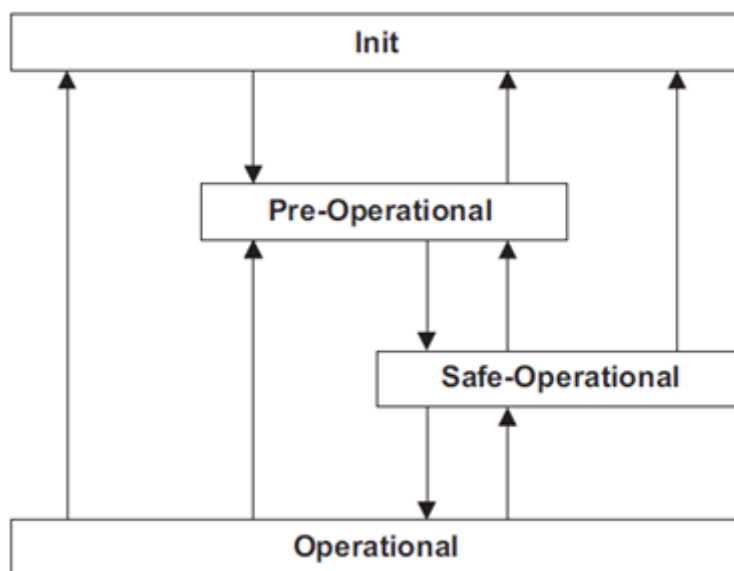
Obr. 3: Prenos PDO údajov.

- komunikácia servisnými dátami (SDO communication) - Master posiela správu Slave zariadeniu a to posiela späť odpoveď. Jedná sa o acyklickú komunikáciu.

Jednotlivé dátové objekty (PDO a SDO) sú v aplikačnej vrstve definované pomocou 16-bitového indexu a 8-bitového subindexu. Tieto hodnoty má každý Slave uložené v takzvanom slovníku objektov (object dictionary).

### Prechodové stavy komunikácie

Nasledujúci diagram zobrazuje komunikačné stavy, ktorými prechádza Slave zariadenie po zapojení napájania. Master zariadenie dokáže tieto stavy v Slave zariadení kontrolovať [5].



Obr. 4: Stavový diagram komunikácie.

Stavy z pohľadu Slave zariadenia:

- INIT
  - inicializačná fáza
  - žiadna komunikácia nie je možná
  - zariadenie je možné detegovať na zbernici
- PRE-OPERATIONAL

- zbernica je aktívna
- SDO komunikácia je možná
- žiadna PDO komunikácia
- SAFE-OPERATIONAL
  - SDO komunikácia je možná
  - PDO komunikácia - vstupné dáta sú aktualizované v procesnom priestore (process image), výstupné dáta z procesného priestoru nie sú prenášané na výstup
- OPERATIONAL
  - SDO komunikácia je možná
  - PDO komunikácia je možná
  - zariadenia na zbernici sú synchronizované

## PROFINET

Priemyselnú komunikačnú sieť PROFINET vytvorilo združenie PROFIBUS & PROFINET International. PROFINET môže byť jednoducho integrovaný do už existujúcej siete Ethernet. Podľa použitia ho môžeme rozdeliť na dve hlavné typy a to PROFINET IO(Input / Output) a PROFINET CBA(Component Based Automation). PROFINET IO je využívaný na pripojenie decentralizovaných vstupno-výstupných zariadení do siete. Na prenos údajov využíva metódu Master / Slave. Každý PROFINET IO systém musí pozostávať z IO riadiaceho počítača, IO zariadenia(vstupy a výstupy) a IO supervízora. IO riadiaci počítač má na starosti riadenie procesu, riadenie a monitorovanie IO zariadení. IO supervízor je softvér, ktorý slúži na parametrizáciu a diagnostiku IO zariadení na sieti.

