Návrh subsystému CAN FD sběrnice pro space grade real-time exekutivu RTEMS

Linux Days 2025

5.10.2025

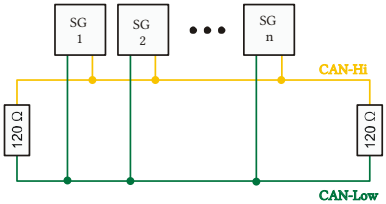
Michal Lenc & Pavel Píša

1 Komunikační sběrnice CAN

Komunikační sběrnice CAN

Controller Area Network (CAN, CAN bus) je sériová datová sběrnice povodně vyvinutá v 80. letech firmou Bosch.

- silně využívaná v automobilovém průmyslu jako hlavní komunikační protokol mezi senzory a výpočetními jednotky v automobilech
- fyzická vrstva jsou dva diferenční dráty, *CAN_H* a *CAN_L*, uzemnění a volitelné napájení
- multi-master protocol bez centrálního uzlu



Na sběrnici jsou dva definované stavy:

- recesivní (logická jednička)
- dominantní (logická nula)

Dominantní stav přetlačí recesivní, pokud dva uzly vysílají na sběrnici ve stejný čas různé stavy. Tato charakteristika je důležitá pro řízení přístupu k médiu.

- stochastický přístup k médiu (bez centrálního rozhodujícího uzlu)
- kolize jsou řešeny až když nastanou
- Carrier-Sense Multiple Access with Collision Resolution (CSMA/CR)
- **kolize vyřešeny na základě priority zpráv během arbitrační fáze přenosu**

Tento přístup k médiu umožňuje využití sběrnice v real-time aplikacích, kde bývá vyžadován deterministický přenos kritických zpráv mezi zařízeními.

Komunikační sběrnice CAN

CAN zpráva se skládá ze dvou částí:

- arbitrační
- datová

Řízení přístupu k médiu řešeno během arbitrační fáze.

- každá zpráva má svůj identifikátor, který odpovídá její prioritě
- během arbitrace jsou identifikátory porovnávány bit po bitu
- dominantní stav přetlačí recesivní -> pokud zařízení vysílající recesivní bit na sběrnici vidí dominantní, z arbitrace ustoupí
- zpráva s vyšší prioritou (nižším ID) vyhraje arbitraci
- po vyhrané arbitraci uzel posílá data, ostatní zařízení se pokusí získat místo při další arbitraci

Příklad

Máme dvě zařízení používající 3 bitový identifikátor. Zařízení A chce poslat zprávu s identifikátorem *0x1* (*0b001*), zařízení B s *0x2* (*0b010*). Při porovnání nejvyššího bitu se nic nestane, obě zařízení vysílají dominantní stav (logickou nulu). U druhého bitu (0 pro A, 1 pro B) ale dominantní stav z A přetlačí recesivní z B a tím zpráva zařízení B prohraje arbitraci.

TODO: obrázek

Synchronizační požadavky během arbitrační fáze znamenají omezení rychlosti na 1 Mbit/s při vzdálenosti přibližně 50 metrů.

Tato omezení částečně překonává novější standard CAN FD (flexible data rate).

- arbitrace probíhá standardní rychlostí
- po skončení arbitrační fáze dojde ke změně bitratu a samotná data jsou přenášena vyšší rychlostí
- data na 50 metrech teoreticky až 8 Mbit/s (automotive standard 500 Kbit/s a 2 Mbit/s)
- zvýšen datový payload z 8 bajtů na 64 bajtů
- **není zpětná kompatibilita, tedy nelze použít CAN FD zprávu, pokud na sběrnici operují zařízení, které umí pouze standardní CAN**

V posledních letech se pomalu začíná používat CAN XL standard umožnující přenést až 2048 bajtů v jedné zprávě.

Existující CAN/CAN FD subsystémy

Pro zjednodušení přístupu k hardwaru a plnému využití vlastností sběrnice operační systémy nabízí implementaci CAN/CAN FD subsystémů.

Menší systémy zaměřené na real-time jako NuttX nebo Zephyr mají vlastní character device drivery, GNU/Linux poskytuje na SocketCAN.

- využívá socket API, podobné rozhraní jako TCP/IP
- pomalu a v omezené míře přebírán i do NuttXu a Zephyru
- koncept socketů sedí k CAN síti

Implementace SocketCANu má ale své nevýhody.

