



RICE

NOVÉ KONCEPTY NADŘAZENÝCH ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ KOLEJOVÝCH VOZIDEL MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVY

DISERTAČNÍ PRÁCE

PLZEŇ, 2013

ING. PETR BÁRTA

NOVÉ KONCEPTY NADŘAZENÝCH ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ KOLEJOVÝCH VOZIDEL MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVY

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor

v oboru

Elektrotechnika

Autor:
Školitel:
Datum státní závěrečné zkoušky:
Datum odevzdání práce:

Ing. Petr Bárta
prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
16. prosince 2010
30. srpna 2013

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému školiteli, Prof. Ing. Zdeňku Peroutkovi Ph.D., za cenné rady a připomínky v průběhu studia a při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům Ing. Vladimíru Svobodovi a Ing. Miroslavu Žilákovi za pomoc při kódování mnou navržených algoritmů při realizaci funkčního prototypu jednotky CETVCE a vedení firmy Cegelec a.s. za umožnění veřejně publikovat některé vnitrofiremní informace. Můj velký dík rovněž patří všem, kteří se mi snažili vytvořit příjemné prostředí při psaní této práce.

Tato disertační práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj (ERDF) a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094: Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE).

V Plzni, 30. srpna 2013

.....

Ing. Petr Bárta

Prohlášení autora

Předpokládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni, 30. srpna 2013

.....

Ing. Petr Bárta

Anotace

Tato práce se zabývá nadřazenými řídicími systémy kolejových vozidel městské hromadné dopravy a jejich vzájemnou komunikací ve vícevozových soupravách. První část práce obsahuje analýzu a komplexní popis řídicích systémů současných vozidel a formuluje jejich základní nedostatky pro zajištění dalšího rozvoje zejména v oblasti diagnostiky a řízení. Na tuto část navazuje návrh nového řešení řídicích systémů s využitím průmyslového Ethernetu jako náhrady za doposud používané sběrnice. Práce obsahuje konkrétní návrhy nových topologií řídicích systémů včetně popisu vazeb na ostatní systémy souvisejícími s provozem vozidla, jako jsou bezdrátová komunikace s vozidlem a související diagnostika, interakce vozidla se systémy řízení dopravy a komplexními technologiemi SmartCity.

Druhá část této disertační práce se zabývá návrhem a realizací nového řešení komunikace centrálních počítačů nadřazených řídicích systémů ve vícevozových soupravách tramvajových vozidel (návrhem nové mezivozové komunikace jako náhrady za sběrnici WTB). Tato část práce je zakončena praktickým návrhem komunikačního uzlu a výrobou jeho prototypu i prototypu celé navržené mezivozové komunikace. Nově navržená jednotka, ve které byly využity výsledky této disertační práce, byla vyvinuta, otestována a nasazena ve spolupráci s firmami Cegelec a.s. a AmiT s.r.o. nese obchodní název CETVCE. Návrh jednotky je optimalizován pro řídicí systém CECOMM používaného firmou Cegelec a.s. Vlastnosti nového řešení komunikace jsou pomocí jednotky CETVCE otestovány na tramvajových soupravách a po úspěšných testech byly sériově nasazeny na dvou projektech tramvají LF2 Brno a GT6-ER Berlín.

Klíčová slova

Nadřazený řídicí systém, CAN, CANOpen, MVB, WTB, Ethernet, Ethernet Powerlink, VME, komunikace v reálném čase, systém ITS, tramvajová vozidla, GSM modem, vzdálený monitoring vozidla, diagnostika vozidla, vlaková komunikace, vozová komunikace, Fritting.

Abstract

This thesis deals with vehicle control system of urban light rail vehicles and their communication in more vehicle trains. The first part contains an analysis and complex description of the control system of existing vehicles and formulates the fundamental deficiencies to ensure the continued development, especially in the diagnosis and controls. This part is followed by a new draft solution of control systems using Industrial Ethernet as a replacement for the previously used bus. The thesis contains concrete proposals for the new topology control systems including a description of link to other systems related to the operation of vehicles, such as wireless communication and diagnostics, the interaction of vehicle traffic management systems and complex technologies SmartCity.

The second part of this PhD thesis deals with the design and implementation of new communications solutions of central computers of vehicle control system in more vehicle trains of tramcars (proposed new inter-vehicles communication as substitute for bus WTB). This part ends with practical design and production unit prototype and prototype of the proposed inter-vehicles communication. The newly designed unit, which used the results of this PhD thesis as been developed, tested and deployed in collaboration with Cegelec a.s. and AmiT s.r.o. carries the trade name CETVCE. Design of the unit is optimized for the control system CECOMM using by the company Cegelec a.s. Features of the new communication solution are verified by the unit CETVCE tested and after successful tests were deployed on two projects of tram LF2 Brno and GT6-ER Berlin.

Keywords

Vehicle control system, CAN, CANOpen, MVB, WTB, Ethernet, Ethernet Powerlink, VME, real-time communication, Intelligent Transport System, GSM modem, remote monitoring of vehicle, vehicle diagnostics, train communication, Wire fritting.

Résumé

Ce travail de thèse a l'objectif de l'étude les systèmes de commande supérieurs installés aux véhicules du transport public et un communication supérieur de ces systèmes entre des wagons. La première partie de la thèse concerne les recherches et les descriptions des systèmes de commande supérieurs installés aux véhicules actuels, elle nomme aussi les désavantages en raison d'assurer le prochain développement, surtout en domaine de diagnostique et des systèmes de commande. La partie suivante montre le dessin des systèmes nouveaux en utilisant le système Ethernet comme un remplacement des vieux systèmes utilisés jusqu'à présent. La thèse concerne les dessins concrètes des topologies de commande supérieur aussi avec les descriptions de l'influence aux autres systèmes concernats le service de véhicules, tels comme communication sans fils avec le véhicule et diagnostique y relative, interaction du véhicule avec les systèmes du contrôle du transport et les technologies complexes SmartCity.

La deuxième partie de thèse concerne le dessin et la réalisation de la solution de la communication nouvelle entre les ordinateurs centrales de commande dans les systèmes de commande supérieurs, tels qui sont installés sur les trains de tramway créés de plusieurs rames (ça signifié le dessin de communication entre wagons comme une replacement du bus WTB). Cette partie est fini par le dessin concret pratique de le boucle de communication et par fabrication de prototype aussi avec la fabrication des autres éléments de système de commande supérieur. La nouvelle unité de communication, cette qui utilise des résultats de la these, a été développée, testée et utilisée par l'entreprise Cegelec a.s. en cooperation avec l'entreprise AmiT s.r.o., et elle est nommée comme CETVCE. Le dessin d'unité est optimisé pour le système de commande CECOMM (système de l'entreprise Cegelec a.s.). Les caractéristiques de la nouvelle solution de communication par la unité CETVCE ont été testées et après les tests furent passés avec success les unités sont utilisées dans les projets LF2 Brno (République Tchèque) et GT6-ER Berlin (Allemagne).

Le mots-clés:

Système de commande supérieur, CAN, CANOpen, MVB, WTB, Ethernet, Ethernet Powerlink, VME, communication en temps réel, système ITS, tramway rames, modem GSM, surveillance de véhicule à distance, diagnostique de véhicule, communication entre wagons, Fritting.

Obsah

1. Úvod	15
2. Současné systémy nadřazeného řízení kolejových vozidel městské hromadné dopravy ..	17
2.1 Základní struktury nadřazených řídicích systémů	17
2.2 Spolupráce nadřazených řídicích systémů u vícevozových souprav	22
2.3 Vzdálený monitoring vozidla	24
2.4 Vozidlo a systémy ITS	26
2.5 Principy průmyslového Ethernetu	27
2.5.1 Metody modifikace Ethernetu pro dosažení vlastností real-time systému.....	27
3. Cíle práce	30
4. Metodika řešení	30
5. Nová koncepce nadřazeného řídicího systému městských kolejových vozidel.....	32
5.1 Výběr nové komunikační sběrnice	32
5.1.1 Ethernet Powerlink	35
5.2 Navrhované řešení nového nadřazeného řídicího systému	38
5.2.1 Topologie sítě EPL.....	39
5.2.2 Fyzické provedení Ethernetu na vozidle	42
5.3 Bezdrátová komunikace s vozidlem.....	42
5.3.1 Nové možnosti ovládání a diagnostiky vozidla	44
5.3.2 Zabezpečení bezdrátové komunikace - Cyber Security.....	45
6. Nové řešení komunikace nadřazených řídicích systémů ve vícevozových soupravách....	46
6.1 Popis nové mezivozové sběrnice.....	47
6.2 Hardwarový návrh jednotky mezivozové sběrnice	50
6.2.1 Fritting.....	52
6.3 Návrh řešení mezivozové komunikace	53
6.3.1 ETH modul.....	53
6.3.2 TCS modul.....	62
6.3.3 APL modul	73
7. Realizace komunikační jednotky mezivozové sběrnice	73
7.1 Řídicí systém CECOMM.....	74
7.1.1 Centrální počítač CETVM.....	74
7.2 Hardwarový návrh jednotky mezivozové sběrnice CETVCE	75
7.2.1 Ethernet řadič LAN91C111	77
7.2.2 VME sběrnice.....	78
7.3 Softwarové řešení jednotky mezivozové sběrnice CETVCE	79

7.3.1	ETH modul	80
7.3.2	APL modul	89
7.3.3	TCS modul	92
7.4	Nástroje a prostředky pro ladění a testování jednotky CETVCE	100
7.4.1	Kvaser CanKing	100
7.4.2	Wireshark	101
7.4.3	Síťová utilita operačního systému Microsoft Windows – „Ping“	102
7.4.4	TCS_SIM	102
7.5	Testování jednotky CETVCE	104
7.5.1	Testování „Virtuálního propojení konektorů mezivozové sběrnice“ jednotky CETVCE	104
7.5.2	Test zpoždění přenosu dat	106
7.5.3	Test stability systému	109
7.5.4	Certifikace podle ČSN EN 50 155	109
8.	Nasazení nového řešení mezivozové komunikace na vozidlo	109
8.1	Vozidlo LF2 Brno	109
8.1.1	Testování mezivozové komunikace	111
8.1.2	Testování tří vozové soupravy vozidel	112
8.2	Vozidlo GT6 – 94 ER Berlín	113
9.	Závěr	115
10.	Literatura	117
11.	Seznam autorových prací	122
12.	Přílohy	126
12.1	Nastavení registrů LAN91C111 jednotky CETVCE	126
12.2	Mapa DPM paměti jednotky CETVCE	128
12.3	Struktura zpráv v DPM	129

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Řídicí systém kolejového vozidla městské hromadné dopravy.....	17
Obr. 2.2 Řídicí systém s využitím Ethernetu jako diagnostické a servisní sběrnice.....	19
Obr. 2.3 Topologie řídicího systému CECOMM vozu K2S.....	21
Obr. 2.4 Topologie řídicího systému CECOMM vozu GT6.....	22
Obr. 2.5 Zapojení zdroje a zátěže pro „Fritting“	24
Obr. 2.6 Vzdálený monitoring vozidla - bezdrátový přenos dat např. GSM modemem	25
Obr. 5.1 Základní architektura sítě Ethernet Powerlink.....	35
Obr. 5.2 Základní komunikační cyklus ETHERNET Powerlink protokolu [28]	36
Obr. 5.3 Navrhované řešení nového řídicího systému	38
Obr. 5.4 Liniová topologie sítě EPL	39
Obr. 5.5 Kruhová topologie sítě EPL	40
Obr. 5.6 Topologie hvězda sítě EPL.....	41
Obr. 5.7 Navržená kombinace kruhové topologie s topologií hvězda sítě EPL	41
Obr. 5.8 Řešení bezdrátové komunikace s vozidlem	43
Obr. 5.9 Bezpečnostní koncept bezdrátové komunikace pro vozidla firmy Cegelec a.s.	46
Obr. 6.1 Topologie mezivozové sběrnice a definice vzájemné orientace komunikační jednotky a obousměrného vozidla	49
Obr. 6.2 Hardwarový návrh jednotky mezivozové komunikace	51
Obr. 6.3 Obvody fyzické vrstvy Ethernet 10Base-T a 100Base-TX [28].....	52
Obr. 6.4 Připojení zdroje stejnosměrného napětí a zátěže pro "Fritting"	53
Obr. 6.5 Formát IP protokolu	54
Obr. 6.6 Hlavička ARP protokolu	56
Obr. 6.7 Hlavička ICMP protokolu	57
Obr. 6.8 Hlavička UDP protokolu.....	58
Obr. 6.9 Příjem a vysílání Ethernet zpráv modulem ETH.....	59
Obr. 6.10 Zpracování přijaté Ethernet zprávy periodickou částí modulu ETH	60

Obr. 6.11 Grafické znázornění inaugurace sběrnice	70
Obr. 7.1 Blokové schéma jednotky CETVCE	76
Obr. 7.2 CETVCE - zapojení obvodů pro Fritting	76
Obr. 7.3 Jednotka CETVCE	77
Obr. 7.4 Obsluha přerušení řadiče Ethernetu procesorem jednotky CETVCE	83
Obr. 7.5 Příjem Ethernet zprávy z řadiče LAN91C111 procesorem jednotky CETVCE.....	85
Obr. 7.6 Proces odesílání Ethernet zprávy ETH modulem.....	87
Obr. 7.7 Řízení komunikace přes DPM	91
Obr. 7.8 Popis předání zprávy z APL do ETH modulu	93
Obr. 7.9 Popis předání zprávy z ETH do APL modulu	94
Obr. 7.10 Stavový automat „Inaugurace mezivozové sběrnice“	95
Obr. 7.11 Uživatelské rozhraní programu CanKing.....	101
Obr. 7.12 Uživatelské rozhraní programu Wireshark	102
Obr. 7.13 Uživatelské rozhraní programuTCS_SIM – modul ETH	103
Obr. 7.14 Uživatelské Uživatelské rozhraní programuTCS_SIM – modul TCS	104
Obr. 7.15 Zapojení zkušební sestavy pro testování virtuálního propojení konektorů.....	105
Obr. 7.16 Ukázka utility Ping	105
Obr. 7.17 Fotografie zkušební sestavy pro testování zpoždění přenosu dat	106
Obr. 7.18 Zapojení zkušební sestavy pro testování zpoždění přenosu dat	107
Obr. 7.19 Oscilogram z testování zpoždění přenosu dat (sondy osciloskopu jsou připojeny na výstupy jednotek CETVIOB; barvy stop odpovídají barvám na obr. 7.18)	108
Obr. 8.1 Souprava dvou vozů LF2	110
Obr. 8.2 Tří vozová souprava vozů LF2 při zkušební jízdě po městě Brno (foto: J. Černý)	112
Obr. 8.3 Vozidlo GT6 Berlín	113

Seznam tabulek

Tab. 5.1 Standardy IEC Průmyslového Ethernetu [27].....	34
Tab. 5.2 Základní vlastnosti kabelů pro průmyslový Ethernet [30]	42
Tab. 6.1 Základní vlastnosti mezivozové sběrnice	50
Tab. 6.2 Tabulka stavů komunikačního uzlu mezivozové sběrnice	68
Tab. 6.3 Seznam chyb na sběrnici	71
Tab. 6.4 Klíč pro určení orientace řízeného vozidla soupravy.....	73
Tab. 7.1 Přehled a priority přerušení definovaných LCSE knihovnou	80
Tab. 7.2 Hodnoty položky status datové struktury st_Buffer	81
Tab. 7.3 Mapa uživatelské části DPM.....	90
Tab. 7.4 Převodní tabulka TCS modulu – adresování	92
Tab. 7.5 Seznam přechodových funkcí stavového automatu „Inaugurace mezivozové sběrnice“	96
Tab. 7.6 Výsledky testování virtuálního propojení konektorů	106
Tab. 8.1 Základní parametry mezivozové komunikace – LF2 Brno.....	111
Tab. 8.2 Výsledky testování sběrnice CegNet dvou vozové soupravy LF2	111
Tab. 8.3 Výsledky testování sběrnice CegNet tří vozové soupravy LF2.....	113

Seznam symbolů a zkratk

AWG	American Wire Gauge – americká norma, specifikující průřezy vodičů
Broadcast	Způsob adresování – vysílaná zpráva je určena pro všechny komunikující uzly
Buffer	Vyrovnávací paměť
Bus	Komunikační sběrnice
CAN	Controller Area Network – perspektivní komunikační standard, definující fyzickou a linkovou vrstvu. Primárně vyvinut pro automobilovou techniku
CANOpen	Vyšší aplikační protokolová vrstva komunikace CAN. Nejrozšířenější evropský CAN standard
CECOMM	Obchodní název distribuovaného řídicího systému pro tramvajová vozidla firmy Cegelec a.s.
CegNet	Obchodní název mezivozové sběrnice vyvinuté na základě této disertační práce.
CETVCE	Obchodní název jednotky mezivozové komunikace vyvinuté na základě této disertační práce
CiA	CAN in Automation – sdružení firem a organizací, zabývajících se aplikací a rozvojem standardu CAN
CRC	Cyclic Redundancy Check – cyklický zabezpečovací kód, běžně používaný ke kontrole integrity přenesených dat v sériových komunikacích
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection – kolizní přístupová metoda ke sdílené fyzické vrstvě datových sítí Ethernet
EMC	Electromagnetic Compatibility – chování objektu v elektromagnetickém prostředí jak z pohledu zařízení rušeného, tak z hlediska zařízení rušícího
EPL	ETHERNET Powerlink – Real-time protokol pro sběrnici Ethernet
EPSSG	ETHERNET Powerlink Standardization Group – vývojové a standardizační sdružení komunikace ETHERNET Powerlink
Ethernet	Vžitě označení firmy Xerox pro specifikaci komunikačního standardu IEEE 802.3, popisující fyzickou a linkovou komunikační vrstvu datových sítí
Ethernet Powerlink	Průmyslová verze komunikace Ethernet s definovaným deterministickým přístupem ke sdílenému médiumu
Fast Ethernet	Rozšířená verze Ethernet s přenosovou rychlostí 100 Mbit/s
Fieldbus	Vžitě označení průmyslové komunikační sběrnice
Header	Hlavička – použito u přenosového rámce
Heartbeat	Diagnostická zpráva periodicky vysílaná komunikačním uzlem

ICMP	Internet Control Message Protocol – protokol síťové vrstvy pro řízení a diagnostiku komunikujících uzlů
IEEE	Institute for Electrical and Electronics Engineers – normalizační institut
IP	Internet Protocol – komunikační protokol datových sítí na úrovni síťové vrstvy v síti Internet
ISC	Informační systém cestujících
ISO-OSI	International Standards Organization - Open System Interconnect – normalizační institut, definující otevřený systém
ITS	Intelligent Transport Systems - inteligentní dopravní systémy
Master	Řídící stanice komunikace
MSB	Most Significant Bit – nejvyšší významový bit
Multicast	Způsob adresování – vysílaná zpráva je určena pro několik komunikujících stanic současně
Multimaster	Způsob přístupu ke komunikační sběrnici, při kterém může být přenos dat aktivován nezávisle libovolnou stanicí
MVB	Multifunction Vehicle Bus – označení pro datovou komunikační sběrnici určenou pro komunikaci v rámci vozidla, součást TCN
NMT	Network Management - správa sítě vyšších protokolových vrstev
PDO	Process Data Object – procesní datový objekt CANopen
PoE	Power Over Ethernet – napájení koncových zařízení v síti Ethernet
Request	Požadavek stanice na zaslání dat
RS232	Recommended Standard 232 – až donedávna jedno z nejvíce používaných sériových rozhraní osobních počítačů
RS485	Recommended Standard 485 – specifikace fyzické komunikační vrstvy s diferenčním signálem, sloužící za základ mnoha průmyslových komunikací
SDO	Service Data Object – servisní datový objekt (služba) komunikace CANopen
Slave	Podřízená stanice komunikace
STP	Shielded Twisted Pair – stíněný kroucený dvou vodič
TCN	Train Communication Network – označení pro datovou komunikační síť kolejových vozidel
TCP	Transmission Control Protocol – protokol datových sítí na úrovni transportní vrstvy, realizující spojovanou službu v transportní vrstvě nad IP protokolem
TDMA	Time Division Multiple Access - deterministická přístupová metoda k sdílenému médiu, založená na předdefinování fixních časových oken pro výhradní přístup jednotlivých stanic

Timeout	Označení časové periody, ohraničující interval čekání na dokončení specifikované operace
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter – asynchronní sériový kanál
UDP	User Datagram Protocol – protokol datových sítí na úrovni transportní vrstvy, realizující nespojovanou službu nad IP protokolem
Unicast	Způsob adresování – vysílaná zpráva je určena pro jednu konkrétní komunikující stanici
USB	Universal Serial Bus – standardní a nejrozšířenější sériové komunikační rozhraní současných osobních počítačů
UTP	Unshielded Twisted Pair – nestíněný kroucený dvou vodič
WiFi	Bezdrátová přístupová metoda datových sítí dle specifikace IEEE 802.11b, g, n
WTB	Wire Train Bus - označení pro datovou komunikační sběrnici určenou pro komunikaci v rámci soupravy vozidel, součást TCN

1. Úvod

Rychlý růst možností elektronických zařízení a rostoucí požadavky na vozidlo městské hromadné dopravy způsobuje, že moderní vozidlo je doslova plné více či méně inteligentních elektronických zařízení. Tyto zařízení zajišťují veškeré potřebné funkce vozidla od řízení trakčního měniče po ovládání zpětných zrcátek. Zařízení jsou často navrhována jako autonomní jednotky s vlastní diagnostikou a bývají nazývány jako řídicí počítače nebo regulátory (např. regulátor trakčního měniče nebo řídicí počítač dveří). Tato filozofie návrhu má svoje výhody i nevýhody. Výhodou je rozdělení ovládání vozidla do samostatných funkčních celků, které jsou na sobě nezávislé. Při poruše jednoho zařízení, tedy ostatní funkční celky vozidla mohou pracovat dále bez jakéhokoli omezení. Nevýhoda je vysoká náročnost pro obsluhu vozidla ovládat každé zařízení zvlášť a zároveň sledovat diagnostická data od všech zařízení na vozidle. Pro obsluhu vozidla, zejména pro řidiče, je ideální, pokud se vozidlo tváří jako jeden funkční celek s jednotnou diagnostikou. Pro splnění tohoto požadavku se na vozidle objevil nadřazený řídicí systém.

Nadřazený řídicí systém vozidla je tedy soubor zařízení zajišťující spojení jednotlivých autonomních funkčních celků vozidla tak, aby se pro obsluhu tvářily jako jedno zařízení. Nadřazený řídicí systém se vždy skládá z centrálního počítače, který je doplněn jednotkami zajišťujícími sběr informací a komunikačními uzly zajišťující komunikaci centrálního počítače s jednotlivými zařízeními na vozidle. Řídicí systém většinou využívá distribuovanou architekturu řízení. To znamená, že jednotlivé komunikační uzly jsou rozmístěny podle potřeby po vozidle a s centrálním počítačem jsou spojeny pomocí komunikační sběrnice. Algoritmy centrálního počítače zpracovávají získané požadavky od obsluhy vozidla a distribuují je příslušným řídicím počítačům a regulátorům. Z těchto jednotek pak naopak získává centrální počítač diagnostická data, která analyzuje a vyhodnocené poruchy uloží do žurnálu. Pokud je vozidlo vybaveno zobrazovací jednotkou, zajistí centrální počítač zobrazení těchto dat na displeji. Další důležitou úlohou, kterou centrální počítač plní, je zajištění vzájemné interakce jednotlivých funkčních celků (např. omezení spotřeby palubní napájecí sítě vozidla při výpadku dobíječe palubní baterie, apod.). Tyto vzájemné vazby jsou provedeny automaticky a nezatěžují tak obsluhu vozidla.

U některých vozidel, zejména se jedná o kolejová vozidla, je požadavek na ovládání vozidla i bez řídicího systému. V tomto případě musí obsluha ovládat přímo jednotlivé funkční celky. Jedná se ale o nouzový režim, který slouží k dojezdu vozidla při poruše nadřazeného řídicího systému. V tomto režimu se ovládají pouze ty funkční celky vozidla, které jsou potřebné pro bezpečnou jízdu a jejich ovládání je maximálně zjednodušeno (např.

zadání pro trakční měniče není spojitě, ale má pouze 3 přednastavené stupně: 100% provozní brzdy, 60% jízdního tahu a výběh).

Současné nadřazené řídicí systémy řeší ovládání a diagnostiku vozidla jako celku. Vývoj v oblasti výpočetní techniky, zejména rostoucí výpočetní výkon procesorů a zvyšování přenosových rychlostí komunikačních sběrnic, umožňuje neustálé rozšiřování vlastností nadřazeného řídicího systému a jeho interakci s okolním světem. Problematika nadřazeného řídicího systému vozidel městské hromadné dopravy je velice obsáhlá už jenom z důvodu rozmanitosti typů používaných vozidel. Jinak bude vypadat řídicí systém pro autobusy, jinak pro trolejbusy a jinak pro tramvaje.

Tato práce se z důvodu rozsahu a složitosti zkoumané problematiky zaměřuje pouze na nadřazené řídicí systémy pro kolejová vozidla městské hromadné dopravy. První část práce obsahuje studii předpokládaného vývoje požadavků na vlastnosti nadřazeného systému v blízké budoucnosti. Neustálý tlak na snižování nákladů na provoz vozidla způsobuje potřebu interakce řídicího systému vozidla s okolím. Jedná se zejména o bezdrátový přenos informací mezi vozidlem a dispečinkem dopravního podniku. Nové řídicí systémy tak nebudou řešit úlohy pouze „uvnitř“ vozidla, ale bude po nich požadována i vzdálená diagnostika, plánování oprav a preventivních prohlídek. K těmto požadavkům se samozřejmě přidají požadavky na neustálé zlepšování původních vlastností. Zejména se jedná o problematiku diagnostiky vozidla.

Tramvajová vozidla jsou jako jediný typ vozidel městské hromadné dopravy provozovány i ve vícevozových soupravách. Pro zajištění výše zmíněných požadavků na nadřazený řídicí systém vozidla je naprosto klíčová podmínka kvalitní a rychlá komunikace mezi jednotlivými vozidly soupravy. Tato problematika byla v minulosti, na rozdíl od „vozové komunikace“, podceňována. Často byla řešena pomocí diskrétních vodičů doplněných o analogové linky pro informační systém a sběrnice pro přenos základních informací pro ovládání řízených vozidel. Použité typy sběrnic již nestačí svojí přenosovou kapacitou novým požadavkům a musejí být tedy nahrazeny novým řešením. Tato problematika je již řešena v železniční dopravě sběrnicí WTB¹. Potřeby a vlastnosti železničních vozidel jsou však odlišné od požadavků vozidel tramvajových. Z tohoto důvodu není zcela vhodné využít toto řešení.

Druhá část této disertační práce se tedy zabývá návrhem a realizací nového řešení komunikace mezi jednotlivými vozidly soupravy. Cílem této části práce je návrh nového

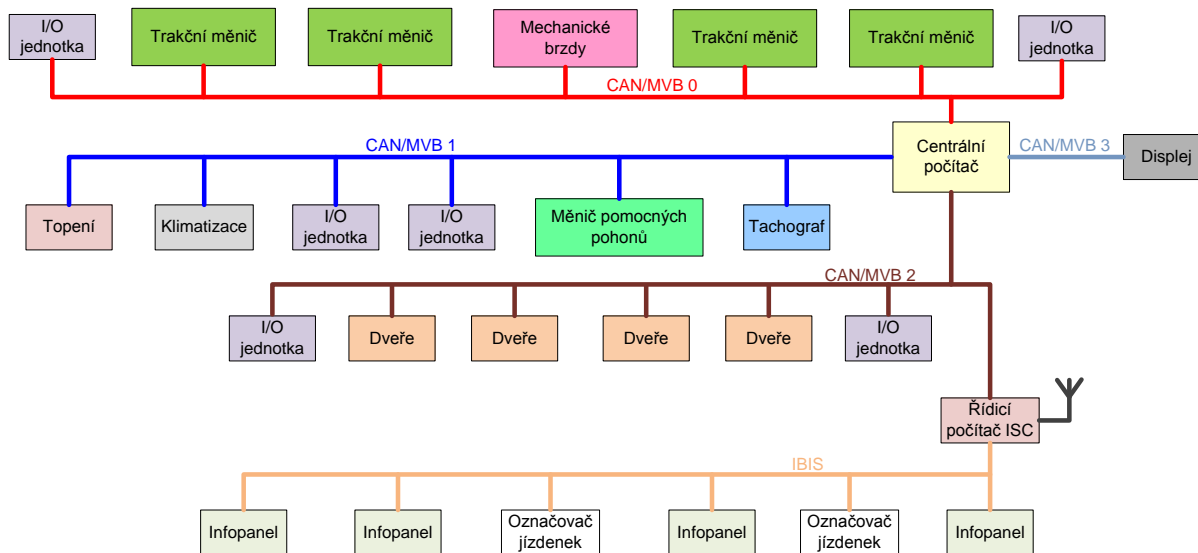
¹ WTB (Wire Train Bus) je sběrnice definovaná standardem IEC 61375 [42]. WTB sběrnice byla vyvinuta speciálně pro komunikaci mezi jednotlivými vozy železničních souprav.

řešení, jako alternativy k WTB. Závěrem této disertační práce jsou uvedeny dva vzorové projekty, kde byly aplikovány výsledky této práce s cílem ověřit na reálném vozidle vlastnosti nově vyvinuté koncepce vzájemné komunikace vozidel ve vícevozových soupravách.

2. Současné systémy nadřazeného řízení kolejových vozidel městské hromadné dopravy

2.1 Základní struktury nadřazených řídicích systémů

Současné nadřazené řídicí systémy jsou založeny na principu distribuovaného řízení. Tento koncept spočívá v rozložení jednotlivých prvků řídicího systému po vozidle tak, aby k integraci řídicího systému do vozidla bylo zapotřebí co nejmenší počet konektorů a co nejkratší vodiče pro jeho připojení. Významní evropští výrobci tramvajových vozidel [1], [2], [3], [4] používají v zásadě shodnou strukturu nadřazeného řídicího systému [5], [6], [7]. Na obr. 2.1 je ukázka typického systému. Hlavními prvky jsou centrální počítač (někdy nazýván jako řídicí počítač vozidla), který je vybaven několika samostatnými kanály sériové sběrnice. Přes tyto sběrnice centrální počítač komunikuje s regulátory trakčních měničů, měničů pro napájení pomocné spotřeby, regulátory mechanických brzd, záznamovou jednotkou jízdy (tachograf) a displejem. Dále bývá systém doplněn o další komunikační uzly, jako jsou například vstupně/výstupní jednotky, jednotky ovládání dveří, topení, ventilace apod.



Obr. 2.1 Řídicí systém kolejového vozidla městské hromadné dopravy

Jako komunikační sběrnice je použita sběrnice CAN² podle specifikace ISO 11898 [8], [9]. Přenosová rychlost používaná na vozidlech je v rozsahu 250 kbit/s až 1 Mbit/s podle délky sběrnice a požadavku na potřebné množství přenesených dat. Někteří výrobci (např. Bombardier) používají sběrnici MVB³ podle specifikace IEC 61375 [10], [11]. Přenosová rychlost MVB je 1,5 Mbit/s. Přenosové kapacity těchto komunikačních sběrnic jsou dostatečné jak pro přenos dat potřebných pro ovládání vozidla, tak pro přenos základních diagnostických a servisních dat. Obě sběrnice podporují rozlišování priority vysílaných datagramů na sběrnici. Priority jednotlivých datagramů jsou navrženy s ohledem na důležitost přenášené informace. Nejvyšší prioritu mají zprávy obsahující data potřebná pro ovládání a řízení vozidla. Za nimi následují diagnostická data a nejnižší prioritu mají servisní zprávy.

Při výčtu komunikačních standardů, které se objevují na vozidlech, je potřeba uvést i sběrnici IBIS. Tuto sběrnici využívá Informační systém cestujících (dále jen ISC). Tento systém, jak napovídá již samotný název, má za úkol informovat cestující o trase vozidla, zastávkách, aktuální poloze vozidla apod. Je tedy otázka, jestli je ISC součástí nadřazeného řídicího systému vozidla. Vzhledem k tomu, že řídicí počítač informačního systému si vyměňuje diagnostické a stavové informace s centrálním počítačem a centrální počítač částečně ovládá některé funkce informačního systému (např. hlášení zastávek) lze informační systém cestujících chápat jako součást systému nadřazeného řízení vozidla.

Na vozidle se objevují ještě další komunikační standardy. Většina složitějších funkčních celků (např. regulátor trakčního měniče) potřebuje pro detailnější diagnostiku a servisní účely komunikovat se servisním programem běžícím na notebooku. Pro přenos těchto dat již nestačí přenosová kapacita sběrnic použitých pro komunikaci nadřazeného systému. Proto jsou řídicí jednotky těchto zařízení vybaveny ještě další servisní komunikační sběrnici⁴. Nejčastěji se používá RS232 nebo u nejnovějších zařízení USB či Ethernet.

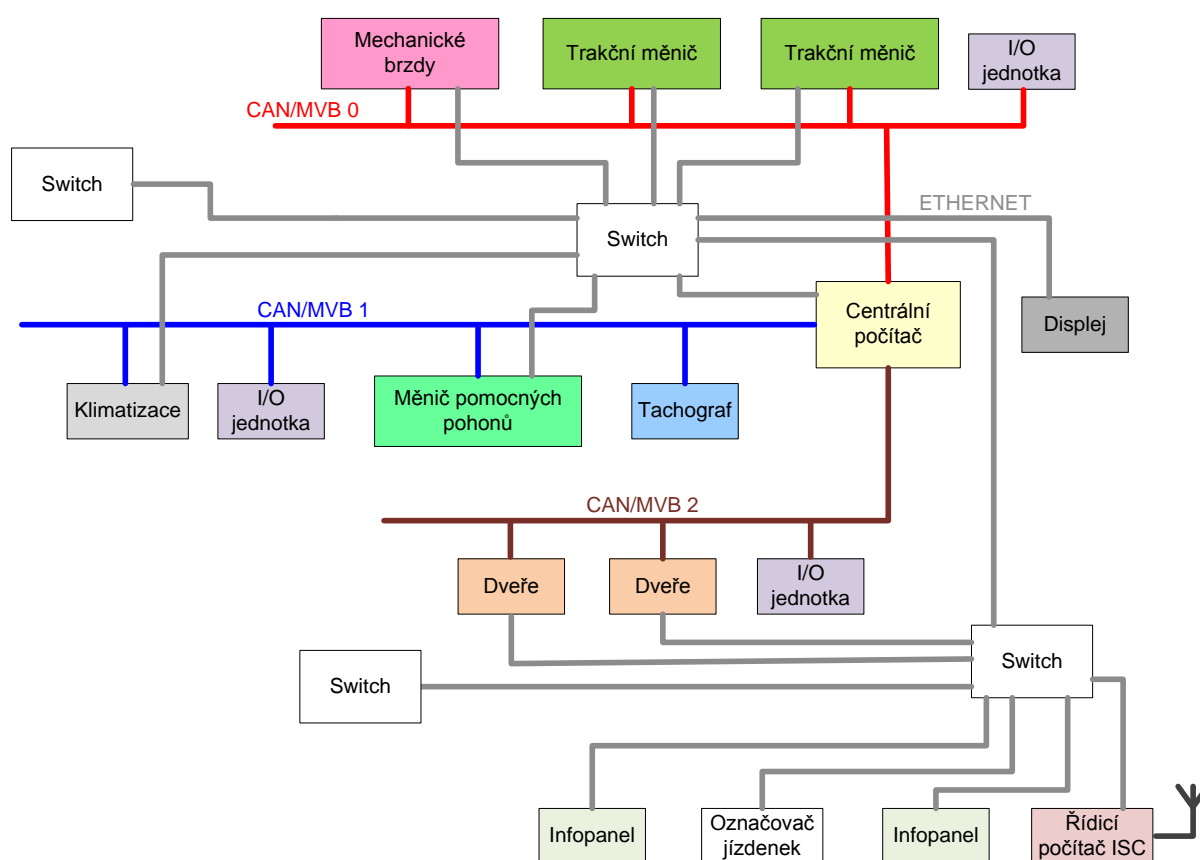
Sběrnice Ethernet se začíná prosazovat i pro komunikaci centrálního počítače vozidla s displejem a začíná vytlačovat sběrnici IBIS v systémech ISC. Hlavním důvodem je neustále narůstající požadavek na objem přenášených dat, na který již nestačí standardy CAN, MVB a IBIS reagovat. Důvodů proč se používá zrovna Ethernet je, dle názoru autora, hned několik:

² Nejčastěji používaným protokolem je CANOpen podle specifikace CiA DS 301 [44].

³ MVB sběrnice používá protokol RTP (Real-Time Protocol) definovaný IEC 61375 [42].

⁴ Tyto sběrnice nejsou na obr. 2.1 zobrazeny z důvodu přehlednosti.

- Jedná se o velice rozšířený standard, který začíná ovládat komunikace v průmyslové automatizaci, kde ukazuje svojí odolnost vůči rušení.
- Díky tomu jsou vývojové náklady spojené s implementací Ethernetu a jeho základních protokolů minimální.
- Přenosové kapacity Ethernetu jsou pro tyto komunikace v současné době více než dostačující. To zajišťuje možnost dalšího budoucího rozvoje bez nutnosti hledat nový komunikační standard.
- Možnost připojení k sběrnici Ethernet dnes nabízí všechny PC a notebooky, takže odpadá nutnost používání převodníků pro vývojové a servisní práce.



Obr. 2.2 Řídicí systém s využitím Ethernetu jako diagnostické a servisní sběrnice

Na obr. 2.2 je upravená topologie nadřazeného řídicího systému o sběrnici Ethernet, která je použita jako servisní a diagnostická sběrnice a nahrazuje tak servisní komunikaci pomocí RS232. Konkrétně se jedná o specifikaci Ethernet 100Base-TX s přenosovou rychlostí 100 Mbit/s. Díky svým vlastnostem Ethernet může i zcela nahradit sběrnici IBIS. Pro přenos dat potřebných pro ovládání vozidla (data přenášená v reálném čase) zůstaly původní sběrnice CAN nebo MVB. Ethernet, na rozdíl od těchto sběrnic, není vhodné použít pro real-time komunikaci. Hlavním důvodem je nedeterministický přístup komunikačních uzlů

na sběrnici. Ten je potřeba pro časově a bezpečnostně kritickou komunikaci zejména mezi centrálním počítačem a regulátory trakčních měničů a mechanických brzd. Z tohoto důvodu nelze klasický Ethernet použít jako hlavní komunikační sběrnici vozidla.

Komunikace mezi jednotlivými komunikačními uzly na sběrnici je realizována pomocí standardních IP protokolů, tak jak je známe z oblasti počítačových sítí a internetu. Pro přenos diagnostických dat jsou použity standardní protokoly TCP/IP a UDP. Systém ISC pak může použít pro přenos hlasu a obrazu protokoly, používané k tomuto účelu mezi osobními počítači.

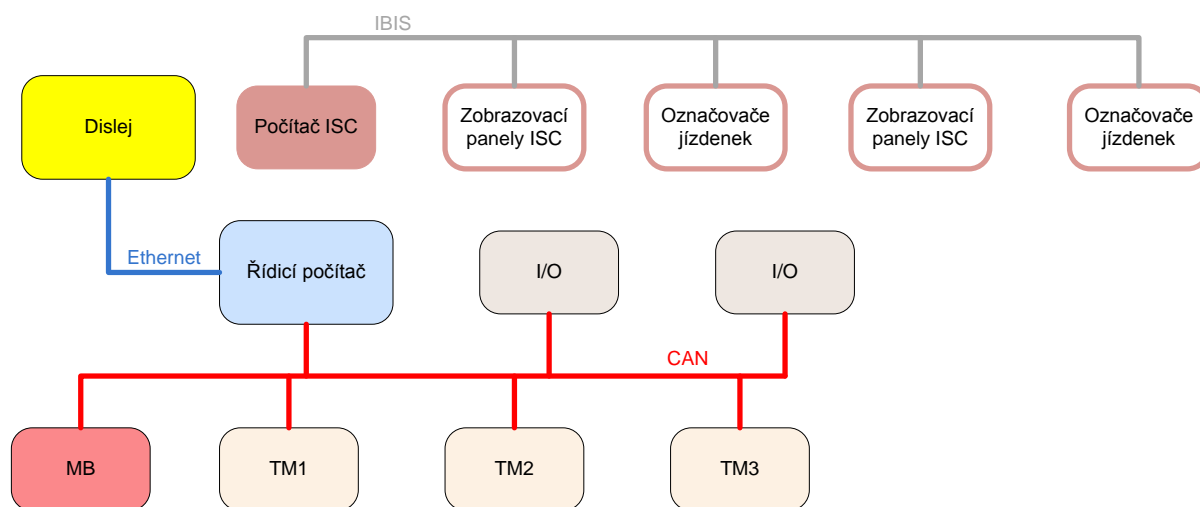
Pro adresování jednotek na sběrnici využívá Ethernet MAC a IP adresu. MAC adresa je jedinečná adresa hardwarového rozhraní a je stanovena výrobcem zařízení. IP protokoly používají pro adresaci tzv. IP adresu, která musí být unikátní v rámci jedné sítě. Přidělování IP adres je možné buď dynamicky, nebo staticky. Dynamická adresa je jednotce přiřazena DHCP serverem a může se měnit. Statická adresa je přiřazena zařízení při návrhu sítě a je neměnná. Při použití Ethernetu na vozidle je výhodnější používání statických IP adres. Při použití dynamického přidělování IP adres musí komunikační uzly před zahájením komunikace získávat IP adresu cílové jednotky od DHCP serveru. Tím se zvyšuje pravděpodobnost poruchy komunikace.

