

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering

Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Vozidlové distribuované systémy pro technologie x-by-wire

Vehicle Distributed Systems for X-by-Wire Technologies

Summary

X-by-wire technologies make it possible to remove common mechanical or hydraulic attachments in vehicle driving subsystems. Distributed systems provide a backbone for these technologies and therefore they are subject of much stronger requirements than are the distributed technologies used in today vehicles. Within several distributed system standards designed for x-by-wire applications, FlexRay seems to be the winning technology. Nevertheless, till now it is used only for less safety-critical applications in higher-class cars. FlexRay node implementation also covers a correct setting of the link layer protocol parameters, including those of distributed synchronization mechanism. To analyze its behavior, the mathematic model of the synchronization mechanism was designed and validated. The model allows to analyze its behavior at a presence of selected failures or when the parameterization is not correct and to design the methods to test these settings.

Souhrn

Technologie *x-by-wire* umožňují odstranění klasické mechanické či hydraulické vazby u subsystémů řízení vozidel. Distribuované systémy tvoří páteř těchto technologií a požadavky na ně kladené se značně liší od požadavků na současně používané vozidlové komunikační technologie. Z několika standardů distribuovaných systémů, které byly pro aplikace *x-by-wire* vyvinuty, se začíná prosazovat standard FlexRay, zatím však pouze v méně kritických úlohách ve vozidlech vyšších tříd. Součástí implementace uzlu sítě FlexRay je správné nastavení parametrů protokolu spojové vrstvy, jehož součástí je distribuovaný synchronizační mechanismus. Pro analýzu jeho chování byl vyvinut a následně validován matematický model synchronizačního mechanismu. Ten umožňuje studovat jeho chování v poruchových stavech nebo při chybné parametrizaci uzlů sítě a návrh metod pro testování této parametrizace.

Klíčová slova: vozidlové distribuované systémy, FlexRay, synchronizační mechanismus, *x-by-wire*

Keywords: vehicle distributed systems, FlexRay, synchronization mechanism, x-by-wire

Obsah

1. Úvod	6
2. Technologie x-by-wire	6
2.1 Požadavky na distribuované technologie pro x-by-wire	7
2.2 Distribuované technologie pro x-by-wire	8
3. Distribuovaný systém FlexRay	9
3.1 Základní funkční principy	9
3.2 Synchronizační mechanismus	10
4. Model synchronizačního mechanismu	11
5. Validace modelu	15
6. Využití modelu pro další výzkum	19
7. Zkušební vozidlo pro „x-by-wire“	19
8. Závěr	20
9. Literatura	21
10. Ing. Jiří Novák, Ph.D.	22

1. Úvod

Myšlenka nahradit existující mechanické či hydraulické vazby v systémech řízení silničních vozidel systémy elektromechanickými, souhrnně nazývanými *x-by-wire*, není nijak nová a objevuje již několik desítek let. Ačkoliv například v letecké technice se obdobné technologie, souhrnně označované jako *fly-by-wire*, již rutinně nasazují, v oblasti silničních vozidel k tomuto zlomu ještě nedošlo. Základní příčinou tohoto stavu jsou vzájemně protichůdné požadavky na spolehlivost systémů a z ní vyplývající bezpečnost na straně jedné a náklady na její dosažení na straně druhé. Existující implementace systémů *x-by-wire* ve vozidlech jsou obvykle doplněny buď mechanickou nebo hydraulickou zálohou a objevují se především ve vozidlech vyšších tříd.

2. Technologie x-by-wire

Požadavky na technologie pro *x-by-wire* lze rozdělit do několika základních skupin – na požadavky technické, uživatelské, legislativní, dále požadavky bezpečnostní, zajišťující, že pravděpodobnost selhání bezpečnostně kritického systému bude dostatečně nízká, a konečně požadavky technicko-ekonomické, zohledňující výrobní technologie, škálovatelnost nasazení, výrobní náklady apod.

Například technické požadavky na systém *steer-by-wire* (tedy „řízení po drátě“) zahrnují možnost řízení, pokud je vozidlo v pohybu (bez ohledu na to, zda je zapnutý či vypnutý motor), očekávaný rozsah a přesnost nastavení polohy přední nápravy, dostatečně rychlou odezvu na požadavek řidiče a její dynamiku, spotřebu elektrické energie a z ní plynoucí nárůst spotřeby.

Uživatelské požadavky vyžadují implementaci daného subsystému s parametry a vlastnostmi minimálně shodnými nebo lepšími, než poskytuje současné hydraulické či mechanické řešení, pro systém řízení je tedy nezbytná silová zpětná vazba, informující řidiče o interakcích řízené nápravy vozidla s vozovkou nebo automatický návrat řízené nápravy a volantu do přímého směru.

Požadavky kladené na bezpečnost systémů *x-by-wire* jsou vysoké, literatura [1] uvádí, že pravděpodobnost selhání systému kritického z pohledu bezpečnosti za hodinu funkce nesmí překročit 10^{-9} . Metody vyvinuté v leteckém průmyslu nelze jednoduše aplikovat nejen z cenových, ale i z technických důvodů – např. běžná úroveň redundance technických prostředků je nepřijatelná nejen finančně, ale i vzhledem k prostorovým a hmotnostním omezením. Systémy *x-by-wire* musí být tolerantní vůči chybám (*fault-tolerant*), jinak nelze výše uvedené požadavky splnit.

Mnoho z výše uvedených požadavků je definováno závaznými právními předpisy (viz [2]), ať už se jedná o minimální technické parametry jednotlivých subsystémů nebo úroveň bezpečnosti.

Dnešní automobily přecházejí při selhání některých subsystémů do nouzového režimu (*limp-home*), umožňujícího bezpečný dojezd. Obdobná funkčnost je požadována i od vozidel s technologiemi *x-by-wire*.

2.1 Požadavky na distribuované technologie pro *x-by-wire*

Klasifikace SAE (*Society of Automotive Engineers*) dělí vozidlové distribuované systémy do tří tříd (A, B, C) podle komunikačních rychlostí a dalších parametrů [3]. Formálně patří distribuované systémy pro *x-by-wire* do třídy C, požadavky na ně však její definici v mnoha ohledech překračují a v literatuře se proto občas objevuje formálně nedefinovaná třída D.

V systémech *x-by-wire* se komunikační subsystém stává součástí distribuovaných řídicích systémů jednotlivých subsystémů vozidel. Jeho selhání je proto z bezpečnostních důvodů nepřijatelné a i komunikační systém musí být navržen jako tolerantní vůči chybám. Další požadavky pak vyplývají z nároků konkrétních aplikací, parametrů prostředí, z mechanické konstrukce vozidla a nákladů na implementaci.

