

**České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta dopravní**

**Czech Technical University in Prague  
Faculty of Transportation Sciences**

Ing. Zdeněk Lokaj, Ph.D.

**Využití citlivostní analýzy v dopravní telematice**

**The use of Sensitivity Analysis in Transport Telematics**

## SUMMARY

Cooperative systems as a subset of transport telematics represent the future direction of development, and therefore already established designation C-ITS. Due to its architecture, these systems require a different approach in their design and implementation, for this reason it is necessary to modify current practices or redesign.

Habilitation lecture focuses on the application of the general theory of sensitivity in the design of cooperative system or modification of its parameters in order to achieve the desired quality.

To take advantage of all benefits of theory of sensitivity in cases of system design and modification and to make defined system problem soluble it is necessary to studied telematic system linearizes around the real point of the status characterization.

When we are searching for the optimal setting of system parameters, whether in design or in stage of system modification, we can use the behavior of sensitivity invariance, which is defined that the sum of all sensitivities in the linear respectively linearized system is constant, which implies that any change in one or more system parameters of telematic system produces change of another parameter so that the sum of the sensitivity of the linearized system continues to be a constant.

For example in case of requirement to increase the overall accuracy of locating the vehicle when this parameter is influenced by two components - precision of satellite localization and communication delays on the access networks. Therefore, it is possible to decrease the communication delay on access network to achieve required increase of overall positioning accuracy, and the sum of all sensitivities of the studied system remains constant.

In designing and optimizing the properties of the telematic system it is also necessary to consider the economic benefits of the proposed changes, as seen in the previous example, when the increased accuracy of localization would be more costly than reducing communication delays e.g. by changing the setting of communication networks.

## SOUHRN

Kooperativní systémy jako podmnožina dopravní telematiky představují její budoucí směr rozvoje, a proto již vzniklo označení C-ITS. Vzhledem ke svojí architektuře však tyto systémy vyžadují odlišný přístup při jejich návrhu a implementaci, z tohoto důvodu je nutné současné postupy upravit či navrhnout postupy zcela nové.

Habilitační přednáška je zaměřena na využití obecné teorie citlivostí při návrhu resp. úpravě systémových parametrů plánovaného resp. již vybudovaného kooperativního systému s cílem dosažení požadovaných parametrů.

Studovaný telematický systém pro účely jeho návrhu a úpravu systémových parametrů linearizujeme v okolí reálného bodu stavové charakterizace tak, abychom mohli využít všech předností teorie citlivosti a danou systémovou úlohu bylo možné řešit.

Při hledání optimálního nastavení systémových parametrů, ať již při návrhu, tak při jejich úpravě, je možné využít vlastností citlivostní invariance, která říká, že součet všech citlivostí v lineárním resp. linearizovaném systému je konstantní, z čehož plyne, že jakákoliv změna jednoho či více systémových parametrů telematického systému, vyvolá změnu dalšího parametru tak, aby součet citlivostí v linearizovaném systému zůstal nadále konstantní.

Je to možné uvést na příkladu požadavku zvýšení celkové přesnosti lokalizace vozidla, kdy je tento parametr ovlivněn dvěma složkami – přesností vlastní lokalizace a zpožděním komunikace na přístupovém řešení. Proto je možné snížením zpoždění komunikace na přístupové síti docílit zvýšení celkové přesnosti lokalizace, přičemž celková citlivost studovaného systému zůstává nadále konstantní.

Při návrhu a optimalizaci vlastností telematického systému je navíc velmi nutné uvažovat i ekonomickou výhodnost navrhovaných změn, jak je patrné na předchozím příkladu, kdy zvýšení přesnosti lokalizace by bylo nákladnější než snížení zpoždění komunikace např. díky změně nastavení komunikační sítě.