PROFINET CBA poskytuje rozdielny pohľad na technologickú prevádzku. Hlavnou myšlienkou CBA je rozdelenie prevádzky na viacero nezávislých jednotiek nazývaných technologické moduly. Tieto technologické moduly sú zvyčajne riadené vstupnými signálmi. Tieto signály spúšťajú rôzne funkcionality definované užívateľským programom. Následne sú programom generované výstupné signály, ktoré sú posielané ďalšej riadiacej jednotke. Na obrázku 5 je porovnanie dvoch typov zbernice PROFINET na základe ISO/OSI modelu.

Vrstva	Úloha	PROFINET IO	PROFINET CBA
7. aplikačná	Spracovanie	PROFINET IO services, PROFINET IO protocol, Connectionless RPC	PROFINET CBA, DCOM, Connection-oriented RPC
4. sieťová	Transport rámcov	UDP protokol	TCP protokol
3. transportná	Prepínanie(switching)	IP protokol	
2. linková	Bezpečnosť	Full Duplex(IEEE 802.3), priority tagging(IEEE 802.1Q), real-time expansion	
1. fyzická	Prenos bitov	100Base-Tx, 100Base-FX (IEEE 802.3)	

Obr. 5: Porovnanie PROFINET IO a CBA

Skratka DCOM(Distributed Component Object Model) v tabuľke označuje mechanizmus na prenos objektov po sieti. RPC(Remote Procedure Call) zas označuje API rozhranie, pomocou ktorého sa dajú vykonávať volania funkcií medzi serverom a klientom(zariadeniami Master a Slave) [6]. PROFINET CBA sa zväčša nepoužíva na real-time úlohy, keďže čas cyklu zbernice je v rozmedzí 100ms. V oblasti real-time

aplikácii sa využíva PROFINET IO, ktorý má dve rozdielne úrovne protokolu. PROFINET RT(Real-Time) dosahuje čas jedného cyklu od 1ms do 512ms. PROFINET IRT (Isonchronous Real-Time), ktorý sa používa výhradne v časovo kritických aplikáciách, ako sú napríklad pohony pri CNC strojoch, dosahuje čas cyklu od desiatok mikrosekúnd do 1ms. Presnosť cyklu je na hranici 1 $\mu$ s.

Zariadenia určené pre PROFINET IRT musia byť postavené na čipe ERTEC(Enhanced Real-Time Ethernet Controller). Tieto čipy sú založené na architektúre ARM a vyrábajú sa v troch prevedeniach [7]:

- ERTEC 200P - minimálny čas jedného cyklu až 31,25  $\mu$ s, integrovaný 2-portový prepínač, maximálne 96 konfigurovateľných IO modulov
- ERTEC 200 - minimálny čas jedného cyklu až 250  $\mu$ s, integrovaný 2-portový prepínač, maximálne 45 konfigurovateľných IO modulov
- ERTEC 400 - minimálny čas jedného cyklu až 250  $\mu$ s, integrovaný 4-portový prepínač, maximálne 32 konfigurovateľných IO modulov

V sieti PROFINET je možné využívať aj bežné kancelárske prepínače, ktoré však nemusia spĺňať real-time vlastnosti potrebné pre konkrétnu aplikáciu. K tomuto účelu sú určené špeciálne priemyselné prepínače pre RT aplikácie. Pre PROFINET IRT treba použiť špecifický prepínač, ktorý je určený pre IRT komunikáciu a obsahuje vyššie spomenutý čip ERTEC. Keďže PROFINET využíva aj TCP/IP protokol, zariadenie môže obsahovať web server, na ktorý je možné sa vzdialene pripojiť cez web prehliadač. Pomocou webového rozhrania sa môže vykonávať určitá obmedzená parametrizácia ako aj monitoring a diagnostika zariadenia.

### **Adresovanie uzlov**

Každé PROFINET IO zariadenie má tri hlavné identifikátory:

- symbolické meno
- IP adresa
- MAC adresa

Na adresovanie uzlov sa využíva DCP(Dynamic Configuration Protocol), ktorý je integrovaný v každom PROFINET IO zariadení. Každé zariadenie na sieti musí mať nastavené unikátne symbolické meno, ktoré jednoznačne identifikuje zariadenie. Tomuto menu je priradená IP adresa a MAC adresa zariadenia. Práve toto priradenie má na starosti DCP protokol.