Požadavky na distribuované systémy pro aplikace *x-by-wire* lze shrnout do následujících bodů, většina z nich je uvedena v [4]:

- vysoká datová propustnost a nízká, nejlépe konstantní latence, z toho vyplývající dostatečná frekvence aktualizace dat a minimální jitter,
- determinismus, podmíněný především metodou řízení přístupu ke sdílenému médiu, obecná shoda na časově řízené komunikaci (různé varianty TDMA),
- rychlé a definované zotavení se z chybových stavů systému, vyvolaných vnějšími událostmi, např. rychlý (re-)start v případě krátkodobého výpadku napájení,
- kritické algoritmy a protokoly musejí být formálně verifikovány,
- pozorovatelnost stavů kritických algoritmů na úrovni uzlu i celého systému, možnost predikce poruch,
- nezbytná redundance na úrovni fyzické vrstvy,
- podpora více topologií, zejména hvězdicové – klasická sběrníková topologie není pro vozidla ideální ani vzhledem k rozmístění řídicích jednotek, ani z pohledu vlivu vnějšího rušení,
- distribuovaný nebo centralizovaný mechanismus hlídání přístupu k médiu (*bus guardian*), zajišťující chování označované jako *fail-silent*,
- zabezpečení konzistence dat na úrovni systému (podpora atomického broadcastu),
- škálovatelnost pro všechny třídy vozidel

2.2 Distribuované technologie pro x-by-wire

Ačkoliv současné trendy v automobilovém průmyslu indikují rostoucí význam standardu FlexRay (viz kapitola 3), nejedná se zdaleka o jedinou distribuovanou technologii navrženou pro systémy *x-by-wire*. Nejvyspělejším konkurentem, který se ale v automobilovém průmyslu neprosadil a aplikace nalézá spíše v letectví, je standard TTP/C (*Time Triggered Protocol class C*), jehož porovnání se standardem FlexRay lze nalézt v lit. [5]. Komunikace probíhá periodicky v cyklech, je využita deterministická přístupová metoda TDMA (*Time Division Multiple Access*). Komunikační cyklus se dále dělí na kola (*rounds*) skládající se z časových slotů. Časový rozvrh je definován staticky, v rámci jednoho kola mohou být na rozdíl od standardu FlexRay definovány časové sloty různé délky (shodné pro všechna kola). Daný časový slot může být v různých kolech přiřazen buď jedinému, či střídavě více uzlům sítě. Synchronizační mechanismus využívá synchronizačních rámců, vysílaných dedikovanými uzly sítě; implementována je pouze korekce offsetu (viz kapitola 3.2). Fyzická vrstva protokolu je redundantní, je podporována funkce hlídače sběrnice, jsou podporovány sběrnice a hvězdicová topologie. TTP/C poskytuje robustní mechanismus pro zajištění konzistence dat. Jistou nevýhodou TTP/C je striktní využití metody TDMA, takže není podporována událostmi řízená komunikace, popř. její zahrnutí vede k plýtvání přenosovou kapacitou.

Druhým významným standardem, navrženým pro *x-by-wire*, je TTCAN (*Time Triggered Controller Area Network*), detailně popsany např. v [6]. Vychází z původního standardu CAN, částečně však modifikuje chování protokolů spojové vrstvy (při ztrátě arbitráže, reakce na chybové stavy). Komunikace probíhá opět v cyklech, časově řízená komunikace je implementována v relační vrstvě protokolu. Komunikační cyklus se skládá z posloupnosti časových oken, která mohou být přiřazena buď exklusivně jednotlivým uzlům, nebo v nich může probíhat klasická arbitráž využívající standardní přístupovou metodu CANu. Tímto mechanismem je zajištěna podpora událostmi řízené komunikace. Základem synchronizačního mechanismu jsou referenční rámce vysílané v úvodu základních komunikačních cyklů v tzv. referenčních oknech. Ty nesou informaci o čase zdrojového uzlu, která je následně využita pro časovou korekci ostatních uzlů sítě. Využívá se korekce rychlosti i offsetu (viz kapitola 3.2). TTCAN stejně jako CAN neposkytuje redundanci na fyzické vrstvě protokolu, existují však návrhy řešení včetně časové synchronizace redundantních podsystémů, např. v [7].

Závěrem je třeba zmínit technologii Byteflight (viz [8]), založenou na přístupové metodě FTDMA (*Flexible TDMA*), funkčně obdobnou chování standardu FlexRay v dynamickém segmentu (viz kapitola 3.1). Jednoduchá synchronizační metoda spočívá v periodickém vysílání synchronizačního impulsu, který nuluje lokální čítače času jednotlivých uzlů (obdobu korekce offsetu). Ani s touto technologií se v budoucích aplikacích *x-by-wire* nepočítá.

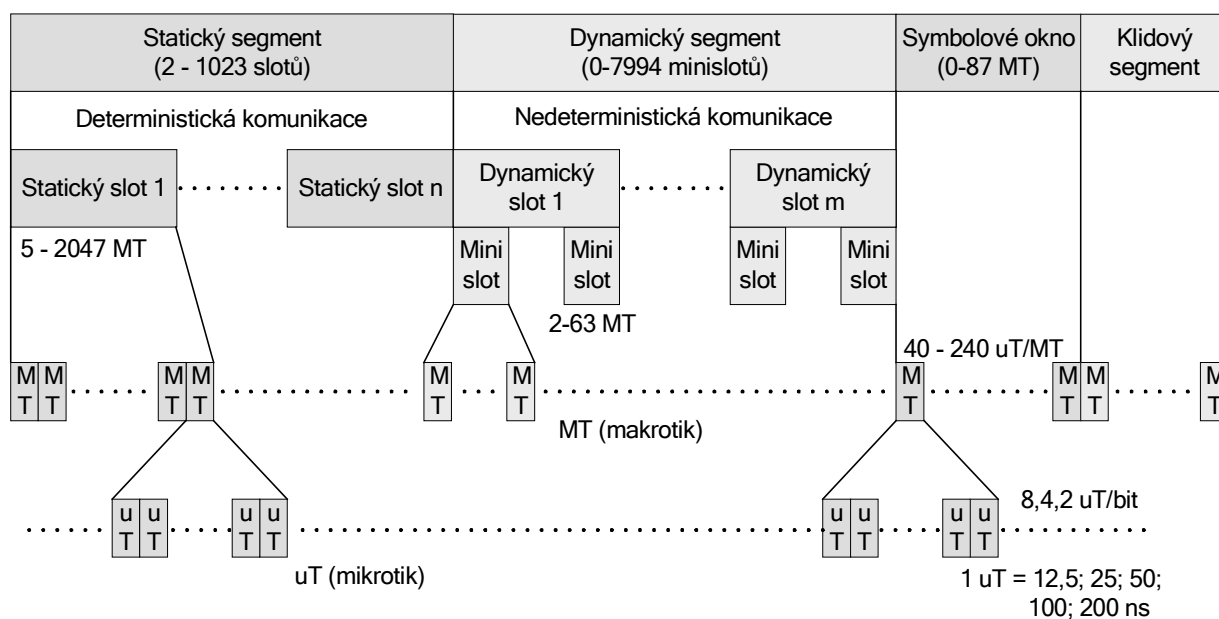
3. Distribuovaný systém FlexRay

Standard FlexRay [9] [10] definuje protokoly fyzické a spojové vrstvy dle modelu OSI. Je navržen tak, aby při respektování všech aspektů splňoval požadavky na komunikační protokol pro systémy *x-by-wire*.