- navržena v době standardního CANu, flagy pro CAN a CAN FD rozděleny
- socket API může být pro real-time systémy zbytečně složité
- pro RTEMS by znamenalo nutnost povolené TCP/IP implementace, nevhodné pro menší systémy bez networkingu nebo s omezenou pamětí

2 RTEMS

Real-Time Executive for Multiprocessor Systems

- původně Real-Time Executive for Missile Systems
- vývoj začal koncem 80. letech na žádost US Army Missile Command
- kód vlastnila vláda USA -> public domain, díky čemuž se RTEMS stal rychle populární i mezi komerčními projekty
- dnes prakticky plnohodotný real-time operační systém
- POSIX kompatibilní, zároveň vlastní rozhraní pro kernel
- networking stack z FreeBSD, IPv4/IPv6 TCP/IP, DNS server

- ARM, x86, PowerPC, RISC-V, i386
- BSP s podporou SMP
- schedulery optimalizované pro více jader
- shared memory design
- single address space system
- kernel v C, aplikace i C++, Java, Lua, Rust

Podpora CAN sběrnice

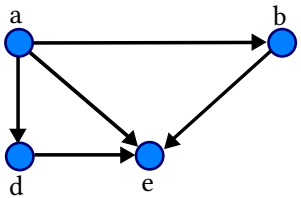
- původní stav bez obecného CAN/CAN FD stacku
- aplikace či BSP musely implementovat řešení specifická pro cílový target
- to zásadně komplikuje práci s drivery napříč platformami, zároveň chybí některé užitečné funkce
- užitečné funkcionality:
  - blokující/neblokující zápis a čtení
  - TX/RX polling
  - filtrace zpráv do prioritních front
  - error reporting
  - echo zprávy v případě úspěšného odeslání
  - konfigurace přes jednotné API

Cílem bylo navrhnout API založené na modelu POSIX character device driveru

3 Design CAN FD subsystému

Design CAN FD subsystému

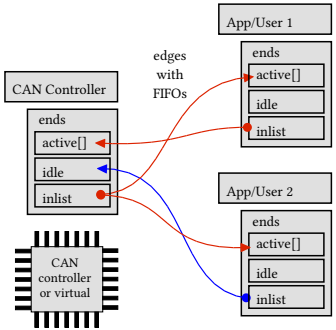
- založeno na LinCAN infrastruktuře
  - loadable modul do Linux kernelu vyvinutý na CVUT začátkem tisíciletí
  - později se od něj v Linuxu upustilo ve prostěch SocketCANu
- POSIX character device driver rozhraní
  - CAN ovladač registrován jako device do */dev* složky (např. */dev/can0*, */dev/can1*, ...)
  - standardní IO funkce *open*, *write*, *read*, *ioctl*
- využití FIFO front organizovaných do orientovaných hran mezi ovladačem a aplikací



FIFO fronty

Rozhraní sloužící k předávání CAN zpráv mezi kontrolerem a aplikací.

- fronty rozděleny podle směru a priority
- *inlist* jsou vstupy fronty -> zápis
- *idle* jsou prázdné výstupy -> čtení
- *active* jsou aktivní výstupy -> čtení
- stejné typy hran (a tedy funkcí) využity pro oba směry
- aktivní výstupy poskytují tři priority
- filtrace zpráv podle ID nebo flagů



- dvě fronty RX a TX automaticky vytvořeny při otevření driveru
- fronty pro CAN only ovladače alokují pouze 8 bajtů pro data
- fronty jsou pro různé otevřené instance na sobě nezávislé

Filtrace zpráv do front

Aplikace používající CAN mohou mít různé požadavky na přístup ke kontroleru.

- filtrace přijatých zpráv podle flagů
  - rozdělení CAN a CAN FD zpráv
  - fronta pro echo potvrzující odeslání
  - fronta pro error zprávy
- filtrace odesílaných zpráv podle priority
  - některé zprávy může aplikace chtít odeslat prioritně
  - rozdělení zpráv do front podle rozsahu ID (problém s *priority_inversion*)

```
struct can_filter {
  uint32_t id;
  uint32_t id_mask;
  uint32_t flags;
  uint32_t flags_mask;
};
```

- *_mask* slouží k vyřazení zpráv s daným identifikátor či flagem

Vytvoření a mazání front


```
ssize_t ioctl( fd, RTEMS_CAN_CREATE_QUEUE, &queue );
ssize_t ioctl( fd, RTEMS_CAN_DISCARD_QUEUES, type );

struct rtems_can_queue_param {
  uint8_t direction;
  uint8_t priority;
  uint8_t dlen_max;
  uint8_t buffer_size;
  struct rtems_can_filter filter;
};
```