Výhody tohoto řešení proti původnímu konceptu podle obr. 2.1 jsou následující:

- Přenos diagnostických dat nezatěžuje sběrnice určené pro ovládání vozidla.
- Komunikace centrálního počítače s displejem vozidla po Ethernetu umožní lepší a rychlejší zobrazování stavových a diagnostických informací.
- Takto navržené schéma umožňuje přímou komunikaci displeje vozidla s řídicími počítači jednotlivých zařízení. Centrální počítač, tak není zatěžován přeposíláním dat, které nepoužívá pro své algoritmy, mezi displejem a vozidlem. Typickým příkladem je např. informace o verzi firmwaru.
- Umožňuje servisní diagnostiku jednotlivých zařízení na vozidle z jednoho místa.

Skutečná struktura současných řídicích systémů se pohybuje mezi řešením na obr. 2.1 a obr. 2.2. Zejména u modernizací vozidel dochází z důvodu ponechání některých původních komponent k současnému používání sběrnice IBIS, RS232 a Ethernetu. Konkrétní výslednou topologii řídicího systému vozidla je obtížné získat, protože ji výrobci veřejně nepublikují a je pouze součástí interní dokumentace mezi výrobcem vozidla resp. řídicího systému a zákazníkem. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeny pouze topologie řídicích systémů vozidel, na jejichž řešení se podílel autor práce a které byly publikovány v [8] a [12]. Jedná se o

rekonstrukce tramvajových vozidel K2S dopravního podniku Bratislava (obr. 2.3) a GT6 – ER dopravního podniku Berlín (obr. 2.4).

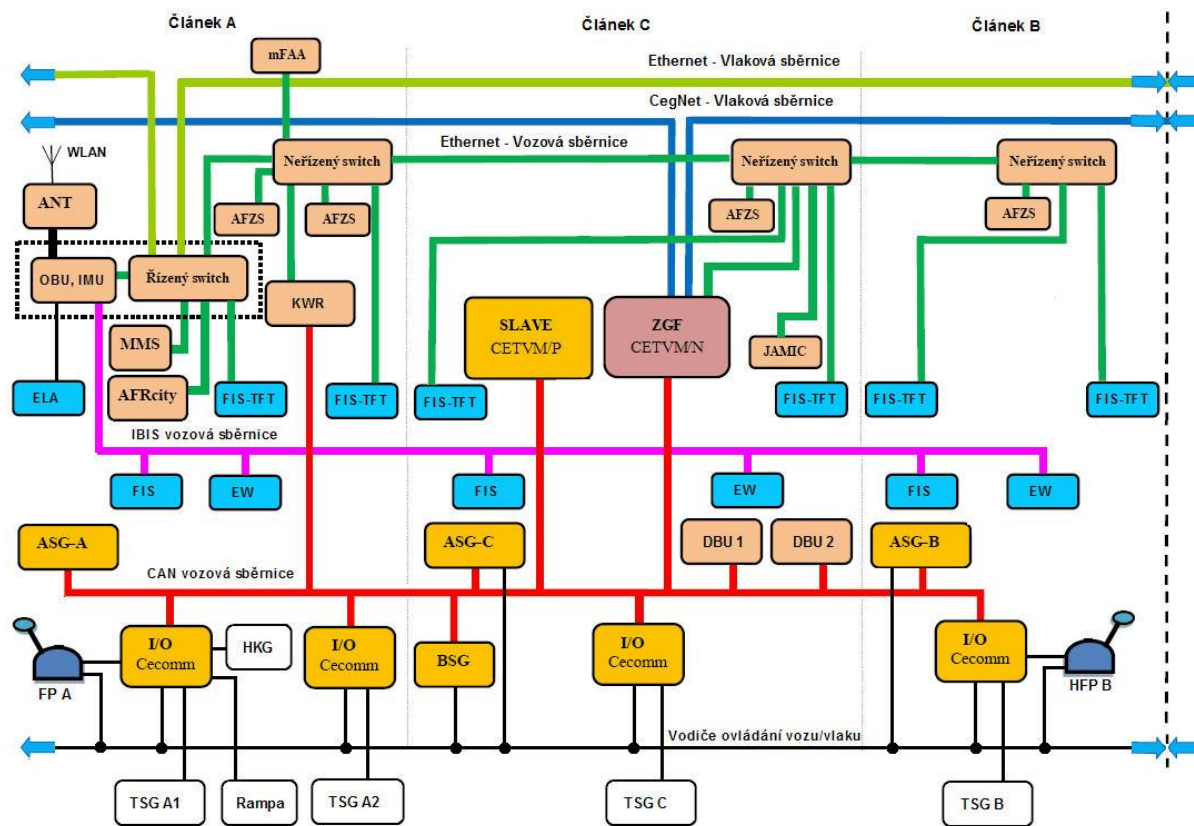


Obr. 2.3 Topologie řídicího systému CECOMM vozu K2S

Tato dvě vozidla jsou vybrána záměrně. Je na nich vidět rozrůstající se použití sběrnice Ethernet na vozidlech. Řídicí systém vozidla K2S byl navržen v roce 2005 a Ethernet je zde použit pouze pro komunikaci řídicího počítače vozidla s displejem a informační systém cestujících využívá pouze sběrnici IBIS. Dále zde neexistuje žádná vazba mezi nadřazeným řídicím systémem a informačním systémem cestujících. Řídicí systém vozidla GT6 byl modernizován v roce 2010. Z obr. 2.4 je patrné, že Ethernet zde využívá jak řídicí systém jako součást diagnostického subsystému vozidla⁵, tak informační systém cestujících⁶. Díky tomu je možná komunikace mezi řídicím počítačem vozidla a počítačem ISC. Protože na vozidle zůstaly na přání zákazníka některé původní komponenty ISC, podporující pouze sběrnici IBIS, musí počítač systému ISC používat pro komunikaci jak Ethernet, tak sběrnici IBIS.

⁵ Diagnostický subsystém vozidla se skládá z jednotek ZFG (řídicí počítač), SLAVE (podřízené PLC), JAMIC (jednotka pro správu aplikačních chyb a deníku poruch) a displej (MMS). Tyto komponenty si spolu vyměňují diagnostická data pouze přes Ethernet.

⁶ Systém ISC tvoří jednotky OBU (hlavní počítač ISC), AFRcity (terminál pro obsluhu ISC řidičem), AFZS (prodejní automat jízdenek), FIS-TFT (zobrazovací panel - TFT), FIS (zobrazovací panel – LED), EW (označovač jízdenek).



Obr. 2.4 Topologie řídicího systému CECOMM vozu GT6

2.2 Spolupráce nadřazených řídicích systémů u vícevozových souprav

Pro zajištění vzájemné spolupráce vozidel v soupravě současné řídicí systémy využívají kombinace diskretních signálových vodičů a komunikační sběrnice. Pro snadnější orientaci v následujícím textu popisujícím tuto problematiku jsou definovány pojmy: „vlaková sběrnice“ resp. „vlaková komunikace“ pro systém zajišťující komunikaci mezi jednotlivými vozidly soupravy a „vozová sběrnice“ resp. „vozová komunikace“ pro systém zajišťující komunikaci komponent řídicího systému. Tato terminologie je převzata z železničních vozidel, kde je tato problematika z důvodu interoperability vozidel velice podrobně řešena.

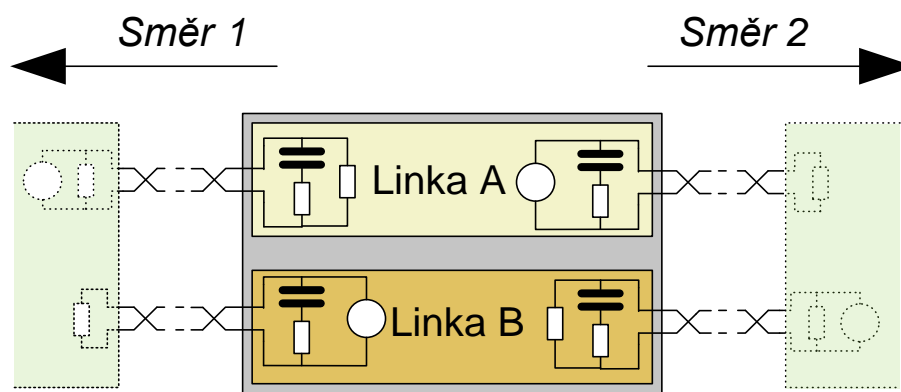
Pro městská vozidla žádný standard řešící vlakovou komunikaci neexistuje. Soupravy městských kolejových vozidel jsou vždy stavěny z vozů od stejného výrobce a převážně se jedná i o vozidla stejného typu. Z tohoto důvodu není vytvářen tlak na vznik standardu pro vlakovou komunikaci městských kolejových vozidel. Pro řešení této problematiky lze sice

použít normu IEC 61375 používanou pro železniční vozidla⁷ [6], [13]. Požadavky městských vozidel na vlakovou komunikaci jsou ale přeci jenom rozdílné. Soupravy mají menší počet vozů a použité řešení tedy nemusí umožňovat dosahovat takové délky sběrnice a množství připojených komunikačních uzlů jako u železničních vozidel.

Norma IEC 61375 a na ní navazující standardy UIC definující obsah jednotlivých datagramů jsou navrženy a optimalizovány pro ovládání železničních vozidel a řešení úkolů řízení železniční dopravy. Respektování těchto standardů sice zajišťuje kompatibilitu mezi vozidly různých výrobců, ale znemožňuje přizpůsobení řešení vlakové komunikace pro potřeby konkrétního projektu. Dalším výrazným aspektem proti používání IEC 61375 v městských vozidlech je i vysoká cena toho řešení.

Z těchto důvodů výrobci řídicích systémů velice často pro vlakovou komunikaci používají sběrnice stejného typu jako pro vozovou komunikaci [6], [14]. Při použití sběrnice CAN nebo MVB je potřeba dodatečně vyřešit požadavky specifické pro vlakovou komunikaci. Jsou to převážně úlohy zabývající se sestavením soupravy jako dynamicky měnící se topologie sběrnice a určení stranové orientace vozidla vůči soupravě. Další problém představuje vlastní provedení fyzické vrstvy ISO-OSI modelu sběrnice. Konkrétně se jedná o konektory pro propojení jednotlivých vozidel soupravy. Tyto konektory jsou vystaveny povětrnostním vlivům a mohou být určitou dobu nepoužívané. To způsobí vytvoření oxidační vrstvy na jednotlivých pinech konektoru a tím jejich sníženou elektrickou vodivost. Tento problém lze odstranit použitím vhodného typu konektoru, u kterého při spojování dojde k mechanickému poškození této vrstvy. Sběrnice WTB (používaná v železničních vozidlech) tento problém řeší pomocí metody nazývané „Fritting“. Jedná se o „přiložení“ zdroje stejnosměrného napětí o velikosti cca 30 ÷ 50 V na zoxidovaný kontakt, které způsobí proražení vrstvy oxidu a obnovení vodivosti kontaktu. Princip této metody „čištění“ kontaktů je znázorněn na obr. 2.5. Hodnota zatěžovacího odporu tohoto zdroje je zvolena tak, aby zatěžovací proud byl v řádech desítek mA.

⁷ Norma IEC 61375 definuje obecně komunikační sběrnice pro drážní vozidla. Pro vlakovou komunikaci je definována sběrnice WTB (z angl. Wire Train Bus). Pro vozovou komunikaci je definována sběrnice MVB. Dále obsahuje definici protokolu RTP (z angl. Real Time Protocol), který je použit jak pro sběrnici WTB tak pro MVB. V poslední revizi z roku 2012 je pro vozovou komunikaci nově definována i sběrnice CAN s protokolem CANOpen jako alternativa ke sběrnici MVB.



Obr. 2.5 Zapojení zdroje a zátěže pro „Fritting“

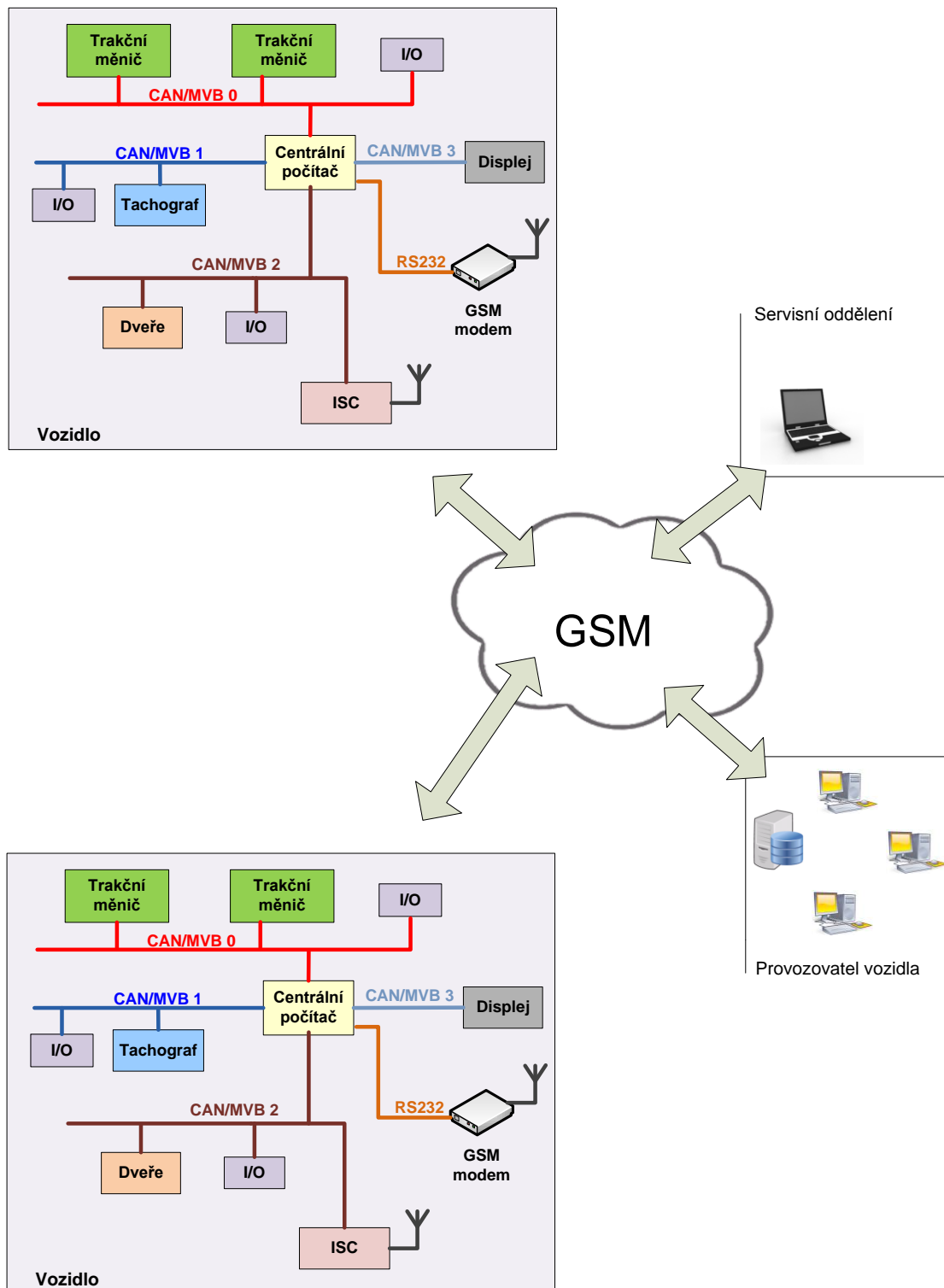
Některé firmy zabývající se řešením řídicích systémů pro městská vozidla si pro řešení vlakové komunikace vyvíjejí vlastní sběrnice. Tato řešení spočívají ve vhodném rozšíření vlastností standardů používaných pro vozovou komunikaci. Jedním z takových výrobců je např. švýcarská firma Selectron, která vyvinula sběrnici CAN Powerline [7]. Jedná se však o řešení, které používá vždy malý počet výrobců a jsou navzájem nekompatibilní.

2.3 Vzdálený monitoring vozidla

Masivní rozvoj bezdrátové datové komunikace, hlavně technologií GSM, umožňuje zcela nové pojetí diagnostiky vozidla. Otevírá se zde prostor pro vzdálenou diagnostiku a monitoring vozidla založeném na bezdrátovém přenosu diagnostických a provozních dat z vozidla do stacionárních zařízení. Tento přenos umožní získat cenné informace o vozidle bez nutnosti fyzické přítomnosti servisního technika. Tato výhoda umožní výrazně snížit náklady výrobce vozidla na servisní práce, protože většinu problémů se buď podaří vyřešit bez nutnosti servisního výjezdu, nebo si servisní technik dokáže zanalyzovat situaci a lépe se připravit na konkrétní servisní zásah. Pro provozovatele vozidel je jistě zase zajímavá možnost přenosu provozních údajů o vozidle přímo do systému plánování údržby vozidla a tím tak celý proces plánování zautomatizovat.

Řešení bezdrátového přenosu dat je znázorněno na obr. 2.6. Vlastní přenos dat je nejčastěji realizován pomocí GSM modemu, který je připojen pomocí sběrnice RS232 případně jiné sériové sběrnice k centrálnímu počítači řídicího systému. Zaslání dat je nejčastěji řešeno metodou založenou na principu dotaz odpověď, kdy se vzdálený počítač ptá prostřednictvím GSM modemu centrálního počítače na konkrétní informace. Druhou možností je automatické generování reportů při vzniku nestandardní události (např. výpadek trakčního měniče). Často jsou používány oba principy najednou. Centrální počítač posílá reporty servisnímu oddělení jako oznámení mimořádné situace. Servisní technik provede

analýzu nahlášené události a v případě potřeby si vyžádá od centrálního počítače vozidla podrobnější informace.



Obr. 2.6 Vzdálený monitoring vozidla - bezdrátový přenos dat např. GSM modemem

2.4 Vozidlo a systémy ITS

Systémy ITS (Intelligent Transport Systems) jsou inteligentní dopravní systémy, které mají za cíl zefektivnit plánování silniční dopravy a informovanost účastníků o aktuálním stavu dopravy. Podrobnější definici systémů ITS lze nalézt např. [15] nebo [16]. Vznik projektů využívající tyto systémy je zaštitěn Evropskou Unií směrnicí Evropského parlamentu a rady 2010/40/EU [17], kterou podepsali všechny členské státy EU. Tato směrnice stanovuje krátkodobé a střednědobé cíle pro řízení dopravy na území EU. Cílem projektů je koordinovat vývoj těchto systémů na národní úrovni v rámci EU a tím zlepšit plynulost dopravy a snížit přetěžování jednotlivých silničních koridorů jak v mezistátní a meziměstské dopravě, tak zlepšení průjezdnosti ve velkých městech po celém území Evropské Unie.

Současné systémy ITS nasazované ve vozidlech MHD řeší dva základní úkoly:

- Preferování vozidel MHD při průjezdu městem (např. řízením světelných křižovatek, omezení rychlosti ostatních účastníků silničního provozu apod.).
- Informování cestujících o aktuálních jízdních řádech vozidel upravených o skutečnou situaci na tratích (započítané zpoždění jednotlivých vozidel, informace o možnostech přestupu na ostatní linky apod.)

Současné systémy ITS jsou integrovány do systému ISC (Informační systém cestujících) a nemají žádnou vazbu na centrální počítač vozidla. Nedokážou tedy přímo ovlivnit chování vozidla a naopak aktuální stav vozidla nedokáže ovlivnit chování systému ITS (např. informace o aktuální maximální rychlosti, obsazení vozidla apod.)

Pro spolupráci se systémem ITS je řídicí počítač ISC vybaven komunikační centrálou, a jednotkou GPS. Jednotka GPS slouží pro určení přesné polohy vozidla na trati. Tato informace je pak spolu s identifikačními údaji⁸ vysílána komunikační centrálou stacionární části systému ITS. Ta tyto informace zpracovává a na jejich základě ovládá své akční členy pro řízení dopravy a vozidlu posílá aktuální informace o času příjezdu do další zastávky a možnostech přestupu na další spoje. Tyto informace jsou zobrazovány pomocí informačních panelů systému ISC v prostoru pro cestující. Cestující tedy mohou být on-line informováni o aktuálním stavu dopravy a mají k dispozici aktuální příjezdové a odjezdové časy jednotlivých linek z následující zastávky. Podrobnější informace o systémech ITS na vozidlech městské

⁸ Identifikačními údaji se v tomto případě rozumí číslo linky a pořadí, na kterém je vozidlo vypraveno.

hromadné dopravy lze nalézt na webových stránkách výrobců těchto systémů např. [15], [18], [19], [20].

2.5 Principy průmyslového Ethernetu

V kapitole 2.1 je uvedeno, že klasický Ethernet nelze použít jako komunikační sběrnici pro systémy pracující v reálném čase. Jako hlavní důvod byl uveden nedeterministický přístup komunikačních uzlů k přenosovému médiu. Aplikace Ethernetu v průmyslové automatizaci ale ukazují, že Ethernet za jistých podmínek může vykazovat vlastnosti real-time komunikace s deterministickým přenosem dat. Pro takto upravený Ethernet se začal používat název Průmyslový Ethernet (v angl. literatuře Industrial Ethernet) a v současné době se jedná pravděpodobně o nejprogresivnější sběrnici průmyslové automatizace, která začíná vytlačovat standardně používané sběrnice typu fieldbus (např. CAN, RS485, apod.).

Oblíbenost průmyslového Ethernetu v průmyslové automatizaci zatím zůstává v oboru nadřazených řídicích systémů kolejových vozidel bez povšimnutí. Hlavním důvodem je pravděpodobně konzervativní přístup v tomto oboru k novým technologiím a částečná nedůvěra v řešení, jehož základ vychází z kancelářské techniky. I přesto, že se v současné době průmyslový Ethernet na vozidlech nepoužívá, je tato kapitola popisující základní principy zajišťující deterministický přenos dat zařazena do této práce záměrně. Vybrané řešení průmyslového Ethernetu je totiž použito při řešení prvního cíle této disertační práce.

2.5.1 Metody modifikace Ethernetu pro dosažení vlastností real-time systému

Pro zajištění vlastností systému pracujícího v reálném čase používá průmyslový Ethernet následující metody případně jejich vzájemnou kombinaci:

- Tvorba nekolizních domén použitím přepínačů.
- Plně duplexní přenos dat.
- Použití protokolu UDP místo TCP.
- Použití komunikace založené na principu **producer – consumer** nebo **publisher – subscriber**.
- Použití prioritních slotů v protokolu Ethernetu ve druhé vrstvě komunikačního modelu podle standardu IEEE 802.1p.
- Segmentace sítě na časově kritické a časově nekritické segmenty.
- Časová synchronizace metodou PTP podle standardu IEEE 1588.

2.5.1.1 Přepínání (switching)

Metoda CSMA/CD je nedeterministická metoda přístupu k přenosovému médiu. Potlačení nežádoucích vlastností této metody z pohledu real-time systému je snížení pravděpodobnosti vzniku kolize na sběrnici. To lze zajistit vhodnou architekturou sítě použitím přepínačů (switch) místo rozbočovačů (hub). Síťový přepínač umožňuje rozdělení sítě na malé kolizní domény díky schopnosti filtrace a směrování paketů pouze jednomu cílovému účastníkovi. Nevýhoda přepínačů oproti rozbočovačům je jejich větší zpoždění. Díky tomu některá řešení preferují používání rozbočovačů i za cenu větší kolizní domény (např. Powerlink Ethernet).

2.5.1.2 Plný duplex

Možnost stanice současně přijímat i vysílat zprávu zvýší dvakrát rychlost komunikace a tím se opět sníží pravděpodobnost kolize.

2.5.1.3 UDP místo TCP

Protokol TCP i UDP jsou protokoly čtvrté vrstvy referenčního modelu ISO/OSI. Protokol TCP je spojovanou službou, která vytváří virtuální spojení mezi vysílací a přijímací stanicí. Díky tomuto virtuálnímu spojení je přenos dat zajištěn proti ztrátě jednotlivých paketů a zaručeno jejich správné pořadí při příjmu. Tato vlastnost ale přináší problémy při poruše, kdy protokol TCP opakuje posílání paketů tak dlouho, dokud nejsou všechny pakety doručeny ve správném pořadí. To znemožní vyslat další data, která jsou již aktuálnější.

Naproti tomu protokol UDP představuje nespojovanou službu, která se při vysílání paketů nestará o to, jestli byla vyslaná data přijímací stanicí přijata nebo ne. Proto mohou být při chybě přenosu nová data přenesena již v dalším cyklu. Protokol UDP je tedy mnohem rychlejší a jednodušší, a proto se mu v průmyslových variantách Ethernetu dává přednost.

2.5.1.4 Metody typu producer – consumer a publisher – subscriber

Tyto metody nahrazují komunikaci typu **Client – Server**. Jejich smyslem je pomocí zpráv typu multicasting sloučit příjemce určitého typu dat do jedné skupiny a těm zasílat zprávy současně. V případě metody **publisher – subscriber** se zájemci o data (subscribers) registrují u poskytovatelů těchto dat (publishers). Poskytovatelé dat si na základě registrací vytvářejí tabulky příjemců, podle kterých pak data vysílají. U metody **producer – consumer** se žádné tabulky nevytvářejí. Data jsou označena identifikátorem, na jehož základě příjemci (consumers) data od poskytovatelů (producers) odebírají.

2.5.1.5 Prioritní sloty v protokolu Ethernet

Prioritní sloty jsou dalším mechanismem podporující vyšší stupeň determinismu přístupové metody CSMA/CD. Jedná se o opatření v druhé vrstvě referenčního modelu ISO/OSI podle standardu IEEE 802.1p, kdy je do pole **tag** v hlavičce Ethernet paketu doplněna informace o prioritě. Podle této informace pak směrovače podporující rozlišování priorit paketů upřednostňují při směrování zprávy s vyšší prioritou.

2.5.1.6 Segmentace sítě

Protože průmyslový Ethernet se používá a bude používat i kromě přenosu řídicích a technologických dat i k přenosu dat pro vizualizaci, přenos přes GSM modemy apod., je efektivní výslednou síť rozdělit na část striktně používající přenos dat v reálném čase a na část striktně deterministický přenos nevyžadující. Tyto dvě části jsou pak navzájem propojeny přes směrovač a případně firewall, který zajistí ochranu segmentu pracujícím v reálném čase před přetížením z ostatních segmentů.

2.5.1.7 Časová synchronizace v Ethernetových sítích

Pro zvláště časově kritické úlohy, kdy je potřeba zajistit současnost prováděných operací se používá metoda časové synchronizace podle standardu IEEE 1588 s označením **PTP** (Precision Time Protocol). Tato metoda spočívá v synchronizaci účastníků pomocí distribuce hodin reálného času s kompenzací zpoždění přenosu informace po síti. Podrobnější popis PTP je uveden např. v [21], [22].

2.5.1.8 Závěrečné shrnutí

Z uvedené analýzy je zřejmé, že různou kombinací uvedených metod lze dosáhnout různé úrovně determinismu výsledného řešení. Některé metody lze realizovat pouze vhodným softwarovým řešením ovladače Ethernet rozhraní, některé pak vyžadují hardwarové úpravy přímo řadičů Ethernetu. Důsledkem toho vzniklo značné množství řešení průmyslové varianty Ethernetu. Mezi nejpoužívanější patří např. EtherNet/IP, ModBus TCP, Profinet IO, Ethernet Powerlink, EtherCat a Profinet IRT.

Seznam uvedených metod modifikace zahrnuje pouze základní metody a není tedy úplný. Detailnější popis jednotlivých metod modifikace, stejně jako popis jednotlivých variant průmyslového Ethernetu a popisů praktických aplikací průmyslového Ethernetu, lze nalézt v literatuře zabývající se touto problematikou např. [23], [24], [25], [26].

3. Cíle práce

Na základě provedené podrobné analýzy současného stavu poznání systémů pro nadřazené řízení městských kolejových vozidel a na základě požadavků vzniklých z praktických aplikací těchto systémů, které jsou obtížně řešitelné současnými (běžnými) technologiemi, byly stanoveny následující cíle této disertační práce:

- 1) Návrh nové koncepce nadřazeného řídicího systému vozidla. Navržené řešení by mělo reagovat na současné trendy vývoje požadavků na tyto systémy. Zejména se jedná o nové požadavky na diagnostiku a monitoring vozidla pomocí bezdrátového přenosu dat. Současný trend v těchto odvětví vyžaduje přístup ke všem subsystémům vozidla z jednoho místa (jednoho konektoru), což současné řešení řídicích systémů neumožňuje.
- 2) Návrh řešení spolupráce nadřazených řídicích systémů ve vícevozových soupravách zejména tramvajových vozidel. Navržené řešení musí umožnit spřahování obousměrných vozidel až do pěti vozových souprav s automatickou detekcí počtu vozů a jejich vzájemné stranové orientace vůči výsledné soupravě.
- 3) Ověření navrženého řešení podle bodu 2) tohoto seznamu praktickou realizací řešení „mezivozové“ komunikace pro konkrétní řídicí systém a nasazení nového řešení na vozidlo.

4. Metodika řešení

Kapitola 1 je úvodem do problematiky nadřazených řídicích systémů vozidel městské hromadné dopravy, kterou se zabývá tato práce. Z důvodu rozsáhlosti a složitosti dané problematiky je v této kapitole vymezena užší oblast, která je v této disertační práci dále zkoumána a řešena.

V následující kapitole 2 je uveden detailní popis současného stavu poznání v oblasti řídicích systémů kolejových vozidel městské hromadné dopravy. Tato část práce se zabývá jak principy současných řídicích systémů, tak návaznostmi na ostatní systémy ovlivňujícími vlastní vozidlo (jako např. systémy řízení dopravy, apod.). První část kapitoly se zabývá současným způsobem řešení nadřazeného řídicího systému na vozidle včetně popisu topologie a použitých komunikačních sběrnic. Tuto část uzavírá konkrétní příklad realizace řídicího systému na dvou vybraných vozidlech. Na těchto příkladech je demonstrován vývoj současného pojetí řídicích systémů pro kolejová vozidla městské hromadné dopravy. Druhá část kapitoly se zabývá problematikou vzájemné spolupráce řídicích systémů ve vícevozových soupravách a bezdrátové komunikace vozidla se stacionárními zařízeními.

Tato komunikace je potřebná pro realizaci systémů řízení dopravy (ITS), informačních systémů cestujících (ISC) a systému pro vzdálený monitoring vozidla. Závěr kapitoly je věnován stručnému popisu sběrnice nazývané jako průmyslový Ethernet.

V kapitole 3 jsou definovány cíle práce. Tyto cíle byly stanoveny na základě konfrontace analýzy současného řešení popsaného v kapitole 2 a trendu vývoje požadavků na moderní vozidlo městské hromadné dopravy, zaznamenaného autorem práce při dlouhodobém řešení dané problematiky v praxi.

Kapitola 5 se zabývá návrhem nové koncepce nadřazeného řídicího systému kolejových vozidel městské hromadné dopravy a je řešením prvního cíle definovaného v kapitole 3. První část kapitoly se zabývá vlastním návrhem nového řešení. Na úvod je definován důvod návrhu nové koncepce řídicího systému. Následuje detailní popis navrhovaného řešení včetně návrhu nových topologií systému a analýzy řešení poruchových stavů na sběrnici pro jednotlivé topologie. Druhá část kapitoly se zabývá novými možnostmi řešení bezdrátové komunikace vozidla se stacionárními zařízeními a poukazuje i na možné bezpečnostní problémy způsobené umožněním této komunikace. Závěr kapitoly je věnován krátké úvaze o nových možnostech navrhovaného řešení zejména v oblasti ovládání a diagnostiky vozidla.

Kapitola 6 se zabývá návrhem nového řešení vzájemné komunikace řídicích systémů při spojení vozidel do vícevozových souprav. První část kapitoly je věnována popisu navrhovaného řešení s využitím fyzické vrstvy sběrnice Ethernet a popisem obecného hardwarového řešení komunikační jednotky. Druhá část navrhuje způsob řešení mezivozové komunikace. Tato část kapitoly obsahuje návrhy řešení řízení sběrnice, přenos dat v reálném čase a přenos dat mezi mezivozovou a vozovou sběrnici.

Navazující kapitola 7 popisuje praktickou část práce spočívající v realizaci prototypu komunikační jednotky podle teoretického návrhu popsaného v kapitole 6. Úvod kapitoly je věnován hardwarovému návrhu nové jednotky a zajištění její výroby. Další část se zabývá detailním popisem softwarového řešení jednotlivých modulů navržených v předcházející kapitole této práce. Hardwarové i softwarové řešení bylo optimalizováno pro požadavky řídicího systému kolejových vozidel CECOMM firmy Cegelec a.s., který bude tuto jednotku používat. Závěr kapitoly je věnován testování vlastností nově vytvořené jednotky.

Kapitola 8 se zabývá použitím navrženého řešení mezivozové komunikace v reálné aplikaci. Tato kapitola popisuje nasazení jednotky CETVCE, která vznikla v praktické části práce, na vozidla (tramvaje) LF2 a GT6.

Závěrečné shrnutí hlavních poznatků dosažených v této disertační práci je popsáno v kapitole 9. V kapitole jsou dále naznačeny směry dalšího budoucího postupu autora v dané

problematice. Zejména se jedná o praktickou realizaci nové koncepce nadřazeného řídicího systému navrženého v 5. kapitole této práce. Dalším úkolem, kterým se chce autor dále zabývat, je dokončení praktické realizace jednotky mezivozové komunikace tak, aby splňovala všechny vlastnosti definované v teoretické kapitole 6.

5. Nová koncepce nadřazeného řídicího systému městských kolejových vozidel

Předcházející analýza řídicích systémů ukazuje vhodnost použití principu distribuovaného řízení. Pro distribuovaný řídicí systém je stěžejní částí komunikační sběrnice. Vytížení těchto sběrnic, zejména pak u systémů využívající sběrnici CAN, se začíná přibližovat k hranici použitelnosti. Zatím je tento problém řešen rozdělením sběrnice na více nezávislých linek nebo instalací další sběrnice. U řešení podle obr. 2.2 je dalším typem Ethernet, který je použitý pro přenos diagnostických informací a zajišťuje komunikaci systému ISC. Tato nepříjemná skutečnost může způsobit komplikace pro další vývoj a zdokonalování funkcí nových řídicích systémů. Instalace dalších sběrnic navíc negativně působí na spolehlivost řídicího systému. Přidání dalších kabelů navýší počet konektorů a tím se zvýší pravděpodobnost možné poruchy komunikace. V neposlední řadě pak také zvyšuje výslednou cenu celého systému nadřazeného řízení vozidla. Pro umožnění dalšího vývoje v oblasti nadřazených řídicích systémů bude tedy zapotřebí nahradit současně používané sběrnice typu CAN a MVB jinou sběrnici, která svými vlastnostmi umožní další nárůst objemu přenášených dat s požadovanou časovou odezvou.

5.1 Výběr nové komunikační sběrnice

Hledaná komunikační sběrnice by měla mít tyto základní vlastnosti:

- Schopnost přenášet data v reálném čase.
- Dostatečnou přenosovou kapacitu i pro přenos dat systému ISC, kde se očekává největší zatížení sběrnice.⁹
- Musí být schopná pracovat v prostředí s vyšší intenzitou elektromagnetického rušení.¹⁰
- Instalace sběrnice na vozidlo by měla být co nejjednodušší.

⁹ Moderní ISC jsou multimediální zařízení vyžadující přenos obrazu i zvuku.

¹⁰ V praxi hladina elektromagnetického rušení v některých částech vozidla výrazně přesahuje limity povolené normou.

- Musí existovat vysoká pravděpodobnost podpory výrobců hardwaru dalších několik desítek let.¹¹
- Měla by umožnit snadné rozšíření o možnost bezdrátové komunikace vozidla s okolím.

Pro snížení nákladů na vývoj nového řešení a rychlejší standardizaci nové komunikační sběrnice řídicích systémů vozidla, by bylo vhodné nalézt již používaný komunikační standard, který splňuje výše uvedené požadavky. Obor vhodný pro hledání řešení je průmyslová automatizace, která do jisté míry řeší podobné úkoly jako nadřazené řídicí systémy vozidel. Průmyslové řídicí systémy také pracují v silně exponovaných prostředích elektromagnetickým rušením a vyžadují přenos dat v reálném čase. Mezi systémy pro průmyslová řešení lze nalézt zástupce splňující podmínky pro provozní teploty, rázy a vibrace stejné jako jsou požadovány normou ČSN EN 50155¹² definující požadavky na elektronická zařízení drážních vozidel.

Vhodnou sběrnici, která splňuje tyto požadavky a je podle názoru autora nejperspektivnější pro nové aplikace, je průmyslový Ethernet. Důvodů proč použít průmyslový Ethernet jako hlavní komunikační sběrnici řídicího systému je hned několik:

- Průmyslový Ethernet využívá Ethernet podle specifikace IEEE 802.3. Ethernet 802.3 je v současné době asi nejpoužívanější sběrnici a díky tomu poskytuje dostatečné množství výrobců hardwaru.
- Ethernet 802.3 je sběrnice, která, ač se používá už přes 30 let, se neustále vyvíjí. Výsledky tohoto vývoje lze použít i pro Průmyslový Ethernet.
- Průmyslový Ethernet dosahuje dostatečné přenosové rychlosti, která umožní realizovat jak přenos procesních dat pro ovládání vozidla, tak přenos diagnostických a servisních dat po jedné sběrnici. Díky této vlastnosti lze na vozidle použít pouze jeden typ sběrnice a zajistit možnost komunikace všech systémů na vozidle bez nutnosti převodníků.
- Průmyslový Ethernet podporuje jak komunikaci v reálném čase, tak komunikaci časově nekritickou s podporou standardních TCP/IP protokolů. Díky této vlastnosti lze dále používat již vyvinuté systémy s podporou Ethernet 802.3 bez nutnosti je upravovat pro nový řídicí systém (např. systém ISC a displej).

¹¹ Životnost tramvajového vozidla je cca 20 let.

¹² **ČSN EN 50155 - Drážní zařízení - Elektronická zařízení drážních vozidel.** Tato norma je závazná i pro kolejová vozidla městské hromadné dopravy.

- Vhodným návrhem topologie sběrnice na vozidle lze oproti dříve používaným sběrnícím snížit počet přechodových konektorů a zkrátit délku sběrnice. To bude mít příznivý vliv na spolehlivost i na cenu instalace celého řídicího systému.

Označení	Architektura	Požadavky na hardware	Standard
EtherCAT	segment RT ¹³	standardní	IEC 62407
EtherNet/IP	otevřená	standardní	IEC 62413
Ethernet Powerlink	segment RT	standardní	IEC 62408
ProfiNet	segment RT	standardní / ASIC	IEC62411
Modbus-RTPS	otevřená	standardní	IEC 62030

Tab. 5.1 Standardy IEC Průmyslového Ethernetu [27]

Nejpoužívanější typy Průmyslového Ethernetu jsou uvedeny v tab. 5.1. Jednotlivé typy Průmyslového Ethernetu se od sebe liší způsobem, kterým je dosaženo komunikace v reálném čase. Některá řešení této vlastnosti dosáhla pomocí softwarové úpravy architektury při zachování standardního hardwaru pro Ethernet 802.3. Některá řešení vyžadují kombinaci softwarové a hardwarové úpravy. Základní principy průmyslového Ethernetu jsou uvedeny v kapitole 2.5 této práce. Detailnější popis jednotlivých řešení lze nalézt v literatuře zabývající se touto problematikou (např. [23], [25]).

Pro řídicí systém vozidla lze použít všechny varianty Průmyslového Ethernetu uvedené v tab. 5.1. Dle názoru autora je pro použití na vozidle nejvhodnější Ethernet Powerlink a to ze dvou důvodů:

- 1) Ethernet Powerlink nevyžaduje speciální hardware a lze tudíž použít standardní čipy pro Ethernet 802.3.
- 2) Od verze Ethernet Powerlink V2 je implementováno aplikační rozhraní založené na mechanismech protokolu CANOpen, který se používá v řídicích systémech vozidla se sběrnicí CAN. Využití těchto mechanismů výrazně zjednoduší portaci již používaných řešení na nový systém využívající Ethernet jako hlavní komunikační sběrnice.