**Klíčová slova:** ITS, kooperativní systém, telematika, telekomunikace, WiMax, LTE, DSRC, citlivostní analýza

**Keywords:** ITS, cooperative systems, telematics, telecommunications, WiMAX, LTE, DSRC, sensitivity analysis

## **Obsah**

<b>1</b>	<b>CITLIVOSTNÍ ANALÝZA .....</b>	<b>6</b>
1.1	Nová formulace parametrů telematického systému s využitím citlivostní funkce	6
1.2	Citlivostní charakteristiky	8
1.3	Citlivostní matice telematického systému	9
1.4	Systémové parametry kooperativních systémů	9
<b>2</b>	<b>VYUŽITÍ CITLIVOSTNÍ ANALÝZY PŘI NÁVRHU KOOPERATIVNÍCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>16</b>
2.1	Citlivostní analýza pro V2I koncept	16
2.2	Citlivostní analýza pro V2V koncept	19
<b>3</b>	<b>NÁVRH TELEMATICKÉHO SYSTÉMU S VYUŽITÍM CITLIVOSTNÍ INVARIANCE .....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>ODBORNÝ ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>28</b>

# 1 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

První významnější práce na téma teorie citlivosti publikoval Hendrik Bode v období těsně po 2. světové válce ve svém článku „Network Analysis and Feedback Amplifier Design“, publikovaného v roce 1945 resp. 1951 v New Yorku (D. Nostrand) a zavádí pojem tzv. **relativní citlivost**.

K dalšímu zásadnímu rozvoji teorie citlivosti došlo až počátkem 70. let 20. století, kdy Károly Géher rozpracoval základy teorie citlivostí při velkých změnách parametrů tzv. **teorie diferenčních citlivostí**.

Teorii citlivostí lineárních systémů se dlouhodobě zabývá také prof. Sanjit Kumar Mitra na University of California v Santa Barbaře, který řeší zejména využití teorie citlivostí při návrhu filtrů na základě tzv. **citlivostní invariance** [2].

## 1.1 Nová formulace parametrů telematického systému s využitím citlivostní funkce

Aplikaci citlivostní analýzy pro oblast dopravní telematiky se autor této habilitační přednášky věnoval již ve své disertační práci [3], a proto z jejich závěrů vychází a aplikuje je na oblast kooperativních systémů, které jsou v mnoha ohledech specifické.

Ačkoliv byla teorie citlivostí většinou využívána zejména pro RLC obvody, je možné najít analogie s obecnými lineárními systémy, které nejsou složeny pouze z elektronických součástek [2]. Aby bylo možné aplikovat teorii citlivostí na dopravní telematiku a její podmnožinu kooperativní systémy, je v prvním kroku nutné formálně zapsat telematický systém, který bude pro další práci nejlépe vyjádřen maticovým zápisem, představující přenosovou matici lineárního systému následovně:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1n} \\ T_{21} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ T_{m1} & \cdots & \cdots & T_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

kde

$Y_i$  jsou výstupní stavové proměnné,

$T_{ij} = F_{ij}(a_1, a_2, \dots, a_n)$  jsou systémové funkce a

$X_j$  jsou vstupní stavové proměnné.

Platí totiž, že systémová funkce  $T_{ij}$  je vyjádřena v rovnici:

$$Y_i = T_{ij} \otimes X_j \quad (1.2)$$

kde  $\otimes$  reprezentuje konvoluci v časové oblasti.

Tento vztah platí, je-li systém lineární či linearizovaný. Je-li vyjádřen v operátorovém tvaru nebo v prostoru Fourierových funkcí, pak platí

$$T_{ij} = \mathcal{F}\{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (1.3)$$

kde  $\mathcal{F}$  je funkcionál.

Výchozím pojmem teorie citlivosti lineárních resp. linearizovaných systémů, která je aplikována na oblast telematických resp. kooperativních systémů, jsou tzv. **citlivostní funkce**, které udávají míru vlivu změn daných parametrů na přenosové nebo imitační funkce systému.

Klasická definice citlivostní funkce pochází již od Hendrika Bodeho a je zavedena následovně:

**Nechť  $T_{ij}$  je systémová funkce a  $a_i$  jeden z parametrů jí odpovídajícího systému. Pak jako citlivost  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  funkce  $T$  vzhledem k parametru  $a$  budeme označovat výraz:**

$$S_{a_i}^{T_{ij}} = \frac{\frac{dT_{ij}(a_i)}{da_i}}{\frac{T_{ij}(a_i)}{a_i}} = \frac{d[\ln T_{ij}(a_i)]}{d(\ln a_i)} \quad (1.4)$$