- mazat lze pouze všechny RX, všechny TX nebo úplně všechny fronty
- infrastruktura zajistí odeslání všech zpráv před zničením front
- fronty se automaticky dealokují při zavolání *close*

Formát CAN zprávy


```
struct can_frame_header {
  uint64_t timestamp;
  uint32_t can_id;
  uint16_t flags;
  uint16_t dlen;
};

struct can_frame {
  struct can_frame_header header;
  uint8_t data[CAN_FRAME_MAX_DLEN];
};
```

Poslání zprávy

```
ssize_t write( int fd, struct can_frame *frame, size_t count );
```

Pro neblokující přístup lze použít TX polling čekající na alespoň jedno místo ve frontě.

```
ssize_t ioctl( fd, RTEMS_CAN_POLL_TX_READY, &timeout );
```

Aplikace se může chtít ujistit, že zprávy opravdu byly poslány.

```
ssize_t ioctl( fd, RTEMS_CAN_WAIT_TX_DONE, &timeout );
```

Omezení: *RTEMS_CAN_WAIT_TX_DONE* čeká na odeslání všech zpráv ze všech front.

Přijetí zprávy

Lze číst pouze jednu zprávu během jednoho volání *read*.

- pro *count* menší než délka zprávy *read* nevyplní celou strukturu, ale jen daný počet bajtů
- *count* musí být větší než délka hlavičky -> vždy se vyplní hlavička s délkou zprávy
- zpráva zůstane ve frontě, dokud není přečtena celá jedním *read*

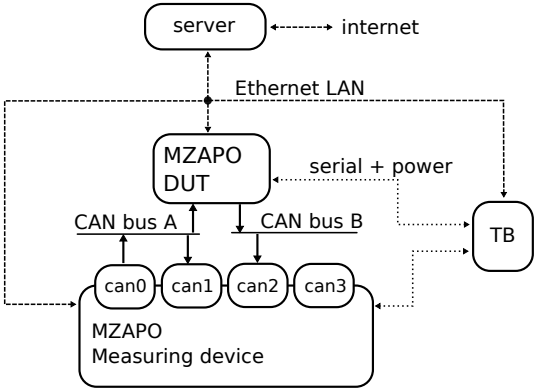
```
ssize_t read( int fd, struct can_frame *frame, size_t count );
```

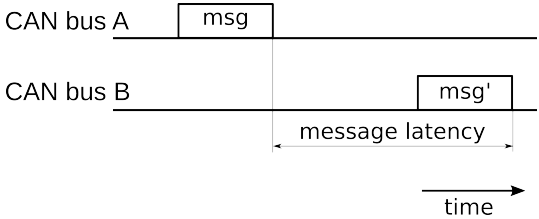
Pro neblokující přístup lze použít RX polling čekající na alespoň jednu zprávu ve frontě.

```
ssize_t ioctl( fd, RTEMS_CAN_POLL_RX_AVAIL, &timeout );
```

Naměřené latence

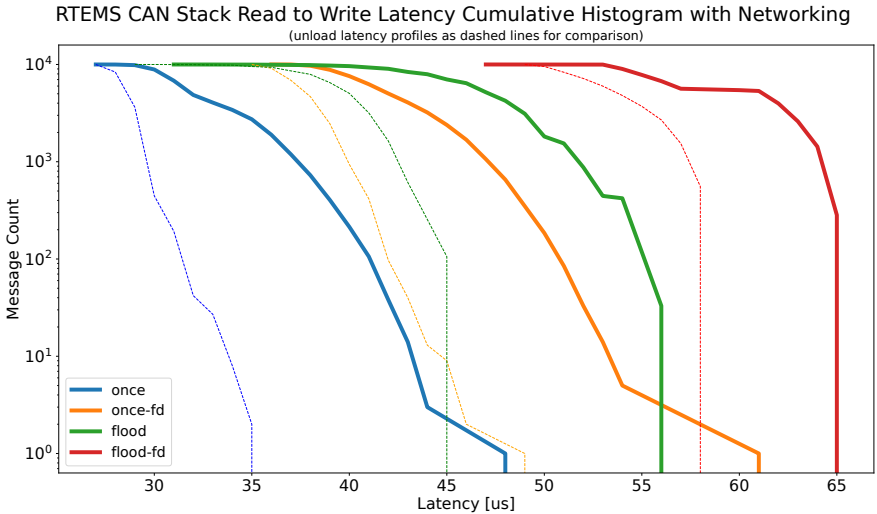
- CAN LaTester infrastutura původně vyvinutá pro testování CAN latencí v Linux jádře
- *DUT* funguje jako CAN gateway: dostane zprávu ze sběrnice A a okamžitě ji odešle na B