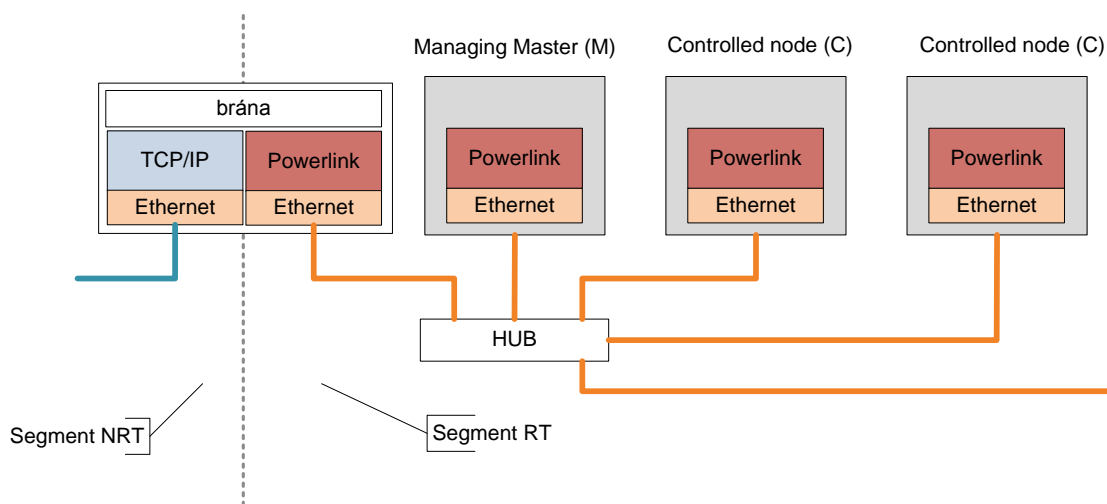
¹³ RT – Real Time

5.1.1 Ethernet Powerlink

První verzi Ethernet Powerlink V1 představila rakouská firma Bernecker & Rainer Industrie-Elektronik v roce 2001. V roce 2002 byla založena standardizační skupina EPSG (Ethernet Powerlink Standardization Group), která v roce 2003 vydala specifikaci Ethernet Powerlink V2 obsahující rozšíření V1, z nichž nejvýznamnější je definice aplikačního rozhraní založené na principech definovaných ve standardu CANOpen (EN 50325-4).

Základní charakteristické rysy standardu Ethernet Powerlink jsou:

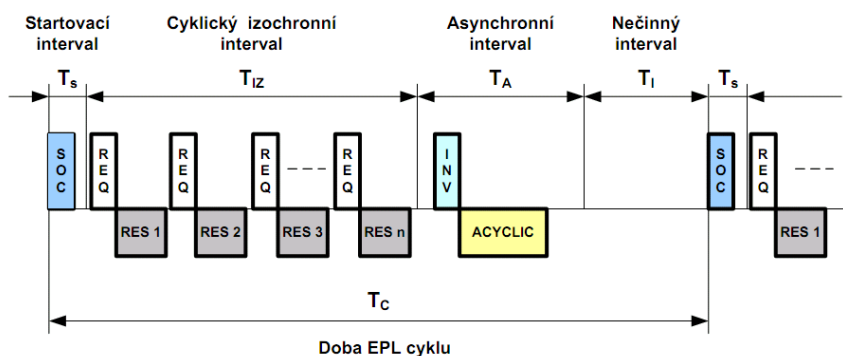
- Používá fyzickou vrstvu Fast Ethernet 100Base-TX.
- Je založen výhradně na využití konvenčního hardware, standardních síťových prostředků (HUB, Switch) a kabelů, které používá klasická verze Ethernet.
- Vysílání dat v reálném čase je dosaženo pouze softwarovým řešením.
- Používá cyklické deterministické vysílání dat s minimální periodou 200 μ s.
- Kromě deterministického cyklického vysílání umožňuje asynchronní přenos nedeterministických dat.
- Podporuje paralelní vysílání na základě protokolů běžných IP standardů.



Obr. 5.1 Základní architektura sítě Ethernet Powerlink

Základní architektura sítě Ethernet Powerlink (EPL) je na obr. 5.1. Pro správné fungování přenosu dat v reálném čase je potřeba síť rozdělit pomocí komunikační brány na segment reálného času (*RT – Real - Time*) a na segment, ve kterém budou připojeny zařízení nepodporující real-time komunikaci (*NRT – Non Real - Time*). V principu činnosti protokolu Ethernet Powerlink je využita skutečnost, že pro maximální využití přenosového pásma sběrnice je potřeba se vyhnout kolizím. Pro dosažení tohoto efektu je využita kombinace

dvou přístupových metod a to primárně metody časových oken TDMA a metody dotaz – odpověď. Na sběrnici Ethernet Powerlink (EPL) je vždy jedna jednotka řídicí komunikaci – tzv. managing master (M). Tato jednotka definuje časový synchronizační pulz pro všechny ostatní komunikační uzly – tzv. controlled node (C) a přiděluje vysílací práva těmto zařízením.



Obr. 5.2 Základní komunikační cyklus ETHERNET Powerlink protokolu [28]

Základní komunikační cyklus Ethernet Powerlink protokolu je na obr. 5.2. Řídicí jednotka M na začátku cyklu vyšle synchronizační broadcastovou zprávu¹⁴ všem jednotkám. V cyklicky izochronním intervalu vysílá M podle komunikačního schématu daným jednotkám dotazovací rámec, který je typu unicast¹⁵. Adresovaný kontrolér vyšle odpověď pomocí multicastové zprávy¹⁶. Tato zpráva je tedy obecně adresovaná všem jednotkám na sběrnici a může si ji tedy jakékoli zařízení přečíst. Touto vlastností je dosaženo křížové komunikace, která se používá i u sběrnice CAN. Po tomto časovém intervalu následuje „Asynchronní interval“. Tento interval slouží pro časově nekritické datové přenosy. V tomto intervalu mohou komunikační uzly C vysílat obecné rámce – např. IP Frame. Podrobnější popis protokolu Ethernet Powerlink je nad rámec této práce a je uveden např. v [28], [29].

Z důvodu využití zpráv typu Multicast a Broadcast je jako rozbočovač vhodnější používat zařízení typu HUB. Z principu činnosti EPL nedochází na sběrnici ke kolizím a tedy není omezen počet rozbočovačů na sběrnici (na rozdíl od specifikace Fast Ethernet 100Base-TX, kde je max počet stanoven na dva). V praxi bývá běžné, že každé EPL zařízení obsahuje dvouportový HUB, čímž výrazně zjednoduší instalaci sběrnice.

¹⁴ Zpráva typu Broadcast – je zpráva, která je určena všem účastníkům na síti.

¹⁵ Zpráva typu Unicast – je zpráva určena pouze jednomu účastníkovi na sběrnici.

¹⁶ Zpráva typu Multicast – je zpráva, která je určena vybrané skupině účastníků.

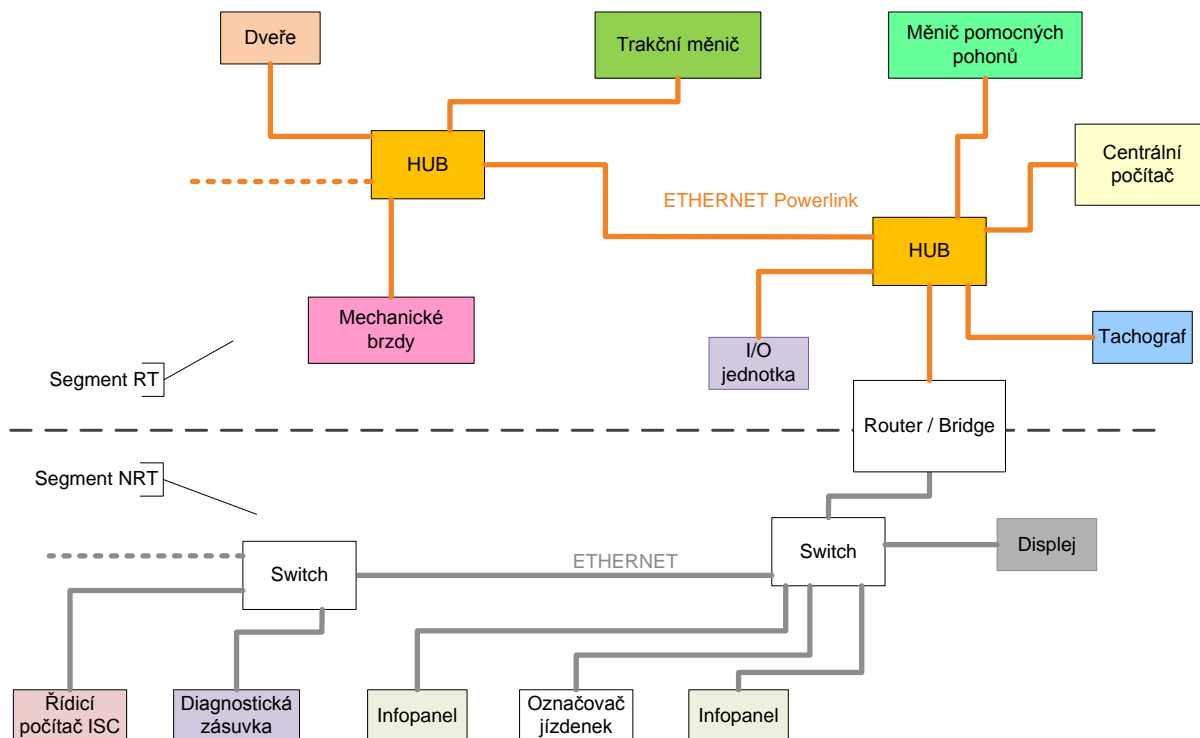
Aplikační rozhraní Ethernet Powerlink (EPL) V2 rozšířilo vlastnosti verze V1 o implementaci mechanismů známých ze standardu CANOpen definovaných v profilech DS301 a DS302 CiA (CAN in Automation). EPL V2 tedy definuje datové objekty PDO, servisní objekty SDO, adresář deskriptorů objektů Object Dictionary a síťový management NMT. PDO objekty jsou přenášeny v izochronní části přenosu. SDO komunikace probíhá v asynchronní části a je alternativně přístupná i prostřednictvím standardních UDP/IP diagramů. SDO diagramy jsou tudíž přístupné i zařízením, které EPL nepodporují.

Hlavní rysy aplikační vrstvy Ethernet Powerlink jsou následující:

- Až 240 zařízení v EPL segmentu.
- 240 vysílacích TX-PDO objektů a 240 přijímacích RX-PDO objektů v řídicí stanici managing node (M).
- 1 vysílací TX-PDO objekt a 240 přijímacích RX-PDO objektů v podřízené stanici controlled node (C).
- Až 254 mapovaných objektů PDO.
- Maximální délka PDO je 1490 byte.
- Standardní boot-up procedura a konfigurační manager.

Pro adresování jednotek na sběrnici používá EPL standardní 48-bitovou MAC adresu, tak jak jej specifikuje standard IEEE 802.3. Navíc k tomu je každému komunikačnímu uzlu přiřazen EPL Node ID, který je konfigurovatelný při instalaci zařízení. Pro možnost komunikace EPL jednotek s ostatními Ethernet jednotkami nabízí Ethernet Powerlink standardní IP adresování.

5.2 Navrhované řešení nového nadřazeného řídicího systému



Obr. 5.3 Navrhované řešení nového řídicího systému

Navrhovaný řídicí systém zobrazený na obr. 5.3 využívá pro komunikaci pouze Ethernet. Všechna zařízení, která jsou připojena na sběrnici, je potřeba rozdělit do dvou skupin. Na zařízení vyžadující pro svou činnost přenos dat v reálném čase a na zařízení, která tyto vlastnosti od komunikační sběrnice nevyžadují. Z tohoto rozdělení vychází návrh architektury Ethernet sítě vozidla, která bude rozdělena na dva segmenty. Segment s časově kritickým přenosem dat (segment RT) je řešen pomocí Ethernet Powerlink v rámci jedné kolizní domény. Ostatní zařízení jsou připojena v segmentu nepodporujícím komunikaci v reálném čase (segment NRT). Tento segment může být rozdělen pomocí Ethernet přepínačů (jednotek Switch) na několik kolizních domén.

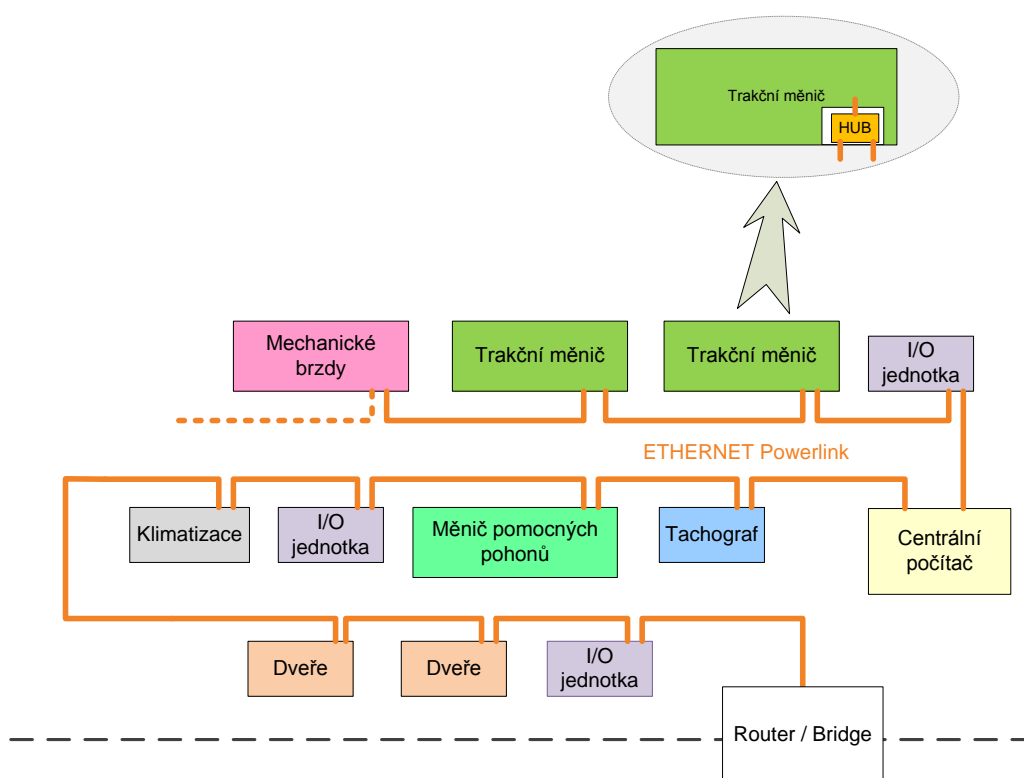
Centrální řídicí počítač zastává funkci „Managing master“ jednotky pro řízení komunikace EPL. Ostatní jednotky v síti EPL jsou typu „Controlled node“. Jednotka „Router/Bridge“ zajišťuje rozdělení sítě na segment RT a NRT.

Takto navržený systém umožní vzájemnou komunikaci jakýchkoli zařízení na vozidle bez nutnosti používání různých převodníků mezi sběrnicemi. Možnost použití libovolného počtu rozbočovačů v EPL části umožňuje vytvářet jakoukoli topologii této části sítě. Pro segment NRT se uvažuje topologie hvězda (příp. strom). Při vhodném návrhu lze

minimalizovat délku kabelů zajišťující propojení zařízení a počet konektorů potřebných při přechodu mezi jednotlivými prostory vozidla.

5.2.1 Topologie sítě EPL

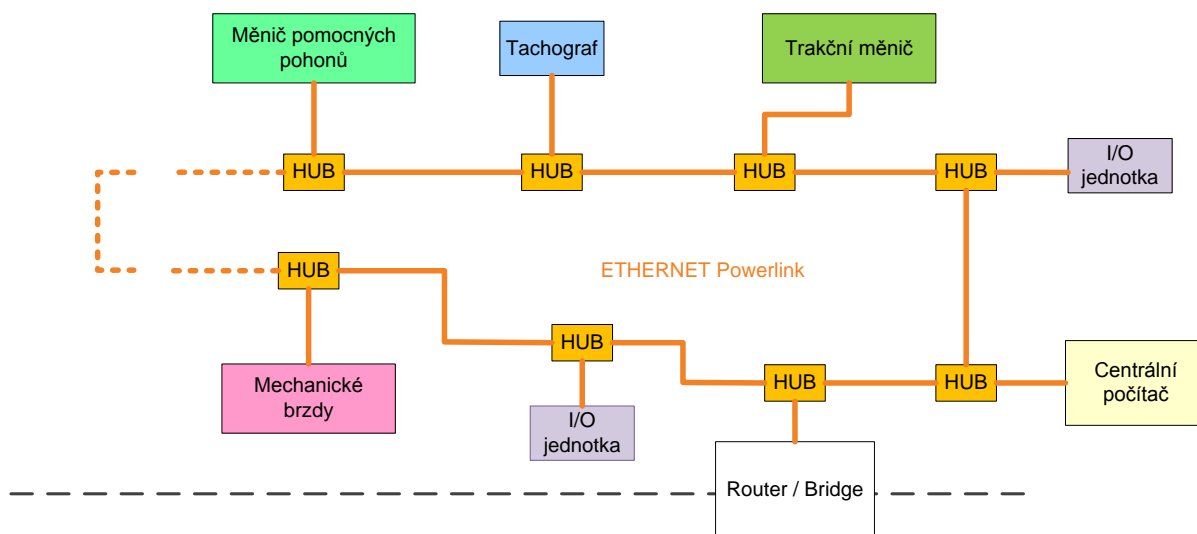
Základní topologie sběrnice, které lze využít, jsou liniová topologie (daisy-chain bus), hvězda, kruh, zdvojený kruh, redundantní hvězda a různé vzájemné kombinace. Detailní popis je např. v [30] nebo v [31].



Obr. 5.4 Liniová topologie sítě EPL

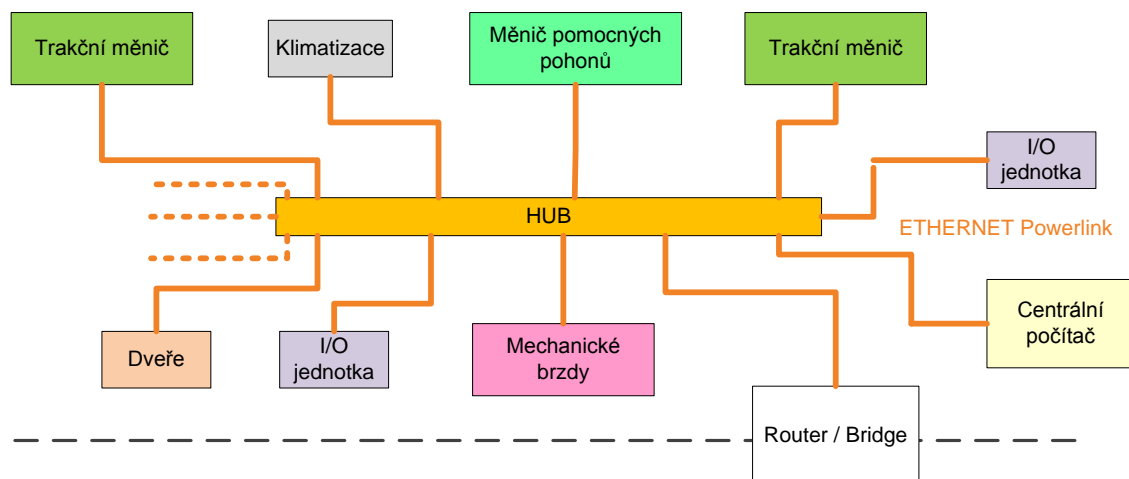
Liniová topologie se nejvíce přibližuje topologii sběrnice CAN. Příklad liniové topologie je uveden na obr. 5.4. Pro liniovou topologii je výhodné použít komponenty, které již v sobě obsahují HUB pro snadnou instalaci sběrnice. Nevýhoda této architektury je, že při poruše jednoho komunikačního uzlu nebo přerušení kabelu dojde k rozpadu sběrnice na dvě samostatné části (to se také označuje jako *single-point of failure*). Tím dojde ke ztrátě komunikace s jednotkami, které fyzicky leží za touto poruchou. Prakticky to znamená, že při poruše na jednom místě může dojít ke ztrátě komunikace centrálního řídicího počítače vozidla např. s regulátory trakčních měničů nebo mechanických brzd a dalších zařízení souvisejících s bezpečným provozem vozidla. I přes tento problém lze liniovou topologii použít při zabezpečení ovládní bezpečnostních funkcí vozidla pomocí diskrétních vodičů.

Vlastnost „Single-point of Failure“ lze odstranit pomocí topologie kruh. Ta je znázorněna na obr. 5.5. Princip tohoto řešení spočívá ve fyzickém kruhovém propojení rozbočovačů. Jeden z rozbočovačů musí zajistit v bezchybném stavu sběrnice rozpojení tohoto kruhu. Při detekci výpadku komunikace dojde k automatické rekonfiguraci sítě tak, aby komunikace mohla dál pokračovat. Při rekonfiguraci může na sběrnici dojít krátkodobě k poruchám typu zdvojení datových paketů nebo změně pořadí paketů. S touto vlastností si musí zařízení poradit, aby nemohlo během rekonfigurace sítě dojít k ohrožení bezpečnostních funkcí vozidla.



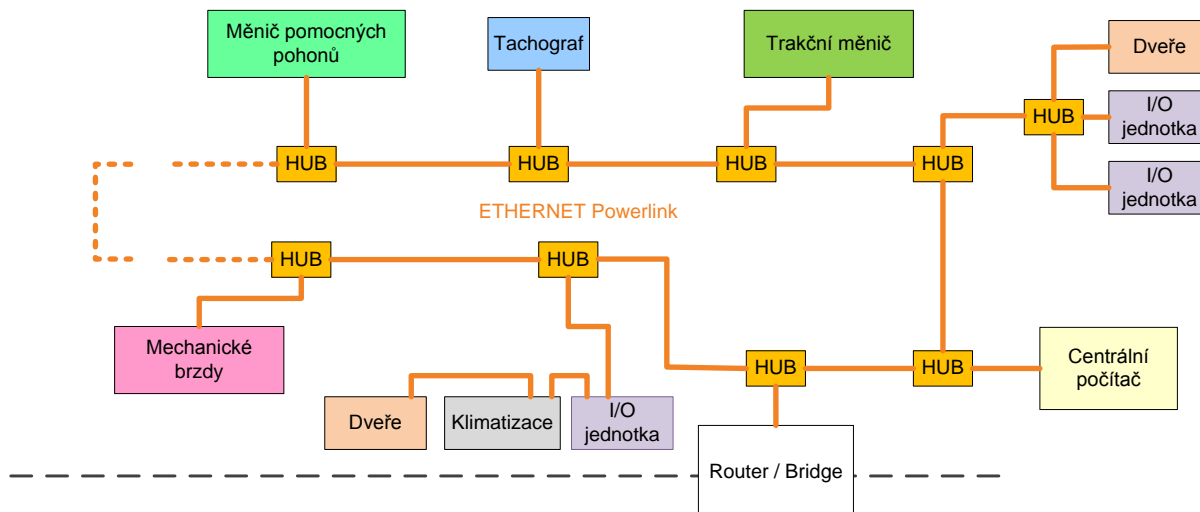
Obr. 5.5 Kruhá topologie sítě EPL

Jako alternativu k liniové topologii sítě lze použít topologii typu hvězda. Ta je naznačena na obr. 5.6 a pro připojení zařízení využívá jeden centrální rozbočovač. Při poruše tohoto rozbočovače dojde ke zhroucení komunikace systému a jedná se tedy o „Single of Failure“. Tomu lze zabránit pouze redundancí centrálního rozbočovače. Další nevýhoda tohoto řešení je nutnost přivedení kabelů od všech jednotek na sběrnici do jednoho místa. Což by přineslo obrovské konstrukční a technologické problémy při realizaci na vozidle. Tento problém lze vyřešit modifikací hvězdy na strom, kdy dojde k rozdělení centrálního rozbočovače na více jednotek. Ty lze pak rozmístit po vozidle a výrazně tak zjednodušit instalaci sběrnice. Výhodou tohoto řešení je, že při poruše libovolného zařízení mimo centrálního rozbočovače nedojde k poruše komunikace s ostatními jednotkami.



Obr. 5.6 Topologie hvězda sítě EPL

Nejvýhodnější se, dle názoru autora, jeví kombinace kruhové topologie a topologie typu hvězda (případně strom). Toto řešení je naznačeno na obr. 5.7. Zařízení potřebné pro zajištění bezpečného provozu vozidla, jako např. regulátory trakčních měničů a mechanických brzd, jsou zapojeny do kruhu. Ostatní zařízení jsou pak do sítě připojeny pomocí stromové topologie. Takto vyřešená architektura sítě vhodně zkombinuje pozitivní vlastnosti obou řešení. Kruhová topologie zajistí dostatečnou odolnost bezpečnostně kritických zařízení proti poruše na sběrnici. Hvězda zase umožní jednoduché pospojování ostatních jednotek, aniž by se jednotky při poruše vzájemně ovlivňovaly.



Obr. 5.7 Navržená kombinace kruhové topologie s topologií hvězda sítě EPL

5.2.2 Fyzické provedení Ethernetu na vozidle

Veškeré elektronické zařízení použité na vozidle musí být certifikováno podle normy ČSN EN 50155. Tento požadavek samozřejmě platí i pro jednotlivé komponenty sítě EPL jako jsou Ethernetové rozbočovače a přepínače. Díky tomu, že EPL využívá konvenční hardware Ethernetu 802.3, jsou tyto komponenty běžně dostupné a vyrábí je prakticky všichni velcí výrobci komponent průmyslového Ethernetu (např. Harting, Wago, PhoenixContact, apod.).

K instalaci Ethernetu jsou také zapotřebí konektory a kabely. Na tyto komponenty jsou kladeny požadavky, které také splňují některá provedení pro průmyslový Ethernet. U kabelů jsou to zejména požadavky na hořlavost a chemické složení. Doporučené vlastnosti kabelů jsou shrnuty v tab. 5.2. U konektorů jsou to zejména požadavky na odolnost proti vibracím. Z tohoto důvodu se upřednostňují konektory typu M12 před klasickým konektorem typu RJ45.

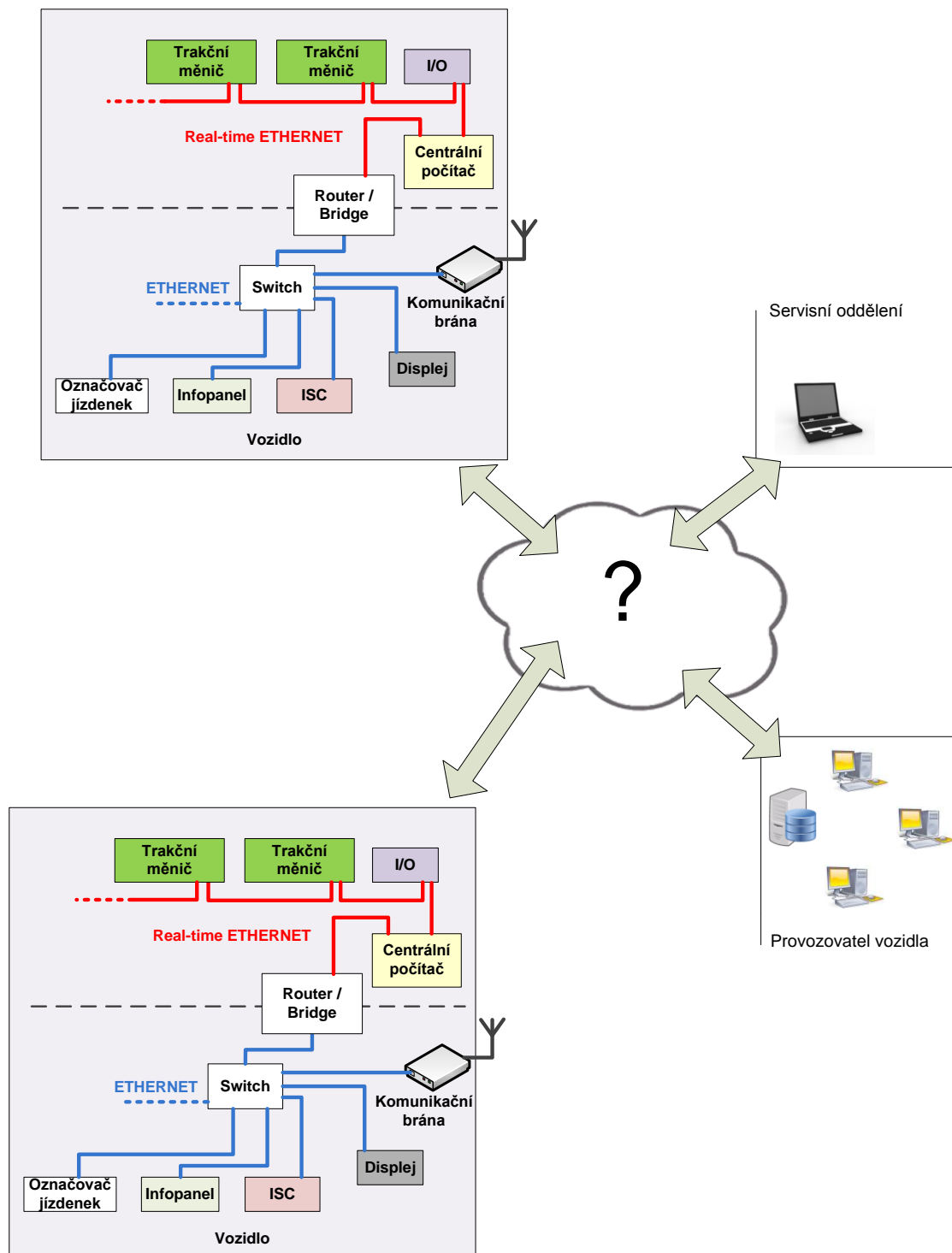
Určení	Kabel pro pevné instalace	Spojovací kabely
Průřez jádra	AWG 24/1 až AWG 22/1	AWG 26/7 až AWG 24/7
Norma	EN 50288-2-1	EN 50288-2-2
Počet párů	2 nebo 4	
Frekvenční rozsah	kategorie 5 (100 MHz)	
Stínění	společné měděné stínění nebo fólie plus měděné stínění	
Maximální délka kabelu	100 m	60 m, popř. 50 m pro spolehlivý přenos

Tab. 5.2 Základní vlastnosti kabelů pro průmyslový Ethernet [30]

5.3 Bezdrátová komunikace s vozidlem

Komunikační modul zajišťující rozhraní pro bezdrátovou komunikaci lze připojit přímo na sběrnici Ethernet. Tím je zajištěna možnost bezdrátové komunikace s jakoukoli jednotkou na vozidle. Připojení komunikačního modulu je znázorněno na obr. 5.8. Modul je záměrně umístěn do segmentu sítě bez podpory real-time komunikace. Díky tomu lze používat standardní zařízení pomocí standardního TCP/IP protokolu. Hlavní důvod umístění modulu do tohoto segmentu sítě je zbytečné nezatěžování real-time segmentu komunikací se zařízeními jako jsou systémy ISC a ITS. Lze totiž předpokládat, že právě bezdrátová komunikace s těmito systémy bude co do objemu dat nejvýznamnější a zbytečně by zatěžovala segment sítě, na které probíhá časově kritická komunikace zajišťující bezpečný

provoz vozidla. V případě potřeby bezdrátové komunikace s jednotkou z real-time segmentu je komunikace realizována přes bridge, který zajistí přenos datagramu v asynchronním intervalu komunikačního cyklu EPL (viz. 5.1.1 Ethernet Powerlink).



Obr. 5.8 Řešení bezdrátové komunikace s vozidlem

Na obr. 5.8 je záměrně neuvedena technologie zajišťující vlastní bezdrátový přenos dat. Zatímco současné řídicí systémy využívaly pro bezdrátovou komunikaci technologii GSM, tak systém ISC využíval buď WiFi nebo kombinaci WiFi sítě s GSM. Síť GSM má výhodu kvalitního pokrytí, ale nevýhodu ve zpoplatněném přenosu dat. Z tohoto důvodu používá systém ISC síť typu WiFi, i přes nutnost vybudování vlastní komunikační sítě (infrastruktury). Zpravidla se přenos dat přes WiFi realizuje v prostorech provozovatele vozidla a slouží k aktualizaci dat systému. Komunikace přes GSM je pak využívána na tratích, kde již objem přenesených dat není tak veliký a tudíž by se nevyplatilo budovat vlastní síť. Z toho vyplývá, že bezdrátová komunikace nebude na vozidle realizována jednou technologií, ale kombinací několika technologií, mezi kterými se bude moci přepínat podle aktuální polohy vozidla tak, aby přenos dat byl optimalizován jak podle ceny, tak podle rychlosti připojení. Proto nebude realizován jedním modulem, ale souborem několika modulů, které jsou na obr. 5.8 naznačeny jako komunikační brána.

Způsob komunikace bude také ovlivněn možnostmi přístupu k jednotlivým typům připojení. WiFi bude pravděpodobně součástí intranetu provozovatele vozidla, takže přenos provozních dat z vozidla potřebných k plánování pravidelných prohlídek vozidla bude realizován přes WiFi a ukládán do databázového systému provozovatele. Zatímco pro výrobce jednotlivých zařízení bude připojení přes WiFi nepřístupné, pro servisní diagnostiku se bude muset využívat síť GSM.

5.3.1 Nové možnosti ovládání a diagnostiky vozidla

Použití jednoho přístupového bodu pro všechny systémy na vozidle umožňuje na jednu stranu výrazně zefektivnit servisní práce při případné poruše vozidla. Na druhé straně přináší nové možnosti v oblasti spolupráce řídicího systému vozidla se systémy ITS.

Při výskytu poruchy vozidla během provozu může poškozené zařízení okamžitě vyslat report s potřebnými servisními informacemi. Tyto informace mají servisní technici k dispozici ještě před tím, než se porouchané vozidlo dostane zpět do depa. Po příjezdu vozidla tedy může rovnou začít oprava poškozené jednotky či systému. Tím se výrazně zkrátí čas potřebný na opravu vozidla a zvýší se jeho nasaditelnost. V případě závažnějšího problému může výrobce pomocí vzdálené diagnostiky stanovit metodu opravy, aniž by musel vyjždět jeho servisní technik na vozidlo a tím prodloužit čas potřebný na opravu.

V oblasti řízení dopravy (systém ITS) může vzájemná komunikace nadřazeného řídicího systému a systému řízení dopravy umožňovat realizaci nových algoritmů jak řízení dopravy, tak řízení samotného vozidla s důrazem na snížení spotřeby elektrické energie. Řídicí systém vozidla může nabídnout k informacím o aktuální poloze i např. informace o aktuálním

obsazení cestujícími, maximální rychlosti, v případě umístění zásobníku energie jeho stav apod. Centrální počítač systému řízení dopravy má pak tyto informace od všech vozidel pohybujících se po městě a může s nimi dále pracovat. Na základě informace o obsazenosti vozidla může např. efektivněji rozhodnout o jeho preferenci při průjezdu křižovatkami. Na základě polohy ostatních vozidel lze upravit maximální rychlost konkrétního vozidla tak, aby do stanice přijely vozidla ve správném pořadí nebo ovlivnit jízdní režim tak, aby byla efektivněji využita rekuperace vozidel do sítě apod.

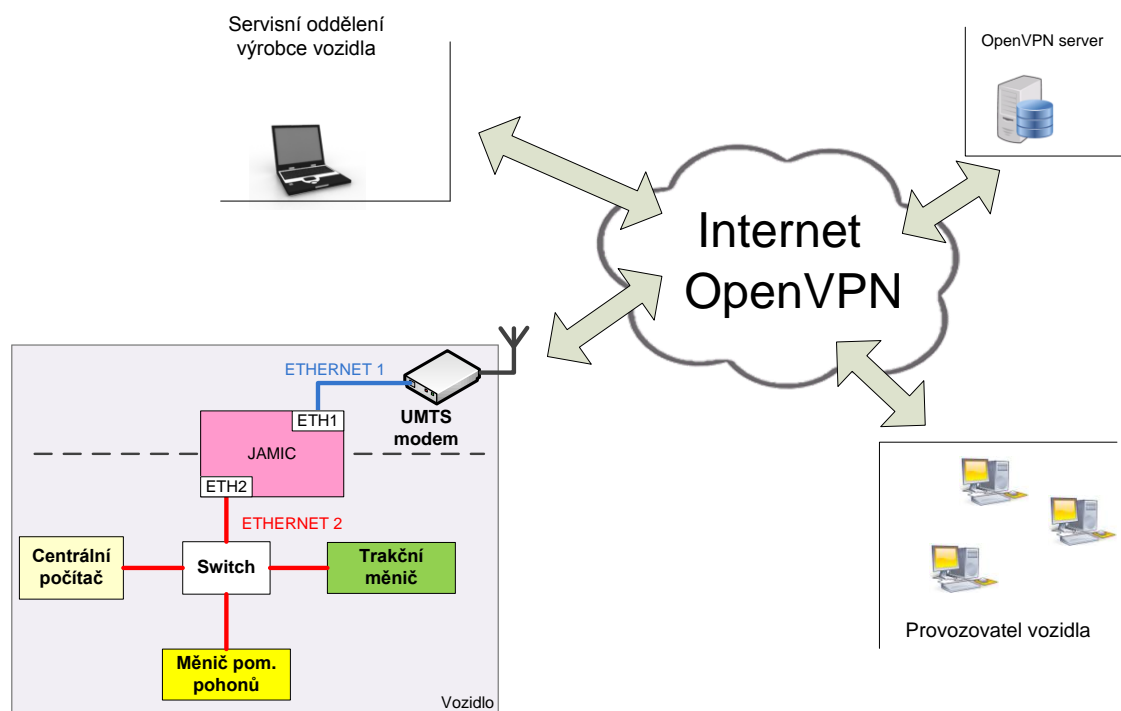
Navržené řešení řídicího systému vozidla umožňuje plnohodnotné začlenění takto vybaveného vozidla do technologií SMARTCity. Možnosti, jak využít vzájemné spolupráce řídicího systému vozidla se systémem řízení dopravy a dalšími technologiemi ve městě, jsou zatím spíše ve stádiu studií a úvah. Přesto se již objevují první pilotní projekty. Zajímavý projekt je např. v německém městě Drážďany, kde na vybraném úseku tramvajové trati je nasazeno řízení maximální rychlosti vozidla s cílem optimalizace plynulého průjezdu daného úseku. Systém řízení dopravy na základě informace o aktuální poloze vozidla vypočítá statický rychlostní profil, který pošle řídicímu systému vozidla. Cílem algoritmu je, aby vozidlo projelo následující křižovatku bez nutnosti zastavení nebo výrazné změny rychlosti vozidla před hranicí křižovatky. Tímto ovlivněním maximální rychlosti vozidla lze dosáhnout úspory elektrické energie oproti standardnímu ovládnutí vozidla řidičem. Výsledky experimentu jsou uvedeny v [32].

5.3.2 Zabezpečení bezdrátové komunikace - Cyber Security

Umožnění bezdrátové komunikace s řídicími jednotkami na vozidle přináší kromě mnoha výhod i jeden závažný problém, který zatím nemusel být na vozidlech řešen. Je jím zabezpečení přenosu dat v angl. literatuře nazýván Cyber Security. Navržená bezdrátová komunikace s vozidlem podle obr. 5.8 využívá pro svoji činnost síť internet. Tím se otevírá možnost pro napadení systému třetí osobou, která by mohla způsobit ať krátkodobé nebo trvalé vyřazení některé části systému z provozu a případně způsobit nehodu vozidla. Tento problém se tedy přímo dotýká bezpečnosti provozu vozidla. Použité zařízení zajišťující bezdrátový přenos musí být vybaveno nástroji, které minimalizují riziko napadení vozidla. Pro zajištění přenosu dat lze použít standardní postupy používané v komerčním sektoru (např. firewall apod.). Podrobněji se touto problematikou zabývá např. [33], [34].

Vzhledem k tomu, že Cyber Security, jak je vysvětleno výše, má dopady na bezpečnost provozu vozidla, musí zabezpečení a jeho úroveň vycházet z rizikové analýzy v souladu s procesy pro certifikaci bezpečnostně kritických systémů na vozidle dle příslušné úrovně SIL. Bezpečnostní koncept aplikace, kterým budou ověřeny výsledky této disertační práce, je

naznačen na obr. 5.9. Zajištění bezpečnosti přenosu dat je zde navrženo jako dvouúrovňové. První úroveň je realizována pomocí projektu OpenVPN. OpenVPN slouží k vytvoření virtuální privátní sítě v internetu se zabezpečeným přístupem pomocí SSL certifikátů. Druhá úroveň je realizována přímo na vozidle pomocí jednotky JAMIC¹⁷. Jednotka JAMIC slouží jednak jako router a NAT mezi Ethernet sítí vozidla a vytvořenou VPN a jednak jako firewall, který kontroluje přicházející pakety z internetu na úrovni aplikačních dat. Jednotka JAMIC tedy musí znát uživatelské protokoly potřebné pro komunikaci s jednotlivými komunikačními uzly vozidla a na síť ETHERNET 2 propustí pouze předem přednastavené datagramy.