Zjednodušeně řečeno lze tedy konstatovat, že každý z prvků matice  $T_{ij}$  je funkcí vnitřních parametrů ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ). V případě infinitesimálních odchylek  $a_i$  pak platí, že:

$$S_{a_i}^{T_{ij}} = \frac{\partial T_{ij}(a_i)}{\partial a_i} \cdot \frac{a_i}{T_i} \quad (1.5)$$

Pro případ konečných tolerancí  $\Delta a_i$  následně dostáváme tento tvar rovnice:

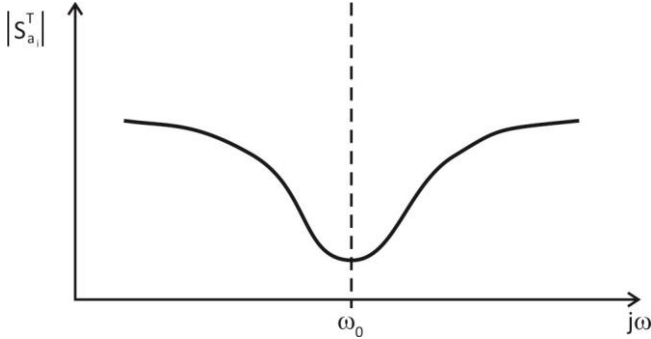
$$S_{a_i}^{T_{ij}} = \frac{\Delta T_{ij}(a_i)}{\Delta a_i} \cdot \frac{a_i}{T_i} \quad (1.6)$$

Tato rovnice je citlivostní funkce a v podstatě představuje zjednodušenou výše uvedenou definici citlivosti, kde  $T_{ij}$  může být funkcí  $t$ ,  $j\omega$  nebo  $p$ ,

v případě, že pracujeme v časové oblasti, v prostoru Fourierových obrazů funkcí nebo pracujeme s Laplaceovým operátorem.

## 1.2 Citlivostní charakteristiky

Pokud budeme mít systém, kde  $T_{ij}$  je funkcí  $j\omega$ , pak rozvojem citlivostní funkce  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  dostaneme tzv. **citlivostní charakteristiky**.



Obr. 1 – Citlivostní charakteristika (Zdroj: [3])

A protože platí, že:

$$\ln T_{ij}(a_i) = \ln T_{ij}(j\omega, a_i) + j \text{Arg} T_{ij}(j\omega, a_i) = a(\omega, a_i) + jb(\omega, a_i) \quad (1.7)$$

lze vyjádřit citlivost  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  následovně:

$$S_{a_i}^{T_{ij}}(j\omega) = \frac{\frac{dT_{ij}(j\omega, a_i)}{da_i}}{\frac{T_{ij}(j\omega, a_i)}{a_i}} + j \frac{d[\text{Arg} T_{ij}(j\omega, a_i)]}{\frac{da_i}{a_i}} = \text{Re} S_{a_i}^{T_{ij}} + j \text{Im} S_{a_i}^{T_{ij}} \quad (1.8)$$

Z této rovnice je tak patrné, že pro lineární systém je reálná část  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  amplitudová charakteristika a imaginární část  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  fázová charakteristika.

Dosazením nominálních hodnot  $a_i = a_{i0}$  a konkrétních kmitočtů do rovnice  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  dostáváme, že  $S_{a_i}^{T_{ij}}$  je **konstantní**. V tomto případě již hovoříme o **citlivosti**, neboť se jedná již o hodnotu, nikoliv o funkci.



### 1.3 Citlivostní matice telematického systému

Na obecnou definici teorie citlivosti navazujeme její aplikaci na telematický systém, který jsme vyjádřili v kapitole 1.1. Vybíráme soubor systémových funkcí  $Y$  a systémových parametrů  $a$ , pro které vypočítáváme hodnoty citlivostí. To nám umožní formulovat vztah mezi tolerancemi systémové funkce  $\Delta Y_i$  a tolerancemi vnitřních parametrů systému  $\Delta a_j$ . Potom je maticové vyjádření následovné:

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \vdots \\ \Delta Y_n \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \vdots \\ \Delta a_n \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Pokud již dosazujeme konkrétní hodnoty citlivostí v matici, mluvíme o tzv. **citlivostní matici**.