- měřící zařízení generuje zprávy a poskytuje přesné měření
- CVUT MicroZed APO s otevřeným CTU CAN FD řadičem

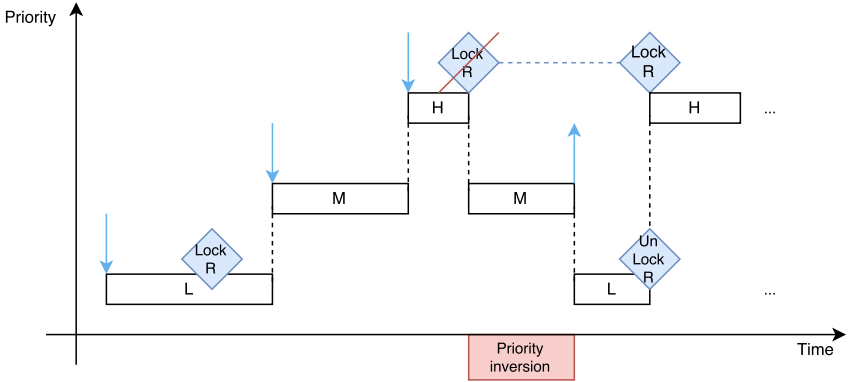
Naměřené latence (ii)



4 Problém inverze priorit

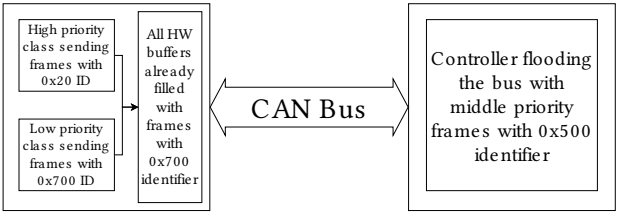
…v computer science

- task s nízkou prioritou, pozastavený taskem se střední prioritou, drží kritickou sekci potřebnou pro task s vysokou prioritou
- task s vysokou prioritou je tak efektivně blokovaný taskem se střední prioritou

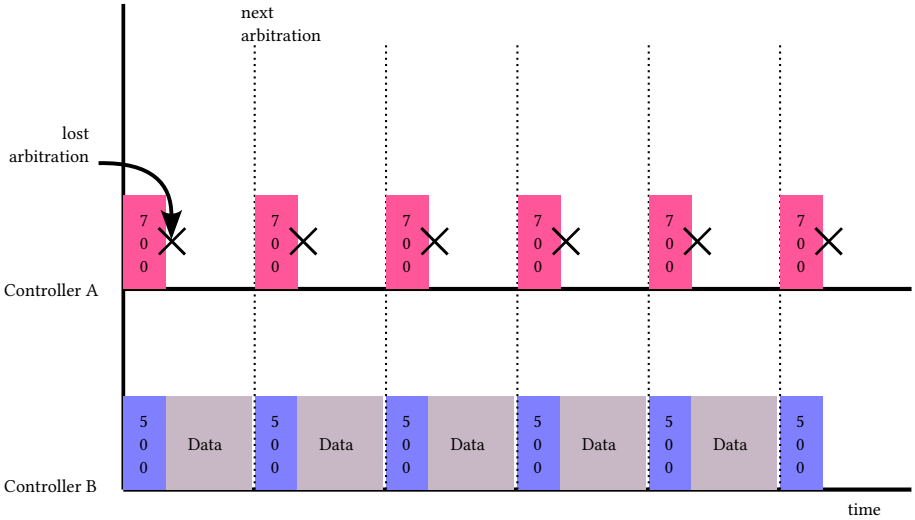


...na CAN sběrnici

- vzniká během arbitrační fáze
- místo tasku máme CAN zprávy, kritické sekce jsou HW buffery kontroléru
- jedno zařízení zahlcuje sběrnici zprávami se střední prioritou
- druhé se snaží poslat mix zpráv s nízkou a vysokou prioritou
- pokud jsou HW buffery zaplněné zprávami s nízkou prioritou, vysoká priorita se nikdy nedostane k arbitraci



...na CAN sběrnici



Řešení?