Obr. 5.9 Bezpečnostní koncept bezdrátové komunikace pro vozidla firmy Cegelec a.s.

Kompletní riziková analýza a detailní technické řešení nasazované na vozidle není součástí této práce a podléhá obchodnímu tajemství výrobce popisovaného vozidla.

6. Nové řešení komunikace nadřazených řídicích systémů ve vícevozových soupravách

Řešení komunikace nadřazených řídicích systémů ve vícevozových soupravách vozidel městské hromadné dopravy postavené na sběrnici CAN nebo MVB řeší stejný problém jako „vozová“ komunikace řídicího systému. Přenosová kapacita používaných řešení již dosahuje

¹⁷ Jednotka JAMIC je univerzální komunikační jednotka navržená firmou Cegelec a.s.

maximální hranice použitelnosti. Pro zajištění dalšího rozvoje v této oblasti je tedy potřeba vymyslet nové řešení. Navrhované řešení tohoto problému na úrovni vozové komunikace je založeno na použití sběrnice Ethernet. Podle názoru autora je Ethernet vhodnou sběrnicí i pro řešení vlakové komunikace¹⁸ vozidel městské hromadné dopravy. Ethernet disponuje dostatečnou přenosovou kapacitou a navíc díky použití transformátoru pro realizaci galvanického oddělení komunikačních uzlů od sběrnice lze jednoduše implementovat metodu „Fritting“ pro čištění kontaktů konektorů mezivozových propojek. Použití této metody se osvědčilo u sběrnice WTB i sběrnice CAN Powerline.

Tato kapitola se zabývá návrhem nového systému vlakové komunikace založené na využití Ethernetu pro vlastní přenos dat mezi řídicími systémy v soupravě. Navrhovaný systém nemá ambice konkurovat sběrnicí WTB řešící vlakovou komunikaci v železničních vozidlech, ale má být spíše alternativou pro menší soupravy vozidel městské hromadné dopravy, zejména pak tramvajových souprav. V těchto aplikacích je použití systémů ze železničních vozidel těžkopádné a zbytečně nákladné. Pojmy „vlaková komunikace“ a „vlaková sběrnice“ jsou při popisování nového systému zavádějící, protože evokují použití pro vozidla železniční dopravy. Proto jsou pro další text nahrazeny pojmy „mezivozová komunikace“ resp. „mezivozová sběrnice“.

6.1 Popis nové mezivozové sběrnice

Navrhovaná mezivozová sběrnice vychází z principu point-to-point komunikace. Jedná se tedy o sběrnicí typu multimaster, na níž jsou všechny uzly rovnocenné a v libovolný časový okamžik mohou zahájit vysílání dat kterékoli stanici na síti. Nová sběrnice využívá pro vlastní přenos dat fyzickou vrstvu standardu Fast Ethernet 100Base – TX, která je doplněna řešením pro čištění kontaktů konektorů metodou Fritting.

Jednotlivé komunikační uzly sběrnice jsou zapojeny do liniové topologie, jak je znázorněno na obr. 6.1. Na rozdíl od standardních sítí Ethernet nejsou používány pro rozbočení sběrnice prvky typu Switch nebo HUB. Pro umožnění vytvoření liniové topologie je každý komunikační uzel vybaven dvěma Ethernet rozhraními. Výsledná mezivozová sběrnice je tedy z pohledu instalace sběrnice Ethernet rozdělena na jednotlivé segmenty, kde počet segmentů $n_S = n_K - 1$.

(n_S – počet segmentů, n_K – počet komunikačních uzlů)

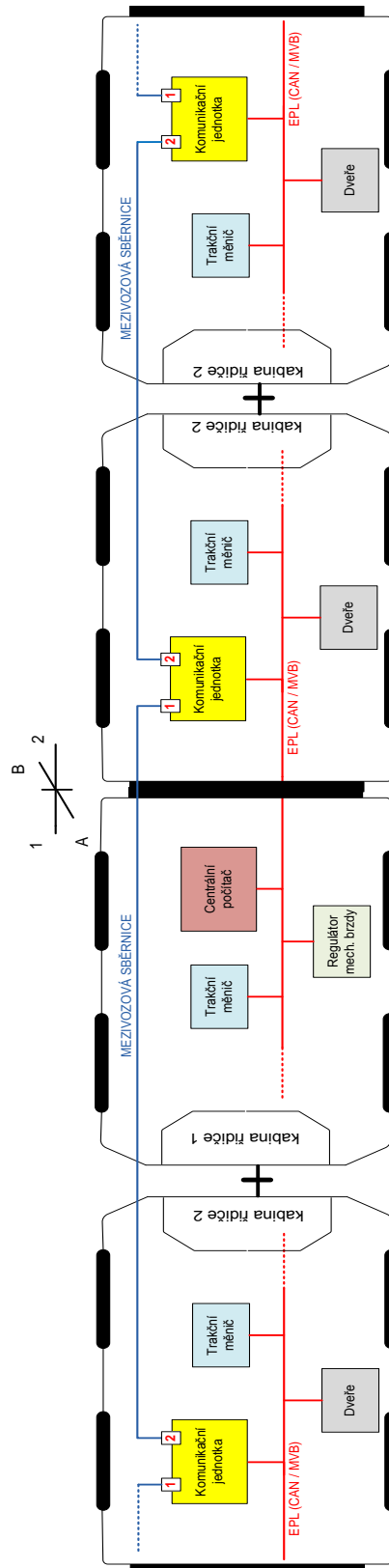
¹⁸ Pojem „Vlaková komunikace“ má zde význam definovaný v kapitole 2.2 jako systém řešící problematiku vzájemné komunikace řídicích systémů ve vícevozových soupravách.

Použití dvou Ethernet rozhraní je potřeba i pro realizaci algoritmů určení orientace jednotky (resp. celého vozidla) vůči soupravě (resp. řídicímu vozidlu soupravy). Definování vzájemné orientace vozidla a jednotky je znázorněno na obr. 6.1.

Propojení jednotlivých segmentů zajišťuje vlastní komunikační uzel. Díky tomuto řešení nedochází na jednotlivých segmentech Ethernet sítě ke kolizím, protože jsou na něm připojeny pouze dva komunikační uzly. Kolize mezi segmenty řeší komunikační uzly na základě různé priority vysílání zpráv. Vhodným rozvržením priorit vysílaných zpráv lze zajistit přenos dat v reálném čase.

Přenos dat probíhá pomocí standardních IP protokolů. Adresování jednotek je realizováno pomocí IP adres, které jsou dynamicky přidělovány v průběhu inaugurace sběrnice. Pro řízení a správu sběrnice je použit princip **Master** a **Slave** jednotek. Jednotka **Master** zajišťuje řízení inaugurace sběrnice při sestavování soupravy. Jakákoli jednotka na sběrnici může zastávat roli **Master** nebo **Slave** jednotky. Master jednotka by vždy měla být na řídicím voze soupravy. Po ukončení inaugurace sběrnice musí být na sběrnici vždy pouze jedna jednotka ve stavu **Master** a ostatní jednotku musí být ve stavu **Slave**.

Po úspěšném ukončení procesu inaugurace sběrnice začnou jednotky vysílat aplikační zprávy s informacemi pro ovládání a diagnostiku vozů v soupravě. Vysílané zprávy mohou být typu broadcast nebo unicast. Multicastové zprávy nejsou podporovány. Pro vysílání zpráv se používá jak periodické vysílání, tak vysílání typu dotaz – odpověď.



Obr. 6.1 Topologie mezivozové sběrnice a definice vzájemné orientace komunikační jednotky a obousměrného vozidla

Základní parametry navrhované mezivozové sběrnice jsou shrnuty v tab. 6.1. Použití Ethernetu pro realizaci fyzické vrstvy sběrnice určuje některé základní parametry mezivozové sběrnice jako jsou například přenosová rychlost a maximální délka segmentu sběrnice mezi dvěma jednotkami. Ostatní parametry definované v tab. 6.1 vychází z praktických poznatků získaných autorem práce při projektování a realizaci řídicích systémů pro tramvajová vozidla.

Přenosové médium ¹⁹ :	2x kroucený metalický pár
Přenosová rychlost ¹⁹ :	10 Mbps/100 Mbps ²⁰
Max. délka segmentu mezi jednotkami ¹⁹ :	100 m
Délka datového rámce ¹⁹ :	max. 1500 Byte
Podpora IP protokolů:	pouze vybrané (ARP, UDP, ICMP)
Min. perioda přenosu procesních dat:	20 ms
Max. počet komunikačních uzlů na sběrnici:	5
Sestavení soupravy:	automatické, při detekci změny

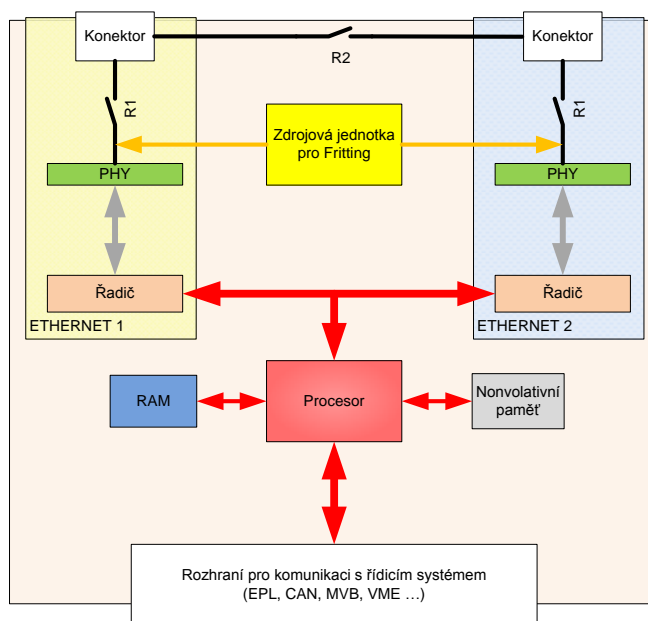
Tab. 6.1 Základní vlastnosti mezivozové sběrnice

6.2 Hardwarový návrh jednotky mezivozové sběrnice

Blokové schéma hardwarového návrhu komunikační jednotky mezivozové sběrnice je naznačeno na obr. 6.2. Základem jednotky jsou dvě rozhraní Ethernet s procesorem zajišťujícím komunikaci po mezivozové sběrnici a přenos dat mezi řídicím systémem vozidla a mezivozovou sběrnici. Ethernet rozhraní jsou doplněna o obvody zajišťující Friting. Rozhraní pro komunikaci s řídicím systémem vozidla na tomto návrhu není jednoznačně specifikováno. Předpokládá se, že se bude flexibilně měnit podle konkrétních požadavků realizované aplikace. Tyto základní bloky jsou doplněny o paměť typu RAM pro realizaci IP stacku a bufferů pro přenos dat mezi jednotlivými částmi jednotky a nonvolatilní paměti pro uložení konfiguračních dat jednotky.

¹⁹ Parametr určený specifikací sběrnice Ethernet.

²⁰ Standardně používané Ethernet řadiče podporují jak specifikace 10 Base-T tak 100 Base-TX. Přenosovou rychlost lze tedy zvolit podle potřeb konkrétního projektu.



Obr. 6.2 Hardwarový návrh jednotky mezivozové komunikace

Jednotlivé komunikační jednotky jsou na mezivozové sběrnici zapojeny do liniové topologie. Nevýhodou této topologie je, že při poruše komunikační jednotky dojde k rozpadu mezivozové sběrnice na dvě samostatné části. Pro řešení tohoto poruchového stavu jsou určeny relé R1 a R2.

Tyto relé slouží k odpojení jednotky a následnému přemostění při poruše. Při bezporuchovém stavu je sepnuto relé R1 a konektory jednotky jsou připojeny k obvodům fyzické vrstvy Ethernet rozhraní (zkráceně PHY). Při poruše jednotky dojde nejprve k vypnutí relé R1, tím se odpojí konektory od nefunkčních rozhraní a následně se sepne relé R2. Sepnutím relé R2 dojde k přemostění jednotky a k propojení dvou sousedních segmentů. Ovládání relé je navrženo tak, aby při ztrátě napájení jednotky byly Ethernet konektory vzájemně propojeny.

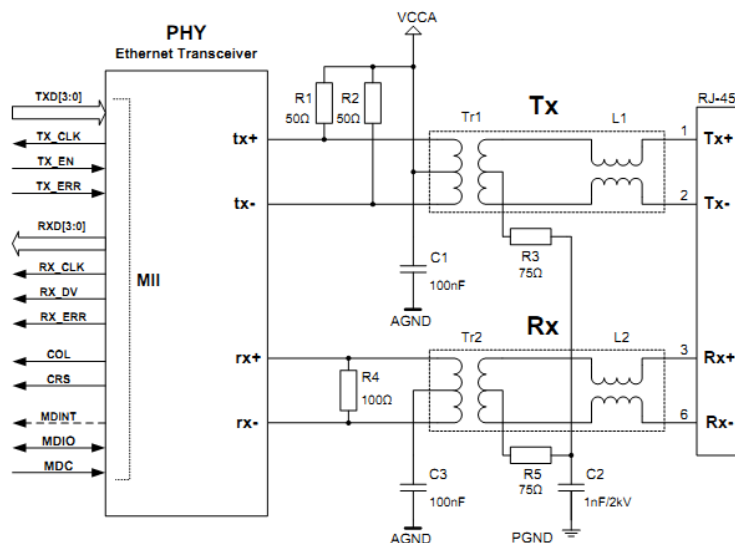
Nevýhodou tohoto řešení je prodloužení segmentu mezi sousedními jednotkami, přičemž musí být zachována maximální délka segmentu. Pokud nelze zajistit maximální délku segmentu do 100m v poruchovém stavu²¹, lze poruchu komunikačního modulu řešit redundancí mezivozové sběrnice nebo zajistit nouzové ovládání soupravy vozidel bez mezivozové komunikace²².

²¹ Tato podmínka je u většiny souprav dvou a tříčlánkových tramvajových vozů splněna.

²² Tento způsob se používá u souprav tramvajových vozů, kde je nouzové ovládání zajištěno pomocí diskrétních logických signálů. Typicky se jedná o zadání brzdy, jízdy a směru jízdy. Nouzové ovládání je určeno pouze k odjezdu porouchané soupravy do depa.

6.2.1 Fritting

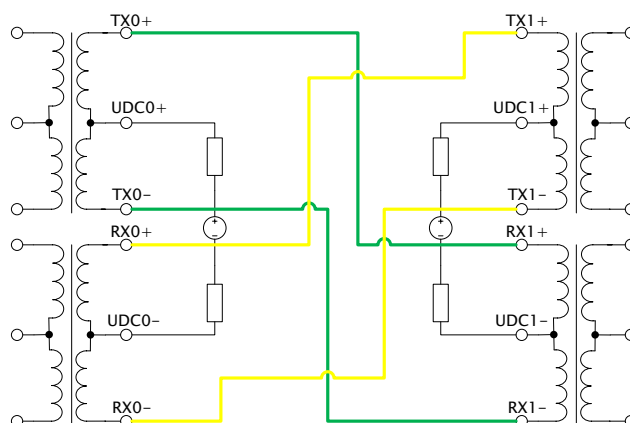
Fritting spočívá v připojení stejnosměrného napětí o velikosti cca $30 \div 50$ V mezi vodiče datového kabelu sběrnice. Toto napětí způsobí proražení oxidační vrstvy na kontaktech konektorů. Pro připojení zdroje napětí je použit transformátor, který je součástí obvodů fyzické vrstvy Ethernet rozhraní (zkráceně PHY). Typické zapojení doporučené výrobcí PHY je na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Obvody fyzické vrstvy Ethernet 10Base-T a 100Base-TX [28]

Připojení zdroje stejnosměrného napětí a zatěžovacích rezistorů je znázorněno na obr. 6.4. Díky připojení zdroje ke středům vinutí oddělovacího transformátoru se magnetický tok vyvolaný průchodem stejnosměrného proudu vinutími transformátoru navzájem odečte a nezpůsobí přesycení jádra transformátoru²³.

²³ Podobný princip připojení zdroje stejnosměrného napětí je použit v PoE (*Power Over Ethernet*) – napájení zařízení pomocí datového kabelu.



Obr. 6.4 Připojení zdroje stejnosměrného napětí a zátěže pro "Fritting"

6.3 Návrh řešení mezivozové komunikace

Řešení navrhované mezivozové sběrnice lze rozdělit do tří částí (modulů):

- 1) Část zajišťující přenos zpráv na mezivozové sběrnici – ETH modul.
- 2) Část zajišťující realizaci algoritmů mezivozové komunikace – TCS modul.
- 3) Část zajišťující komunikaci jednotky mezivozové komunikace s řídicím systémem vozidla – APL modul.

6.3.1 ETH modul

ETH modul zajišťuje vysílání a příjem Ethernet zpráv a realizuje virtuální propojení Ethernet rozhraní jednotky. Pro přenos dat jsou použity standardní IP protokoly. Z důvodů minimalizace požadavků na hardware komunikačního uzlu není implementována úplná protokolová sada TCP/IP, ale pouze vybrané protokoly potřebné pro přenos aplikačních a řídicích dat a základní diagnostiku.

6.3.1.1 Podporované IP protokoly

Mezivozová sběrnice využívá pro přenos dat standardní UDP protokol (*User Datagram Protocol*) podle specifikace RFC 768. Tímto protokolem je realizován veškerý přenos jak aplikačních, tak řídicích dat mezivozové komunikace. Pro diagnostické a servisní účely je přidána podpora protokolu ARP (*Address Resolution Protocol*) podle specifikace RFC 826 a protokol ICMP (*Internet Control Message Protocol*) RFC 777. Z protokolu ICMP je podporována pouze služba „**Ping**“ pro testování dostupnosti komunikačního uzlu podle IP adresy. Díky podpoře protokolů ARP a ICMP lze jako diagnostický nástroj použít jakýkoli osobní počítač nebo notebook.

6.3.1.1.1 IP Protokol

IP protokol (*Internet Protocol*) je protokolem síťové vrstvy a je podrobně specifikován v RFC 791. Hlavní funkcí IP protokolu je směřování paketů od zdrojového k cílovému uzlu. Jde o protokol přepravující data bez záruky, tj. negarantuje ani doručení ani zachování pořadí ani vyloučení duplicit. Zajištění těchto záruk je ponecháno na vyšší vrstvě, kterou představuje protokol TCP. Stejně tak je na vyšší vrstvě ponechána kontrola integrity dat, protože IP datagram nese pouze informaci o kontrolním součtu hlavičky datagramu se služebními údaji. Detail hlavičky IP protokolu je na obr. 6.5.

Byte	0	1	2	3
Byte 0 ÷ 3	verze	IHL	typ služby	celková délka
Byte 4 ÷ 7	identifikace		příznaky (3 bity)	offset fragmentu (13 bitů)
Byte 8 ÷ 11	TTL	číslo protokolu	kontrolní součet hlavičky	
Byte 12 ÷ 15	zdrojová adresa			
Byte 16 ÷ 19	cílová adresa			
Byte 20 ÷ ((IHL * 4) – 1)	rozšířená nepovinná nastavení			
---	data			

Obr. 6.5 Formát IP protokolu

Popis jednotlivých polí:

Verze:

Verze protokolu (0x4)

IHL:

Délka hlavičky v půl bajtu; Skutečná délka je pak vynásobená 4, tzn. typická a minimální délka ($0x5 \ll 2$) = 20 bajtů, a maximální ($0xF \ll 2$) = 60 bajtů.

Typ služby (TOS, Type of Service):

Typ a kvalita přenosové služby IP protokolu. Význam jednotlivých bitových položek je následující:

- Pr** *Precedence* Nastavení priority přenosu paketu
- D** *Delay* Žádost o nízké zpoždění přenosu (D = 1)
- T** *Throughput* Žádost o vysokou propustnost přenosu (T = 1)
- r** pole rezervovaných bitů

Celková délka:

Délka datagramu v bajtech.

Identifikace:

Odesílatel přidělí každému odeslanému paketu jednoznačný identifikátor. Pokud byl datagram při přepravě fragmentován, pozná se podle této položky, které fragmenty patří k sobě (mají stejný identifikátor).

Příznaky:

Příznaky fragmentace. Význam jednotlivých položek je následující“

DF *Don't Fragment.*

DF = 1 Fragmentace zakázána

DF = 0 Fragmentace povolena

MF *More fragment.* Příznak posledního fragmentu paketu

MF = 1 Nejedná se o poslední fragment

MF = 0 Příznak posledního fragmentu

Offset fragmentu:

Udává, na jaké pozici v původním datagramu začíná tento fragment. Jednotkou je osm bajtů.

TTL (Time To Live):

Představuje ochranu proti zacyklení. Každý směrovač zmenší tuto hodnotu o jedničku (případně o počet sekund, které datagram ve směrovači strávil, pokud zde čeká déle). Pokud tím TTL nabude hodnotu nula, datagram zahodí, protože vypršela jeho životnost.

Protokol:

Identifikace protokolu vyšší vrstvy – viz obr. 7.1. Příklady hodnot jsou uvedeny pro protokoly využitě v praktické realizaci práce.

1 ICMP

6 TCP

17 UDP

Kontrolní součet hlavičky:

Slouží k ověření, zda nedošlo k poškození. Počítá se pouze z hlavičky a pokud nesouhlasí, datagram bude zahozen.

Adresa odesílatele:

IP adresa odesílatele - 4 byte IP adresy, která je uložena ve formátu low-endian (nejnižší byte odpovídá nejnižší adrese).

Adresa cíle:

IP adresa příjemce - 4 byte IP adresy, která je uložena ve formátu low-endian (nejnižší byte odpovídá nejnižší adrese).

Volby:

Různé rozšiřující informace či požadavky. Například lze předepsat sérii adres, kterými má datagram projít. Volby obvykle nejsou v datagramu použity (v tabulce jsou barevně odlišeny).

Data:

Obsahuje další zapouzdřené protokoly.

6.3.1.1.2 ARP protokol

ARP je pomocný protokol síťové vrstvy definovaný standardem RFC 826, který se používá pro přiřazení fyzické MAC adresy logické IP adrese. Uvedené přiřazení je nezbytné, neboť komunikace v síti probíhá pomocí fyzických MAC adres. Každá přenášená IP adresa musí korespondovat s odpovídající MAC adresou.

Pokud IP protokol získá z vyšší vrstvy (např. UDP) IP adresu, pro kterou nezná komunikační uzel MAC adresu, vyšle ARP do sítě univerzální broadcast zprávu – **ARP Request** se žádostí o hledanou MAC adresu. Příslušný uzel, který má hledanou IP adresu odpoví rámcem **ARP – Reply**, který nese současně s danou IP adresou i hledanou fyzickou MAC adresu. Každý komunikační uzel si udržuje tabulku již získaných fyzických MAC adres a při dalším vyslání zprávy použije fyzickou MAC adresu z tabulky. Obsah tabulky je buď statický, nebo může být dynamicky obnovován. Hlavička protokolu ARP je na obr. 6.6 a význam jeho jednotlivých polí je vysvětlen pod obrázkem.

Byte	0	1	2	3
Byte 0 ÷ 3	Hardware Type		Protocol Type	
Byte 4 ÷ 7	Hardware Length	Protocol Length	Code	
Byte 8 ÷ 11	Source MAC Address			
Byte 12 ÷ 15	Source MAC Address		Source Protocol Address	
Byte 16 ÷ 19	Source Protocol Address		Destination MAC Address	
Byte 20 ÷ 23	Destination MAC Address			
Byte 24 ÷ 27	Destination Protocol Address			

Obr. 6.6 Hlavička ARP protokolu

Popis jednotlivých polí:

Hardware Type:

Určení typu sítě. 1 - Ethernet, 6 - obecné síť IEEE 802.

Protocol Type:

Určení typu síťového protokolu. Pro IP protokol = 0x800.

Hardware Length:

Délka fyzické MAC adresy (rovna 6).

Protocol Length:

Délka logické IP adresy uzlu (rovna 4).

Code:

Kód typu ARP rámce: 1 – Request, 2 – Reply.

Source MAC Address:

Fyzická MAC adresa zdrojového uzlu.

Source Protocol Address:

Logická IP adresa zdrojového uzlu.

Destination MAC Address:

Fyzická MAC adresa cílového uzlu.

Destination Protocol Address:

Logická IP adresa cílového uzlu.

6.3.1.1.3 ICMP protokol

Protokol ICMP definovaný standardem RFC 777 je určen pro přenos chybových a řídicích zpráv mezi uzly a směrovači sítě TCP/IP. Pro navrhovaný systém mezivozové komunikace je použita pouze služba pro testování dostupnosti a stavu cílového uzlu sítě IP. Tato služba je použita pouze pro diagnostické účely (využití programu **ping** OS Windows) a pro vlastní činnost mezivozové komunikace není použita. Hlavička protokolu ICMP je na obr. 6.7.

Byte	0	1	2	3
Byte 0 ÷ 3	Type	Code	Checksum	
Byte 4 ÷ 7	TSPEC			
---	Data			

Obr. 6.7 Hlavička ICMP protokolu

Popis jednotlivých polí:

Type:

Určuje typ zprávy a její formát²⁴.

0	<i>Echo Reply</i>	Echo odezva
3	<i>Destination Unreachable</i>	Nedoručitelný IP datagram
4	<i>Source Quench</i>	Snížení rychlosti odesílání
5	<i>Redirect</i>	Změna směrování
8	<i>Echo Request</i>	Echo požadavek

²⁴ Program **ping** využívá typ 8 – *Echo Request* a 0 – *Echo Reply*.

9		Odpověď na žádost o směrování
10		Žádost o směrování
11	<i>Time Exceeded</i>	Vypršení času
12	<i>Parameter Problem</i>	Chybný parametr
13	<i>Timestamp</i>	Časová synchronizace – požadavek
14	<i>Timestamp reply</i>	Časová synchronizace – odpověď
17		Maska subsítě – požadavek
18		Maska subsítě – odpověď

Code:

Upřesnění informace k typu zprávy.

Checksum:

Kontrolní součet hlavičky ICMP protokolu.

TSPEC:

Proměnná část hlavičky ICMP protokolu, nesoucí přídatné informace pro daný typ zprávy.

Data:

Data ICMP zprávy. Jejich obsah opět závisí na typu zprávy.

6.3.1.1.4 UDP protokol

Protokol UDP definovaný standardem RFC 768 je určen pro aplikační procesy, které vyžadují rychlý a nezabezpečený přenos bez potvrzování příjmu a případné opakování přenosu – tzv. datagramová služba. Protokol UDP je tedy nespojovaná služba, to znamená, že nenavazuje spojení a poté co je UDP datagram odeslán se již odesílatel nestará o to, jestli datagram dorazil do cílového uzlu. Kontrolu doručení datagramu (pokud je požadována) musí zajistit aplikační vrstva. Hlavička UDP protokolu je na obr. 6.8.

Byte	0	1	2	3
Byte 0 ÷ 3	Source Port		Destination Port	
Byte 4 ÷ 7	Length		Checksum	
---	Data			

Obr. 6.8 Hlavička UDP protokolu

Popis jednotlivých polí:

Source Port:

Identifikátor zdrojového aplikačního portu procesu.

Destination Port:

Identifikátor cílového aplikačního portu procesu.

Length:

Délka hlavičky UDP protokolu.

Checksum:

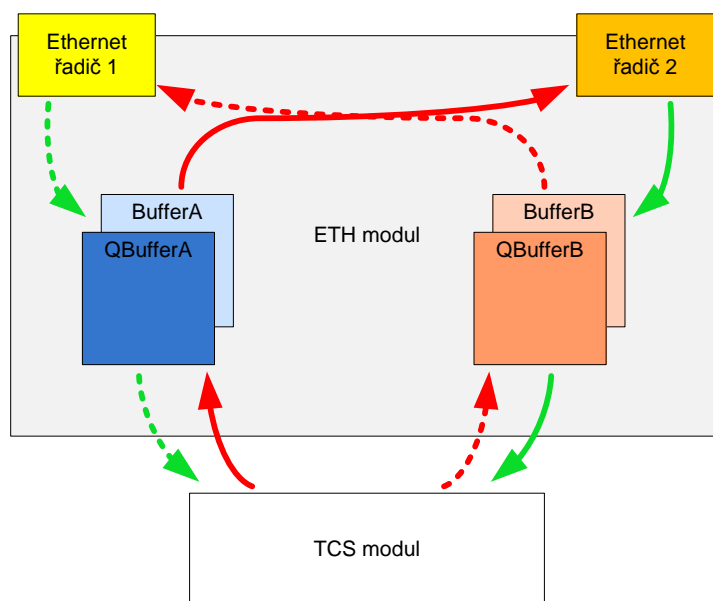
Kontrolní součet hlavičky UDP protokolu.

Data:

Data UDP zprávy. Jejich obsah opět závisí na typu zprávy.

6.3.1.2 Příjem a vysílání Ethernet zpráv

Pro zajištění preference zpráv obsahující informace potřebné pro ovládání soupravy před diagnostickými a servisními informacemi podporuje ETH modul rozdělení zpráv na zprávy s vysokou prioritou zpracování a na zprávy s nízkou prioritou zpracování. Zprávy s vysokou prioritou jsou pouze UDP datagramy. Zprávy s nízkou periodou jsou UDP datagramy a ostatní podporované protokoly (ARP, ICMP). Klíčem pro rozdělení UDP datagramů do jednotlivých skupin je hodnota pole **Destination Port** v hlavičce UDP protokolu.

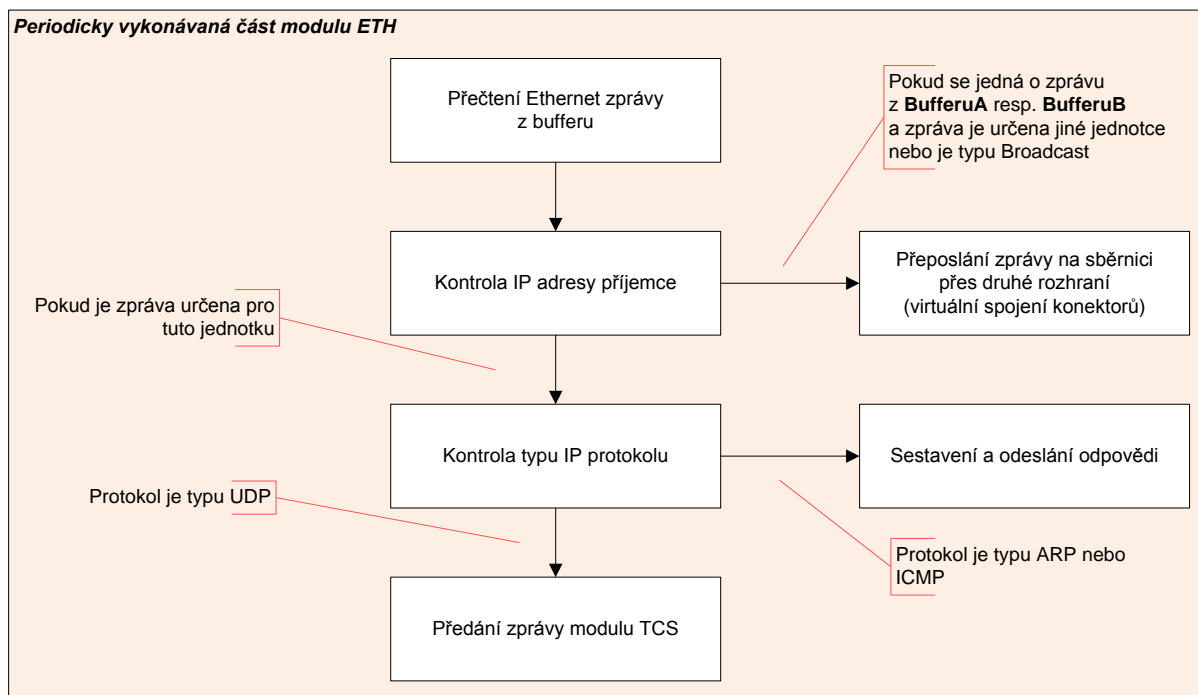


Obr. 6.9 Příjem a vysílání Ethernet zpráv modulem ETH

Pro zajištění realizace různých priorit zpracování dat používá ETH modul čtyři buffery (pro každé Ethernet rozhraní dva), které slouží jak pro příjem a vysílání zpráv na sběrnici, tak pro spolupráci ETH modulu s modulem TCS. Pro zprávy s vyšší prioritou zpracování jsou určeny buffery označené na obr. 6.9 jako **QBufferA** resp. **QBufferB**. Pro zprávy s nízkou prioritou zpracování jsou určeny buffery označené jako **BufferA** resp. **BufferB**.

Modul ETH se skládá z části periodicky spouštěné a z obsluhy přerušení generované řadiči Ethernetovských rozhraní mezivozové sběrnice. Obsluha těchto přerušení je

asynchronní vůči periodické části procesu. Pomocí přerušení je řešeno vzájemné předávání Ethernet zpráv mezi buffery modulu a Ethernet řadiči obou rozhraní. V periodicky spouštěné části modulu probíhá vlastní zpracování dat uložených v bufferech modulu. Periodická část modulu realizuje předání přijatých dat ke zpracování modulu TCS, zpracování diagnostických zpráv (odpověď na ARP a ICMP zprávu), vysílání zpráv předaných modulem TCS na mezivozovou sběrnici a virtuální spojení Ethernet konektorů mezivozové sběrnice pro zprávy s nízkou prioritou zpracování.²⁵ Princip zpracování je znázorněn na obr. 6.10.



Obr. 6.10 Zpracování přijaté Ethernet zprávy periodickou částí modulu ETH

Zpracování příjmu zprávy z mezivozové sběrnice je na obr. 6.9 znázorněno zelenou barvou. Příjem zprávy probíhá na základě obsluhy přerušení Ethernet řadiče. Při příjmu zprávy z řadiče je provedena základní kontrola, zda se jedná o podporovaný protokol a provede se klasifikace priority zpracování. Následně se zpráva uloží z řadiče do příslušného bufferu. Pokud se jedná o zprávu s nižší prioritou zpracování, je zpráva z rozhraní 1 uložena do **BufferuA** a zpráva z rozhraní 2 do **BufferuB**. Pokud přijatá zpráva patří do kategorie vysoké priority zpracování, je uložena do **QBufferuA** (pokud byla přijata rozhraním 1), resp. do **QBufferuB** (pokud je z rozhraní 2), a následně je ihned předána k vysílání do Ethernet řadiče druhého rozhraní.

²⁵ Detailní popis virtuálního spojení konektorů mezivozové sběrnice je v následující kapitole.

Vysílání zprávy je na obr. 6.9 znázorněno červenou barvou. Vysílání zprávy je zahájeno buď uložením zprávy do **QBufferu** nebo periodickou částí modulu při zpracování zpráv uložených v **Bufferech**. Vlastní vysílání zprávy probíhá podle následujícího scénáře. Pokud řadič Ethernetu nezpracovává jinou úlohu, je zpráva překopírována z buferu do řadiče a odeslána na sběrnici. Pokud řadič odmítne zprávu přijmout z důvodu zaneprázdnění, je zpráva ponechána v bufferu, kde čeká, dokud řadič nezačne zase přijímat zprávy k vysílání na sběrnici. Nejdříve jsou vždy vysílány zprávy z **QBufferů**. Až po odvysílání všech zpráv s vysokou prioritou zpracování jsou vysílány zprávy uložené v **Bufferu**.

Pro vysílání jsou buffery modulu oproti příjmu prohozeny. **QBufferA** a **BufferA** je používán pro zprávy určené k vyslání na rozhraní 2 mezivozové sběrnice. Zprávy určené k vyslání na rozhraní 1 jsou uloženy v **QBufferuB** resp. **BufferuB**. Toto prohození bufferů pro vysílání je výhodné pro realizaci virtuálního spojení Ethernet konektorů mezivozové sběrnice. Díky tomuto prohození odpadá nutnost překopírovávat zprávy mezi buffery modulu při přeposílání na druhé rozhraní.

6.3.1.3 Virtuální spojení konektorů mezivozové sběrnice

Virtuální spojení Ethernet konektorů mezivozové komunikace zajišťuje průchod zprávy skrz jednotku. Tím dochází k propojení jednotlivých segmentů sběrnice a je tedy náhradou za fyzické propojení konektorů jednotky. Z předcházejícího textu je patrné, že virtuální propojení je jinak realizováno pro zprávy s vysokou prioritou zpracování a jinak pro ostatní zprávy. Zatímco upřednostňované zprávy s vysokou prioritou jsou přeposílány ihned při příjmu z řadiče, bez jakékoli kontroly adresy doručení, ostatní zprávy jsou přeposílány na druhé rozhraní až při zpracování dat modulem ETH, a pouze tehdy pokud je to potřeba.

Rozdílný přístup virtuálního spojení konektorů zajišťuje minimální zpoždění při přeposílání zpráv s vysokou prioritou a zároveň minimalizuje zatížení sběrnice řízeným přeposíláním zpráv s nízkou prioritou zpracování. Lze předpokládat, že zprávy s vysokou prioritou budou většinou obsahovat data potřebná k ovládání soupravy. Tyto zprávy nemívají dlouhou datovou část a jsou většinou určeny všem jednotkám na sběrnici. Automatické přeposílání těchto zpráv do všech segmentů sítě tedy výrazně nezvýší její zatížení. Zatímco zprávy s nízkou prioritou budou obsahovat diagnostická data, která mohou dosahovat značné délky a jsou zpravidla určena pouze jedné jednotce. U těchto zpráv již kontrola polohy příjemce může výrazně snížit výsledné zatížení sběrnice.

6.3.2 TCS modul

Modul TCS obsahuje algoritmy pro sestavení UDP zpráv, řízení a konfiguraci komunikačního uzlu mezivozové sběrnice. Modul vytváří a udržuje tabulku všech komunikačních uzlů na sběrnici a tabulku UDP portů pro převod zpráv mezi vozovou a mezivozovou sběrnici.

6.3.2.1 Sestavení UDP zpráv

Před předáním vysílané UDP zprávy modulu ETH musí modul TCS doplnit datovou část UDP protokolu IP adresou zdrojové a cílové jednotky a hodnotou zdrojového a cílového aplikačního portu. Hodnota zdrojového aplikačního portu se používá k identifikaci rozhraní, přes které je zpráva odeslána na mezivozovou sběrnici. Pokud je zpráva vyslána přes rozhraní 1 je hodnota zdrojového portu 0xC001²⁶. Při vyslání zprávy přes rozhraní 2 je hodnota zdrojového portu 0xC002. Zdrojová IP adresa je vlastní IP adresa komunikační jednotky. Tato IP adresa je jednotce přidělena při sestavování mezivozové sběrnice. Pro určení cílové IP adresy a hodnoty cílového aplikačního portu lze zprávy rozdělit do dvou skupin na:

- 1) Aplikační zprávy.
- 2) Zprávy pro řízení a konfiguraci mezivozové sběrnice.

Pro aplikační zprávy vychází hodnoty cílové IP adresy a portu z převodní tabulky adres mezivozové a vozové sběrnice. Tuto tabulku musí modul TCS získat buď od vozového řídicího počítače, nebo může být uložena v nonvolativní paměti komunikační jednotky. Pro řídicí a konfigurační zprávy jsou hodnoty cílové IP adresy a portu stanoveny a uvedeny v kapitole 6.3.2.2.

Minimální délka zprávy je 64 Bytů. Pokud je zpráva kratší, je doplněna náhodným obsahem na minimální délku.

²⁶ Hodnoty TCP a UDP portů nižší než 0xC000 (49152) jsou vyhrazeny pro registrované porty. Registraci portů provádí organizace ICANN.