3.1 Základní funkční principy

Fyzická vrstva využívá symetrický kroucený pár a podporuje sběrniceovou nebo hvězdicovou (aktivní i pasivní) topologii a některé jejich kombinace. Implementace fyzické vrstvy může být redundantní, obvod fyzického rozhraní může být navíc doplněn volitelným modulem *bus-guardian*. Maximální rychlost na fyzické vrstvě je 10 Mbit/s.

Protokoly spojové vrstvy definují komunikaci probíhající v tzv. komunikačních cyklech (dále CC) rozdělených do časových slotů, přiřazených jednotlivým uzlům – řízení přístupu k médiu metodou TDMA. Struktura komunikačního cyklu je vysvětlena na obr. 1.



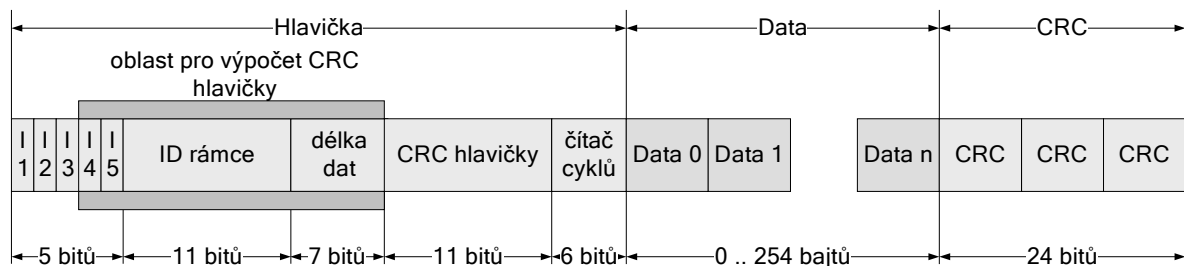
Obr. 1. Členění komunikačního cyklu systému FlexRay

Základní časovou jednotkou uzlu systému je mikrotik ($1 \mu\text{T}$), jeho délka obvykle odpovídá periodě lokálního hodinového generátoru. Základní časovou jednotkou na úrovni systému je pak makrotik (1 MT), jehož délka je shodná pro všechny uzly a je vždy celočíselným násobkem délky mikrotiku.

Komunikační cyklus se skládá ze čtyř segmentů. Statický segment je jeho povinnou součástí a skládá se z daného počtu časových slotů shodné délky, které jsou jednoznačně přiřazeny jednotlivým uzlům systému. Tyto sloty lze využít pro deterministickou komunikaci nezbytnou pro systémy *x-by-wire*. Dynamický segment je volitelnou součástí komunikačního cyklu. Jeho délka je dána

celočíselným násobkem délky tzv. minislottů, z nichž se skládají dynamické sloty potřebné délky. V případě, že dynamický slot není využit, je jeho délka rovna právě délce jednoho minislottu. Celková délka dynamického slotu je konstantní. Komunikace je nedeterministická, neboť rámec přenášený v předchozím dynamickém slotu může odsunout další přenosy až do následujícího komunikačního cyklu. Třetí, opět volitelnou, součástí komunikačního cyklu je symbolové okno, v němž může být vysílána libovolná sekvence bitů definovaná uživatelem. Klidový segment pak povinně uzavírá a odděluje jednotlivé komunikační cykly.

V daných časových slotech jsou uzly systému vysílány rámce, jejichž formát je zřejmý z obr. 2.

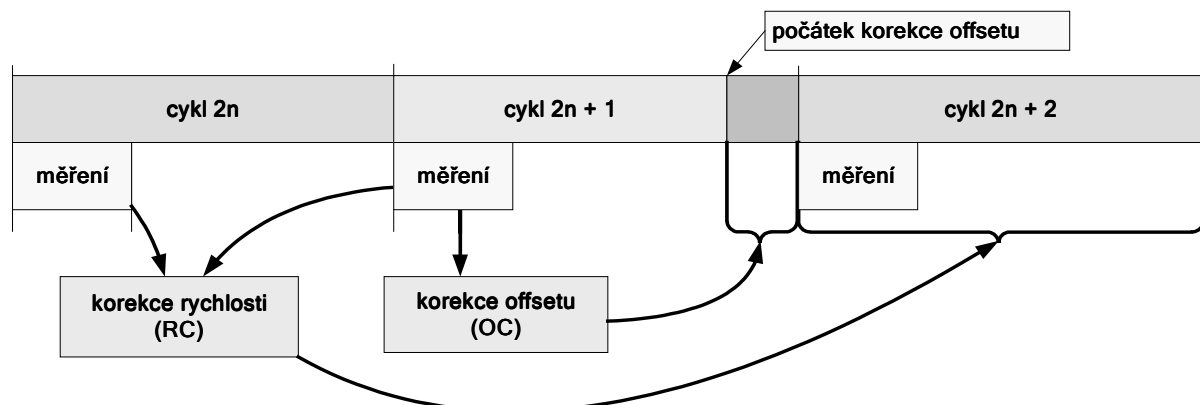


Obr. 2. Struktura rámce FlexRay

Význam jednotlivým polí rámce je zřejmý, úvodní bity I1 – I5 obsahují řídicí příznaky (např. identifikaci synchronizačního rámce apod.)

3.2 Synchronizační mechanismus

Cílem synchronizačního mechanismu je korekce odchylek hodnot frekvence lokálních oscilátorů a zajištění přibližně shodného vnímání času v jednotlivých uzlech sítě, přehled je uveden v [12]. Základní princip funkce synchronizačního mechanismu sítě FlexRay je zřejmý z obr. 3.



Obr. 3. Princip funkce synchronizačního mechanismu

Ten je založen na měření časového rozdílu mezi předpokládaným a skutečným okamžikem příjmu synchronizačních rámců, které jsou vysílány

zvolenými uzly sítě ve statickém segmentu komunikačního cyklu. Na základě těchto měření jsou určeny a následně aplikovány dva typy korekcí – korekce rychlosti (*rate correction*) a korekce offsetu (*offset correction*). Korekce offsetu je určena na počátku a aplikována v závěru každého lichého komunikačního cyklu, korekce rychlosti je určena na počátku každého lichého cyklu a aplikována v průběhu následujících dvou cyklů. Výpočet hodnot obou korekcí je založen na algoritmu FTM (*Fault Tolerant Midpoint*), maximální absolutní hodnoty obou korekcí jsou omezeny a pro korekci rychlosti je zavedeno pásmo necitlivosti v okolí nuly.