- běžné je využití prioritních tříd/front (*priority classes*), běžně FIFO front
- CAN zprávy jsou přiřazeny do těchto tříd na základě rozsahu jejich identifikátorů (priorit)

Příklad

Zprávy s ID *0x0* až *0x200* jdou do fronty s nejvyšší prioritou, zprávy *0x201* až *0x500* do nižší priority atd.

- díky tomu se vysokoprioritní zprávy dostávají do hardwaru ve své vlastní frontě
- to řeší zdržení zpráv na úrovni softwarových bufferů
- fronty je potřeba namapovat na hardwarové buffery, což způsobuje problémy

Limitace

- implementace CAN řadičů v mikrokontrolerech obvykle umožnují posílání zpráv na základě jejich identifikátoru nebo podle pořadí určeného indexem bufferu
- řeší vysílání na základě identifikátoru, tedy priority, problém?
  - aplikace a protokoly mohou vyžadovat zachování pořadí odeslání v rámci prioritní fronty i při použití jiných identifikátorů
  - posílání na základě ID tedy nepoužitelné
- zařízení často limitují počet HW bufferů na jeden pro každou třídu
- to výrazně limituje poskytnutý hardwarový potenciál

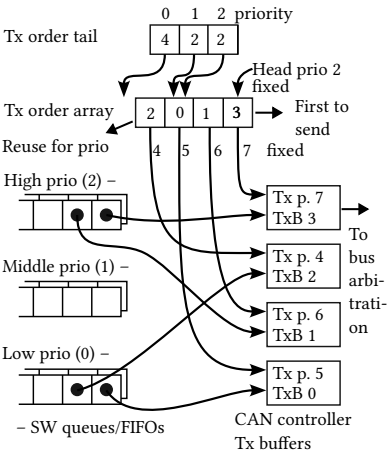
Zprávy z nejvyšší prioritní třídy musí odejít jako první a pořadí zpráv v rámci třídy musí být zachováno

5 Dynamická redistribuce hardware bufferů na prioritní třídy

- design, který rozšiřuje separátní FIFO fronty pro každou prioritní třídu
- přidána dynamická redistribuce HW bufferů na tyto třídy
  - fronty tedy již nejsou pevně přiřazeny k určitým bufferům
- algoritmus zajišťuje, aby HW buffery dostaly správné pořadí v němž mají přístupovat ke sběrnici a tedy k arbitraci
  - toto pořadí je určeno na základě prioritní třídy a pořadí zpráv v rámci této třídy

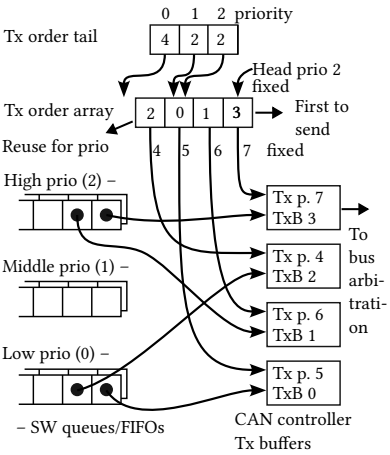
Pokud je do bufferu vložena nová CAN zpráva, tak buffer musí být ve vysílací sekvenci po všech zprávách ze stejné či vyšší prioritní třídy, ale před všemi zprávami z nižší prioritní třídy

Jak určit správnou sekvenci?



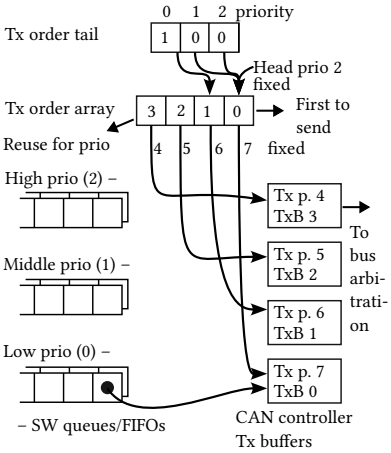
- *TX order array* ukazuje na HW buffery v pořadí, v jakém by měly jít na arbitráž
- *TX order tail* ukazuje na ocásek dané prioritní třídy - místo, kam by měla přijít nová zpráva z této třídy
- hlavička nejvyšší priority je fixní, hlavičky dalších priorit jsou stejné jako ocásek předchozích priorit
- pokud je vložena nová zpráva, všechny zprávy z nižší priority posunuty doleva

Jak určit správnou sekvenci?