6.3.2.2 Zprávy pro řízení a konfiguraci mezivozové sběrnice

Chybové zprávy

Číslo zprávy	0	Popis	Nalezeno více MASTER jednotek	
MAC Adresa	Broadcast	Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2	
IP Adresa	Broadcast	Dst. Port	0xC000	
Data (počet wordů)				
1	IP adresa jednotky, která vyslala zprávu			
2				

Číslo zprávy	1	Popis	Chyba při kontrole tabulky SLAVE jednotek	
MAC Adresa	Broadcast	Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2	
IP Adresa	Broadcast	Dst. Port	0xC001	
Data (počet wordů)				
1	IP adresa jednotky, která vyslala zprávu			
2				

Číslo zprávy	3	Popis	Zrušit sestavení soupravy	
MAC Adresa	Broadcast	Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2	
IP Adresa	Broadcast	Dst. Port	0xC003	
Data (počet wordů)				
1	Důvod zrušení sestavení soupravy (viz. tab. 6.3)			
2	Stav jednotky, která zprávu vyslala (viz. tab. 6.2)			

Konfigurační zprávy

Číslo zprávy	10	Popis	Žádost o sestavení soupravy
MAC Adresa	Broadcast	Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2
IP Adresa	Broadcast	Dst. Port	0xC00A
Data (počet wordů)			
1	počet SLAVE jednotek		
2	IP adresa MASTER jednotky		
3			
4	MAC adresa MASTER jednotky		
5			
6			
7	IP adresa první SLAVE jednotky		
8			
9	MAC adresa první SLAVE jednotky		
10			
11			
x	IP adresa n-té SLAVE jednotky		
x+1			
x+2	MAC adresa n-té SLAVE jednotky		
x+3			
x+4			

Číslo zprávy	11	Popis	Nalezena poslední jednotka	
MAC Adresa	MASTER jednotky	Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2	
IP Adresa	MASTER jednotky	Dst. Port	0xC00B	
Data (počet wordů)				
1	počet SLAVE jednotek			
2	IP adresa MASTER jednotky			
3				
4	MAC adresa MASTER jednotky			
5				
x	IP adresa poslední SLAVE jednotky			
x+1				
x+2	MAC adresa poslední SLAVE jednotky			
x+3				
x+4				

Číslo zprávy	12	Popis	Přepni se ze stavu „Learning Slave“ do stavu Slave	
MAC Adresa	Broadcast	Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2	
IP Adresa	Broadcast	Dst. Port	0xC00C	
Data (počet wordů)				
1	počet SLAVE jednotek celého vlaku			
2	IP adresa MASTER jednotky			
3				
4	MAC adresa MASTER jednotky			
5				
6				
x	Kompletní tabulka IP a MAC adres všech nalezených SLAVE jednotek			
x	Prostor pro případná konfigurační data.			

Číslo zprávy	13	Popis	Ukončení sestavování soupravy	
MAC Adresa	MASTER jednotky		Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2
IP Adresa	MASTER jednotky		Dst. Port	0xC00D
Data (počet wordů)	1			

Číslo zprávy	20	Popis	HeartBeat	
MAC Adresa	Broadcast		Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2
IP Adresa	Broadcast		Dst. Port	0xC020
Data (počet wordů)	1			
	IP adresa jednotky, která vyslala zprávu			

Aplikační zprávy

Číslo zprávy	3x	Popis		
MAC Adresa			Src. Port	0xC001 - vysláno přes roz. 1 0xC002 - vysláno přes roz. 2
IP Adresa			Dst. Port	Hodnota dle požadované priority dané konfigurací.
Data (počet wordů)				
1	Kontrolní čítač zprávy			
2	Kontrolní součet datové části zprávy			
3	Počet bytů datové části zprávy			
4	Data			
...				

6.3.2.3 Detekce připojené jednotky mezivozové sběrnice k Ethernet rozhraní

Standardní Ethernet rozhraní k detekci připojení druhé jednotky používají status LINK Ethernet řadiče. Tento status je vyhodnocen na základě generování 100 ns pulzů fyzickou vrstvou Ethernet řadiče. Detailní popis tohoto principu testování integrity spojení je např. v [28] nebo v [35].

Při testování spolehlivosti detekce připojení druhé jednotky mezivozové sběrnice k Ethernet rozhraní přes kabel přesahující povolenou délku specifikací IEEE 802.3 se

ukázala tato metoda jako nespolehlivá. Ethernet řadič signalizoval připojení jednotky, přesto při pokusu o vyslání UDP zprávy přenos selhal. Z tohoto důvodu je status LINK doplněn o detekci přítomnosti jednotky pomocí Heartbeat zprávy. Jedná se o UDP zprávu (zpráva č. 20), kterou jednotka periodicky vysílá na obě svoje Ethernet rozhraní.

6.3.2.4 Inaugurace mezivozové sběrnice

Inaugurace mezivozové sběrnice je proces, během něhož dojde k přidělení IP adresy komunikačním jednotkám, zjištění počtu vozů v soupravě a jejich vzájemné orientace vůči řídicímu vozidlu soupravy. Výsledkem inaugurace je sestavení sběrnice, kdy každá jednotka na sběrnici má přidělenou IP adresu, definovanou pozici a orientaci v soupravě. Během inaugurace je vytvořen popis mezivozové sběrnice s detailními informacemi všech jednotek na sběrnici. Tento popis je distribuován do všech komunikačních jednotek mezivozové sběrnice a odtud dále distribuován jednotlivým řídicím systémům vozidel soupravy. Popis mezivozové sběrnice obsahuje:

- Aktuální stav komunikačního uzlu.
- Vlastní MAC adresu Ethernet rozhraní.
- Aktuální vlastní IP adresu.
- MAC adresu aktuální **Master** jednotky.
- Počet jednotek na sběrnici.
- Tabulku MAC adres a IP adres všech jednotek na sběrnici.
- Aktuální orientaci jednotky vzhledem k **Master** jednotce.
- Tabulku aktuální orientace všech jednotek na sběrnici vzhledem k **Master** jednotce.
- Příznak detekce připojené sousední jednotky.
- Poslední důvody zrušení sestavené sběrnice.

Z hlediska inaugurace jsou definovány stavy komunikačních uzlů uvedené v tab. 6.2.

Název stavu	Popis
InitUnit	Základní stav po resetu. V tomto stavu jednotka provádí inicializaci jednotlivých rozhraní. Po dokončení inicializace jednotka automaticky přejde do stavu UnnamedUnit . Jednotka není schopna přijímat ani vysílat jakékoli zprávy na mezivozovou sběrnici.

UnnamedUnit	<p>Stav jednotky při nesestavené sběrnici. Na sběrnici neproběhl proces inaugurace nebo sestavení sběrnice bylo zrušeno.</p> <p>Jednotka není schopna přijímat ani vysílat jakékoli zprávy na mezivozovou sběrnici.</p>
TeachingMaster_1	<p>V tomto stavu je jednotka, která obdržela povel k zahájení inaugurace mezivozové sběrnice od řídicího systému vozidla.</p> <p>Jednotka je schopna přijímat a vysílat na mezivozovou sběrnici pouze konfigurační a chybové zprávy. Přenos aplikačních zpráv je zakázán.</p>
TeachingMaster_2	<p>Budoucí Master jednotka sestavila tabulku s popisem mezivozové sběrnice a zahájila jeho distribuci ostatním jednotkám na sběrnici.</p> <p>Jednotka je schopna přijímat a vysílat na mezivozovou sběrnici pouze konfigurační a chybové zprávy. Přenos aplikačních zpráv je zakázán.</p>
Master	<p>Souprava je sestavena. Jednotka je na řídicím vozidle soupravy.</p> <p>Jednotka je schopna přijímat a vysílat na mezivozovou sběrnici konfigurační, chybové i aplikační zprávy.</p>
LearningSlave	<p>Jednotka obdržela žádost o sestavení sběrnice od budoucí Master jednotky. V tomto stavu jednotka čeká na distribuci tabulky s popisem sběrnice.</p> <p>Jednotka je schopna přijímat a vysílat na mezivozovou sběrnici pouze konfigurační a chybové zprávy. Přenos aplikačních zpráv je zakázán.</p>
Slave	<p>Souprava je sestavena. Jednotka je na řízeném vozidle soupravy.</p> <p>Jednotka je schopna přijímat a vysílat na mezivozovou sběrnici konfigurační, chybové i aplikační zprávy.</p>

Tab. 6.2 Tabulka stavů komunikačního uzlu mezivozové sběrnice

Před zahájením inaugurace musí být všechny jednotky ve stavu **UnnamedUnit**. Po ukončení inaugurace je na sběrnici jedna jednotka ve stavu **Master** a všechny ostatní jednotky jsou ve stavu **Slave**. Proces inaugurace se provádí vždy při změně počtu vozů nebo při změně pozice řídicího vozu soupravy.

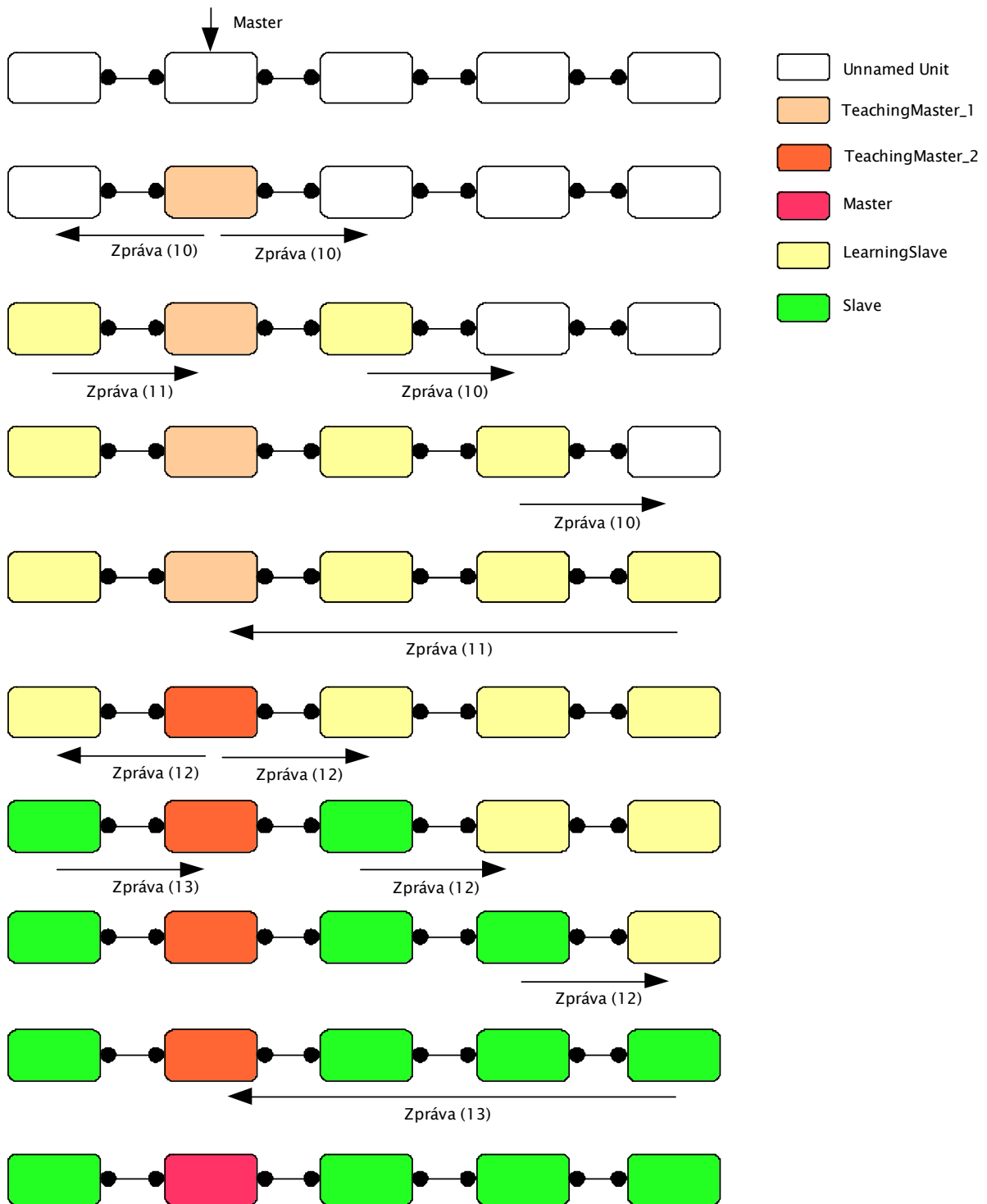
Popis procesu inaugurace:

Postup procesu inaugurace je znázorněn na obr. 6.11.

- 1) Proces inaugurace začne jednotka na řídicím voze soupravy na základě povelu od řídicího systému vozidla. Po obdržení povelu nejprve budoucí **Master** jednotka

přepne do stavu **TeachingMaster_1** a vyšle zprávu č. 3 „Žádost o zrušení sestavené sběrnice“. Následně vyšle zprávu č. 10 „Žádost o sestavení soupravy“. Zprávy jsou vysílány pouze na rozhraní s připojenou další jednotkou (viz. kap. 6.3.2.3 *Detekce připojené jednotky mezivozové sběrnice k Ethernet rozhraní*). Pokud jednotka zjistí, že ani na jednom rozhraní není detekována další jednotka, je proces inaugurace ukončen a jednotka přejde do stavu **Master**.

- 2) Pokud jednotka ve stavu **UnnamedUnit** přijme zprávu č. 10, tak se přepne do stavu **LearningSlave** a provede výpočet svojí IP adresy (viz. kap. 6.3.2.5 *Dynamické přidělování IP adresy jednotky*). Pokud je na druhém rozhraní detekována další jednotka, přepoše jí zprávu č. 10, doplněnou o svojí IP adresu a s upraveným počtem nalezených **Slave** jednotek. Pokud na druhém rozhraní není připojena další jednotka, pošle přes první rozhraní vyplněnou zprávu č. 11.
- 3) Krok číslo 2) se opakuje tak dlouho, dokud se nenaleznou poslední jednotky na obou koncích sběrnice.
- 4) Jednotka zahajující inauguraci sběrnice čeká ve stavu **TeachingMaster_1** dokud nepřijme zprávu č. 11 ze všech rozhraní, na která vyslala zahajující zprávu č. 10. Jakmile se tak stane, změní svůj stav **TeachingMaster_2** a z informací doručených zprávami č. 11 sestaví popis celé sběrnice. Tento popis rozešle všem ostatním jednotkám na sběrnici zprávou č. 12.
- 5) Jakmile jednotka ve stavu **LearningSlave** přijme zprávu č. 12, tak se přepne do stavu **Slave**. Pokud je na druhém rozhraní detekována další jednotka, tak jí zprávu č. 12 přepoše.
- 6) Když zprávu č. 12 přijmou poslední jednotky na sběrnici, vyšlou zpět budoucí Master jednotce zprávu č. 13 jako potvrzení o úspěšné distribuci popisu mezivozové sběrnice.
- 7) Budoucí **Master** jednotka čeká ve **TeachingMaster_2** na příjem zprávy č. 13 potvrzující úspěšnou distribuci popisu sběrnice a tím i přepnutí všech jednotek do stavu **Slave**. Po příjmu této zprávy z obou částí sběrnice se jednotka přepne do stavu **Master** a proces inaugurace sběrnice je ukončen. Sběrnice je připravena na přenos aplikačních dat.



Obr. 6.11 Grafické znázornění inaugurace sběrnice

Proces inaugurace může jakákoli jednotka při detekci chyby zastavit pomocí vyslání zprávy č. 0 nebo č. 1. Sestavenou sběrnici může zrušit jakákoli jednotka vysláním zprávy č. 3. Důvody zrušení sestavené sběrnice jsou uvedeny v tab. 6.3.

Chyba	Identifikační hodnota	Popis
Timeout TeachingMaster	1	Komunikačnímu uzlu ve stavu TeachingMaster_x se nepodařilo ve stanovené době přepnout do stavu Master .
Nalezeno více Master jednotek	2	Více komunikačních uzlů na sběrnici je ve stavu TeachingMaster_x nebo Master ..
Timeout LearningSlave	3	Komunikačnímu uzlu ve stavu LearningSlave se nepodařilo ve stanovené době přepnout do stavu Slave .
Aplikační zrušení sestavené sběrnice	4	Aplikační žádost o zrušení sestavení sběrnice.
Přepnutí jednotek do stavu UnnamedUnit	5	Žádost o zrušení sestavení sběrnice před zahájením inaugurace.
Detekován chybný protokol	6	Komunikační uzel ve stavu TeachingMaster_2 při sestavování tabulky s popisem sběrnice našel u některé jednotky nepodporovanou verzi protokolu.
Připojena jednotka – rozhraní 1	7	Na rozhraní 1 se objevila jednotka.
Připojena jednotka – rozhraní 2	8	Na rozhraní 2 se objevila jednotka.
Chyba při kontrola tabulky Slave jednotek	9	Slave při kontrole tabulky Slave jednotek nenalezl svojí MAC nebo IP adresu.

Tab. 6.3 Seznam chyb na sběrnici

6.3.2.5 Dynamické přidělování IP adresy jednotky

Při inauguraci sběrnice dochází k dynamickému přidělování IP adresy jednotlivým jednotkám na sběrnici. Před zahájením inaugurace jsou všechny jednotky ve stavu **UnnamedUnit** a mají IP adresu 192.168.1.127. Na sestavené sběrnici musí mít každá jednotka unikátní IP adresu. Při inauguraci jsou IP adresy jednotkám přidělovány podle následujících pravidel:

- 1) IP adresa **Master** jednotky je vždy 192.168.1.20²⁷.
- 2) Jednotky připojené k **Master** jednotce přes rozhraní 1 mají IP adresu 192.168.1.x kde: $x = 20 + 1 - 2 * n$ n – hodnota počet **Slave** jednotek ve zprávě č.10²⁸

²⁷ IP adresa 192.168.1.20 byla zvolena tak, aby při pozici **Master** jednotky na konci sběrnice byla dostatečná rezerva pro IP adresy ostatních jednotek přidělené podle následujících pravidel.

- 3) Jednotky připojené k **Master** jednotce přes rozhraní 2 mají IP adresu $192.168.1.x$ kde: $x = 20 + 2 * n$ n – hodnota počet **Slave** jednotek ve zprávě č. 10

Podle těchto pravidel mají jednotky připojené k **Master** jednotce přes rozhraní 1 poslední číslo IP adresy liché číslo menší než 20 a jednotky připojené přes rozhraní 2 sudé číslo větší než 20. Tento způsob přidělování IP adres má následující výhody:

- 1) Pokud **Master** jednotka je uprostřed sběrnice (tato situace je znázorněna na obr. 6.11), tak při inauguraci dochází k přidělování IP adres souběžně na obou částech sběrnice. Přidělování IP adres podle tohoto klíče zajistí unikátnost IP adres na celé sběrnici.
- 2) Podle posledního čísla IP adresy lze rychle poznat, jestli je jednotka připojena před nebo za řídicím vozidlem soupravy (resp. k rozhraní 1 nebo 2 **Master** jednotky).

6.3.2.6 Aktuální orientaci jednotky

Určení aktuální orientace řízeného vozidla soupravy vzhledem k řídicímu vozidlu je důležitá informace pro vozový řídicí systém. Tuto informaci potřebuje vozový řídicí počítač ke správné interpretaci požadovaného směru jízdy a u oboustranných vozidel k správnému určení strany pro ovládání dveří. Chybná interpretace povelů řídicího vozidla soupravy může mít fatální následky z hlediska bezpečnosti cestujících.

Určení aktuální orientace vozidla soupravy (resp. komunikačního uzlu mezivozové sběrnice) se provádí při inauguraci sběrnice. Konkrétně při příjmu zprávy č. 10 (viz. **Popis procesu inaugurace** bod 2). Algoritmus pro určení orientace vychází z předpokladu, že orientace jednotky vůči vozidlu je podle obr. 6.1. (rozhraní 1 komunikačního uzlu mezivozové sběrnice je připojeno na spřáhlo článku A a rozhraní 2 je připojeno na spřáhlo vozidla článku B).

Algoritmus pro určení orientace jednotky je založen na porovnání hodnoty zdrojového portu UDP datagramu²⁹ zprávy č.10 s rozhraním přes které zprávu přijme. Klíč pro určení orientace jednotky je uveden v tab. 6.4.

²⁸ Počet nalezených Slave jednotek n je aktualizován při procesu inaugurace (viz. **Popis procesu inaugurace** bod 2)

²⁹ Hodnota zdrojového portu UDP datagramu je závislá na rozhraní, přes které jednotka zprávu vysílá (viz. kapitola 6.3.2.2). U zprávy č. 10 hlavičku UDP datagramu vyplňuje pouze jednotka ve stavu **TeachingMaster_1**, která zahajuje inauguraci sběrnice. Ostatní jednotky pouze doplňují datovou část zprávy.

Hodnota zdrojového portu UDP datagramu	Číslo rozhraní jednotky	Popis
0xC001	rozhraní 1	Řízené vozidlo je připojeno článkem A k článku A řídicího vozidla. Řízené vozidlo má tedy opačnou orientaci .
0XC001	rozhraní 2	Řízené vozidlo je připojeno článkem B k článku A řídicího vozidla. Řízené vozidlo má tedy shodnou orientaci .
0xC002	rozhraní 1	Řízené vozidlo je připojeno článkem A k článku B řídicího vozidla. Řízené vozidlo má tedy shodnou orientaci .
0xC002	rozhraní 2	Řízené vozidlo je připojeno článkem B k článku B řídicího vozidla. Řízené vozidlo má tedy opačnou orientaci .

Tab. 6.4 Klíč pro určení orientace řízeného vozidla soupravy

6.3.3 APL modul

Modul APL zajišťuje obsluhu rozhraní pro komunikaci jednotky mezivozové sběrnice s řídicím systémem vozidla a realizuje přenos dat mezi modulem TCS a vozovou sběrnicí. Předávání dat mezi moduly APL a TCS je realizováno přes dvojbranou paměť, kde má každá zpráva vlastní paměťový prostor tzv. „*Message Box*“. Řízení přístupu k „*Message Box*“ je řešeno pomocí softwarového semaforu, který zabraňuje přečtení nekonzistentní dat při případné kolizi způsobené současným požadavkem na čtení a zápis.

7. Realizace komunikační jednotky mezivozové sběrnice

Tato kapitola se zabývá realizací komunikační jednotky pro ověření principů mezivozové sběrnice definovaných v předcházející kapitole 6. Komunikační jednotka byla ověřována ve spolupráci s firmou Cegelec a.s., a proto je vyvíjena jako součást řídicího systému pro tramvajová vozidla **CECOMM** používaného firmou Cegelec a.s. Pro nově vyvíjenou jednotku byl zvolen obchodní název **CETVCE** a mezivozová sběrnice je pojmenována **CegNet**.

Hlavním cílem jednotky CETVCE je ověřit vhodnost sběrnice Ethernet pro realizaci mezivozové komunikace v soupravách tramvajových vozidel. Z tohoto důvodu byly ostatní úlohy co nejvíce zjednodušeny. Zejména se jedná o konfiguraci mapování zpráv z vozové úrovně na mezivozovou sběrnicí a nastavení priorit zpracování jednotlivých zpráv. Tato problematika byla zjednodušena defaultním mapováním bez možnosti uživatelské konfigurace. Pro rozdělení zpráv byla napevno zvolena hodnota cílového portu UDP

datagramu. Hodnoty nižší než 0xC00A jsou považovány za zprávy s vysokou prioritou a ostatní UDP datagramy jsou zprávy s nízkou prioritou zpracování.

7.1 Řídicí systém CECOMM

Řídicí systém CECOMM je systém vyvinutý ve spolupráci firem Cegelec a.s. a AmiT s.r.o. jako distribuovaný řídicí systém pro tramvajová vozidla. Firma Cegelec používá systém CECOMM jak pro nová vozidla, tak pro rekonstrukce, kde systém CECOMM nahrazuje starší typy řídicích systémů.

Základním stavebním kamenem systému je centrální počítač s označením CETVM, který je doplněn jednotkami pro čtení analogových a logických vstupů a pro ovládání analogových a logických výstupů. Jako hlavní komunikační sběrnici používá systém CECOMM sběrnici CAN s implementovaným protokolem CANOpen. Díky použití standardizované komunikační sběrnice lze systém CECOMM rozšířit i o komunikační uzly jiných výrobců, podporující tento standard (např. regulátory mechanických brzd a trakčních měničů, řídicí jednotky dveří, topení, apod.). Pro komunikaci řídicího počítače se zobrazovací jednotkou je k dispozici ještě sběrnice Fast Ethernet 100Base – TX s částečnou podporou IP protokolů.

Další popis systému CECOMM se omezí pouze na centrální počítač CETVM, se kterým bude nově navrhovaná jednotka mezivozové sběrnice spolupracovat.

7.1.1 Centrální počítač CETVM

CETVM je modulární vanový počítač. Základem je rack o rozměrech 42TE a 3HE se sběrnici VME a 10 pozicemi pro jednotky. Ten je vždy osazen procesorovou kartou CETVCP a zdrojovou kartou vany CETVZD. Zbylé pozice jsou určeny pro karty rozšiřující vlastnosti centrálního počítače podle potřeb konkrétní aplikace (např. karta vstupů a výstupů CETVIO, karta pro zpracování signálu z IRC čidla otáček CETVHB nebo komunikační karta CETVCA pro rozšíření počtu CAN sběrnic).

7.1.1.1 Karta CETVCP

Jedná se o procesorovou kartu centrálního počítače. Základní parametry karty:

- Procesor ST10F269
 - 256 kB interní Flash paměti procesoru
 - 2 x CAN řadič
- 1 MB externí Flash paměti
- 1 MB externí zálohované RAM paměti

- Obvod RTC
- Watchdog
- Řadič VME sběrnice – realizován pomocí FPGA
- Ethernet řadič – realizován obvodem LAN91C111

Pro komunikaci s okolím je karta CETVCP vybavena těmito rozhraními:

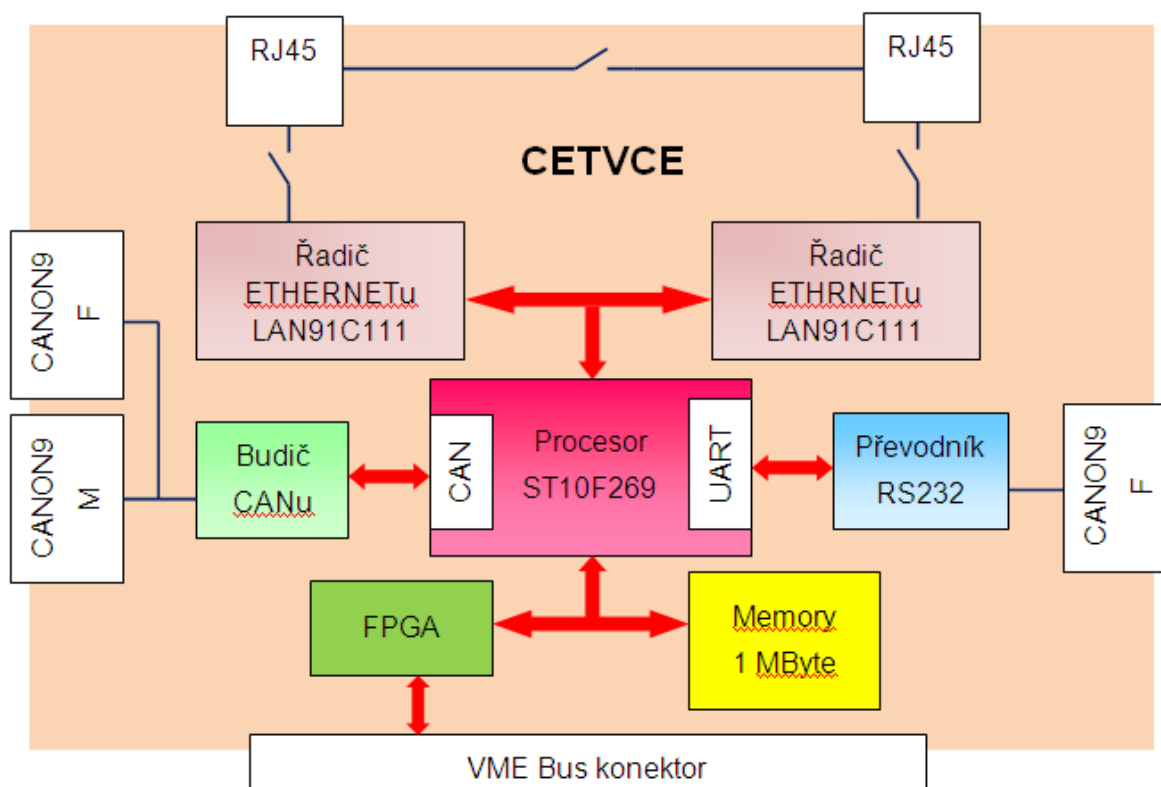
- VME sběrnice – pouze pro vnitřní komunikaci s kartami centrálního počítače.
- 2x CAN – implementován protokol CANOpen, rozhraní určeno pro real-time komunikaci, používá se jako vozová sběrnice řídicího systému.
- Ethernet specifikace 100Base – TX – rozhraní určeno pro komunikaci se zobrazovacím zařízením a přenos diagnostických dat vozidla, není určeno pro real-time komunikaci.
- RS232 – pouze pro servisní účely (nahrávání firmwaru a aplikačního softwaru).

7.2 Hardwarový návrh jednotky mezivozové sběrnice CETVCE

Po analýze řídicího systému CECOMM bylo rozhodnuto, že jednotka pro mezivozovou komunikaci CETVCE bude konstrukčně řešena jako zásuvná karta do vany centrálního počítače CETVM. Pro komunikaci s centrálním počítačem řídicího systému, resp. přímo s jeho procesorovou kartou, může být použita přímo sběrnice VME nebo pro tento účel bude jednotka CETVCE vybavena jedním rozhraním CAN.

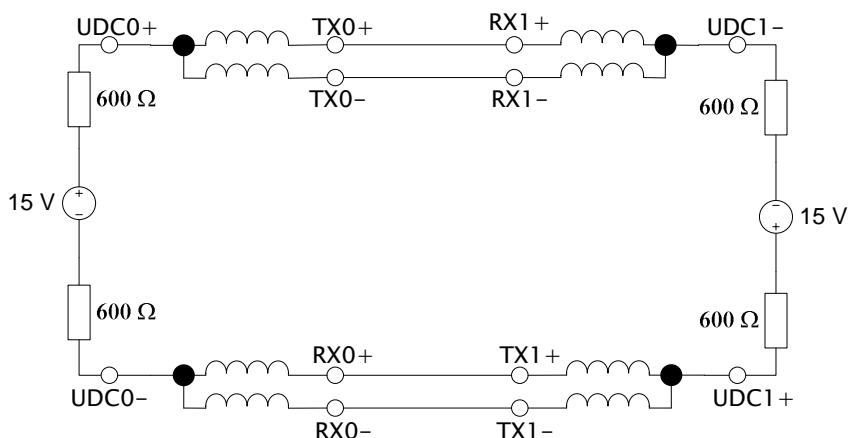
Navrhnuté blokové schéma jednotky je na obr. 7.1. Návrh jednotky vychází z procesorové karty CETVCP s procesorem ST10F269. Tento procesor je doplněn dvěma řadiči Ethernetu LAN91C111, jedním budičem CANu, jedním převodníkem UART ↔ RS232 a externí pamětí RAM o velikosti 1 MB. O komunikaci po VME sběrnici se stará FPGA obvod od firmy Altera. Oba Ethernet řadiče a FPGA jsou k procesoru připojeny pomocí paralelní 16bitové datové sběrnice.

Pro Ethernet byly zvoleny konektory RJ45 s integrovanými LED diodami STATUS a LINK. Sběrnice CAN a RS232 je pak vyvedena na konektory typu CANON9.



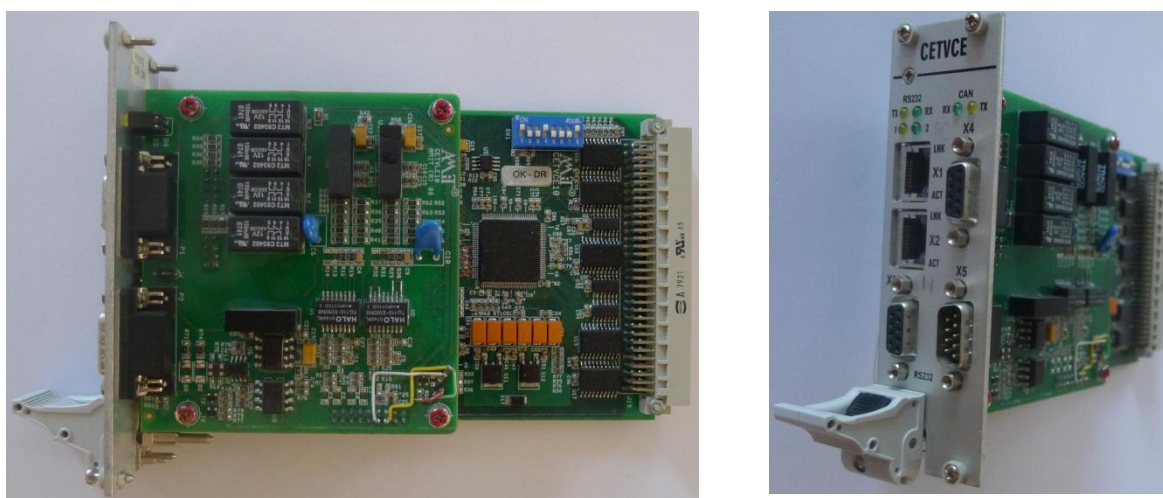
Obr. 7.1 Blokové schéma jednotky CETVCE

Jednotka CETVCE je osazena obvody pro Frifing. Detailní zapojení obvodů je na obr. 7.2. Jednotka po zapnutí napájení vnucuje na střed transformátorů, které realizují galvanické oddělení Ethernet linek, stejnosměrné napětí o velikosti cca 30 V. Toto napětí by mělo zabezpečit průraz oxidace kontaktů na konektorech kabeláže. Při propojení dvou karet kříženým UTP kabelem, teče mezi konektory stejnosměrný proud cca 25 mA.



Obr. 7.2 CETVCE - zapojení obvodů pro Fritting

Návrh finálních obvodových schémat a výroba desek plošných spojů jednotky CETVCE není obsahem této práce a provedla ho firma AmiT s.r.o. na základě dodaného blokového schéma jednotky. Výsledná podoba jednotky CETVCE je na Obr. 7.3. Spolu s jednotkou firma AmiT s.r.o. dodala firmware zajišťující nahrávání aplikačního softwaru³⁰ do Flash paměti procesoru a firmware pro FPGA realizující řadič VME sběrnice. Pro podporu psaní aplikačního softwaru dodala firma AmiT s.r.o. knihovnu LCSE, která zajišťuje podporu pro práci s perifériemi procesoru mimo Ethernet řadičů (např. komunikace po externí datové sběrnici, inicializace CAN řadiče, apod.). Dále knihovna LCSE implementuje jednoduchý RTOS umožňující periodické spouštění úloh. Detailní popis LCSE knihovny je v [36].



Obr. 7.3 *Jednotka CETVCE*

7.2.1 Ethernet řadič LAN91C111

Obvod LAN91C111 je řadič Ethernetu od firmy SMSC s integrovanou vrstvou MAC a PHY. Nejdůležitější vlastnosti obvodu jsou shrnuty v následujícím seznamu.

- Podporované komunikační rychlost: 10/100 Mbit/s.
- 8 KBytů interní FIFO paměti pro vysílání a příjem Ethernet zpráv.
- Konfigurace obvodu s externí EEPROM paměti³¹.
- Vnitřní 32-bitová datová sběrnice.
- Vnější 8, 16 a 32-bitová datová sběrnice pro přístup CPU³².

³⁰ Jako aplikační software jsou v tomto textu chápány algoritmy zajišťující realizaci komunikačního uzlu mezivozové sběrnice.

³¹ Např. MAC adresa.

³² Jednotka CETVCE používá přístup po 16-bitové datové sběrnici.

- Plná podpora IEEE 802.3/802.3u – 100Base – TX / 10Base – T fyzické vrstvy.

Detailní popis obvodu LAN91C111 lze nalézt na stránkách výrobce www.smcc.com.

7.2.2 VME sběrnice

Sběrnice VME (z angl. Versa Module Eurocard Bus) je definována standardem IEEE 1014 – 1987. Základní vlastnosti VME sběrnice lze shrnout do následujících bodů:

- Sběrnice používá Master/Slave architekturu.
 - Na sběrnici může být až 21 Master komunikačních uzlů.
 - Slave moduly monitorují sběrnici a čekají na odpovídající adresu.
 - Komunikace na sběrnici je řízena centrálním arbitrem.
- Asynchronní sběrnice.
 - Není použita žádná časová synchronizace datových přenosů.
 - Rychlost cyklu je dána nejpomalejším účastníkem (nutný handshaking protokol).
- 16/24/32 bitová adresová a 8/16/32 bitová datová sběrnice.
- Rychlost přenosu 40 MB/s.
- 7 úrovní přerušení.

Podrobnější popis VME sběrnice lze nalézt např. v [37] nebo v [38].

Jednotka CETVCE je na VME sběrnici komunikační uzel typu Slave. Adresa jednotky a úroveň přerušení na sběrnici se nastavuje pomocí DIP přepínačů. Podporovaná šířka sběrnice je 16 adresových bitů a 8 datových bitů. S VME Master jednotkou³³ je možné vyměňovat data přes dvojbranou paměť (dále jen DPM), která je mapována do paměťového prostoru procesoru. Obvod FPGA tvoří most mezi VME sběrnici a procesorem jednotky a zajišťuje vlastní vysílání a čtení dat na sběrnici.

Velikost DPM je 1 kB, z toho je pro výměnu aplikačních dat vyhrazen prostor o velikosti 992 B. Zbýlá část slouží pro systémové registry jednotky CETVCE (např. identifikace jednotky, verze aplikačního softwaru a firmwaru, apod.) a pro registry zajišťující řízení přístupu do oblasti pro aplikační data DPM. Pomocí těchto registrů lze realizovat softwarový semafor pro řízení čtení a zápisu do jednotlivých částí aplikační DPM a vyvolat přerušení jak na VME sběrnici, tak v procesoru CETVCE jednotky. Mapa DPM je uvedena v příloze číslo 12.2.

³³ Master jednotka je v centrálním počítači CETVM vždy karta CETVCP.

7.3 Softwarové řešení jednotky mezivozové sběrnice CETVCE

Softwarové řešení jednotky CETVCE lze rozdělit na dvě části:

- 1) Firmware jednotky.
- 2) Aplikační software.

Pro následující popis softwarového řešení je firmwarem chápán software zajišťující nahrávání aplikačního softwaru, správu vektorové tabulky přerušení a konfiguraci FPGA obvodu. Firmware, jak již bylo zmíněno v předcházející kapitole, dodala firma AmiT s.r.o. jako součást jednotky CETVCE. Aplikačním softwarem je chápán kód zajišťující realizaci algoritmů mezivozové komunikace navržených v kapitole 6. Aplikační SW byl kompletně vytvořen v rámci této disertační práce.

Aplikační software využívá služeb knihovny LCSE, dodané výrobcem hardwaru jednotky. I přesto, že knihovna LCSE není součástí této práce, je zde potřeba alespoň stručně popsat některé její části. Tento stručný popis je potřeba k pochopení navrhovaného softwarového řešení jednotky CETVCE, kterým se zabývá tato kapitola.

Knihovna LCSE podporuje spouštění procesů tří typů. Jedná se vlastně o callback funkce volané z obsluhy přerušení periferních časovačů procesoru. Je možné spouštět až 16 normálních procesů s periodou spouštění v násobcích 1 ms. Tyto procesy jsou spouštěny z přerušení CAPCOM31 jednotky. Normální procesy se nemůžou navzájem přerušit. Dalším procesem je tzv. hispeed proces s periodou spouštění v násobcích 25 μ s. Tento proces je spouštěn z přerušení časovače T3, který má vyšší prioritu přerušení než jednotka CAPCOM31. Hispeed proces tedy může přerušit běh normálního procesu. Posledním procesem je proces Idle. Tento proces se vykonává v základní programové smyčce a běží vždy, když není zpracováváno jakékoli přerušení.

Dále knihovna řeší základní obsluhu rozhraní RS232 a CAN. Knihovna LCSE provede při startu programu nastavení potřebných registrů periférie UART a CAN řadiče a obsluhu přerušení při příjmu a vysílání dat. Přijatá data jsou předána aplikaci pomocí call-back funkcí.

Knihovna obsahuje funkce pro zápis a čtení dat z EEPROM paměti přes sběrnici I2C. Pro práci s EEPROM pamětí jsou k dispozici funkce pro zápis a čtení 1 bytu dat ze zadané adresy. Aplikace tak nemusí řešit obsluhu rozhraní I2C, ani vlastní protokol pro práci s pamětí.

Poslední část knihovny obsahuje funkce pro práci s dvojbranou pamětí a sběrnici VME. Tato část slouží ke komunikaci jednotky CETVCE s procesorovou kartou řídicího počítače CETVCP a bude podrobněji popsána v kapitole popisující realizaci APL modulu.

Pro zajištění výše uvedených funkcí využívá knihovna LCSE některá přerušení procesoru. Seznam přerušení LCSE knihovny je uveden v tabulce tab. 7.1. Do tabulky jsou pro úplnost doplněny i přerušení Ethernet řadičů. Tato přerušení obsluhuje již vlastní aplikační software jednotky CETVCE.