4. Model synchronizačního mechanismu

Pro odvození níže uvedeného matematického modelu synchronizačního mechanismu je nezbytné definovat základní pojmy:

A [MT]

definuje počet makrotiků od počátku komunikačního cyklu do okamžiku, kdy v daném cyklu nastane příslušná událost – např. příjem synchronizačního rámce.

MPC [MT]

je počet makrotiků v komunikačním cyklu.

OCS [MT]

definuje okamžik počátku aplikace korekce offsetu v lichém komunikačním cyklu jako celistvý počet makrotiků.

μPC_{nom} [μT]

je nominální počet mikrotiků v komunikačním cyklu.

μPM_{nom} [$\mu T/MT$]

je nominální počet mikrotiků na makrotik. Platí $\mu PM_{nom} = \frac{\mu PC_{nom}}{MPC}$.

RC^i [μT]

je vypočtená hodnota korekce rychlosti pro komunikační cykl i .

OC^i [μT]

je vypočtená hodnota korekce offsetu pro komunikační cykl i .

$\mu PA_x^i(A)$ [μT]

je počet mikrotiků od počátku komunikačního cyklu do výskytu události A v i -tém komunikačním cyklu v uzlu x . Jedná se o hodnotu s aplikací korekcí rychlosti a offsetu.

$\Delta \mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A)$ [μT]

je odchylka mezi okamžiky výskytu události A v uzlech x a y z pohledu referenčního uzlu z v i -tém komunikačním cyklu.

$$\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^i(EOC) [\mu T]$$

odpovídá $\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A)$, kde $A^i = EOC^{i-1}$. EOC^{i-1} je událost reprezentující konec předchozího (tedy $i - 1$) komunikačního cyklu.

$$\mu PA_{add_RC}^i(OCS) [\mu T]$$

představuje odpovídající část hodnoty korekce rychlosti, uplatněné od počátku i -tého komunikačního cyklu do okamžiku, v němž se začíná uplatňovat korekce offsetu.

$$\mu PA_{add_RC}^i(A - OCS) [\mu T]$$

představuje odpovídající část hodnoty korekce rychlosti RC , uplatněné od okamžiku, v němž se začíná uplatňovat korekce offsetu do okamžiku výskytu události A v i -tém komunikačním cyklu.

$$\mu PA_{add_OC}^i(A - OCS) [\mu T]$$

představuje odpovídající část vypočtené hodnoty korekce offsetu OC , uplatněné od okamžiku, v němž se začíná uplatňovat korekce offsetu do okamžiku výskytu události A v i -tém komunikačním cyklu.

$$\mu PA_{add}^i(A) [\mu T]$$

představuje odpovídající část vypočtené hodnoty obou typů korekcí, uplatněnou do okamžiku výskytu události A v i -tém komunikačním cyklu.

Z kapitoly 3.2 je zřejmé, že pro stanovení hodnot obou korekcí je třeba znát časové rozdíly mezi očekávaným a skutečným okamžikem příjmu synchronizačního rámce v jednotlivých uzlech sítě. Pro odvození byl zaveden referenční uzel z , jehož parametry odpovídají nominálním hodnotám. Časový rozdíl výskytu události A v uzlech x a y z pohledu referenčního uzlu v i -tém komunikačním cyklu lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A) = k_{y \rightarrow z} \cdot \mu PA_y^i(A) - k_{x \rightarrow z} \cdot \mu PA_x^i(A) + \Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^{i-1}(EOC), \quad (4.1)$$

kde:

$$k_{y \rightarrow z} = f_z / f_y [-], \quad k_{x \rightarrow z} = f_z / f_x [-],$$

f_z je lokální frekvence oscilátoru referenčního uzlu [Hz],

f_y je lokální frekvence oscilátoru uzlu y [Hz],

f_x je lokální frekvence oscilátoru uzlu x [Hz].

Současně platí počáteční podmínka:

$$\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^{-1}(EOC) = 0 \quad (4.2)$$

Vliv korekcí uplatněných v jednotlivých uzlech lze popsat následujícím vztahem:

$$\mu PA^i(A) = \mu PA_{nom}(A) + \mu PA_{add}^i(A), \quad (4.3)$$

$$\text{kde } \mu PA_{nom}(A) = A \cdot \mu PM_{nom}. \quad (4.4)$$

Vyjádření druhého sčítance ve vztahu 4.3 je závislé na tom, zda se uplatní pouze korekce rychlosti nebo také korekce offsetu. Pro první případ (dále varianta I), kdy událost A nastala buď v sudém komunikačním cyklu nebo v lichém cyklu do počátku aplikace korekce offsetu (tedy pro $A \leq OCS$), platí:

$$\mu PA_{add}^i(A) = \frac{A}{MPC} \cdot RC^i, \quad (4.5)$$

a tedy:

$$\mu PA^i(A) = A \cdot \mu PM_{nom} + \frac{A}{MPC} \cdot RC^i \quad (4.6)$$

Ve druhém případě (dále varianta II), kdy sledovaná událost nastala v lichém komunikačním cyklu po počátku aplikace korekce offsetu (tedy pro $A > OCS$), platí:

$$\mu PA_{add}^i(A) = \mu PA_{add_RC}^i(OCS) + \mu PA_{add_RC}^i(A - OCS) + \mu PA_{add_OC}^i(A - OCS) \quad (4.7)$$

Pro jednotlivé členy součtu pak platí:

$$\mu PA_{add_RC}^i(OCS) = \frac{OCS}{MPC} \cdot RC^i, \quad (4.8)$$

$$\mu PA_{add_RC}^i(A - OCS) = \frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot (RC^i - \frac{OCS}{MPC} \cdot RC^i), \quad (4.9)$$

$$\mu PA_{add_OC}^i(A - OCS) = \frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot OC^i. \quad (4.10)$$

Výsledný vztah pro variantu I je definuje rovnice 4.11, konečná podoba rovnice 4.12 pak respektuje časové rozlišení implementace 1 μT :

$$\begin{aligned} \Delta \mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A) &= \frac{f_z}{f_y} \cdot \left(A \cdot \mu PM_{nom} + \frac{A}{MPC} \cdot RC_y^i \right) - \\ &\quad \frac{f_z}{f_x} \cdot \left(A \cdot \mu PM_{nom} + \frac{A}{MPC} \cdot RC_x^i \right) + \\ &\quad \Delta \mu PA_{xy \rightarrow z}^{i-1}(EOC) \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A) = \text{fix} \left[\begin{array}{l} \frac{f_z}{f_y} \cdot \left(A \cdot \mu PM_{nom} + \text{fix} \left(\frac{A}{MPC} \cdot RC_y^i \right) \right) - \\ \frac{f_z}{f_x} \cdot \left(A \cdot \mu PM_{nom} + \text{fix} \left(\frac{A}{MPC} \cdot RC_x^i \right) \right) + \\ \Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^{i-1}(EOC) \end{array} \right] \cdot \quad (4.12)$$