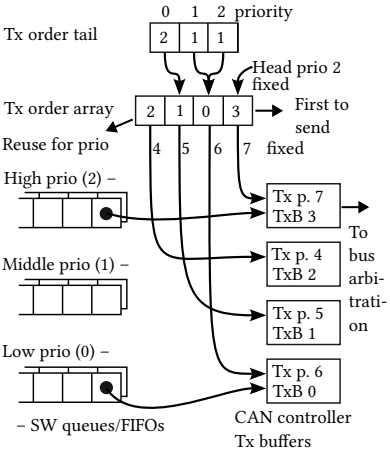
- pokud není volný žádný HW buffer a chceme vložit zprávu vyšší priority, než jaká je v bufferech, musí dojít k abortu
- **nejpozději vložená zpráva z nejnižší priority je odebrána z HW bufferu a držena v SW frontě pro pozdější zpracování**
- nová zpráva vložena do volného HW bufferu a změněno požadí, aby odpovídalo pravidlům

Příklad



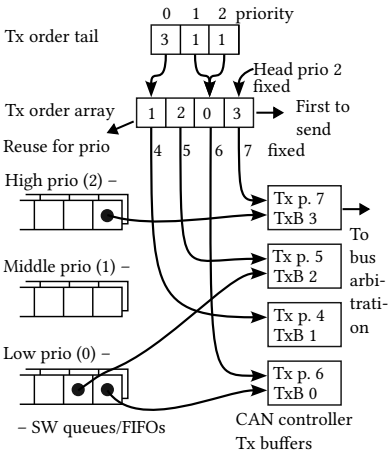
- máme zprávu s nízkou prioritou přiřazenou do HW bufferu 0
- *TX order tail* pro nízkou prioritu přesunut na pozici 1
- buffer 0 je první k poslání s nejvyšší prioritou 7

Příklad (ii)



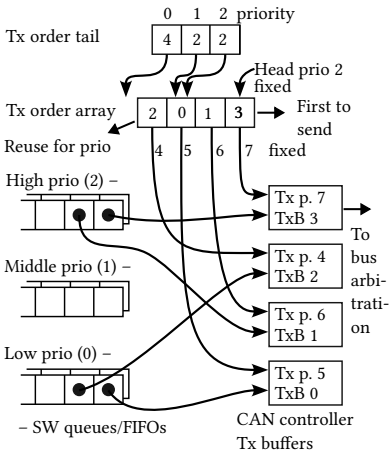
- aplikace zapíše zprávu s vysokou prioritou, ta je přiřazena například do bufferu 3
- tuto zprávu chceme do arbitrace poslat před nízkoprioritní zprávou
- *TX order tail* pro vysokou a střední prioritu posunut na 1, pro nízkou na 2
- buffer 3 teď má nejvyšší prioritu 7, buffer 0 nižší 6
- řadič se tak bude snažit vysílat buffer 3

Příklad (iii)



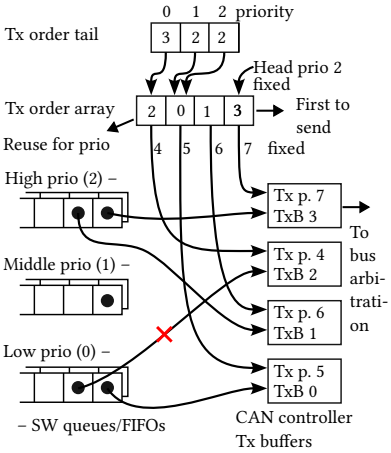
- dojde k zapsání další low priority zprávy, je přiřazená do bufferu 2
- buffer musí být zařazen za všechny vysoko a středně prioritní a za všechny dříve vložené zprávy s nízkou prioritou
- *TX order tail* pro vysoké a střední priority zůstane, po nízkou se posune na 3
- priority bufferů 2 a 1 se prohodí
- současné pořadí odchodu na sběrnici:
  - buffer 3 s vysoko prioritní zprávou
  - buffer 0 s první nízko prioritní
  - buffer 2 s druhou nízko prioritní

Příklad (iv)