### **Komunikácia v sieti**

Celkový rozsah komunikačných funkcionalít siete PROFINET IO je rozdelený do troch tried, ktoré sa nazývajú Conformance Classes. Označujú sa písmenami A, B, C [8].

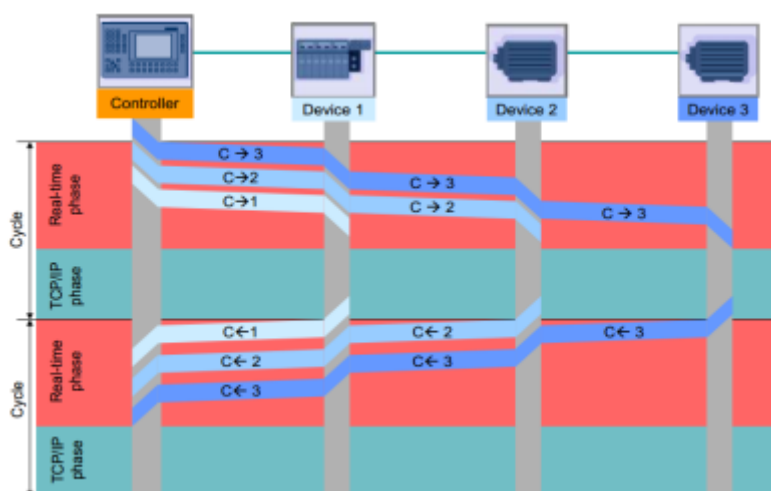
Conformance Class A je trieda pre základný PROFINET RT. Podporuje dva spôsoby výmeny údajov. Cyklická výmena dát je určená pre vstupno-výstupné dáta, teda čítanie vstupov a nastavovanie výstupov IO zariadenia. Dĺžka cyklu sa môže pohybovať od 1 ms až po 512 ms s tým, že nie je zaručená presnosť cyklu. Acyklická výmena dát je určená na nastavovanie parametrov, na konfiguráciu zariadenia a na čítanie stavových

informácii zariadenia.

Conformance Class B rozširuje triedu A o ďalšie funkcionality. Zariadenia sú schopné diagnostikovať sieť alebo detegovať topológiu siete. Na tento účel PROFINET používa protokol SNMP(Simple Network Management Protocol).

Conformance Class C označuje funkcionality potrebné pre PROFINET IRT. K triede B pridáva synchronizačné funkcie, ktoré vytvárajú sieť s prísne deterministickým správaním. Oneskorenie cyklu je maximálne 1  $\mu$ s. Údaje sú cyklicky prenášané v synchronizovaných rámcoch, pre ktoré je rezervovaná určitá šírka pásma zbernice. Minimálny čas cyklu zbernice je 31,25  $\mu$ s v závislosti od hardvéru.

Pri použití PROFINET IRT musí byť známa presná topológia siete a taktiež približná dĺžka kabeľáže medzi jednotlivými zariadeniami. Vďaka tomu môže byť do synchronizácie jednotlivých zariadení zahrnuté aj oneskorenie rámcov, ktoré vzniká pri prechode signálu vodičom. Synchronizácia sa vykonáva špeciálnym synchronizačným rámcem, ktorý zariadenie IO riadiaci počítač posieľa všetkým IO zariadeniam v IRT doméne. Podľa tohto rámca sa nastaví hodiny všetkých zariadení na rovnaký čas.



Obr. 6: IRT komunikácia.