Výsledný vztah pro variantu II je pak popsán rovnicí 4.13, její konečná podoba 4.14 pak opět respektuje časové rozlišení implementace 1 μT :

$$\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A) = \frac{f_z}{f_y} \cdot \left[\begin{array}{l} A \cdot \mu PM_{nom} + \frac{OCS}{MPC} \cdot RC_y^i + \\ \frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot \left(RC_y^i - \frac{OCS}{MPC} \cdot RC_y^i \right) + \\ \frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot OC_y^i \end{array} \right] -$$

$$\frac{f_z}{f_x} \cdot \left[\begin{array}{l} A \cdot \mu PM_{nom} + \frac{OCS}{MPC} \cdot RC_x^i + \\ \frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot \left(RC_x^i - \frac{OCS}{MPC} \cdot RC_x^i \right) + \\ \frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot OC_x^i \end{array} \right] + \quad (4.13)$$

$$\Delta\mu PA_{xy \rightarrow z}^{i-1}(EOC)$$

$$\begin{aligned}
& \Delta \mu PA_{xy \rightarrow z}^i(A) = \\
& \left[\begin{array}{l} \frac{f_z}{f_y} \cdot \left[A \cdot \mu PM_{nom} + \text{fix} \left(\frac{OCS}{MPC} \cdot RC_y^i \right) + \right. \\ \left. + \text{fix} \left(\frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot \left(RC_y^i - \text{fix} \left(\frac{OCS}{MPC} \cdot RC_y^i \right) + OC_y^i \right) \right) \right] - \\ \\ \text{fix} \frac{f_z}{f_x} \cdot \left[A \cdot \mu PM_{nom} + \text{fix} \left(\frac{OCS}{MPC} \cdot RC_x^i \right) + \right. \\ \left. + \text{fix} \left(\frac{A - OCS}{MPC - OCS} \cdot \left(RC_x^i - \text{fix} \left(\frac{OCS}{MPC} \cdot RC_x^i \right) + OC_x^i \right) \right) \right] + \\ \\ \Delta \mu PA_{xy \rightarrow z}^{i-1}(EOC) \end{array} \right] \cdot \quad (4.14)
\end{aligned}$$

Výše uvedené vztahy vycházejí ze zjednodušujícího předpokladu, že lokální frekvence oscilátorů f_x a f_y jsou po dobu od počátku komunikačního cyklu do výskytu události A konstantní (pro frekvenci f_z oscilátoru referenčního uzlu tento předpoklad platí). Skutečný model s časovou závislostí okamžité hodnoty frekvence samozřejmě počítá a hodnoty f_x a f_z nahrazuje střední hodnotou dle vztahu 4.15:

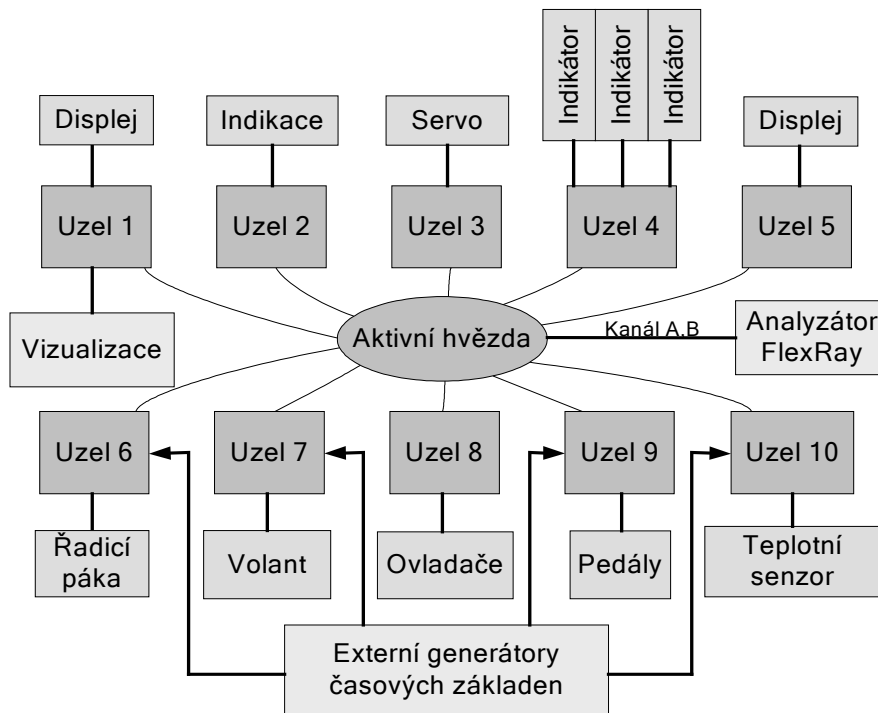
$$\bar{f} = \frac{1}{T_A - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_A} f(t) \cdot dt \quad , \quad (4.15)$$

kde: T_0 je čas počátku daného komunikačního cyklu,
 T_A je čas výskytu události A.

Částečné výsledky modelování synchronizačního mechanismu v síti FlexRay byly publikovány v [12], vzhledem ke zvolenému nástroji bylo možné modelovat pouze situaci odpovídající statickému scénáři, uvedenému v následující kapitole. Zde uvedený model umožňuje modelovat libovolné scénáře bez významných omezení.

5. Validace modelu

Pro validaci výše uvedeného modelu byl využit demonstrátor technologie FlexRay, skládající se z deseti uzlů sítě v topologii aktivní hvězdy s redundantní implementací fyzické vrstvy (viz obr. 4).



Obr. 4. Struktura demonstrátoru technologie FlexRay

Technická realizace uzlů umožňuje náhradu lokálního zdroje hodinového signálu s konstantní frekvencí vnějším zdrojem, jehož okamžitou hodnotu frekvence lze měnit dle předem stanoveného scénáře. Lze tak emulovat změny okamžité hodnoty frekvence jednoho nebo i více (při použití více vzájemně synchronizovaných generátorů) lokálních oscilátorů současně.

V průběhu měření jsou pozorovatelné vnitřní stavy jednotlivých uzlů (např. okamžité hodnoty použitých korekcí rychlosti a offsetu) v pravidelných intervalech ukládány do lokální paměti, demonstrátor také umožňuje vzájemnou časovou synchronizaci úloh sběru dat v jednotlivých uzlech a externích generátorů. Kromě propojení prostřednictvím kanálů FlexRay jsou všechny uzly propojeny také sběrnici CAN, která je zde využita pro sběr informací o vnitřních stavech jednotlivých uzlů demonstrátoru po ukončení měřicího cyklu.

Pro validaci modelu bylo navrženo několik scénářů, zde uvedu pouze dva základní a porovnam výsledky měření na demonstrátoru s výsledky simulací, provedených za stejných podmínek.