Popis	IL	GL
	VL ³⁴	VL ³⁴
Emulace normálních procesů – CC31	1	0
Obecný časovač – T2	2	0
Sériový port	3	0
CAN Timer	3	2
Rychlý proces – T3	4	0
Řadič CAN1	4	1
Řadič CAN0	4	2
Řadič ETH1 – CC29	5	1
Řadič ETH2 – CC28	5	0
VME – CC9	6	0

Tab. 7.1 Přehled a priority přerušení definovaných LCSE knihovnou

Popis aplikačního softwaru jednotky CETVCE je pro přehlednost rozděleno do stejných částí jako teoretický popis mezivozové sběrnice, popsany v kapitole **6.3 Návrh řešení mezivozové komunikace**.

7.3.1 ETH modul

Modul ETH se skládá z následujících částí:

- 1) Inicializace Ethernet řadičů LAN91C111 a alokace RAM paměti pro realizaci bufferů pro práci s Ethernet zprávami.
- 2) Obsluha přerušení Ethernet řadičů.
- 3) Periodicky spouštěná část ETH modulu.

7.3.1.1 Inicializace Ethernet řadičů a bufferů pro práci s Ethernet zprávami

Tato část se vykonává pouze při startu programu. Během ní se provede alokace RAM paměti potřebné pro realizaci bufferů a nastavení registrů Ethernet řadičů LAN91C111.

³⁴ **ILVL** (Interrupt Priority Level) definuje prioritu přerušení. Čím větší číslo, tím větší priorita přerušení.

GLVL (Group Level) definuje pořadí pro přerušení stejné priority (stejně ILVL). Podrobnější popis v [47] str. 77.

Jednotlivé buffery jsou definovány jako kruhové pole datových struktur *st_Buffer*.

```
typedef struct {
    word          wStatus;
    word          len;
    word          portUDP;
    st_ETH_PACKET packet;
}st_Buffer, FAR *p_Buffer;
```

Význam jednotlivých položek struktury:

- wStatus* – položka **wStatus** slouží k řízení přístupu k uloženým datům v řádce bufferu. Význam hodnot položky **wStatus** je definován tab. 7.2
- len* – délka platných dat.
- portUDP* – Destination Port UDP rámce.
- packet* – uložený ETH paket.

Status	Hodnota	Popis
VALID_DATA	0x01	Řádek bufferu obsahuje platná data.
TRANSMIT_DATA	0x02	Uložená data jsou určena pro odeslání přes ETH.
ETH_PROCESS	0x04	Uložená data jsou určena pro proces, který zajišťuje třídění přijatých zpráv (prakticky všechna data, která projdou vstupním filtrem).
TCS_PROCESS	0x08	Uložená data jsou určena pro zpracování modulem TCS
EXECUTING_DATA	0x10	S řádkem bufferu se právě pracuje.
TRANSMITTING_DATA	0x20	Data se právě odesílají.

Tab. 7.2 Hodnoty položky status datové struktury *st_Buffer*

Deklarace bufferů:

```
st_Buffer FAR BufferA[NUM_BUFF];
word          p_BufferA, p_BufferA_read;
```

```
st_Buffer FAR BufferB[NUM_BUFF];
word          p_BufferB, p_BufferB_read;
```

```
st_Buffer FAR QBufferA[NUM_QBUFF];
word          p_QBufferA, p_QBufferA_read;
```

```
st_Buffer FAR QBufferB[NUM_QBUFF];
word          p_QBufferB, p_QBufferB_read;
```

Hodnota konstanty **NUM_BUFF** je 10.

BufferA je použit pro příjem zpráv s nižší prioritou z rozhraní ETH1 a pro vysílání zpráv s nižší prioritou přes rozhraní ETH2.

BufferB je použit pro příjem zpráv s nižší prioritou z rozhraní ETH2 a pro vysílání zpráv s nižší prioritou přes rozhraní ETH1.

QBufferA je použit pro příjem zpráv s vyšší prioritou z rozhraní ETH1 a pro vysílání zpráv s vyšší prioritou přes rozhraní ETH2.

QBufferB je použit pro příjem zpráv s vyšší prioritou z rozhraní ETH2 a pro vysílání zpráv s vyšší prioritou přes rozhraní ETH1.

Proměnné **p_BufferX**, **p_BufferX_read**, **p_QBufferX**, **p_QBufferX_read** jsou ukazatele do polí pro operace čtení a zápis.

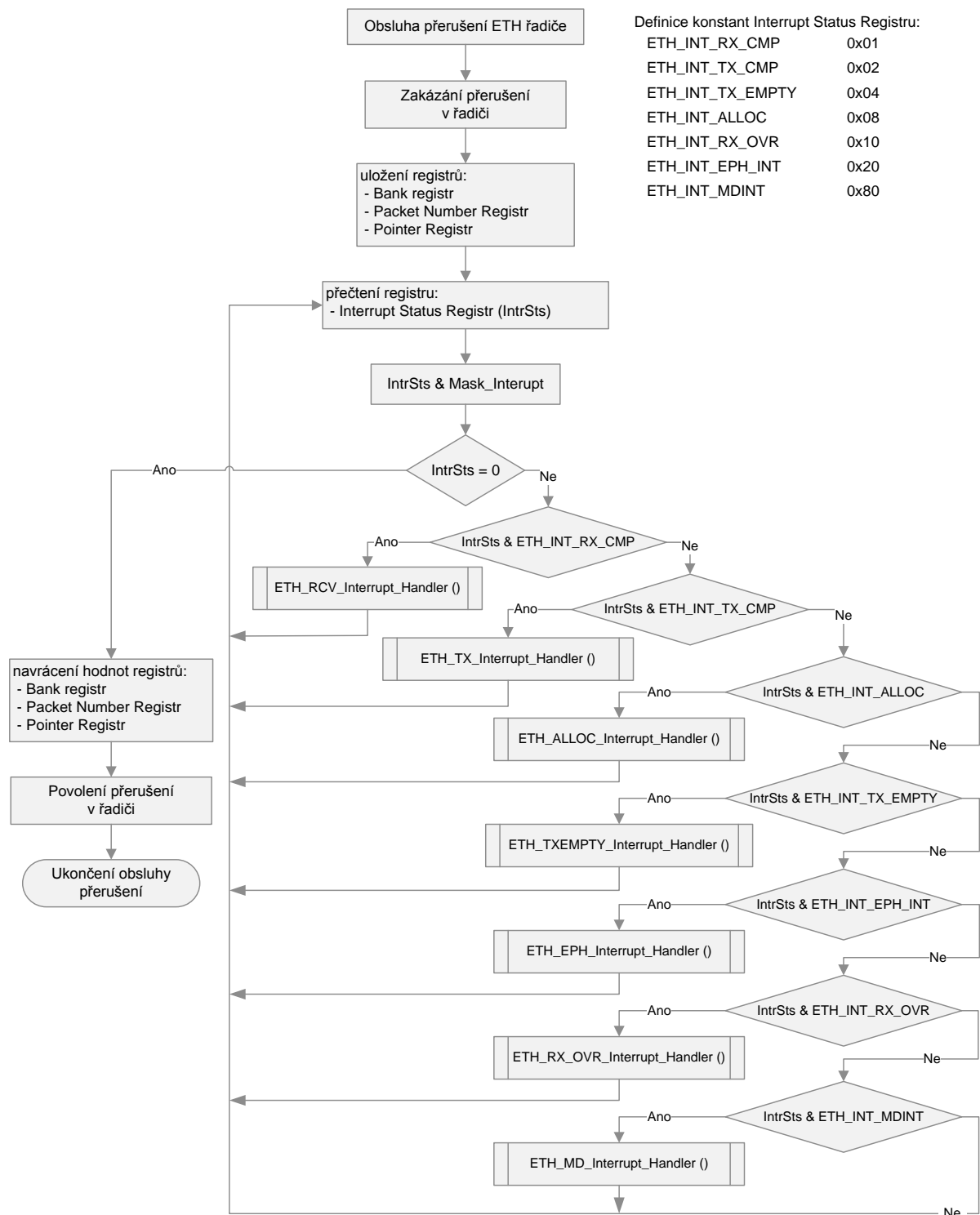
Hodnoty registrů Ethernet řadičů LAN91C111 nastavovaných modulem ETH jsou uvedeny v příloze číslo 12.1. Pro jednotku CETVCE je nastavena komunikační rychlost 10 Mbit/s. Použití jednotky CETVCE se plánuje i pro projekt rekonstrukce tramvajového vozu GT6 Berlín, kde se plánuje použít stávající komunikační kabely. Tyto kabely jsou frekvenční kategorie třídy Cat.3. Tato kategorie nespĺňuje požadavky pro použití maximální komunikační rychlosti 100 Mbit/s. Podle specifikace IEEE 802.3 je pro tuto komunikační rychlost potřeba použít kabel nejméně frekvenční kategorie Cat.5. Detailní popis jednotlivých registrů je uveden v [39].

7.3.1.2 Obsluha přerušení Ethernet řadiče

Ethernet řadič LAN91C111 je vybaven jedním výstupem pro generování žádosti o přerušení. Při požadavku na přerušení nastaví tento výstup řadič do stavu log. 1. V tomto stavu výstup zůstane, dokud nejsou obslouženy všechny vzniklé povolené požadavky na přerušení. Povolení jednotlivých zdrojů přerušení se nastavuje v registru **Bank2 – Interrupt Mask & Status Register** Ethernet řadiče (viz příloha číslo 12.1).

Výstup Ethernet řadiče je přiveden na logický vstup Capture/Compare jednotky CAPCOM29 (řadič rozhraní 1) resp. CAPCOM28 (řadič rozhraní 2). CAPCOM jednotky jsou nastaveny tak, aby při náběžné hraně signálu na svém logickém vstupu generovaly přerušení programu v procesoru. Obsluha přerušení se provádí tak dlouho, dokud logický vstup CAPCOM jednotky nezmění stav na hodnotu log. 0. Priorita přerušení je definovaná LCSE knihovnou v tab. 7.1.

Vlastní zpracování přerušení Ethernet řadiče aplikačním softwarem jednotky CETVCE je znázorněno na obr. 7.4.



Obr. 7.4 Obsluha přerušení řadiče Ethernetu procesorem jednotky CETVCE

Funkce:

- *ETH_MD_Interrupt_Handler ()*,
- *ETH_RX_OVR_Interrupt_Handler ()*,
- *ETH_EPH_Interrupt_Handler ()*,
- *ETH_TX_Interrupt_Handler ()*

přímo nesouvisí s realizací algoritmů mezivozové sběrnice. Jedná se o algoritmy pro standardní obsluhu Ethernet řadiče a jsou napsány podle doporučení výrobce řadiče LAN91C111. Z tohoto důvodu nebudou v této práci dále popisovány.

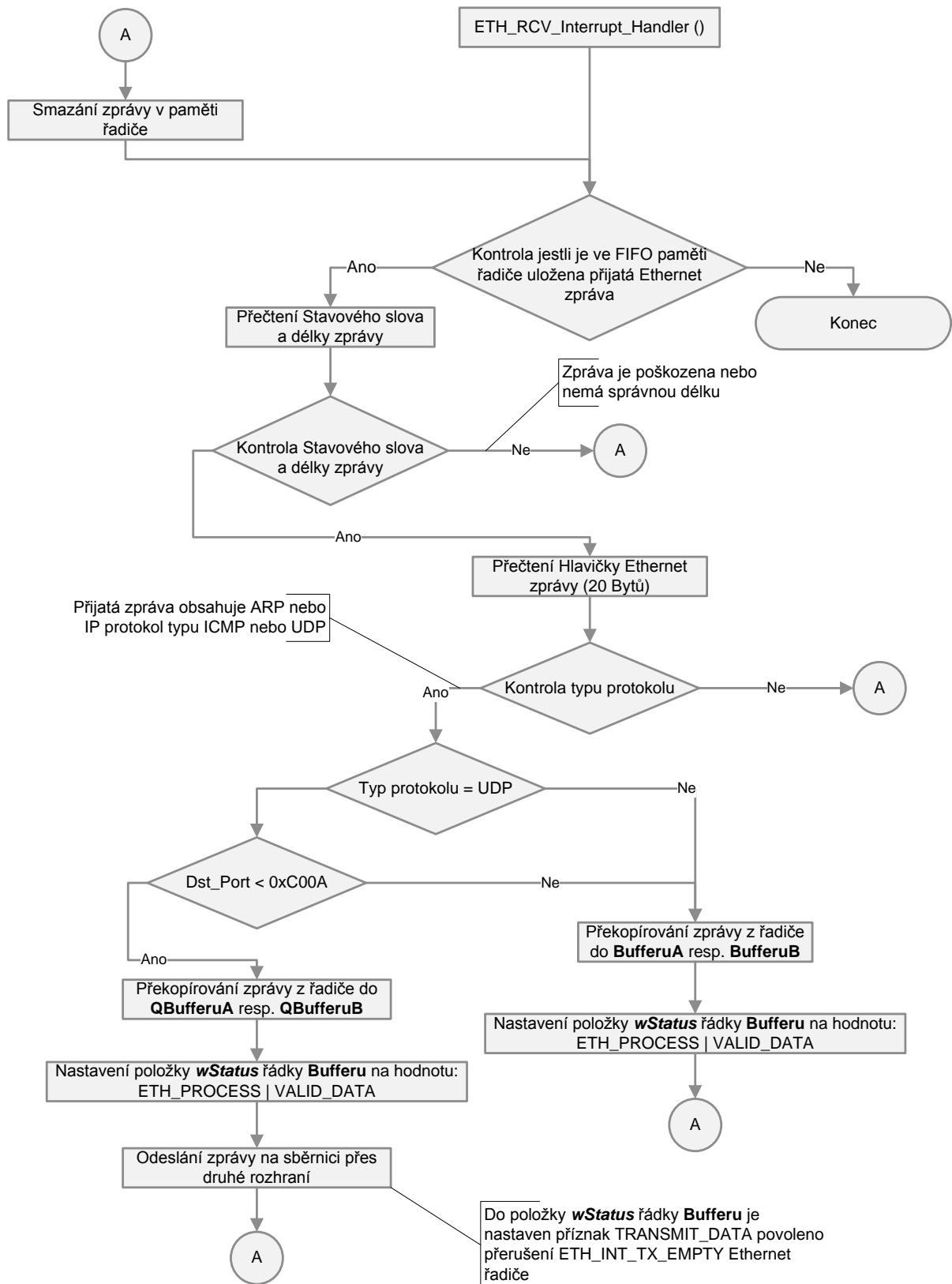
Funkce *ETH_RCV_Interrupt_Handler ()*

Tato funkce zajišťuje přečtení a uložení přijaté Ethernet zprávy z řadiče do bufferů ETH modulu v RAM paměti.

Funkce čte zprávu uloženou v přijímacím FIFO buferu řadiče postupně ve třech krocích. Nejprve přečte **Stavové slovo** a **délku** přijaté Ethernet zprávy. Tyto informace vyplní řadič při příjmu zprávy. Do stavového slova řadič ukládá případně zjištěné chyby při příjmu zprávy. Pokud funkce zjistí, že zpráva není poškozena a má správnou délku, přečte prvních 20 Bytů zprávy obsahujících hlavičku IP protokolu. V opačném případě je ukončeno čtení a funkce zprávu z FIFO bufferu řadiče smaže.

Po přečtení hlavičky IP protokolu následuje kontrola typu protokolu. Pokud se jedná o nepodporovaný protokol (viz. kapitola 6.3.1.1), je opět ukončeno čtení zprávy a následně je zpráva z FIFO bufferu řadiče smazána. Při zjištění, že se jedná o podporovaný protokol, je z řadiče přečtena celá zpráva a uložena podle následujících pravidel do bufferů ETH modulu. Zprávy obsahující protokol ARP a ICMP jsou automaticky uloženy do **BufferuA** resp. **BufferuB**, které jsou určeny pro zprávy s nižší prioritou zpracování. Zprávy s protokolem UDP jsou nejprve rozděleny podle hodnoty cílového portu UDP datagramu. Pokud je hodnota portu větší jak 0xC00A, jedná se o zprávu s nižší prioritou zpracování a je uložena do **BufferuA** resp. **BufferuB**. Ostatní UDP datagramy jsou považovány za zprávy s vyšší prioritou zpracování jsou uloženy do **QBufferuA** resp. **QBufferuB** a okamžitě odeslány do druhého řadiče jednotky CETVCE. Po uložení zprávy do bufferu ETH modulu je zpráva z FIFO bufferu řadiče smazána.

Funkce se provádí tak dlouho, dokud nejsou zpracovány všechny přijaté zprávy uložené v FIFO bufferu řadiče. Graficky je popis příjmu Ethernet zprávy znázorněn pomocí vývojového diagramu zobrazeného na obr. 7.5.



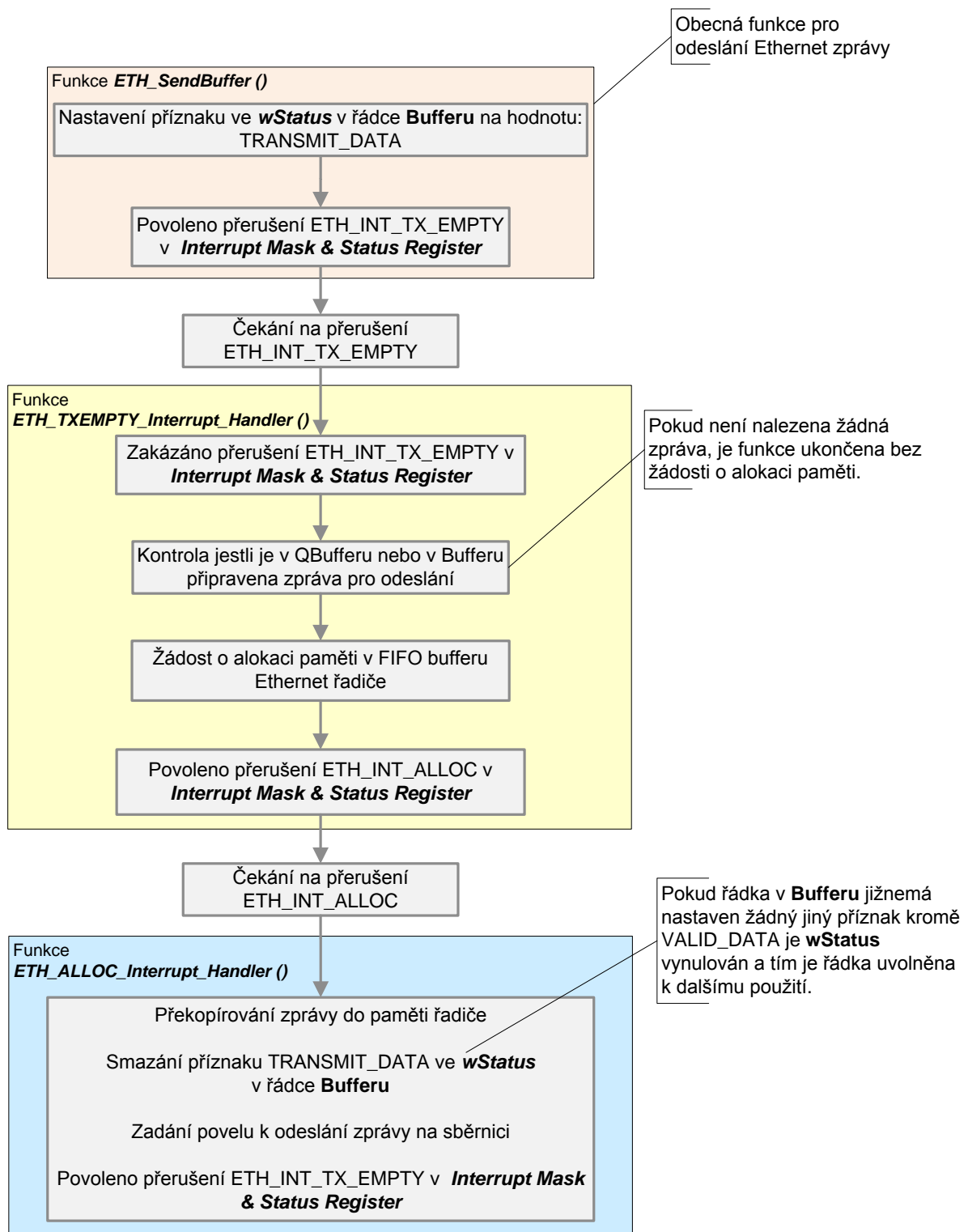
Obr. 7.5 Příjem Ethernet zprávy z řadiče LAN91C111 procesorem jednotky CETVCE

Funkce *ETH_ALLOC_Interrupt_Handler ()* a *ETH_TXEMPTY_Interrupt_Handler ()*

zajišťují obsluhu přerušení potřebných pro odeslání Ethernet zprávy na sběrnici. Proces odesílání Ethernet zprávy je znázorněn na obr. 7.6. Proces odesílání Ethernet zprávy na sběrnici je zahájen buď pomocí obecné funkce pro vysílání zpráv *ETH_SendBuffer ()* nebo funkcí *ETH_RCV_Interrupt_Handler ()* při příjmu UDP datagramu s cílovým portem menším než 0XC00A.

Aby Ethernet zpráva mohla být vyslána, musí se nejprve překopírovat do FIFO bufferu řadiče. Řadič LAN91C111 používá stejný buffer (paměť) jak pro příjem, tak pro vysílání dat. Z tohoto důvodu proces kopírování zprávy do paměti řadiče musí začít příkazem pro alokaci paměti. Přidělení paměti pro překopírování odesílané zprávy oznámí řadič pomocí přerušení. Toto přerušení obsluhuje funkce *ETH_ALLOC_Interrupt_Handler ()*, která zajistí překopírování zprávy do paměti řadiče a následné odeslání na sběrnici. Na sběrnici jsou vždy nejdříve odeslány zprávy připravené v **QBuffereh**, až pokud již v těchto bufferech není připravena žádná zpráva k odeslání, začnou se posílat zprávy z **Bufferů** pro zprávy s nižší prioritou zpracování. Tato kontrola se provádí před každým kopírováním zprávy do řadiče.

Funkce *ETH_TXEMPTY_Interrupt_Handler ()* obsluhuje přerušení, kterým řadič oznámí odeslání zprávy na sběrnici. Tato funkce zkontroluje, jestli jsou v bufferech ETH modulu ještě nějaké zprávy připravené k odeslání. Pokud ano, funkce opět zajistí vyslání povelu pro alokaci paměti řadiče pro vyslání další zprávy.



Obr. 7.6 Proces odesílání Ethernet zprávy ETH modulem

7.3.1.3 Periodicky spouštěná část ETH modulu

Tato část ETH modulu je řešena jako funkce *Handler_ETH_NP0 ()* zaregistrovaná jako „**Normální proces 0**“ LCSE knihovny s periodou spouštění 2 ms. Tato funkce zajišťuje:

- Realizaci virtuálního propojení Ethernet rozhraní jednotky pro zprávy uložené v **BufferuA** resp. v **BufferuB**. Zprávy uložené v **QBufferech** jsou přeposílány na druhé rozhraní již při přečtení zprávy z řadiče.
- Vysílání aplikačních zpráv sestavených modulem TCS.
- Vysílání zprávy č. 20 HeartBeat.
- Detekci připojené jednotky k Ethernet rozhraním na základě kontroly příjmu zprávy č. 20 HeartBeat.
- Odpověď na protokoly ICMP a ARP.
- Předání zpráv obsahující aplikační data modulu TCS ke zpracování.

Funkce *Handler_ETH_NP0 ()* kontroluje buffery modulu ETH a hledá řádky, které mají v položce **wStatus** nastaven příznak VALID_DATA a příznak ETH_PROCESS. Tyto řádky pak dále zpracovává podle dalších příznaků nastavených v položce **wStatus**. Nejdříve jsou vždy zpracovány zprávy uložené v **QBufferuA** a **QBufferuB**. Pokud již v těchto bufech není žádná řádka s příznakem ETH_PROCESS, začnou se zpracovávat zprávy uložené v **BufferuA** a **BufferuB**.

Pokud je v položce **wStatus** nastaven pouze příznak VALID_DATA a ETH_PROCESS jedná se o nově přijatou zprávu. Pokud je nastaven ještě příznak TRANSMIT_DATA jedná se o řádku bufferu, ve které je připravena zpráva na odeslání na mezivozovou sběrnici Ethernet. V tomto případě se zkontroluje, jestli je povoleno přerušení ETH_INT_TX_EMPTY příslušného řadiče Ethernetu. Pokud není, je zavolána funkce *ETH_SendBuffer ()*, která zajistí spuštění procesu pro odeslání zprávy.

Při zpracování nově přijaté zprávy je nejprve zkontrolována cílová IP adresa. Pokud se zjistí, že zpráva není určena pro tento komunikační uzel nebo je typu broadcast, je zpráva pomocí funkce *ETH_SendBuffer ()* odeslána na sběrnici přes druhé rozhraní³⁵. Tím je realizováno **virtuální propojení Ethernet rozhraní jednotky**. Pokud je zpráva určena pro tento komunikační uzel, je další zpracování závislé na typu zprávy. Pokud zpráva obsahuje ICMP nebo ARP protokol je sestavena odpověď a opět pomocí funkce *ETH_SendBuffer ()*

³⁵ Výjimku tvoří zprávy s vyšší prioritou zpracování, které jsou automaticky přeposílány již při čtení z Ethernet řadiče.

odeslána na sběrnici. Pokud zpráva obsahuje UDP datagram, je předána modulu TCS k dalšímu zpracování.

Předání zprávy modulu TCS se provede pouze pomocí nastavení příznaku TCS_PROCESS v položce **wStatus** a u zpráv s vyšší prioritou zpracování se zavolá callback funkce modulu TCS pro rychlé zpracování zprávy. Zprávy s nižší prioritou jsou zpracovávány asynchronně.

Z výše uvedeného popisu je zřejmé, že jak modul ETH, tak modul TCS využívá pro své činnosti stejné buffery. Díky tomu se zprávy nemusí při jednotlivých operacích přesouvat v paměti a tím se výrazně zkracuje čas potřebný na zpracování jednotlivých zpráv. Aby nemohlo dojít k poškození zprávy uložené v řádku bufferu díky současnému přístupu modulu ETH a modulu TCS jsou v položce **wStatus** připraveny příznaky EXECUTING_DATA a TRANSMITING_DATA. Tyto příznaky slouží k zamknutí řádky pro ostatní operace.

7.3.2 APL modul

APL modul zajišťuje předávání dat mezi modulem TCS a centrálním počítačem nadřazeného vozového řídicího systému. Komunikační jednotka CETVCE je pro komunikaci s vozovým řídicím systémem CECOMM vybavena VME a CAN sběrnici. Pro první verze aplikačních SW je použita pouze sběrnice VME. Sběrnice CAN je využita pouze pro vysílání ladicích informací potřebných při tvorbě vlastního aplikačního programu jednotky CETVCE.

Komunikace po VME sběrnici probíhá přes DPM jednotky CETVCE. Vymezený prostor v DPM pro aplikační data je rozdělen na oblasti představující jednotlivé zprávy. Pomocí těchto zpráv je realizována jak komunikace směrem CETVCP \Rightarrow CETVCE, tak směrem CETVCE \Rightarrow CETVCP. Řízení přístupu do DPM je řešeno pomocí registrů **INT_INx** a **INT_OUTx** (viz. mapa DPM paměti v příloze číslo 12.2). Registry **INT_INx** jsou určeny pro komunikaci směrem CETVCP \Rightarrow CETVCE, registry **INT_OUTx** jsou využívány pro řízení komunikace směrem CETVCE \Rightarrow CETVCP. Výjimku tvoří adresy v rozsahu 0x020 až 0x024. Na tyto adresy zapíše jednotka CETVCE data pouze při startu programu, kdy ještě nelze komunikovat po VME sběrnici. Z tohoto důvodu nemůže dojít k nekonzistenci dat vlivem současnému přístupu do paměti z VME sběrnice a procesorem jednotky. Další oblastí, která nemá ošetřen současný přístup do DPM, je adresa 0x026. Na této adrese je 1 Bytová zpráva pro ovládání CETVCE jednotky. Z pohledu přístupu k paměti je jak čtení, tak zápis 1 Bytu atomická operace a tedy opět zde nemůže dojít k nekonzistenci dat v důsledku současného přístupu do DPM z obou stran.

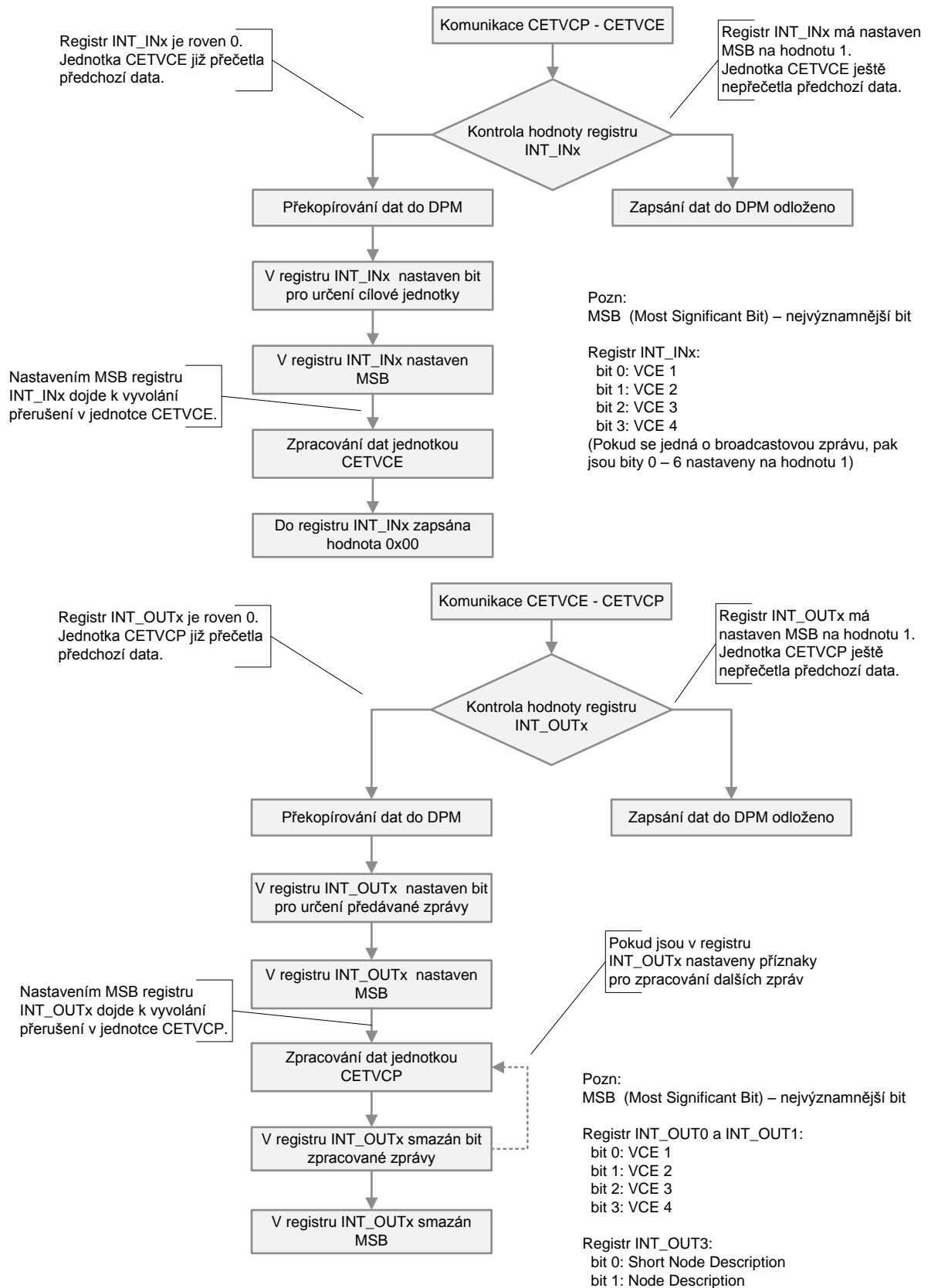
Rozdělení DPM paměti na jednotlivé zprávy včetně přiřazení zpráv jednotlivým řídicím registrům je naznačeno v tab. 7.3. Řízení komunikace přes DPM včetně významu jednotlivých bitů registrů *INT_INx* a *INT_OUTx* je vysvětleno pomocí obr. 7.7.

Adresa	Délka [B]	Popis	Řídicí registr	Směr přenosu
0x020	2	Číslo verze protokolu mezivozové sběrnice	---	CETVCE ⇒ CETVCP
0x022	2	Číslo verze modulu TCS	---	CETVCE ⇒ CETVCP
0x024	2	Číslo verze modulu ETH	---	CETVCE ⇒ CETVCP
0x026	1	Ovládání jednotky (Command Msg)	---	CETVCP ⇒ CETVCE
0x027	13	Krátký popis komunikačního uzlu (Short Node Description)	INT_OUT3	CETVCE ⇒ CETVCP
0x034	158	Popis komunikačního uzlu (Node Description)	INT_OUT3	CETVCE ⇒ CETVCP
0x0D2	36	VCP QMsg ³⁶	INT_IN0	CETVCP ⇒ CETVCE
0x0F6	48	VCP Msg ³⁷	INT_IN1	CETVCP ⇒ CETVCE
0x126	36	VCE 1 QMsg	INT_OUT0	CETVCE ⇒ CETVCP
0x14A	48	VCE 1 Msg	INT_OUT1	CETVCE ⇒ CETVCP
0x17A	36	VCE 2 QMsg	INT_OUT0	CETVCE ⇒ CETVCP
0x19E	48	VCE 2 Msg	INT_OUT1	CETVCE ⇒ CETVCP
0x1CE	36	VCE 3 QMsg	INT_OUT0	CETVCE ⇒ CETVCP
0x1F2	48	VCE 3 Msg	INT_OUT1	CETVCE ⇒ CETVCP
0x222	36	VCE 4 QMsg	INT_OUT0	CETVCE ⇒ CETVCP
0x246	48	VCE 4 Msg	INT_OUT1	CETVCE ⇒ CETVCP
0x276 až 0x3FF	---	Rezerva		

Tab. 7.3 Mapa uživatelské části DPM

³⁶ QMsg – zpráva s vyšší prioritou zpracování.

³⁷ Msg – zpráva s nižší prioritou zpracování.



Obr. 7.7 Řízení komunikace přes DPM

7.3.3 TCS modul

Podle kapitoly 6.3.2 TCS modul zajišťuje proces inaugurace mezivozové sběrnice a realizaci transportní vrstvy pro předávání aplikačních dat mezi mezivozovou a vozovou sběrnicí vozidla prostřednictvím modulů APL a ETH.

7.3.3.1 Realizace transportní vrstvy mezi APL a TCS modulem

Při předávání zprávy směrem z APL modulu do modulu ETH (zpráva z vozového počítače) je nejdříve provedena kontrola zprávy pomocí ověření kontrolního součtu vypočítaného centrálním počítačem vozidla (jednotka CETVCP). Při porušení zprávy je zpráva smazána. Pokud jsou data neporušena, musí modul TCS zajistit před překopírováním dat do bufferů ETH modulu vyplnění hlavičky UDP datagramu. Informace potřebné k vyplnění hlavičky získá z popisu topologie mezivozové sběrnice získané při inauguraci sítě a z převodní tabulky přiřazující každé zprávě APL modulu hodnotu cílového portu UDP datagramu. Jelikož jednotka CETVCE nepoužívá konfigurovatelné mapování zpráv, je tato tabulka napevno definována zdrojovým kódem modulu TCS. Výsledná podoba převodní tabulky je znázorněna tab. 7.4. Sestavení UDP datagramu se realizuje přímo v obsluze přerušení vyvolaného VME sběrnicí.

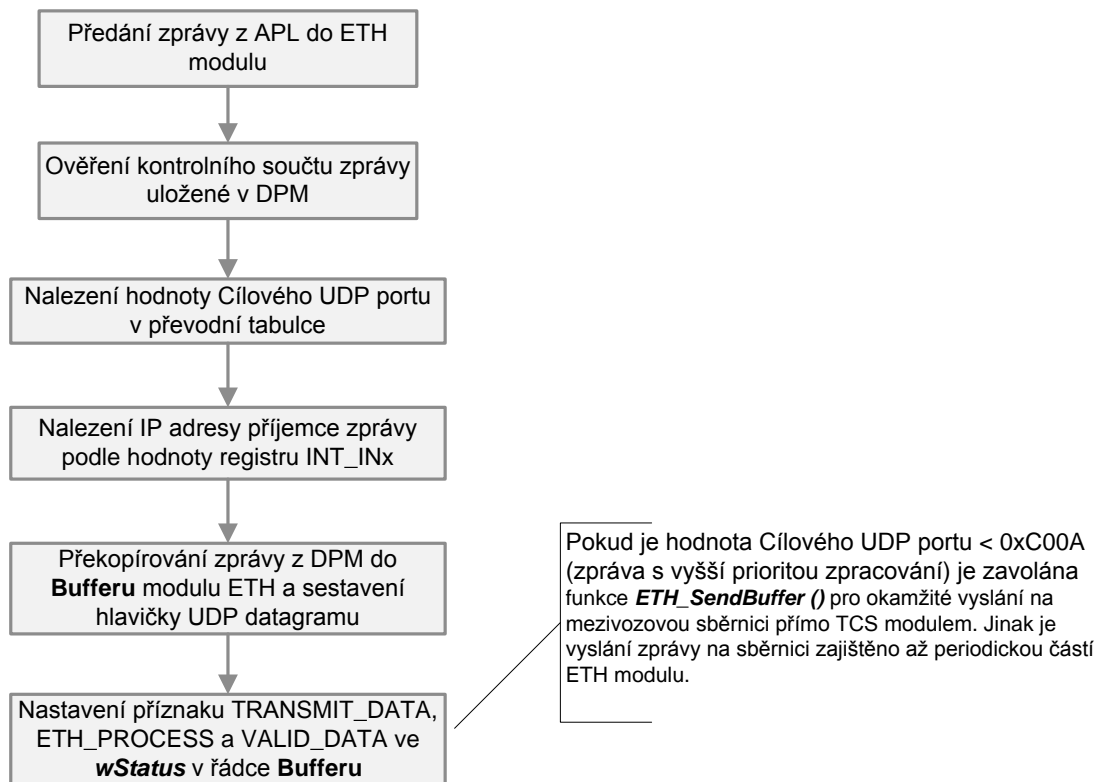
Stav jednotky CETVCE	Zpráva	Cílový port UDP datagramu
Master	VCP QMsg	0xC005
	VCP Msg	0xC030
	VCE x QMsg	0xC006
	VCE x Msg	0xC031
Slave	VCP QMsg	0xC006
	VCP Msg	0xC031
	VCE 1 QMsg	0xC005
	VCE 1 Msg	0xC030

Tab. 7.4 Převodní tabulka TCS modulu – adresování

Při předávání zprávy směrem z ETH do APL modulu (UDP datagram z mezivozové sběrnice), provede modul TCS před překopírováním dat do DPM kontrolu, zda přijatá data nejsou porušena. Při porušení dat je nastaven příznak ve stavovém wordu **wTransferErrors**

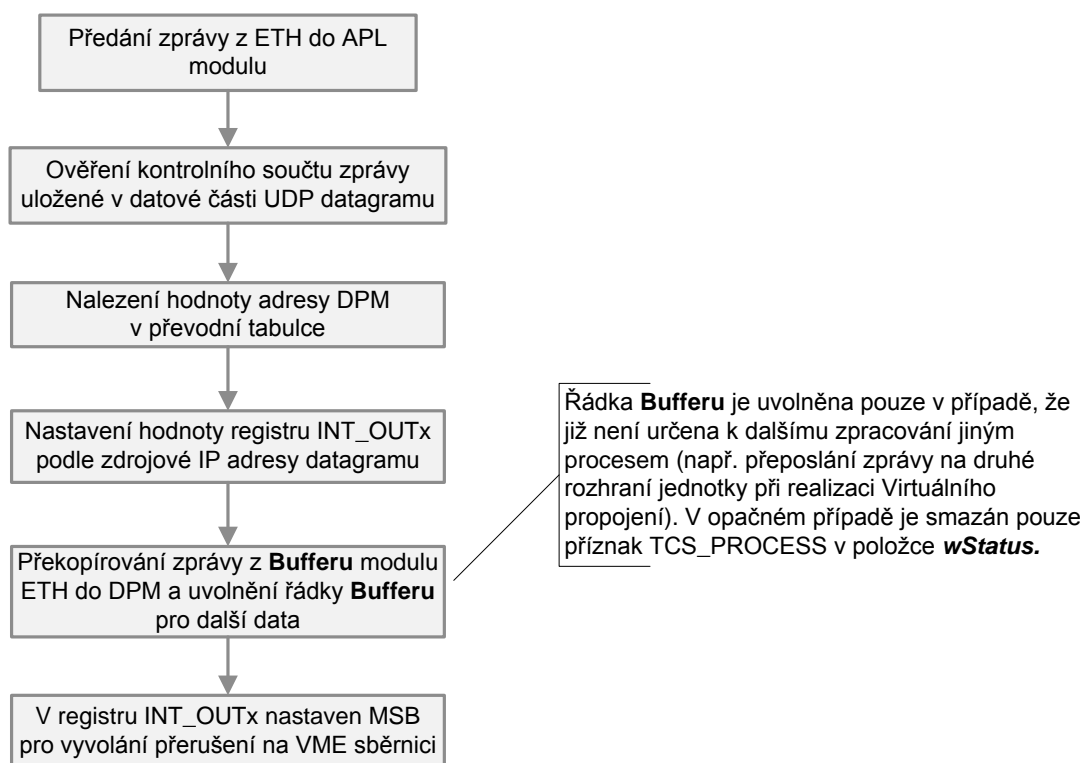
zprávy³⁸. Po kontrole jsou data z UDP datagramu podle hodnoty cílového portu překopírována do příslušné části DPM. Po překopírování dat je nastaven registr *INT_OUTx* a vyvoláno přerušení na VME sběrnici.