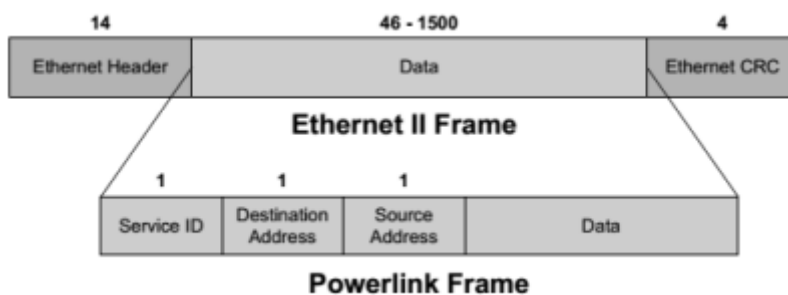
Na obrázku 6 môžeme vidieť, že prenosové pásmo zbernice je rozdelené na dve časti. Červená časť je vyhradená pre IRT komunikáciu. Zelená časť je vyhradená pre bežnú TCP/IP komunikáciu. V každom cykle vyšle IO riadiaci počítač (ďalej Master) počet rámcov rovný počtu IO zariadení (ďalej Slave). Každé Slave zariadenie odpovie Mastrovi odoslaním vlastného rámca. Na minimalizovanie času cyklu bola vyvinutá metóda zvaná „slipstreaming“. Jedná sa o plán, podľa ktorého budú rámce vysielané do siete za účelom minimalizovania celkového času. Rámce, ktoré patria najvzdialenejším zariadeniam sa vyšlú ako prvé. Z tohto dôvodu je pri konfigurácii podstatná topológia a fyzické rozmiestnenie prvkov systému, ako aj dĺžky jednotlivých úsekov. Pre PROFINET IO existujú aplikačné profily, ktoré sú definované na 7. vrstve ISO/OSI modelu. Sú to profily, ktoré sú určené pre použitie v určitej skupine aplikácií. Pre zvýšenú bezpečnosť aplikácii je to PROFIsafe, pre pohybové systémy zase PROFIdrive.

## ETHERNET POWERLINK

Posledná zbernica založená na technológii Ethernet, ktorú si v tomto príspevku predstavíme je ETHERNET POWERLINK. Zjednodušene sa dá povedať, že POWERLINK je spojenie Ethernetu a aplikačného protokolu CANopen. Tak ako predchádzajúce zbernice aj POWERLINK je implementovaný na piatich vrstvách OSI/OSI modelu:

- 1. Fyzická vrstva - 100BASE-TX Fast Ethernet alebo 1000BASE-TX Gigabit Ethernet.
- 2. Linková vrstva - štandardná Ethernet linková vrstva rozšírená o vlastný plánovač, ktorý nahrádza nedeterministickú prístupovú metódu CSMA/CD.
- 3. Transportná vrstva - IP protokol.
- 4. Sieťová vrstva - TCP, UDP protokoly.
- 7. Aplikačná vrstva - CANopen protokol.

Na rozdiel od zbernice PROFINET, POWERLINK je nezávislý od špecifického sieťového rozhrania keďže je jeho rámec zabalený v štandardnom Ethernet II rámci. ETHERNET POWERLINK je schopný dosiahnuť rýchlosť cyklu až 200  $\mu$ s s maximálnym oneskorením cyklu do 1  $\mu$ s.



Obr. 7: ETHERNET POWERLINK rámec[3].

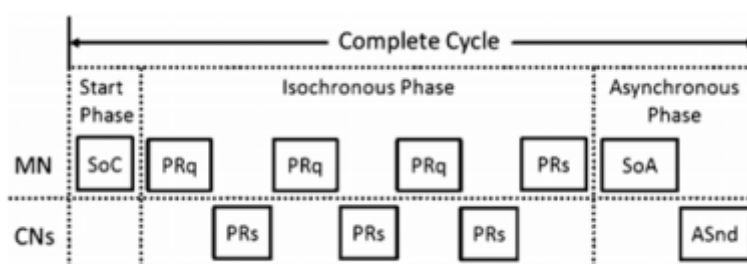
## Adresovanie uzlov

Keďže POWERLINK pracuje na základe technológie Ethernet, adresovanie uzlov v sieti je veľmi podobné. Každé zariadenie v sieti musí mať priradenú unikátnu adresu. Na adresovanie sa využívajú MAC adresa zariadenia, IP adresa a špeciálne ID uzla, ktoré môže byť nastavené prepínačom fyzicky priamo na zariadení [9].