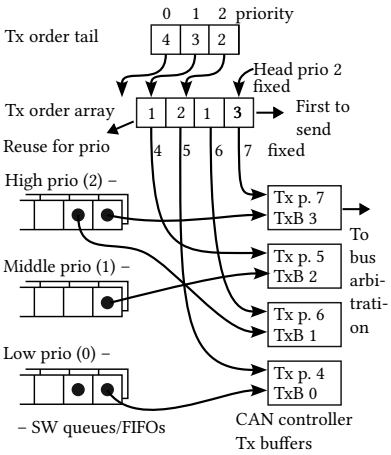
- zpráva s vysokou prioritou vložena do bufferu 1
- buffer musí být zařazen za předchozí vysoko prioritní zprávu a před všechny střední a nízké priority
- *TX order tail* pro vysokou se posune na 2, pro nižší priority se posune doleva (nízká už se nevejde)
- současné pořadí odchodu na sběrnici:
  - buffer 3 s první vysoko prioritní
  - buffer 1 s druhou vysoko prioritní
  - buffer 0 s první nízko prioritní
  - buffer 2 s druhou nízko prioritní

Příklad (v)



- aplikace zapíše do fronty zprávu se střední prioritou
- všechny HW buffery jsou plné, musí dojít k abortu poslední zprávy s nejnižší prioritou
- proveden abort na buffer 2 - poslední vložená nízko prioritní zpráva
- *TX order tail* pro nízkou prioritu posunut na pozici 3
- odebraná zpráva s nízkou prioritou ponechána v SW bufferu, bude vyřešena později

Příklad (vi)



- zpráva se střední prioritou je vložena do již volného bufferu 2
- tento buffer se musí zařadit mezi vysoko a nízko prioritní buffery
- *TX order tail* pro střední prioritu posunut na 3, pro nízkou na 4
- buffer 2 dostane prioritu 5, buffer 0 (drží zprávu s nízkou prioritou) dostane 4
- současné pořadí odchodu na sběrnici:
  - buffer 3 s první vysoko prioritní
  - buffer 1 s druhou vysoko prioritní
  - buffer 2 se středně prioritní
  - buffer 0 s první nízko prioritní

Nutné požadavky

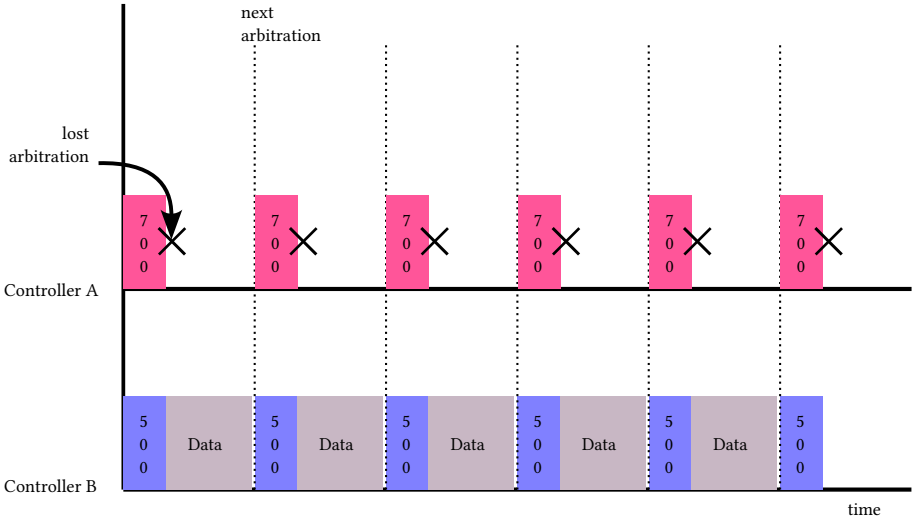
- na vyšší vrstvu (obecné CAN/CAN FD rozhraní)
  - podpora více prioritních tříd a filtrace zpráv do nich
  - možnost přeplánovat abortnuté zprávy na pozdější zpracování (slot by měl zůstat alokovaný, dokud není zpráva odeslána na sběrnici)
- na řadič
  - možnost určit pořadí, v jakém mají HW buffery odcházet na sběrnici (ideálně bez deaktivace řadiče)
  - možnost provedení abortu na HW buffer