Výše popisovaný postup při předávání zpráv je graficky znázorněn na obr. 7.8 a obr. 7.9.



Obr. 7.8 Popis předání zprávy z APL do ETH modulu

³⁸ Struktura zpráv v DPM je uvedena v příloze číslo 12.3.

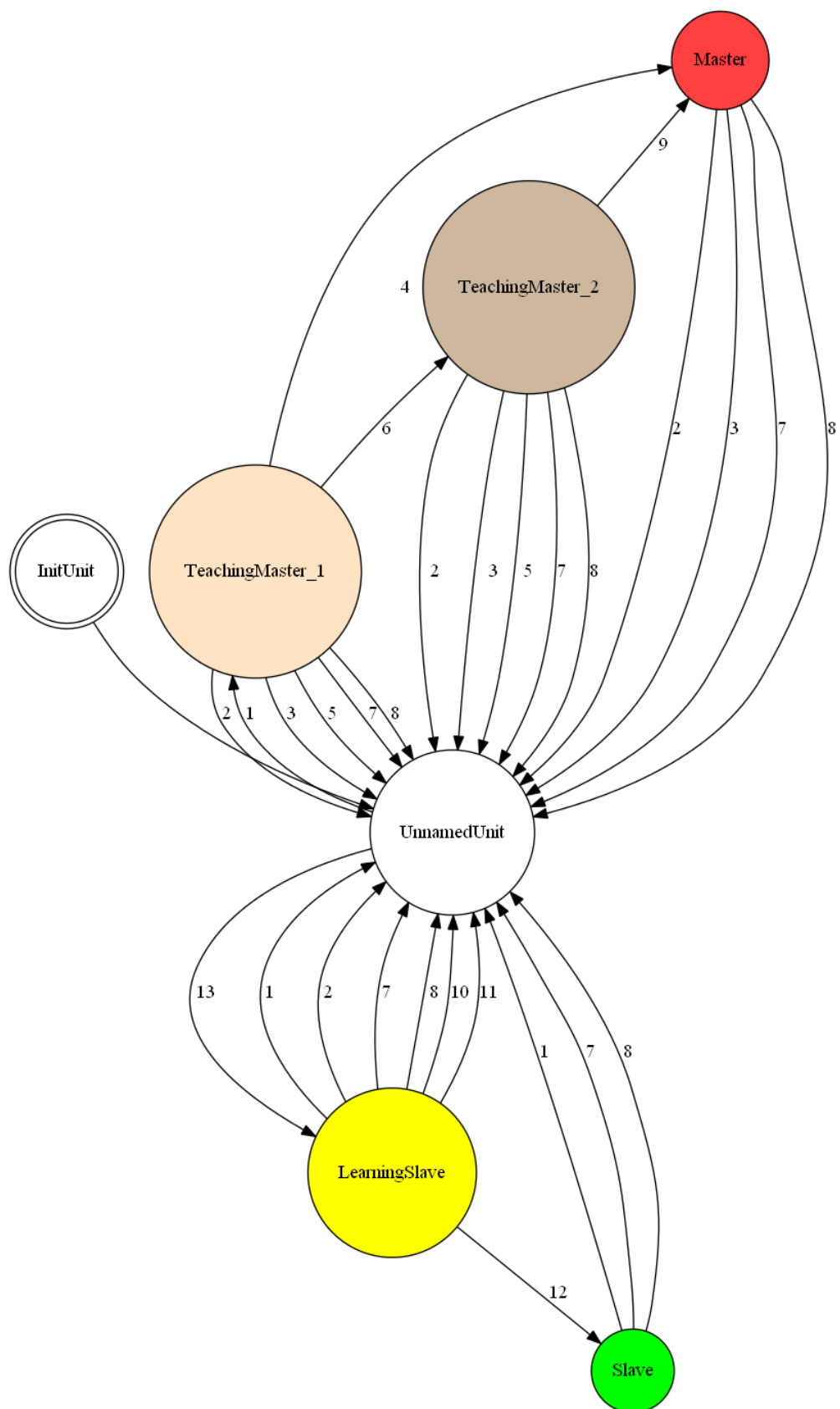


Obr. 7.9 Popis předání zprávy z ETH do APL modulu

7.3.3.2 Řešení Inaugurace mezivozové sběrnice

Z pohledu řízení komunikačního uzlu na mezivozové sběrnici se může jednotka CETVCE nacházet celkem v 7 stavech podle aktuální fáze procesu inaugurace sběrnice (seznam stavů je uveden v tab. 6.2.). Požadavek na sestavení a zrušení soupravy (inaugurace mezivozové sběrnice) předává vozový počítač jednotce CETVCE ve zprávě „Command Msg“ přes DPM³⁹. Přechod mezi jednotlivými stavy jednotky je realizován pomocí stavového automatu, který je znázorněn na obr. 7.10. V tab. 7.5 je uveden seznam a popis jednotlivých podmínek přechodů. Pod tabulkou jsou popsány přechodové funkce stavového automatu.

³⁹ Seznam příkazů pro ovládání jednotky CETVCE je uveden v příloze číslo 12.3 v popisu zprávy „Command Msg“



Obr. 7.10 Stavový automat „Inaugurace mezivozové sběrnice“

Číslo podm.	Popis podmínky přechodu
1	Příkaz „Požadavek na stav komunikačního uzlu: MASTER“ z DPM
2	Přišla zpráva č. 10 – „Žádost o sestavení soupravy“
3	Zrušen příkaz „Požadavek na stav komunikačního uzlu: MASTER“ z DPM
4	Ani na jednom ETH rozhraní není LINK (nepřichází „HeartBeat“ zprávy)
5	Vypršel TimeOut – překročena povolená doba trvání stavu „TeachingMaster_x“
6	Ze všech rozhraní, na kterých je LINK, přišla zpráva č. 11 – „Nalezena poslední jednotka“
7	Přišla zpráva č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“
8	Příkaz „Požadavek na zrušení sestavené sběrnice“ z DPM nebo detekováno připojení nového komunikačního uzlu na sběrnici (změna LINK z hodnoty FALSE na TRUE)
9	Ze všech rozhraní, na kterých je LINK, přišla zpráva č. 13 – „Ukončení sestavování soupravy“
10	Vypršel TimeOut – překročena povolená doba trvání stavu „LearningSlave“
11	Přišla zpráva č. 12 – „Přepni se ze stavu „LearningSlave“ do stavu „Slave“ a jednotka nenalezla svojí MAC a IP adresu v tabulce Slave jednotek
12	Přišla zpráva č. 12 – „Přepni se ze stavu „LearningSlave“ do stavu „Slave“ a jednotka našla svojí MAC a IP adresu v tabulce Slave jednotek
13	Přišla zpráva č. 10 – „Žádost o sestavení soupravy“ a není různá verze komunikačního protokolu

Tab. 7.5 Seznam přechodových funkcí stavového automatu „Inaugurace mezivozové sběrnice“

Přechodové funkce stavu "InitUnit"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit		
UnnamedUnit	Přejde po prvním průchodu stavovým automatem.	nic
TeachingMaster_1	X ⁴⁰	
TeachingMaster_2	X	
Master	X	
LearningSlave	X	
Slave	X	

Přechodové funkce stavu "UnnamedUnit"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit	X	
UnnamedUnit		
TeachingMaster_1	1	Vyslání zprávy č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“. Nastavení IP adresy na hodnotu 192.168.1.20. Vyslání zprávy č. 10 – „Žádost o sestavení soupravy“. Nastavení TimeOutu doby trvání stavu „TeachingMaster_x“.
TeachingMaster_2	X	
Master	X	
LearningSlave	13	Výpočet a nastavení vlastní IP adresy dle výpočtu v kapitole Dynamické přidělování IP adresy jednotky. Aktualizace tabulky Slave jednotek. Pokud je jednotka poslední, tak vyšle zprávu č. 11 – „Nalezena poslední jednotka“ jinak přepoše doplněnou zprávu č. 10 - „Žádost o sestavení soupravy“ na druhé rozhraní. Nastavení TimeOutu doba trvání stavu „LearningSlave“.
Slave	X	

⁴⁰ Do tohoto stavu nelze přejít.

Přechodové funkce stavu " TeachingMaster_1"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit	X	
UnnamedUnit	2, 3, 5, 7, 8	<p>Při podmínkách 2, 3, 5 a 8 se vyšle zpráva č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“.</p> <p>Při podmínce 2 se vyšle zpráva č. 0 – „Nalezeno více MASTER jednotek“.</p> <p>Při podmínce 7 – nic.</p>
TeachingMaster_1		
TeachingMaster_2	6	Vyslání zprávy č. 12 – „Přepni se ze stavu LearningSlave do stavu Slave“
Master	4	nic
LearningSlave	X	
Slave	X	

Přechodové funkce stavu " TeachingMaster_2"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit	X	
UnnamedUnit	2, 3, 5, 7, 8	<p>Při podmínkách 2, 3, 5 a 8 se vyšle zpráva č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“.</p> <p>Při podmínce 2 se vyšle zpráva č. 0 – „Nalezeno více MASTER jednotek“.</p> <p>Při podmínce 7 – nic.</p>
TeachingMaster_1	X	
TeachingMaster_2		

Master	9	nic
LearningSlave	X	
Slave	X	

Přechodové funkce stavu " Master"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit	X	
UnnamedUnit	2, 3, 7, 8	<p>Při podmínkách 2, 3 a 8 se vyšle zpráva č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“.</p> <p>Při podmínce 2 se vyšle zpráva č. 0 – „Nalezeno více MASTER jednotek“.</p> <p>Při podmínce 7 – nic.</p>
TeachingMaster_1	X	
TeachingMaster_2	X	
Master		
LearningSlave	X	
Slave	X	

Přechodové funkce stavu " LearningSlave"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit	X	
UnnamedUnit	1,2, 7, 8, 10, 11	<p>Při podmínkách 1, 2, 7 – nic.</p> <p>Při podmínkách 8, 10 a 11 se vyšle zpráva č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“.</p> <p>Při podmínce 11 se vyšle zpráva č. 1 – „Chyba při kontrole tabulky SLAVE jednotek“.</p>

TeachingMaster_1	X	
TeachingMaster_2	X	
Master	X	
LearningSlave		
Slave	12	Pokud je jednotka poslední, tak vyšle zprávu č. 13 – „Ukončení sestavování soupravy“, jinak přepoše zprávu č. 12 – „Přepni se ze stavu Learning Slave do stavu Slave“ další jednotce. Zjistí aktuální orientaci jednotky.

Přechodové funkce stavu " Slave"

Nový stav	Podmínka přechodu	Přechodová funkce
InitUnit	X	
UnnamedUnit	1, 7, 8	Při podmínkách 1, 7 – nic. Při podmínce 8 se vyšle zpráva č. 3 – „Zrušit sestavení soupravy“.
TeachingMaster_1	X	
TeachingMaster_2	X	
Master	X	
LearningSlave	X	
Slave		

7.4 Nástroje a prostředky pro ladění a testování jednotky CETVCE

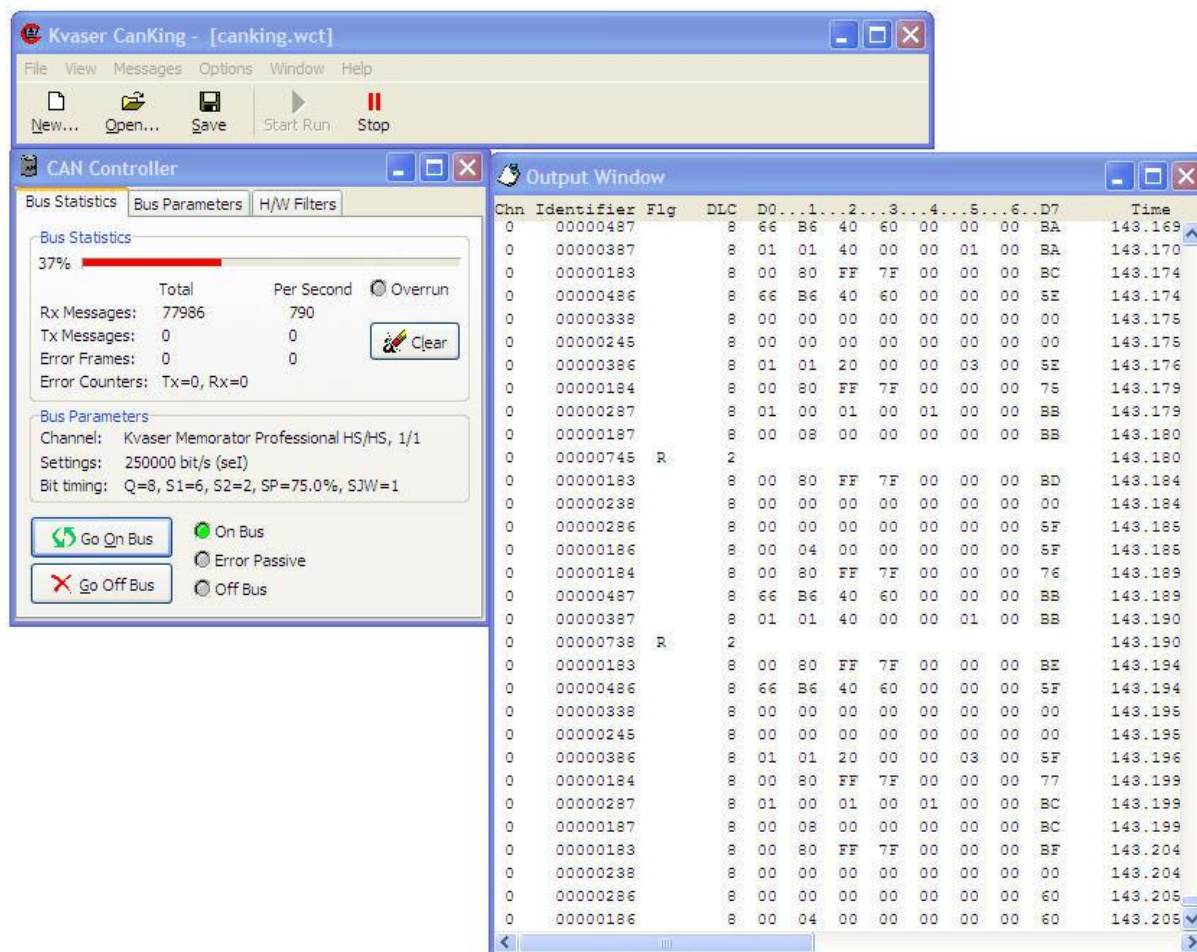
Hlavní výhodou navrhovaného řešení mezivozové komunikace z pohledu ladění a testování je použití Ethernetu a standardních IP protokolů. Díky této volbě lze pro tyto účely použít klasický osobní počítač nebo notebook bez nutnosti rozšíření speciálními převodníky a komunikačními kartami. Výjimku tvoří pouze komunikační modul CAN sběrnice od firmy Kvaser.

7.4.1 Kvaser CanKing

V popisované realizaci aplikačního softwaru jednotky CETVCE je sběrnice CAN použita pouze jako ladící sběrnice. Na této sběrnici existuje pouze jednostranná komunikace, kdy

jednotka CETVCE vysílá informace potřebné pro odladění jednotlivých funkčních bloků zdrojového kódu jednotky.

Pro čtení a záznam těchto ladících zpráv byl použit program **CanKing** od firmy Kvaser určený pro operační systém Microsoft WindowsXP. Tento program potřebuje pro svoji činnost převodník USB \Leftrightarrow CAN od stejné firmy. Konkrétně byl použit převodník **Kvaser Memorator Profesional HS/HS**. Program **CanKing** umožňuje jak online sledování zpráv na CAN sběrnici, tak jejich záznam do souboru či paměťovou kartu převodníku pro pozdější analýzu. Na obr. 7.11 je uveden příklad uživatelského rozhraní programu.



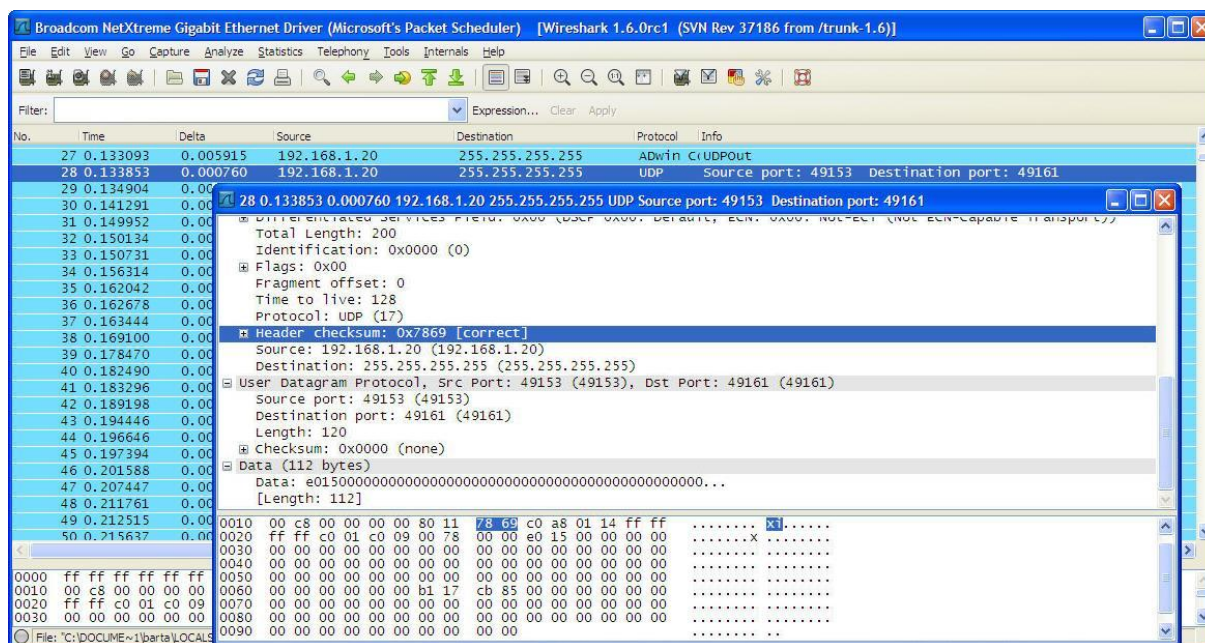
Obr. 7.11 Uživatelské rozhraní programu CanKing

7.4.2 Wireshark

Wireshark je program určený pro monitorování rámců přenášených v síti Ethernet. Jedná se o Open Source program distribuovaný pod licencí GNU General Public License. Detailní informace o programu lze získat na webových stránkách projektu www.wireshark.org.

Program **Wireshark** umožňuje online sledování vysílaných rámců na Ethernetu. U zaznamenaných rámců umožňuje analýzu jejich obsahu, statistické vyhodnocení a filtrování podle uživatelsky nastavitelných kritérií.

Tento program byl využit pro kontrolu zpráv vysílaných jednotkou na mezivozovou sběrnici. Zejména pak ke kontrole správné implementace jednotlivých použitých IP protokolů (kontrola vyplnění hlaviček IP protokolů, výpočtu CRC, apod.) a četnosti vysílaných zpráv. Ukázkové rozhraní tohoto programu je zobrazeno na obr. 7.12, který zobrazuje analýzu UDP zprávy.



Obr. 7.12 Uživatelské rozhraní programu Wireshark

7.4.3 Síťová utilita operačního systému Microsoft Windows – „Ping“

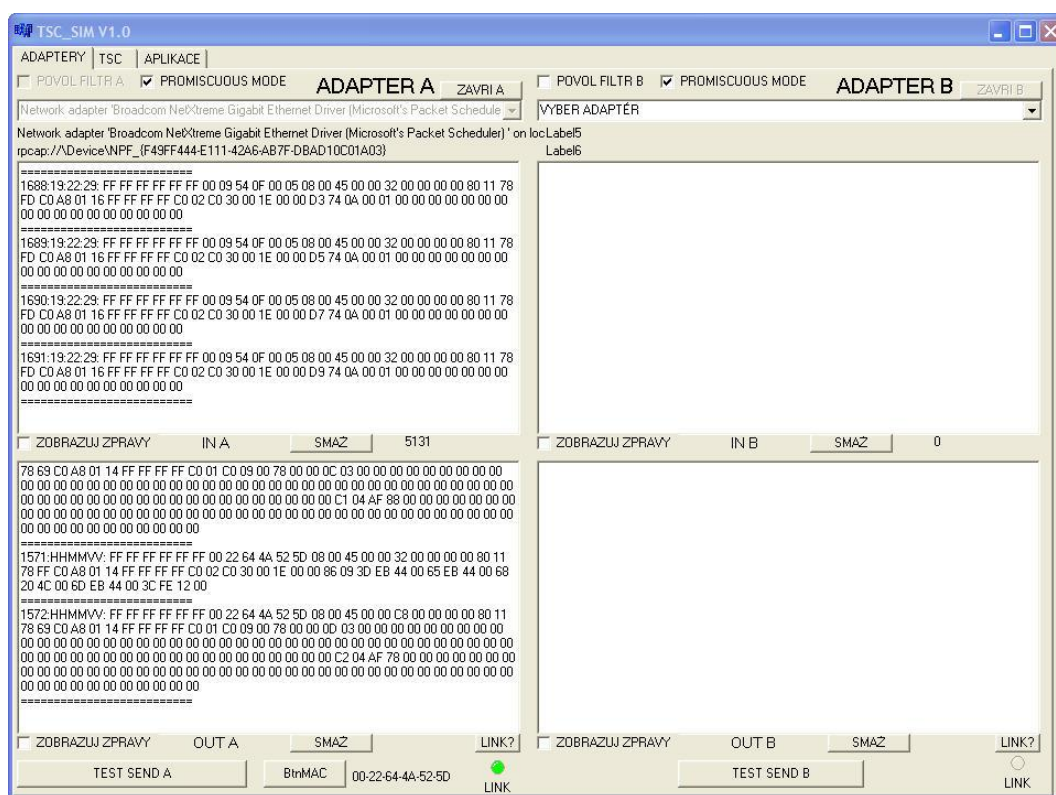
Utilita **Ping** slouží pro generování ICMP paketů Echo Request na síti Ethernet. Pomocí této utility byla testována implementace protokolu ARP a ICMP a stabilita virtuálního spojení konektorů mezivozové sběrnice popsané v kapitole 6.3.1.3.

7.4.4 TCS_SIM

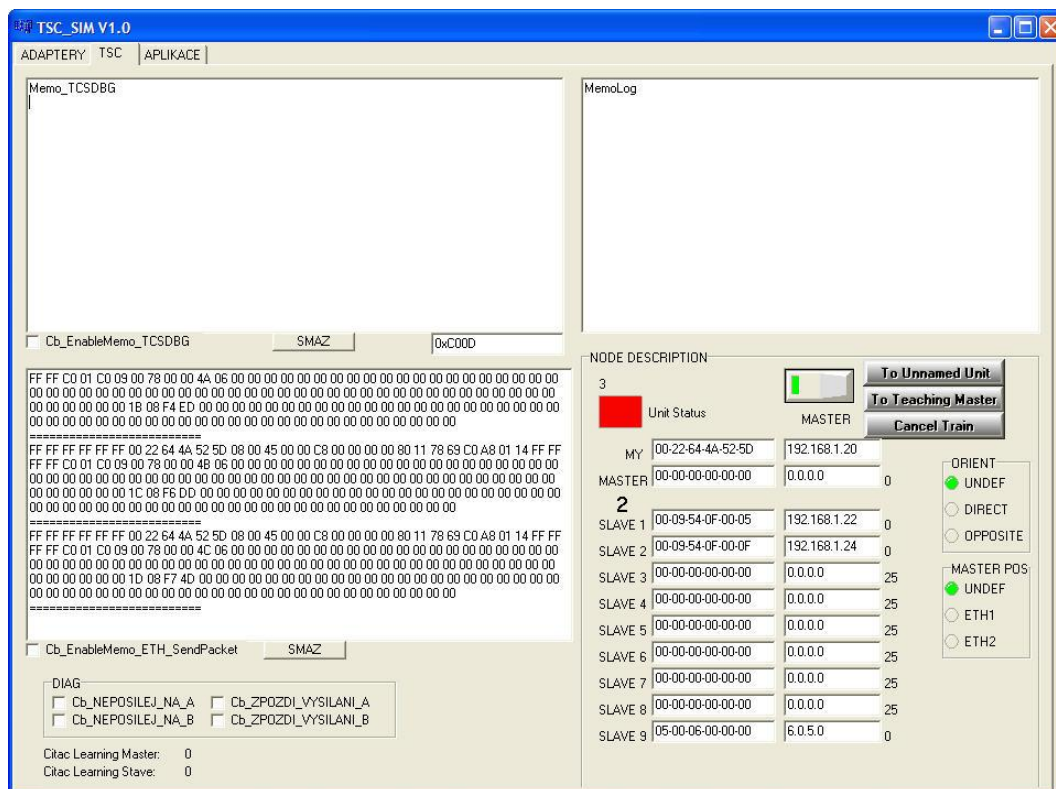
Vývojové nástroje pro jednotku CETVCE dodané firmou AmiT s.r.o. neposkytují dostatečné prostředky pro ladění zdrojového kódu. Z tohoto důvodu pro ladění a testování algoritmů aplikačního programu jednotky CETVCE vznikl ve spolupráci s firmou Cegelec a.s. program **TCS_SIM**. Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Builder C++ verze 6, který nabízí standardní nástroje pro ladění programu, jako jsou např. debugger včetně krokování programu, zobrazení aktuálních hodnot proměnných, RAM monitor, apod. Uživatelské

rozhraní programu TCS je zobrazeno na obr. 7.13 a obr. 7.14. Na prvním obrázku je zachycen výpis Ethernet rámců probíhající komunikace jednotky na mezivozové sběrnici. Na druhém obrázku je zobrazena záložka pro ladění TCS modulu a jím realizované inaugurace sběrnice.

Program **TCS_SIM** využíval stejný zdrojový kód jako jednotka CETVCE, který byl pouze doplněn o modul pro zobrazení uživatelského rozhraní programu, emulace procesů LCS knihovny a ovladačem Ethernet řadičů. Ostatní kód byl psán tak, aby šel přeložit jak v Builder C++, tak překladačem pro procesor ST10F269 použitý v jednotce CETVCE. Program **TCS_SIM** je tedy softwarovým emulátorem jednotky CETVCE.



Obr. 7.13 Uživatelské rozhraní programu **TCS_SIM** – modul **ETH**



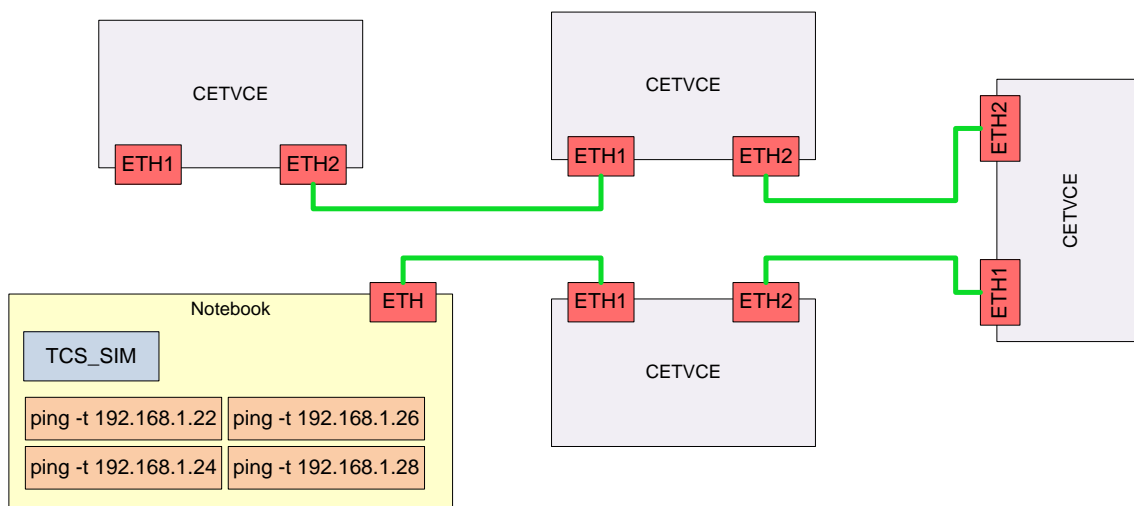
Obr. 7.14 Uživatelské Uživatelské rozhraní programu TCS_SIM – modul TCS

Pomocí tohoto programu byly odladěny algoritmy modulu TCS a část algoritmů modulu ETH, včetně jejich vzájemné spolupráce. Ostatní algoritmy již byly odladěny přímo s jednotkou CETVCE pomocí výše uvedených nástrojů.

7.5 Testování jednotky CETVCE

7.5.1 Testování „Virtuálního propojení konektorů mezivozové sběrnice“ jednotky CETVCE

Testování virtuálního propojení konektorů bylo provedeno pomocí utility **Ping**. Zkušební sestava obsahovala čtyři jednotky CETVCE a notebook s programem TCS_SIM. Zapojení zkušební sestavy je zobrazeno na obr. 7.15.



Obr. 7.15 Zapojení zkušební sestavy pro testování virtuálního propojení konektorů