## Komunikácia v sieti

Sieť POWERLINK sa skladá z jedného Master uzla (MN - managing node) a maximálne 240 Slave uzlov (CN - controlled node). Komunikácia prebieha v pravidelných cykloch a každý cyklus je rozdelený do dvoch fáz [9]:

- izochrónna fáza
- asynchrónna fáza





### Obr. 8: Cyklus zbernice POWERLINK

Izochrónna fáza je rozdelená do takzvaných časových slotov, vždy pre každé CN jeden. Teda v každom časovom okamihu(jeden slot), môže vysielat len jeden uzol. Na začiatku každého cyklu pošle MN Broadcast rámeč nazývaný „Start of Cycle“ (SoC). Tento rámeč vykoná synchronizáciu CN uzlov s MN uzlom. Následne MN posiela takzvaný „poll request“ (PRq) rámeč jednému uzlu, kde požaduje nejaké dáta. Následne tento uzol odpovedá takzvaným „poll response“ (PRs) rámcom, v ktorom posiela požadované dáta. Tieto operácie sa opakujú pre každý uzol v sieti. Keď sa obslúžia všetky uzly siete, MN vyšle Broadcast rámeč typu PRs, ktorý značí ukončenie izochrónnej fázy.

Nasleduje asynchrónna fáza. Na jej začiatku MN pošle všetkým uzlom „Start of Asynchronous“ rámeč, ktorý obsahuje informáciu o tom, ktorý uzol ma odpovedať. Následne tento uzol pošle „Asynchronous send“ (ASnd) rámeč s požadovanými dátami. MN čaká na začiatok ďalšieho cyklu. POWERLINK podporuje aj krížovú komunikáciu medzi CN uzlami.

### Záver

Nasadzovanie priemyselných komunikačných sieti na báze Ethernetu do priemyslu zaznamenáva v súčasnosti prudký rast. V týchto sieťach celosvetovo každoročne pribudnú milióny nových uzlov. Na súčasnom trhu je dostupný veľký výber takýchto riešení pre skoro ľubovoľnú aplikáciu. V tomto príspevku sme predstavili tri rýchle sieťové zbernice, ktoré sú schopné spĺňať požiadavky pre hard real-time aplikácie. Spomenuli sme ich špecifikácie ako aj spôsob ako komunikujú na sieti. Nedá sa povedať, ktorá zbernica je najlepšia, správny výber závisí od požiadaviek budúcej aplikácie.

### Podakovanie

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja projektom APVV-0211-10.

### Použitá literatúra

1. Doyle, P. Introduction to Real-Time Ethernet I. Limerick, Ireland : Contemporary Control Systems, Inc, 2004. Zv. 5, 3.
2. EtherCAT Technology Group. EtherCAT. Technical introduction and overview. [Online] <http://www.ethercat.org/en/technology.html#1.1>
3. Doyle, P. Introduction to Real-Time Ethernet II. Limerick, Ireland : Contemporary Control Systems, Inc, 2004. Zv. 5, 4
4. Rostan, M. High Speed Industrial Ethernet for Semiconductor Equipment. Nuremberg : EtherCAT Technology Group, 2006.
5. Lenze. Controller-based automation: Communication Manual. s.l. : Lenze, 2012.
6. Pigan, R. a Metter, M. Automating with PROFINET. s.l. : John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-3-89578-294-7.
7. Siemens. ERTEC 400 Manual. Furth, Germany : Siemens AG, 2010
8. Profibus International. PROFINET System Description. s.l. : Profibus International, 2011.
9. Baumgartner, J. a Schoenegger, S. POWERLINK and Real-Time Linux: A Perfect Match

---

for Highest Performance in Real Applications. Eggelsberg, Austria : B&R Automation, 2010.

---

Spoluautorom článku je prof. Ing. Ján Murgaš PhD.

---