Testování

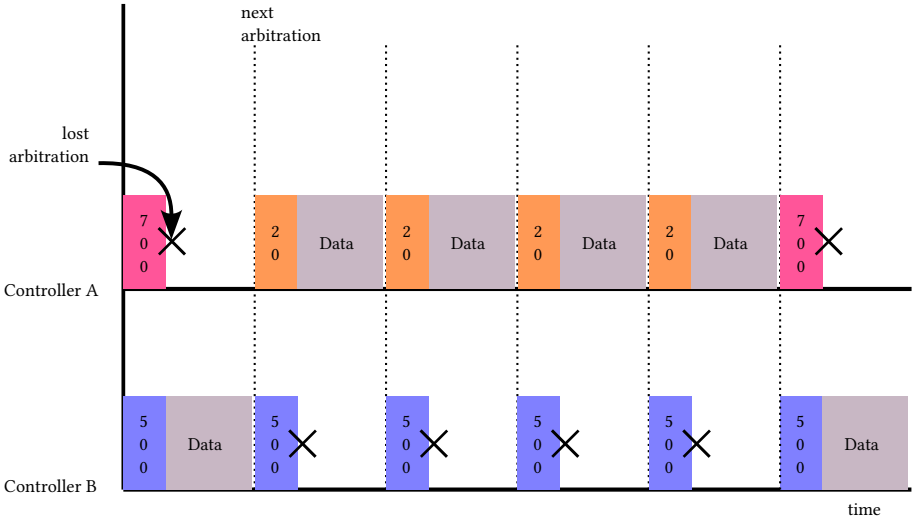
- testování na kitu MicroZed APO s Xilinx Zynq-7000 a CTU CAN FD řadiči
  - CTU CAN FD IP řadiče připravené pro abort TX bufferu a změny priority za běhu
  - přesný timestamping s rozlišením 10 ns
- dva CAN FD řadiče na desce
- každý řadič se čtyřmi hardwarovými buffery
- řadič A zahlcuje sběrnici zprávami s ID *0x500* -> střední priorita
- řadič B vysílá zprávy z dvou aplikací
  - jedna posílá ID *0x700* -> nízká priorita
  - druhá posílá ID *0x20* -> vysoká priorita
- vysoká priorita posílaná v burstu po 4 zprávách, zpoždění mezi bursty dostatečně velké, aby se všechny 4 zprávy stihly poslat

Simulace plně zahlcené sběrnice jedním řadičem, zatímco druhý se snaží přistupovat na sběrnici a dochází v něm k potenciální inverzi priorit.

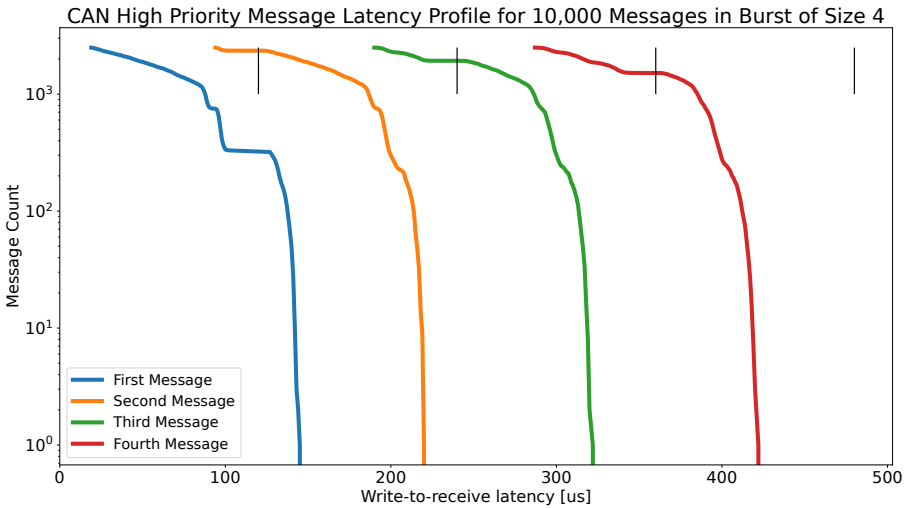
Testování (ii)



Testování (iii)



Testování (iv)



6 Otázky

Zdroje

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CAN-Bus_Elektrische_Zweidrahtleitung.svg
- Píša, Pavel. Linux/RT-Linux CAN Driver (LinCAN). [cit. 2024-25-02]. Available from https://cmp.felk.cvut.cz/~pisa/can/doc/lincandoc-0.3.pdf.
- Federico Reghenzani, Giuseppe Massari, and William Fornaciari. 2019. The Real-Time Linux Kernel: A Survey on PREEMPT RT. ACM Comput. Surv. 52, 1, Article 18 (January 2020), 36 pages. https://doi.org/10.1145/3297714 CC-BY 2024: Michal Lenc, Pavel P´ıˇsa Scheduling of CAN Message Transmission
- Vasilevski, Matěj. CAN Bus Latency Test Automation for Continuous Testing and Evaluation. master's thesis. CTU FEE, 2022. Available from https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/101450/F3-DP-2022-Vasilevski-Matej-vasilmat.pdf.