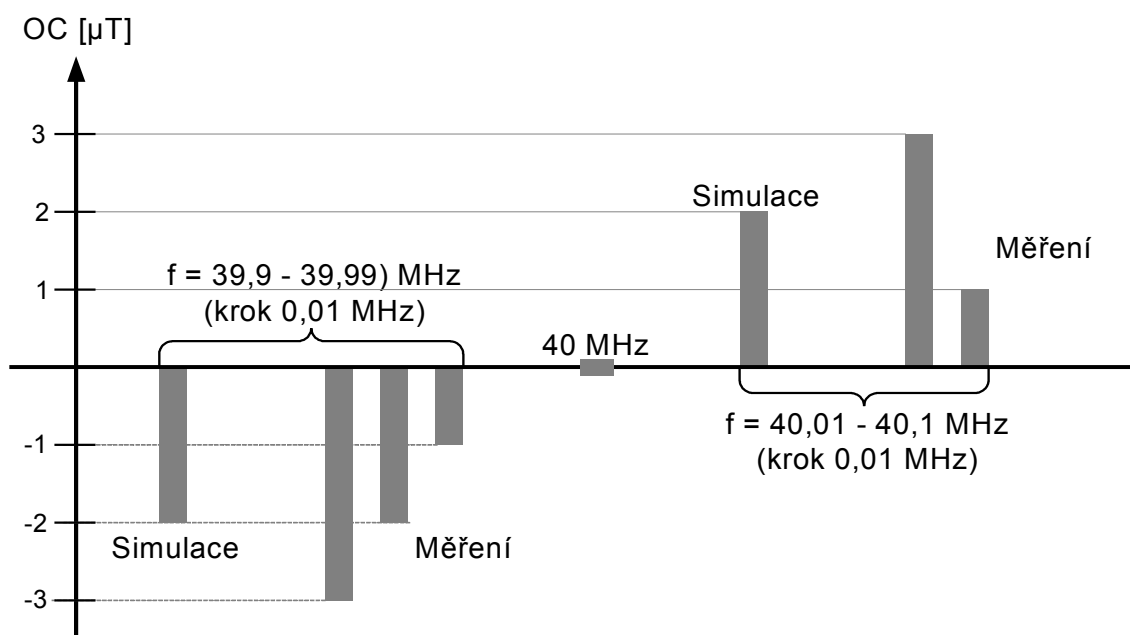
První scénář lze nazvat statickým. Všechny uzly systému s výjimkou jediného pracují s nominální frekvencí oscilátoru 40 MHz, frekvence oscilátoru zvoleného uzlu se od nominální hodnoty liší o zvolené konstantní hodnoty Δf . Doba trvání každého kroku je 500 komunikačních cyklů. Konfigurace systému je taková, že změna korekčního faktoru rychlosti o 1 μT koriguje frekvenční rozdíl 200 Hz.

Hodnoty korekčního faktoru rychlosti uvedené v následující tabulce ukazují naprostou shodu výsledků poskytovaných modelem a získaných měření na demonstrátoru.

Tab. 1 Validace modelu – korekce rychlosti, statický scénář

f [MHz]	RC [μ T] (simulace)	RC [μ T] (měření)	f [MHz]	RC [μ T] (simulace)	RC [μ T] (měření)
39.90	- 499	- 499	40.01	+ 49	+ 49
39.91	- 449	- 449	40.02	+ 99	+ 99
39.92	- 399	- 399	40.03	+ 149	+ 149
39.93	- 349	- 349	40.04	+ 199	+ 199
39.94	- 299	- 299	40.05	+ 249	+ 249
39.95	- 249	- 249	40.06	+ 299	+ 299
39.96	- 199	- 199	40.07	+ 349	+ 349
39.97	- 149	- 149	40.08	+ 399	+ 399
39.98	- 99	- 99	40.09	+ 449	+ 449
39.99	- 49	- 49	40.10	+ 499	+ 499
40.00	0	0			

Zajímavější je pohled na hodnoty korekčního faktoru offsetu na obr. 5. Výsledky simulace i měření jsou shodné pro všechny odchylky Δf od nominální hodnoty, jelikož korekce offsetu koriguje pouze tu část odchylky Δf , nekorigovanou korekcí rychlosti.