Pomocí programu *TCS_SIM* se provedla inaugurace mezivozové sítě, aby se jednotkám CETVCE přiřadila unikátní IP adresa. Na notebooku se spustila čtyřikrát utilita **Ping** s parametrem `-t` a IP adresami jednotlivých komunikačních uzlů. Utilita **Ping** vysílá ICMP paket typu Ping, na který jednotka CETVCE odpoví. Utilita **Ping** po ukončení provede analýzu úspěšnosti počtu doručení odpovědí (ukázka utility **Ping** s výpočtem statistiky úspěšnosti je na obr. 7.16). Jako kritérium přijatelnosti byla definována úspěšnost doručení odpovědí na dotaz větší než 98% za 24 hodin testování. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 7.6. Požadovaná hodnota úspěšnosti doručení odpovědí se podařila splnit.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - ping -t 192.168.1.24
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Statistika ping pro 192.168.1.24:
Pakety: Odeslané = 345, Přijaté = 345, Ztracené = 0 (ztráta 0%),
Přibližná doba do přijetí odezvy v milisekundách:
Minimum = 2ms, Maximum = 99ms, Průměr = 3ms
Ctrl+Break
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=4ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=2ms TTL=128
Odpověď od 192.168.1.24: bajty=32 čas=3ms TTL=128

```

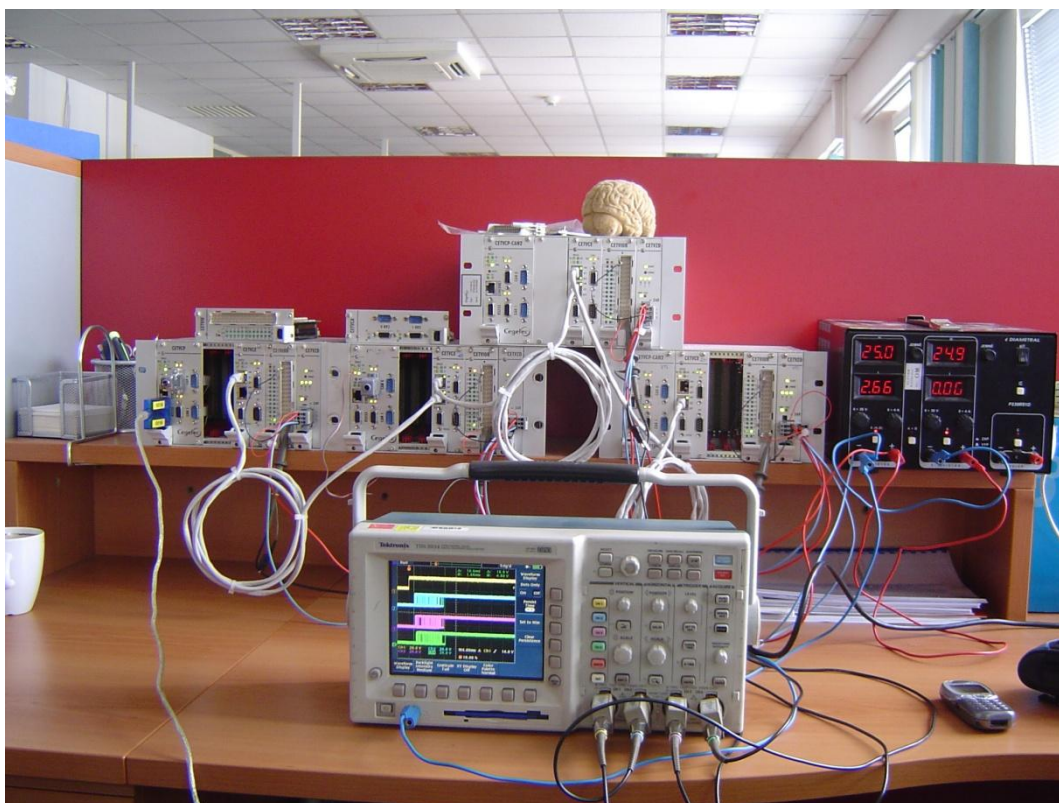
Obr. 7.16 Ukázka utility Ping

IP adresa	Celkový počet odeslaných dotazů	Úspěšnost doručení odpovědí	Průměrné zpoždění doručení odpovědí
192.168.1.22	81382	99,69 %	5 ms
192.168.1.24	80498	99,72 %	6 ms
192.168.1.26	78354	99,33 %	9 ms
192.168.1.28	77842	99,26 %	10 ms

Tab. 7.6 Výsledky testování virtuálního propojení konektorů

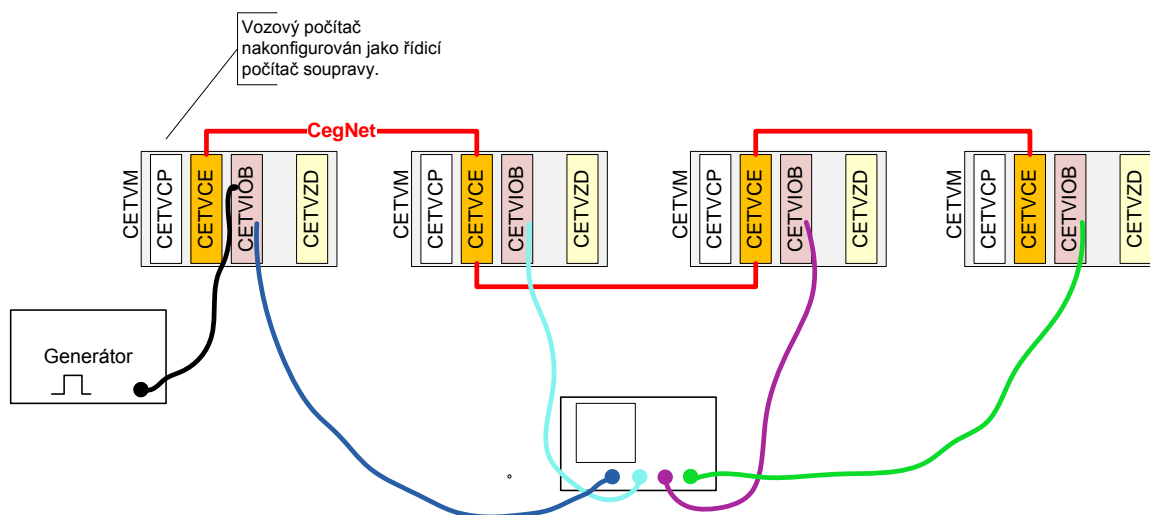
7.5.2 Test zpoždění přenosu dat

Tento test byl realizován jako systémový test včetně přenosu dat mezi jednotkou CETVCE a CETVCP (procesorová karta centrálního vozového počítače). Cílem testu bylo zjistit maximální zpoždění při předávání dat z jednoho vozového počítače do druhého přes vyvinutou mezivozovou sběrnici CegNet. Tento údaj je klíčový pro budoucí návrh architektury softwaru vozidla využívající tento způsob přenosu dat mezi vozidly soupravy.



Obr. 7.17 Fotografie zkušební sestavy pro testování zpoždění přenosu dat

Pro tento test byly sestaveny čtyři vozové počítače CETVM. Každý počítač obsahoval jednotky CETVCP, CETVIQB, CETVCE a CETVZD⁴¹. Tyto počítače byly pospojovány pomocí sběrnice CegNet. Testovací sestava je zobrazena na fotografii na obr. 7.17. Jeden z vozových počítačů byl pomocí podmíněného překladač aplikací SW jednotky CETVCP vybrán jako řídicí počítač simulované soupravy čtyř vozidel. Zapojení zkušební sestavy je zobrazeno na obr. 7.18.



Obr. 7.18 Zapojení zkušební sestavy pro testování zpoždění přenosu dat

Aplikační SW jednotek CETVCP vysílá přes jednotku CETVCE na mezivozovou sběrnici vždy jednu zprávu **VCP QMsg** a jednu zprávu **VCP Msg** (viz. tab. 7.3) s periodou vysílání 20 ms pro zprávu **VCP QMsg** a 100 ms pro zprávu **VCP Msg**. Ve zprávě **VCP QMsg** je vysílán stav digitálních vstupů jednotky CETVIQB. Ostatní datové wordy zprávy mají náhodný obsah. Struktura vysílaných zpráv je uvedena v příloze číslo 12.3.

Jednotka CETVIQB řídicího počítače soupravy má na svůj vstup DI03 připojen generátor pulzů, který generuje obdélníkový signál s periodou 200 ms. Stav vstupů je jednotkou CETVCP čten s periodou vzorkování 20 ms. Po přečtení je sestavena zpráva **VCP QMsg**. Datová část zprávy je doplněna kontrolním čítačem a zabezpečena kontrolním součtem. Po výpočtu kontrolního součtu je zpráva předána přes DPM jednotce CETVCE k odeslání.

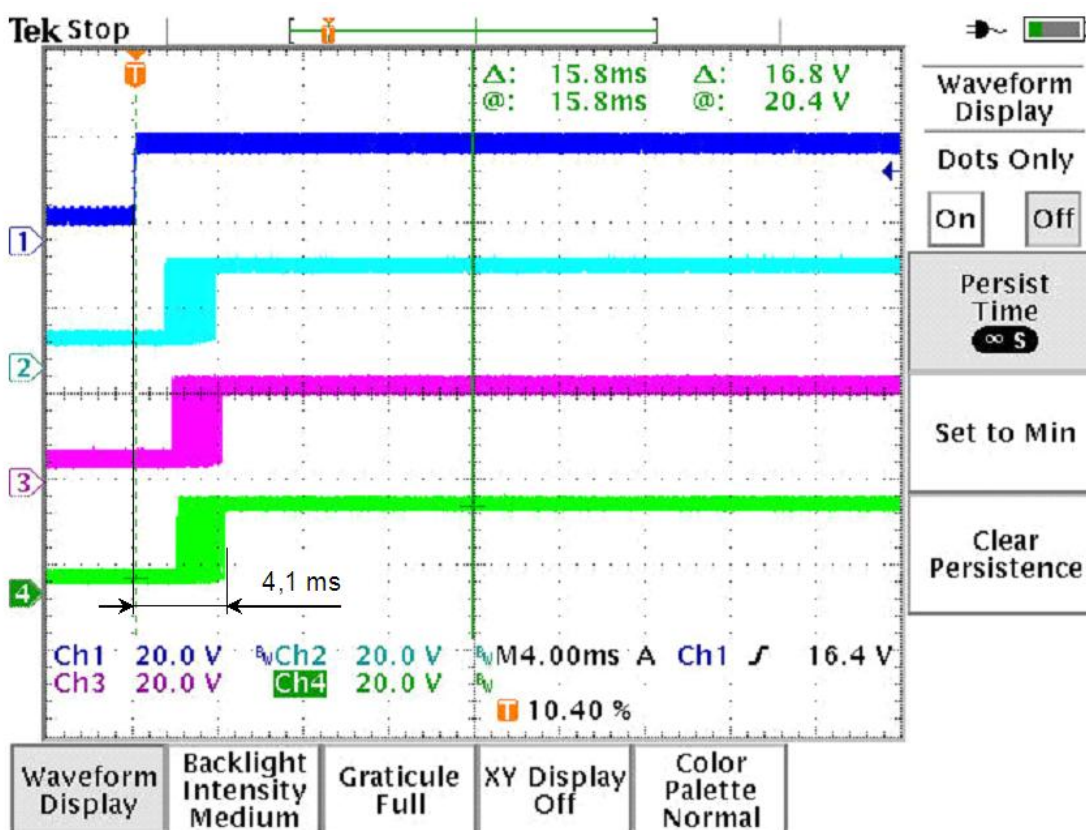
⁴¹ CETVIQB – jednotka vstupů a výstupů (2 x AI, 20 x DI, 8 x DO).

CETVZD – jednotka zdrojů pro napájení karet vozového počítače CETVM.

Pokud je jednotka CETVCP v řídicím počítači soupravy, ihned po odeslání zprávy **VCP QMsg** do DPM nastaví stav výstupů jednotky CETVIOB podle stavu prvních osmi vstupů právě odeslaných ve zprávě.

Jednotka CEPVCP v řízených počítačích ovládá výstupy jednotky CETVIOB podle stavu vstupů zaslaných řídicím počítačem soupravy.

K výstupům jednotky CETVIOB jsou připojeny sondy osciloskopu. Na osciloskopu je zapnut perzistentní mód zobrazování a je synchronizován na vzestupnou hranu signálu z výstupu řídicího počítače soupravy. Oscilogram z měření je zobrazen na obr. 7.19. Barvy stop na oscilogramu odpovídají barvám na obr. 7.18.



Obr. 7.19 Oscilogram z testování zpoždění přenosu dat (sondy osciloskopu jsou připojeny na výstupy jednotek CETVIOB; barvy stop odpovídají barvám na obr. 7.18)

Z časového posunu náběžných hran signálů lze přímo určit zpoždění zpracování dat posílaných mezi řídicím a řízeným počítačem soupravy včetně přenosu přes DPM s kontrolou platnosti dat pomocí kontrolního součtu a čítače zpráv. Maximální zpoždění zachycené na oscilogramu je 4,1 ms. Tato hodnota je pro potřeby řízení vozidla akceptovatelná.

7.5.3 Test stability systému

Jednalo se o dlouhodobý test, při kterém se sledoval výpadek komunikace na mezivozové sběrnici. Výpadek komunikace byl definován jako ztráta tří po sobě vysílaných zpráv. U každé přijaté zprávy se kontrolovala změna čítače zpráv a kontrolní součet. Zapojení zkušební sestavy bylo stejné jako v případě testování zpoždění uvedené na obr. 7.18 pouze s tím rozdílem, že nebyl připojen generátor ani osciloskop. Aplikační SW jednotek CETVCP byl upraven pro počítání výpadků komunikace.

Během týdenního testování nebyl zaznamenán jediný výpadek komunikace.

7.5.4 Certifikace podle ČSN EN 50 155

Norma ČSN EN 50 155 definuje požadavky na elektronická zařízení pro drážní kolejová vozidla, mezi která patří i tramvajové vozy. Pro ověření těchto požadavků je v normě seznam zkoušek, které musí testované zařízení během certifikace absolvovat. Zkoušení samotné jednotky CETVCE by bylo poměrně obtížně realizovatelné, protože některé části (např. napájecí zdroje) nejsou součástí jednotky. Proto se jednotka testovala jako součást řídicího počítače CETVM. Pro zkoušení se použila upravená zkušební sestava pro testování zpoždění přenosu dat, zobrazená na obr. 7.18. Úprava spočívala pouze v použití dvou počítačů CETVM místo čtyř. Certifikace proběhla v EZÚ Praha⁴².

8. Nasazení nového řešení mezivozové komunikace na vozidlo

Nové řešení mezivozové komunikace navržené v této disertační práci využívající Ethernet jako mezivozovou sběrnici je v současné době úspěšně otestováno a použito ve dvou projektech. Jedná se o tramvajová vozidla LF2 provozovaná dopravním podnikem města Brno a modernizovaná tramvajová vozidla GT6 – 94ER provozovaná dopravním podnikem Berlín. Oba projekty požadují spřahování vozidel do dvou vozových souprav. Řídicí počítače vozidel jsou v soupravě propojeny nově navrženou a vyvinutou komunikační sběrnici CegNet pomocí jednotek CETVCE.

8.1 Vozidlo LF2 Brno

Vůz LF2 (viz. obr. 8.1) je dvoučlánkový jednosměrný, částečně nízkopodlažní vůz vybavený řídicím systémem CECOMM. Jedná se o první projekt, kde byla vyvinutá jednotka CETVCE otestována a použita. Z tohoto důvodu byl požádán výrobce vozidla, provozovatel

⁴² Elektrotechnický zkušební ústav v Praze.

a drážní úřad o možnost širšího testování řešení komunikace vozidel v soupravě než bylo nutné pro schválení vozidla do provozu. Zejména se jednalo o možnost spřažení většího počtu vozidel do soupravy a simulaci některých poruchových stavů při zkušebních jízdách.



Obr. 8.1 Souprava dvou vozů LF2

Základní parametry řešení mezivozové komunikace jsou shrnuty v tab. 8.1. Jednotka CETVCE je součástí řídicího počítače vozidla CETVM/N, který je umístěn v rozvaděči za stanovištěm řidiče. Požadavky na přenos informací mezi jednotlivými vozovými počítači byly definovány projektantem vozidla. Řídicí vůz soupravy (MASTER) vysílá:

- Zadání poměrného jízdního a brzdného tahu.
- Stav vstupů od základních ovládacích prvků řidiče (přepínač směru, tlačítko "mrtvého muže", vypínače protiskluzové ochrany, tlačítko výhybky, tlačítko mycího stroje, apod.).
- Ovládání topení a osvětlení v prostoru pro cestující.
- Ovládání dveří a plošiny.

Řízený vůz (SLAVE) pak vysílá tyto stavové informace:

- Stav kontaktů mechanických brzdíčů.
- Zásah smykové/skluzové ochrany jednotlivě od všech podvozků.
- Diagnostické informace obvodu mechanických brzd, kolejnicových brzd a trakce (zásahy SW a HW ochran, diagnostika linkových stykačů atd.)
- Diagnostické informace měniče pro napájení pomocných pohonů.

Z uvedených seznamů je zřejmé, že po mezivozové sběrnici se v tomto projektu požaduje přenos pouze řídicích a stavových informací. Tato data jsou periodicky přenášena

s intervalem vysílání 20 ms jak pro řízený, tak pro řídicí vůz. Přenos diagnostických dat v tomto projektu nebyl požadován. Pro přenesení požadovaného objemu dat stačí vysílat na mezivozovou sběrnici pouze jednu zprávu (přes VME sběrnici jsou data přenášena zprávou *QMsg*).

Max. počet komunikačních uzlů (vozidel v soupravě):	2
Délka segmentu CegNet (délka Ethernet kabelu mezi jednotkami CETVCE):	38,4 m
Počet konektorů v segmentu CegNet:	8
Přenosová rychlost CegNetu	10 Mbit/s
Počet zpráv vysílaných MASTER / SLAVE:	1 / 1
Perioda vysílání zpráv MASTER / SLAVE:	20 ms / 20 ms

Tab. 8.1 Základní parametry mezivozové komunikace – LF2 Brno

8.1.1 Testování mezivozové komunikace

Během provádění zkoušek potřebných pro schválení vozidla do provozu vznikl dostatečný časový prostor pro realizaci doplňujících funkčních testů systému mezivozové komunikace, které lze obtížně realizovat mimo vozidlo. Zejména se jednalo o sledování jakosti chodu celé soupravy (např. nežádoucí rázy při prudké změně jízdního režimu) a odolnost mezivozové komunikace vůči elektromagnetickému rušení, které generují trakční střídače, a zvýšení přenosové rychlosti na 100 Mbit/s.

Pro sledování výpadků komunikace byl aplikační software jednotky CETVCE doplněn o funkci umožňující po rozhraní RS232 vypsát stav chybových registrů Ethernet radičů. Do těchto registrů radiče zapisují např. počet přijatých zpráv se špatným CRCem, počet kolizí při vysílání apod. Během zkušebních jízd se tak mohl sledovat jak výpadek zpráv na aplikační úrovni pomocí kontrolního čítače vysílaného v každé zprávě, tak sledováním těchto registrů. Výsledky testování jsou shrnuty v tab. 8.2.

Doba zkušební jízdy	Počet chyb čítače zpráv		Počet chyb zachycených v registrech	
	MASTER	SLAVE	MASTER	SLAVE
3,5 hod.	0	0	0	0
6 hod.	0	0	0	0
6 hod.	0	0	0	0

Tab. 8.2 Výsledky testování sběrnice CegNet dvou vozové soupravy LF2

Po ukončení zkušebních jízd bylo možné konstatovat, že nedochází k výpadkům komunikace ani při maximálních proudech a výkonech trakčních střídačů. Dále bylo potvrzeno, že zpoždění přenosu dat po mezivozové komunikaci negativně neovlivňuje chování soupravy ani při rychlých změnách požadovaného zadání tahu trakčních pohonů.

8.1.2 Testování tří vozové soupravy vozidel

U dvou vozové soupravy nelze provést test poruchy jednotky mezivozové komunikace uprostřed sběrnice. Z tohoto důvodu byl po konzultaci s provozovatelem vozidel požádán drážní úřad o povolení mimořádné zkušební jízdy s tří vozovou soupravou. Během této jízdy byla simulována porucha jednotky CETVCE v prostředním voze soupravy. Pro obnovení komunikace na mezivozové sběrnici porouchaná jednotka propojila svoje konektory pomocí relé R2 znázorněného na obr. 6.2 resp. obr. 7.1 a souprava dále pokračovala v jízdě pouze s upravenou konfigurací, kdy prostřední vůz byl nouzově odbrzděn a nereagoval na pokyny řídicího vozidla. Na obr. 8.2 je zachycena souprava během noční zkušební jízdy po městě Brno.



**Obr. 8.2 Tří vozová souprava vozů LF2 při zkušební jízdě po městě Brno
(foto: J. Černý)**

Během jízdy se simulovanou poruchou jedné jednotky CETVCE opět nedocházelo k výpadkům komunikace a sběrnice byla dále schopna přenášet data mezi krajními vozy soupravy. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 8.3. Tento test tedy potvrdil správnost řešení poruchy jednotky pomocí hardwarového propojení konektorů mezivozové sběrnice relátky.

Doba zkušební jízdy	Počet chyb čítače zpráv		
	MASTER	SLAVE 1	SLAVE 2
3 hod.	0	0	0
0,5 hod.	0	--- ⁴³	0

Tab. 8.3 Výsledky testování sběrnice CegNet tří vozové soupravy LF2

8.2 Vozidlo GT6 – 94 ER Berlín



Obr. 8.3 Vozidlo GT6 Berlín

Vozidla GT6 – 94 ER (viz. obr. 8.3) jsou tříčlánkové nízkopodlažní jednosměrné vozy vyrobené v roce 1994 až 1996 firmou AEG. Tyto vozy jsou od roku 2010 postupně modernizovány firmou Cegelec. Součástí modernizace je i nahrazení původního řídicího systému vozidla systémem CECOMM. Vzhledem k tomu, že vozy jsou opět provozovány ve dvou vozových soupravách, je řídicí počítač vozidla vybaven kartou CETVCE pro zajištění mezivozové komunikace v soupravě pomocí nové sběrnice CegNet⁴⁴. Sběrnice CegNet tak nahradila původní řešení mezivozové komunikace realizované pomocí redundantní sběrnice RS485 s přenosovou rychlostí 500 kb/s. Jelikož výměna komunikačních kabelů mezivozové

⁴³ Jednotka byla během testu vypnuta.

⁴⁴ Obchodní název pro mezivozovou sběrnici vyvinutou ve spolupráci s firmou Cegelec a.s.

sběrnice by byla velice náročná, požadoval projektant rekonstrukce vozidla pro propojení jednotek CETVCE zachování původních kabelů. Tyto kabely však nesplňovaly požadavky na frekvenční parametry definované pro standard Fast Ethernet 100Base – TX. Z tohoto důvodu byla přenosová rychlost nasazené CegNet sběrnice snížena na 10 Mbit/s.

Na rozdíl od projektu LF2 Brno je rozsah použití mezivozové komunikace podstatně větší. V tomto projektu jsou po sběrnici CegNet přenášeny jak řídicí a stavové informace, tak diagnostická data. Pro přenos dat se tedy využívá obou zpráv, které podporuje jednotka CETVCE. Ve zprávách s vyšší prioritou zpracování (na VME sběrnici zprávy *QMsg* viz. kap. 7.3.2) jsou přenášena řídicí a stavová data, jako jsou například:

- Požadovaný poměrný tah motorů.
- Referenční rychlost vozidla.
- Podmínky souhlasu s jízdou.
- Ovládání topení, osvětlení a dveří.
- Ovládání pantografu.
- Stavové informace obvodu topení (např. požadavek na dochlazení při vypnutí vozidla).
- Hlášení stavu mechanických brzd.
- Počet nouzově odbrzděných podvozků.
- Počet zapnutých trakčních měničů.
- Evidenční číslo vozu.

Tyto zprávy jsou přenášeny periodicky po 20 ms.

Ve zprávách s nižší prioritou zpracování (na VME sběrnici zprávy *Msg* viz. kap. 7.3.2) se z řízeného vozidla do řídicího přenáší seznam aktivních aplikačních poruch a obráceným směrem jsou posílány příkazy pro práci s aplikačními poruchami řízeného vozidla (např. povel kvitace poruchy řidičem, reset počítadla výskytu aplikační poruchy, apod.). Tyto zprávy jsou přenášeny jak periodicky (stav aplikačních poruch), tak jako reakce na událost (např. kvitace aplikační poruchy řidičem).

9. Závěr

Rostoucí požadavky na kvalitu a nové vlastnosti diagnostiky vozidla (např. expertní systém analýzy poruch založený na bezdrátovém přenosu informací z vozidla) a nové požadavky na algoritmy řízení vozidel, včetně jejich interakce se systémy řízení dopravy či komplexními technologiemi SmartCity, narážejí na hranice možností současných řídicích systémů. Nejvíce limitujícím faktorem je nízká datová propustnost používaných komunikačních sběrnic typu fieldbus (CAN, RS485), které již nestačí svojí přenosovou kapacitou reagovat na neustále se zvyšující požadavky na objem přenášených dat. Řešení tohoto problému bylo jedním z cílů této práce. Výsledkem první části této disertační práce je nalezení vhodné sběrnice jako náhrady za současná řešení a rozpracování návrhů nových topologií nadřazených řídicích systémů pro městská kolejová vozidla.

Další části této disertační práce reagují na potřeby nalézt vhodné řešení pro komunikaci centrálních počítačů nadřazených řídicích systémů ve vícevozových soupravách městských kolejových vozidel. Cílovou skupinou použití nového řešení představeného v této práci jsou hlavně tramvajové vozy, kde není použití sběrnice WTB používané v železničních vozidlech zcela výhodné. Významným výsledkem této práce je návrh nového řešení komunikace ve vícevozových tramvajových soupravách a vývoj prototypu nového komunikačního uzlu. Navržené řešení komunikace ve vícevozových soupravách bylo otestováno a úspěšně nasazeno již na dvou projektech tramvají pro města Brno a Berlín.

Hlavní přínos práce lze shrnout do následujících bodů:

- Detailní analýza a komplexní popis současného stavu nadřazených řídicích systémů městských kolejových vozidel. Na rozdíl od jiných odvětví využívajících řídicí systémy, jsou řídicí systémy vozidel málo zdokumentovány a je obtížné najít odbornou literaturu popisující tuto oblast.
- Návrh nové sběrnice pro řídicí systém vozidel. Navrhované řešení s využitím průmyslového Ethernetu jako nové sběrnice řídicího systému umožní svojí přenosovou kapacitou sjednotit řídicí a servisní komunikaci do jedné sběrnice při zachování požadavků na přenos dat v reálném čase.
- Konkrétní návrhy topologie řídicího systému s využitím průmyslového Ethernetu standardu Ethernet Powerlink. Tento standard je vybrán záměrně pro svoji podobnost se standardem CANOpen používaným na vozidlech se sběrnici CAN. Navržené topologie lze ale zobecnit pro jakýkoli standard průmyslového Ethernetu.

- Analýzy řešení poruchových stavů na sběrnici pro jednotlivé navržené topologie řídicího systému.
- Návrh nového řešení komunikace řídicích systémů (mezivozové komunikace) ve vícevozových soupravách s použitím Ethernetu jako náhrady za sběrnici WTB. Navržené řešení je určeno pro městská kolejová vozidla – tramvaje.
- Vývoj prototypu nového komunikačního uzlu a celé mezivozové komunikace. Vývoj a výroba prototypu probíhaly ve spolupráci s firmami Cegelec a.s. a AmiT s.r.o.
- Industrializace, otestování a úspěšné nasazení nově navržené mezivozové komunikace, která nese obchodní označení CegNet, na dvou projektech tramvajů pro města Brno a Berlín. Obě vozidla úspěšně prošla homologačními testy a jsou již v pravidelném provozu s cestujícími.

Perspektivní směry dalšího výzkumu v návaznosti na prezentované výsledky této disertační práce spatřuji především v následujících oblastech:

- hledání nových přístupů řešení diagnostiky a vzdáleného monitoringu vozidla,
- unifikace nasazení a optimalizace topologie sítě průmyslového Ethernetu na vozidla,
- další rozvoj použití Ethernetu jako sběrnice pro mezivozovou komunikaci s cílem vytvořit podklady pro širší používání tohoto řešení,
- návrh nových algoritmů řízení vozidel umožněných nasazením nového nadřazeného řízení a mezivozové komunikace představené v této práci, včetně výzkumu a vývoje algoritmů interakce vozidla se systémy řízení dopravy a komplexními technologiemi SmartCity.

10. Literatura

- [1] Cegelec a.s., [Online]. Available: <http://www.cegelec.cz>.
- [2] „Siemens Mobility References,“ Siemens Mobility, [Online]. Available: <http://www.mobility.siemens.com/apps/references/index.cfm>.
- [3] „Willkommen bei Vossloh Kiepe,“ Vossloh Kiepe, [Online]. Available: <http://www.vossloh-kiepe.com>.
- [4] „Rail Control Solutions - Transportation Systems - Bombardier,“ Bombardier, [Online]. Available: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions.html>. [Přístup získán 2010].
- [5] S. Marian, M. Bilic a K. Ivanus, „CANopen implementation in the Zagreb tramcar,“ [Online]. Available: <http://www.can-cia.de/fileadmin/cia/files/icc/11/marijan.pdf>.
- [6] „Metro Munich C1 Car,“ [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/101141878/MVB-Siemens-e4-TCN>.
- [7] „Selectron - Automation for rail vehicles,“ [Online]. Available: <http://www.selectron.ch/downloads/kataloge/flyers/E/Image-Brochure-EN.pdf>.
- [8] P. Bárta a J. Tichý, „Řídicí systém na tramvajových vozech,“ Česká elektrotechnická společnost, Elektrické pohony 2007, Plzeň, 2007.
- [9] K. Wörner, „CANOpen vehicle control for streetcars and trolley-busses,“ <http://www.can-cia.org>, 2003.
- [10] „Integration der OBU in das FIS Einbau und Schnittstellen beshreibung,“ Berlin BVG, Straßenbahn, 2010.
- [11] „SIBAS 32 - The control system for all rail vehicles,“ [Online]. Available: http://www.mobility.siemens.com/en/data/pdf/sonstiges/sibas/siemens_sibas_32_en.pdf.
- [12] P. Bárta a J. Tichý, „Aplikace řídicího systému CECOMM na trakčním vozidle GT6 Berlín,“ Česká elektrotechnická společnost, Elektrické pohony 2011, Plzeň, 2011.

- [13] U. Kucharzyk a R. Shingler, „Intelligent Trains - Parts of a Smart Railway,“ <http://www.bitkom.org>, Berlín, 2007.
- [14] „Bombardier MVB Porto Reference,“ [Online]. Available: http://www.initag.de/share/projects/en/Porto_Reference.pdf. [Přístup získán 2010].
- [15] P. Příbyl a M. Svítek, Inteligentní dopravní systémy, Praha: Technická literatura BEN, 2001.
- [16] „Sdružení dopravní telematiky,“ [Online]. Available: <http://www.sdt.cz>.
- [17] „Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/40/EU,“ 6 Srpen 2010. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:207:0001:0013:CS:PDF>. [Přístup získán 20 Červen 2013].
- [18] „APEX sro - Výrobce a dodavatel dopravních, řídicích a informačních systémů,“ APEX s.r.o, [Online]. Available: <http://www.apex-jesenice.cz>. [Přístup získán 20 Duben 2012].
- [19] „ELTODO - Doprava a infrastruktura,“ ELTODO, [Online]. Available: <http://www.eltodo.cz/produkty-a-sluzby/doprava-a-infrastruktura.html>. [Přístup získán 6 Květen 2013].
- [20] „Unternehmen - ATRON,“ ATRON electronic GmbH, [Online]. Available: <http://www.atron.de>. [Přístup získán 20 Duben 2012].
- [21] L. Tao, T. Jiang a X. Zhang, „A solution for Ethernet-based real-time communication network of Distributed Numerical Control system,“ v *Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009), International*, 2009.
- [22] F. Zezulka a O. Hynčica, „Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision Time,“ *AUTOMA*, č. 2, pp. 17-19, 2010.
- [23] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet IV: Principy průmyslového Ethernetu,“ *AUTOMA*, sv. 13, č. 10, pp. 57-60, 2007.
- [24] C. Rojas a P. Morel, „Guidelines for Industrial Ethernet infrastructure implementation: A

- control engineer's guide," v *Cement Industry Technical Conference, 2010 IEEE-IAS/PCA 52nd*, 2010.
- [25] A. Lüder a K. Lorentz, „IAONA Handbook - Industrial Ethernet - 2nd edition,“ IAONA, Magdeburg, 2005.
- [26] K. Erwinski, M. Paprocki, L. Grzesiak, K. Karwowski a A. Wawrzak, „Application of Ethernet Powerlink for Communication in a Linux RTAI Open CNC system,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, sv. 60, č. 2, pp. 628-636, 2012.
- [27] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet VII: Přehled současných standardů,“ *AUTOMA*, sv. 14, č. 2, pp. 26-29, 2008.
- [28] P. Krist, *Moderní principy průmyslových komunikací [disertační práce]*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [29] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet VIII: Ethernet Powerlink, Profinet,“ *AUTOMA*, sv. 14, č. 5, pp. 62-66, 2008.
- [30] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet III: Fyzické provedení sítě Ethernet,“ *AUTOMA*, sv. 13, č. 6, pp. 40-44, 2007.
- [31] „Industrial Ethernet Planning and Installation Guide - 4.0,“ IAONA, Magdeburg, 2003.
- [32] C. Gassel, „Enhanced transport quality and tramway energy efficiency by multi-modal traffic management systems,“ [Online]. Available: http://www.polisnetwork.eu/uploads/Modules/PublicDocuments/Enhanced_transport_quality_and_tramway_energy_efficiency_by_multi-modal_traffic_management_systems,Christian%20Gassel,Dresden_University_of_Technology.pdf. [Přístup získán 10 08 2012].
- [33] A. Lüder a K. Lorentz, „IAONA Handbook - Network security,“ IAONA, Magdeburg, 2005.
- [34] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet VI: Informační bezpečnost,“ *AUTOMA*, sv. 14, č. 1, pp. 58-62, 2008.

- [35] A. Vojáček, „Auto-Negotiation = automatické nastavení Ethernet komunikace,“ *Automatizace.hw.cz*, 2006. [Online]. Available: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006053001>. [Přístup získán 21. 09. 2012].
- [36] Vosáhlo, Martin,; „LCSE - Knihovna pro jednotku CETVCE (Programátorská příručka),“ *AmiT s.r.o.*, 2008.
- [37] L. Davis, „VME Bus Description, Pinout and VME Standards information,“ [Online]. Available: http://www.interfacebus.com/Design_Connector_VME.html. [Přístup získán 10. 06. 2012].
- [38] M. Flídr, „Počítačové systémy - Vnitřní sběrnice,“ *Západočeská Univerzita v Plzni*, 2007.
- [39] „SMSC LAN91C111 rev.B - datasheet,“ [Online]. Available: http://www.smcs.com/media/Downloads_Public/Data_Sheets/91c111.pdf.
- [40] P. Husa a J. Tichý, „Technické podmínky distribuovaného řídicího systému CECOMM,“ *Praha*, 2008.
- [41] P. Krist, „ETHERNET Powerlink aneb fieldbus druhé generace,“ *Sdělovací technika*, sv. 09, pp. 12 - 14, 2006.
- [42] IEC 61375 - 1, *Electric railway equipment - Train bus, Part 1: Train Communication Network*, 1999.
- [43] A. Pfeiffer, „Průmyslová síť Ethernet - srovnání sklidňuje,“ *Automatizace*, p. 99, 02 2006.
- [44] „CANOpen - Application Layer and Communication Profile, CiA Draft Standard 301 - Version 4.02,“ *CAN in Automation*, 2002.
- [45] H. Kirrmann a P. A. Zuber, „The IEC/IEEE Train communication network,“ *Micro, IEEE*, 2001.
- [46] „IPv4 - Wikipedie,“ [Online]. Available: <http://cs.wikipedia.org/wiki/IPv4>. [Přístup získán 30 10 2012].
- [47] „ST10F269 User's manual,“ [Online]. Available: www.st.com.
-

- [48] M. Kaňák, „Synchronizace času pomocí standardu IEEE 1588 [bakalářská práce],“
ČVUT FEL, Praha, 2011.
- [49] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet I: Historický úvod,“ *AUTOMA*, sv. 13, č.
1, pp. 41-43, 2007.
- [50] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet II: Referenční model ISO/OSI,“
AUTOMA, sv. 13, č. 3, pp. 86-90, 2007.
- [51] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet V: Bezpečná komunikace po Ethernetu,“
AUTOMA, sv. 13, č. 12, pp. 58-61, 2007.
- [52] F. Zezulka a O. Hynčica, „Průmyslový Ethernet IX: EtherNet/IP, EtherCAT,“ *AUTOMA*,
sv. 14, č. 10, pp. 60-64, 2008.

11. Seznam autorových prací

- [A1] BÁRTA P.; GERLICH J.: Zkoušky vozu GT6 94 - 98 Berlín se specificky uspořádaným pojezdem. Seminář - Vývoj a zkoušky v dopravní technice 2013, Pardubice. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera 2013, ISBN 978-80-7395-626-4.
- [A2] BÁRTA P.; TICHÝ J.: Aplikace řídicího systému CECOMM na trakčním vozidle GT6 Berlín. Elektrické pohony 2011, Plzeň. Česká elektrotechnická společnost 2011. ISBN 978-80-02-02308-1.
- [A3] TICHÝ J.; BÁRTA P.: Aplikace řídicího systému CECOMM na trakčních vozidlech. Elektrické pohony 2009, Plzeň. Česká elektrotechnická společnost 2009. s 93 – 98, ISBN 978-80-02-02151-3.
- [A4] BÁRTA P.; TICHÝ J.: Jednotka CETVCE pro mezivozovou komunikaci. Elektrické pohony 2009, Plzeň. Česká elektrotechnická společnost 2009. s. 89 – 92. ISBN 978-80-02-02151-3.
- [A5] TICHÝ J.; BÁRTA P.: Mezní stavy tramvajového vozu. Elektrické pohony 2007, Plzeň. Česká elektrotechnická společnost 2007. ISBN 978-80-02-01921-3.
- [A6] BÁRTA P.; TICHÝ J.: Řídicí systém na tramvajových vozech. Elektrické pohony 2007, Plzeň. Česká elektrotechnická společnost 2007. s. 125 – 130. ISBN 978-80-02-01921-3.
- [A7] PITTERMANN, M., DRÁBEK, P., FOŘT, J., BÁRTA, P. The distortion produced by the drive with double fed generator. In Proceedings of the 6th international conference Elektro 2006. Žilina: EDIS-Žilina University publishers, 2006. s. 150-151. ISBN: 80-8070-544-5
- [A8] PITTERMANN, M., FOŘT, J., DRÁBEK, P., BÁRTA, P. Power and control circuits for drive with double-fed machine. In Elektros ir valdymo technologijos - 2006. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2006. s. 184-188. ISBN: 9955-25-054-2
- [A9] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. Varianty regulace pohonu s dvojitě napájeným strojem s nepřímým měničem kmitočtu. In Kybernetika a informatika. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre kybernetiku a informatiku, 2005. s. 261-265.

- [A10] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. Posouzení kvality odběru (dodávky) energie pohonu s dvojitě napájeným strojem. In Elektrické pohony a výkonová elektronika. Brno: Vysoké učení technické, 2005. s. 118-122. ISBN: 80-214-3052-4
- [A11] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. The comparing of the distortion produced by the standard electric drive and the drive with double fed generator. In EMD 2005. Bialystok: Bialystok Technical University, 2005. s. 571-574. ISBN: 83-88229-97-4
- [A12] PITTERMANN, M., BÁRTA, P. The methods of control of the double-fed machine. In Electronics devices and systems. Brno: Vysoké učení technické, 2005. s. 460-465. ISBN: 80-214-2990-9
- [A13] PITTERMANN, M., JANDA, M., BÁRTA, P. Řídicí algoritmy pro pohon s dvojitě napájeným strojem s nepřímým měničem kmitočtu. In Elektrické pohony. Plzeň: Česká elektrotechnická společnost, 2005. s. 1-6. ISBN: 80-02-01733-1
- [A14] PITTERMANN, M., BÁRTA, P., FOŘT, J. Control circuits for the double fed generator with the indirect frequency generator. In Applied electronics 2004. Pilsen: University of West Bohemia, 2004. s. 178-181. ISBN: 80-7043-274-8
- [A15] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. Použití dvojitě napájeného stroje v energetice. In Elektroenergetika 2004. Praha: ČVUT, 2004. s. 1-4. ISBN: 80-239-3565-8
- [A16] PITTERMANN, M., BÁRTA, P. Using the double fed generator. In Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. Wrocław: Politechnika Wroclawska, 2004. s. 121-126. ISBN: 83-921315-0-9
- [A17] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. Indirect frequency converter for the supply of the double-fed machine. In 11th Electronics devices and systems conference 2004. Brno: University of Technology, 2004. s. 493-496. ISBN: 80-214-2701-9
- [A18] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. Dynamické vlastnosti pohonu s dvojitě napájeným strojem. In Elektrické pohony a výkonová elektronika. Brno: Vysoké učení technické, 2004. s. 213-218. ISBN: 80-214-2766-3
- [A19] PITTERMANN, M., FOŘT, J., BÁRTA, P. The using of double-fed machine for the minimizing of THD produced by electric drives. In EMD'2004. Vilnius: Vilnius

Gediminas Technical University, 2004. s. 75-78. ISBN: 9986-05-766-3

- [A20] BÁRTA, P., PITTERMANN, M. Řízení dvojitě napájeného stroje s nepřímým měničem kmitočtu v rotoru. In SYMEP 04. Praha: ČVUT, 2004. s. 5-8. ISBN: 80-01-03018-0
- [A21] PITTERMANN, M., BÁRTA, P. Indirect frequency converter for the supply of the rotor of the asynchronous motor. In Proceedings of the 5th international conference Elektro 2004. Žilina: Žilinská univerzita, 2004. s. 78-79. ISBN: 80-8070-252-7
- [A22] PITTERMANN, M., BÁRTA, P. Výkonová část pohonu s dvojitě napájeným strojem. In SYMEP 2004. Praha: ČVUT, 2004. s. 190-194. ISBN: 80-01-03018-0
- [A23] PITTERMANN, M.; BÁRTA, P.; FOŘT, J. Pohon s dvojitě napájeným strojem napájeným do rotoru z nepřímého měniče frekvence. In EPVE 2003. Brno: VUT Brno, 2003. s. 67-71. ISBN 80-214-2497-4.
- [A24] PITTERMANN, M.; BÁRTA, P. Drive with doubly-fed machine supplied into rotor by indirect frequency converter. In Applied Electronics 2003. Pilsen : University of West Bohemia, 2003. s. 169-172. ISBN 80-7082-951-6.
- [A25] PEROUTKA, Z.; BÁRTA, P.; CIBULKA, J.; ČENGERY, J. Control system for variable speed drives based on digital signal processor. In Applied Electronics 2003. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. s. 157-160. ISBN 80-7082-951-6.
- [A26] BÁRTA, P.; PEROUTKA, Z. Řízení napětového střídače digitálním signálovým procesorem. In Elektrotechnika a informatika 2003. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. s. 5-8. ISBN 80-7082-992-3.

Seznam realizovaných projektů nadřazeného řídicího systému tramvajových vozidel:

- RT6 N Praha (návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- K2S Bratislava (návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- K3R - NT Plzeň (návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- KT8D5 Plzeň (návrh architektury nadřazeného řízení, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- M31 Göteborg (návrh architektury nadřazeného řízení, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)

- MGT6D Halle (návrh architektury nadřazeného řízení, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- M8C Heidelberg (návrh architektury nadřazeného řízení, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- GT6 Berlín (návrh architektury nadřazeného řízení – autorský podíl 100%, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 50%)
- GT8N Freiburg (návrh architektury nadřazeného řízení – autorský podíl 100%, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 50%)

Seznam realizovaných projektů řídicího systému trolejbusů:

- SOLARIS Trollino 18AC Salzburg (návrh architektury nadřazeného řízení – autorský podíl 30%, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- SOLARIS Trollino 18AC Bologna (návrh architektury nadřazeného řízení – autorský podíl 30%, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- SOLARIS Trollino 18AC Eberswalde (návrh architektury nadřazeného řízení – autorský podíl 30%, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)
- SOLARIS Trollino 18AC Ancona (návrh architektury nadřazeného řízení – autorský podíl 30%, návrh algoritmů řízení - autorský podíl 100%)

12. Přílohy

12.1 Nastavení registrů LAN91C111 jednotky CETVCE

Registr: Bank1 – Control Register							Offset: C	
HIGH BYTE	Res.	RCV_BA D	Res.	Res.	AUTO RELEAS E	Res.	Res.	Res.
	0	0	0	0	1	0	0	0
LOW BYTE	LE ENABL E	CR ENABLE	TE ENABL E	Res.	Res.	EEPRO M SELECT	RELOA D	STOR E
	1	0	1	0	0	0	0	0

Registr: Bank0 – Receive Control Register							Offset: 4	
HIGH BYTE	SOFT RST	FILT CAR	ABORT_E NB	Res.	Res.	Res.	STRIP CRC	RXEN
	0	0	0	0	0	0	1	1
LOW BYTE	Res.	Res.	Res.	Res.	Res.	ALMUL	PRMS	RX_ ABORT
	0	0	0	0	0	0	0	0

Registr: Bank0 – Transmit Control Register							Offset: 0	
HIGH BYTE	SWFDUP	Res.	EPH LOOP	STP SQET	FDUPLX	MON_CSN	Res.	NOCRC
	1	0	0	0	0	1	0	0
LOW BYTE	PAD_EN	Res.	Res.	Res.	Res.	FORCOL	LOOP	TXENA
	1	0	0	0	0	0	0	1

Registr: Bank0 Receive/PHY Control Register							Offset: A	
HIGH BYTE	Res.	Res.	SPEED	DPLX	ANEG	Res.	Res.	Res.
	0	0	0	1	0	0	0	0
LOW BYTE	LS2A	LS1A	LS0A	LS2B	LS1B	LS0B	Res.	Res.
	0	0	0	1	0	0	0	0

Registr: Bank2 – Interrupt Mask & Status Register							Offset: C	
HIGH BYTE	MDINT MASK	ERCV INT MASK	EPH INT MASK	RX_OVR INT MASK	ALLOC INT MASK	TX EMPTY INT MASK	TX INT MASK	RCV INT MASK
	1	0	1	1	0	0	1	1
LOW BYTE	MDINT	ERCV INT	EPH INT	RX_OVR INT	ALLOC INT	TX EMPTY INT	TX INT	RCV INT
	0	0	0	0	0	0	0	0

PHY Registr: Control							Adresa: 0	
HIGH BYTE	RST	LPBK	SPEED	ANEG_EN	PDN	MII_DIS	ANEG_RST	DPLX
	0	0	0	0	0	0	0	0
LOW BYTE	COLST	Res.	Res.	Res.	Res.	Res.	Res.	Res.
	0	0	0	0	0	0	0	0

PHY Registr: Mask							Adresa: 19	
HIGH BYTE	MINT	MLNKFAIL	MLOSSSYN	MCWRD	MSSD	MESD	MRPOL	MJAB
	0	0	1	1	1	1	1	1
LOW BYTE	MSPDDT	MDPLDT	Res.	Res.	Res.	Res.	Res.	Res.
	1	1	0	0	0	0	0	0

12.2 Mapa DPM paměti jednotky CETVCE

Adresa	Operace	Popis
0x000	R	Registr TYPE_L - identifikace jednotky (dolní byte)
0x001	R	Registr TYPE_H - identifikace jednotky (horní byte)
0x002	R	Registr FPGA_L - verze firmwaru FPGA (dolní byte)
0x003	R	Registr FPGA_L - verze firmwaru FPGA (horní byte)
0x004	R, W	Registr WDG - ovládání Watchdogu jednotky
0x005	---	Rezerva
0x006	R	Registr DIPSW - obraz DIP přepínačů jednotky
0x007	R, W	Registr INV - kontrolní registr
0x008	R, W	Registr INT_IN0 – nastavení MSB ⁴⁵ tohoto registr vyvolá přerušení interního procesoru
0x009	R, W	Registr INT_IN1 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení interního procesoru
0x00A	R, W	Registr INT_IN2 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení interního procesoru
0x00B	R, W	Registr INT_IN3 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení interního procesoru
0x00C	R, W	Registr INT_OUT0 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení VME Master jednotky
0x00D	R, W	Registr INT_OUT1 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení VME Master jednotky
0x00E	R, W	Registr INT_OUT2 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení VME Master jednotky
0x00F	R, W	Registr INT_OUT3 – nastavení MSB tohoto registr vyvolá přerušení VME Master jednotky
0x010	R, W	Registr INT_SRC - reflektuje stav nejvyšších bitů registrů INT_INx a INT_OUTx
0x010 až 0x01F	---	Rezerva
0x020 až 0x03FF	R, W	Uživatelská část DPM paměti

⁴⁵ MSB (Most Significant Bit) – nejvýznamnější bit.

12.3 Struktura zpráv v DPM

Short Node Description

```
typedef struct {  
  byte    bMyStatus;  
  byte    bMyOrient;  
  byte    MyIPAddress_LSB;  
  byte    bSlavesFound;  
  byte    bLifeCitacMaster;  
  byte    bLifeCitacSlaveNotExpiredFlags;  
  byte    bLifeCitacSlaveNotLowFlags;  
  word    wCitacZprav;  
  word    wChecksum;  
  word    wTransferErrors;  
}st_NodeDescriptShort, *p_ShortNodeDescriptShort;
```

Node Description

```
typedef struct {  
  word    wMyStatus;  
  word    wMyOrient;  
  word    wMasterPosition;  
  dword   dwMyIPAddress  
  dword   dwMasterIP;  
  uETH_MAC MyMAC;  
  uETH_MAC MasterMAC;  
  BOOL16  ETH1_Link;  
  BOOL16  ETH2_Link;  
  BOOL16  NewNeighbor1;  
  BOOL16  NewNeighbor2;  
  word    wSlavesFound;  
  st_Topo aTopo[MAX_NUMBER_OF_SLAVES];  
  word    wLastCancelTrainReasonSent[3];  
  word    wCancelTrainCountSent;  
  dword   dwLastCancelTrainSourceRcv[3];  
  word    wLastCancelTrainReasonRcv[3];  
  word    wCancelTrainCountRcv;  
  word    wLifeCounterMaster;  
  word    wLifeCounterSlave[MAX_NUMBER_OF_SLAVES];  
  word    wCounterMsg;  
  word    wChecksum;  
  word    wTransferErrors;  
}st_NodeDescript, *p_NodeDescript;
```

QMsg

typedef struct

```
{  
  word wData[15];  
  word wCitacZprav;  
  word wChecksum;  
  word wTransferErrors;  
} st_QMessage, *p_QMessage;
```

Msg

typedef struct

```
{  
  word wData[21];  
  word wCitacZprav;  
  word wChecksum;  
  word wTransferErrors;  
} st_Message, *p_Message;
```

Command Msg

byte byCommand;

- bit 0: Požadavek na stav komunikačního uzlu: MASTER
- bit 1: Požadavek na zrušení sestavené sběrnice
- bit 2: Povolení generování přerušování na VME sběrnici
- bit 3: Rezerva
- bit 4: Rezerva
- bit 5: Rezerva
- bit 6: Povel rozsvítit diagnostickou LED na předním panelu jednotky
- bit 7: Požadavek na zaslání zprávy Node Description