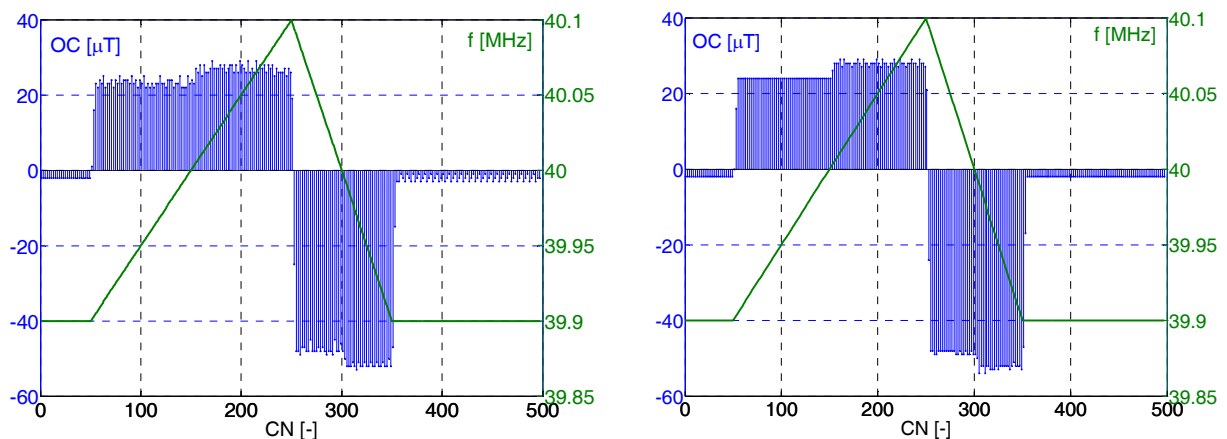


Obr. 5. Validace modelu – korekce offsetu, statický scénář

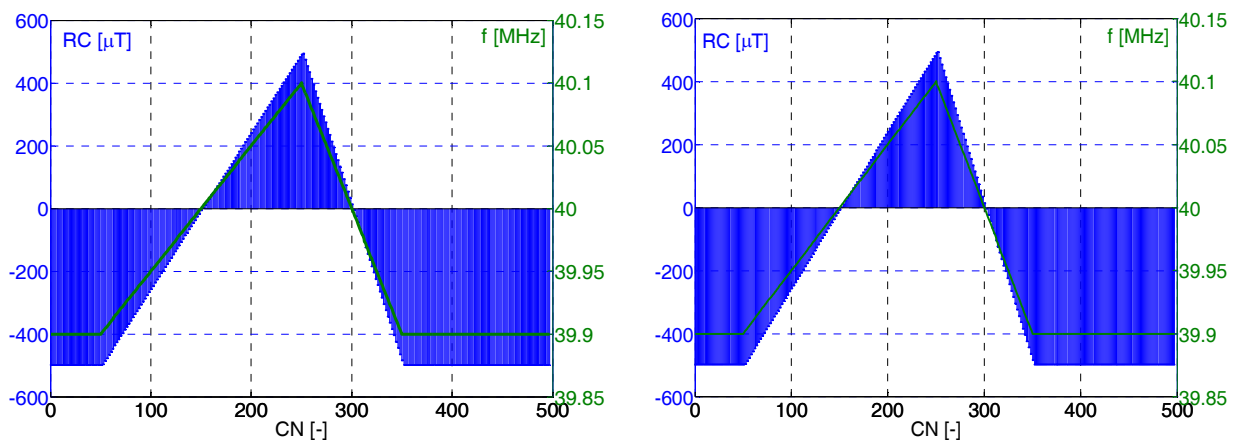
Simulace poskytuje ve všech případech konstantní hodnotu korekce offsetu $+2 \mu\text{T}$. Pro zápornou odchylku Δf je cyklicky měřena posloupnost korekčních hodnot $-1 \mu\text{T}$, $-2 \mu\text{T}$, $-3 \mu\text{T}$, pro kladnou pak posloupnost $+1 \mu\text{T}$, $+3 \mu\text{T}$, pro nulovou odchylku je korekce v obou případech nulová. Je zřejmé, že střední

hodnota je v obou případech stejná a rozdíl výsledků simulace a měření je důsledkem omezeného rozlišení hodnot korekce offsetu.

Druhý scénář využitý pro validaci modelu lze nazvat dynamickým, jelikož okamžitá hodnota odchylky Δf je funkcí času. Okamžitá hodnota frekvence je nejprve rovna hodnotě 39,9 MHz, následně lineárně roste a poté dvojnásobnou rychlostí opět klesá k hodnotě počáteční. Shodu výsledků měření a výsledků poskytnutých modelem demonstrují následující grafy (obr. 6 až obr. 8).

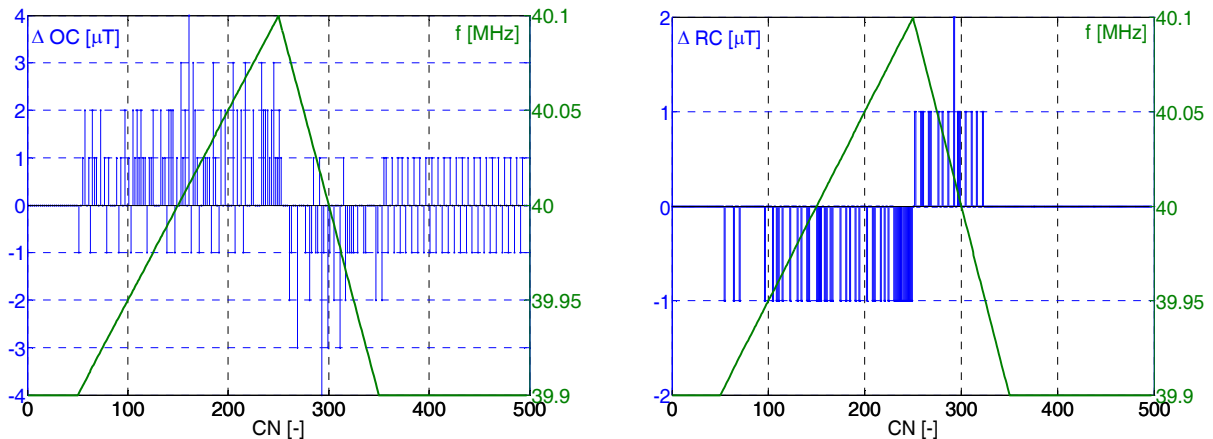


Obr. 6. Validace modelu – korekce offsetu, dynamický scénář (měření, simulace)



Obr. 7. Validace modelu – korekce rychlosti, dynamický scénář (měření, simulace)

Uvedené závislosti (obr. 6 a obr. 7) demonstrují pouze základní shodu, vyšší vypovídací hodnotu mají následující grafy (obr. 8), zobrazující rozdíly mezi výsledky měření a simulace.



Obr. 8. Rozdíl měřených a simulovaných hodnot korekce rychlosti a korekce offsetu

Rozdíly jsou opět způsobeny kvantováním hodnot korekcí ve všech uzlech systému. V případě dynamického testu dochází v uzlech demonstrátoru s nominální hodnotou frekvence k současnému uplatnění korekce, která je následně kompenzována opačnou a vyšší korekcí v uzlu s proměnnou frekvencí oscilátoru. V případě simulace, která je synchronní pro všechny uzly sítě, tento jev nenastává.

6. Využití modelu pro další výzkum

Validovaný model synchronizačního mechanismu bude dále využit v několika oblastech dalšího výzkumu. První oblastí je výzkum chování tohoto mechanismu při jeho částečném selhání v jednom nebo více uzlech sítě současně, který by měl vyústit v návrh metod, jak tyto stavy predikovat a případně eliminovat jejich důsledky. Druhou oblastí je využití vyvinutého modelu jako dílčího prvku úplného modelu uzlu sítě FlexRay, který je vyvíjen s cílem zkoumat reakce uzlů sítě i komunikačního subsystému jako celku na poruchové stavy. Třetí, z mého pohledu nejvýznamnější oblastí, je využití modelu pro návrh metod měření kritických parametrů synchronizačního mechanismu, které jsou nastavovány programovým vybavením elektronické řídicí jednotky. Jejich hodnoty jsou pro funkci distribuovaného systému kritické, ověřit je však lze pouze zkoumáním odezev na vhodně zvolené vnější podněty. Model bude použit i při verifikaci implementace tohoto mechanismu, na niž se pracuje v rámci vývoje IP funkce pro hlídač sběrnice (*bus guardian*). Modifikovaná implementace synchronizačního mechanismu bude dále využita i v plánovaném generátoru FlexRay, mezi jehož vlastnostmi bude i generování chyb synchronizace pro invazivní testování.

7. Zkušební vozidlo pro „x-by-wire“

Pro získávání praktických zkušeností s implementací technologií *x-by-wire* a následné ověření metod vhodných pro jejich testování je vyvíjeno zkušební

vozidlo (viz obr. 9). V tuto chvíli je funkční systém řízení po drátě (*Steer-by-Wire*) a pracuje se na systému brzd (*Brake-by-Wire*).



Obr. 9. Zkušební vozidlo pro technologie x-by-wire

8. Závěr

V současnosti je téměř jisté, že se technologie FlexRay bude v automobilech nasazovat stále častěji, a to v nejrůznějších třídách aplikací včetně bezpečnostně kritických aplikací *x-by-wire*. Výzkum a vývoj metod pro testování implementací jednotlivých uzlů i celých sítí, založený na modelování vlivu poruch na jejich činnost a následném návrhu metod a měřicích přístrojů pro invazivní testování je bezpochyby nutnou podmínkou pro jejich úspěšné nasazení v hromadné výrobě.

Obdobné postupy, uplatněné při vývoji metod a přístrojů pro testování současné generace vozidlových distribuovaných systémů, využívajících zejména distribuované systémy standardu CAN, vedly k návrhu nových měřicích metod a k jejich implementaci v přístrojích, vyvinutých na základě požadavků partnerů z oblasti automobilového průmyslu (viz kapitola 10).

Lze očekávat, že s růstem bezpečnostně kritických aplikací standardu FlexRay porostou požadavky především na metody invazivního testování, na něž se chci dále zaměřovat.

9. Literatura

- [1] Navet, N., Song, Y., Simonot-Lion, F., Wilwert, C.: *Trends in Automotive Communication Systems*, Proceedings of the IEEE In Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6. (2005), pp. 1204-1223.
- [2] X-By-Wire, final report of BE 95/1329 project, Vienna University of Technology, 1998, *X-by-wire –Safety related fault tolerant systems in vehicles (final report)*,” X-by-Wire Project, Brite-EuRam 111 Program, Rep. No. XByWire-DB-6/6-24, 1998.
- [3] Lupini, C.A.: *Vehicle Multiplex Communication*, SAE International 2004, ISBN 0-7680-1218-X.
- [4] Navet, N., Simonot-Lion, F.: *Automotive Embedded Systems Handbook*, CRC Press, ISBN 978-0-8493-8026-6.
- [5] Kopetz, H.: *A Comparison of TTP/C and FlexRay*, Technical report 10/2001, Vienna University of Technology.
- [6] Leen, G., Heffernan, D.: *TTCAN: a new time-triggered controller area network*, Microprocessors and Microsystems 26, 2002, pp. 77-94.
- [7] Muller, B., Fuhrer, T., F.Hartwich, R.Hugel, H.Weiler: *Fault Tolerant TTCAN Networks*, Robert Bosch, GmbH.
- [8] Berwanger, J., Peller, M., Griessbach, R.: *Byteflight – A New Protocol for Safety Critical Applications*, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress. June 12-15, 2000, Seoul Korea.
- [9] FlexRay Consortium, *FlexRay Protocol Specification V2.1 Rev. A*, 2005.
- [10] FlexRay Consortium, *FlexRay Electrical Physical Layer Specification V2.1 Rev. A*, 2005.
- [11] Kopetz, H., Ochsenreiter, W.: *Clock Synchronization in Distributed Real-Time Systems*, IEEE Transaction on Computers, vol. C-36, pp. 933-940. ISSN 0018-9340.
- [12] Hanzlik, A.: *A Case Study of Clock Synchronization in FlexRay*, Technical report 31/06 Vienna University of Technology, 2006. “Unpublished”.
- [13] Malinský, J., Novák, J.: *Modelling a FlexRay Synchronization Mechanism*, prepared for submission to IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [14] Malinský, J.: *Intrusive Tests in FlexRay Standard*, Doctoral Thesis, CTU FEE, 2010.

10. Ing. Jiří Novák, Ph.D.

narozen 5. února 1967, titul inženýr získal na Českém vysokém učení technickém v Praze, fakultě elektrotechnické, v oboru Technická kybernetika. Následně byl přijat k aspirantuře a v roce 1992 nastoupil na katedru měření. V roce 1992 absolvoval tříměsíční stáž v PTB Berlín. V letech 1994 až 1998 pracoval celkem 4 měsíce tamtéž jako hostující výzkumný pracovník na řešení projektu nadace VW "Behavior of distributed systems under the influence of external disturbances". V roce 2000 obhájil doktorskou disertační práci na téma „Distribuované měřicí systémy a jejich odolnost vůči vnějším elektromagnetickým vlivům“ a získal titul Ph.D.

Pedagogická praxe

Na katedře měření přednáší v anglicky vyučovaných předmětech *Diagnostics of Digital Devices*, *Industrial Systems for Data Acquisition and Transfer*, *Measurement in Digital Circuits* a *Microelectronics in Vehicles* (programu European Master's Degree in Automotive Engineering fakulty strojní). Dále přednáší a cvičí předměty *Diagnostika číslicových zařízení*, *Průmyslové systémy pro sběr a přenos dat*, *Aplikace programovatelných hradlových polí* a *Sběr a přenos dat*, částečně přednáší v předmětu *Měření na číslicových obvodech*. Je školitelem-specialistou 2 studentů doktorského studia ve studijní etapě, 1 po ukončení studijní etapy, 2 s úspěšně složenou doktorskou zkouškou, dokončujících disertační práci a jednoho absolventa doktorského studia.

Významné publikace

Novák, J.: *Testing of CAN Based Automotive Distributed Systems Using a Flexible Set of IP Functions*, Sensors and Transducers 2010, vol. 8, pp. 54-64, ISSN 1726-5749.

Novák, J.: *New Measurement Method of Sample Point Position in Controller Area Network Nodes*, Measurement 2008, No. 41, pp. 300 - 306, ISSN 0263-2241.

Ripka, P., Tipek, A.: *Modern Sensors Handbook*, ISTE Ltd., Londýn 2007, ISBN 978-1-905-209-66-8, chapter 4, *Intelligent Sensors and Sensor Networks*, pp. 141-192.

Ježdík, P., Novák, J.: *Centralized Diagnostics of Electronic and Electric Equipment in Vehicles*, *Engine Lighting Equipment Testing*, Computing - International Scientific Journal of Computing, 2008, vol. 7, no. 2, p. 30-34. ISSN 1727-6209.

Řešené projekty

– FRVŠ A/2094, „Inovace vybavení a výuky v laboratořích základních měření“, řešitel za ČVUT (2010),

- GAČR 102/09/H081, „SYNERGIE - Mobilní senzorické systémy a sítě“, spoluřešitel za ČVUT (2009 – 2012),
- MPO FT—TA3/029, “Malorozměrný víceúčelový bezpilotní monitorovací komplet pro civilní i vojenské využití MAMOK”, spoluřešitel za ČVUT (2006 – 2008),
- MPO FI-IM4/138, „AMM systém pro měření elektrické energie“, spoluřešitel za ČVUT (2006 – 2008),
- MŠMT 1M0568 „Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka“, jmenovaný spoluřešitel (2005 – 2009)

Realizace

V rámci spolupráce s průmyslem řídil projekt vývoje a realizace dvou generací automatizovaného pracoviště pro testování elektronických řídicích jednotek pro Škodu Auto, a.s., které se rutinně používá pro testování předprodukčních komponent. Řídil také projekt vývoje a realizace zařízení pro interaktivní diagnostický přístup k řídicím jednotkám světel pro Automotive Lighting, s.r.o., kde je na výrobních linkách nasazeno v téměř 30 instalacích.