**Bude-li systém lineární, pak součet všech relativních citlivostí je roven konstantě!** Tento jev je nazýván **citlivostní invariancí** a využívá se hojně při optimalizaci (v praxi též nazývané ladění) systému tak, aby byl co nejrobustnější.

Při vyšetřování robustnosti systému se využívá výpočet citlivostí pro tzv. Worst Case (WC), tedy nejhorší kombinace stavu, který může nastat. Robustnost telematického systému je dána odolností vůči „WC“, kdy se sečtou absolutní hodnoty všech tolerancí v nejnepříznivějším stavu.

Pro výpočet robustnosti se použije následující vztah:

$$\Delta[T_{ij}] = \sqrt{\sum [S_{ij} \cdot \Delta a_i]^2} \quad (1.10)$$

kde  $S_{ij} \cdot \Delta a_i$  představuje vnitřní toleranci systému.

### 1.4 Systémové parametry kooperativních systémů

Pro účely aplikace citlivostní analýzy na kooperativním systému provedeme linearizaci v okolí reálného bodu stavové charakterizace, což nám pomůže úlohu zjednodušit tak, aby byla řešitelná a využitelná při návrhu změn vlastností a parametrů kooperativních systémů.

Jako výchozí parametry jsou v této habilitační práci využity již zavedené systémové parametry dle [4], a to:

- Telematické performační indikátory

- Telekomunikační performační indikátory

### 1.4.1 Telematické performační indikátory

Telematické performační indikátory jsou zavedeny k elementárnímu popisu telematických aplikací resp. k možnosti kvantifikovat požadavky, které musí implementovaný telematický systém splňovat. Jednotlivé parametry jsou definovány dle [4] obecně, aby byly využitelné pro co nejširší množinu telematických aplikací.

#### Přesnost

Přesnost je definována jako stupeň shody mezi měřenou a definovanou hodnotou parametru/procesu/funkce:

$$P(|p_i - p_{m,i}| \leq \varepsilon_1) \geq \gamma_1 \quad (1.11)$$

tedy, že rozdíl mezi požadovaným parametrem  $p_i$  a měřeným parametrem  $p_{m,i}$  nepřesáhne hodnotu  $\varepsilon_1$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_1$ . Uvedený vztah platí i pro vektory parametrů.

#### Spolehlivost

Spolehlivost je schopnost systému plnit požadované funkce bez přerušení během daného postupu v průběhu definovaného časového intervalu:

$$P(|\vec{v}_t - \vec{v}_{m,t}| \leq \varepsilon_2) \geq \gamma_2, t \in \langle 0, T \rangle \quad (1.12)$$

tedy že rozdíl mezi požadovanými parametry (vektory parametrů)  $\vec{v}_t$  a měřenými parametry  $\vec{v}_{m,t}$  nepřesáhne hodnotu  $\varepsilon_2$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_2$  v libovolném čase  $t$  časového intervalu  $\langle 0, T \rangle$ .

#### Dostupnost

Dostupnost je schopnost systému plnit požadované funkce při inicializaci (spuštění) systému/procesu podle daného postupu:

$$P((q_{m,i} - q_i) \leq \varepsilon_3) \geq \gamma_3 \quad (1.13)$$

tedy rozdíl požadované hodnoty úspěšného spuštění  $i$ -té funkce/procesu  $q_i$  a naměřené hodnoty  $q_{m,i}$  nepřekročí hodnotu  $\varepsilon_3$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_3$ .

## Kontinuita

Kontinuita (spojitost) je schopnost systému plnit požadované funkce/procesy bez (neplánovaného) přerušení (maximální povolená délka přerušení je předem definována) během daného postupu (nebo definovaného časového intervalu):

$$P(|r_t - r_{m,t}| \leq \varepsilon_4) \geq \gamma_4, t \in \langle 0, T \rangle \quad (1.14)$$

tedy rozdíl mezi požadovaným maximálním přerušením  $r_t$  a měřenou hodnotou  $r_{m,t}$  nepřesáhne v každém čase  $t$  v intervalu  $\langle 0, T \rangle$  hodnotu  $\varepsilon_4$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_4$ . Kontinuita má blízko ke spolehlivosti, ale hlavním rozdílem je sledování délky výpadku. Jde tedy o možnost kvantifikace rozložení výpadků – u spolehlivosti můžeme zaznamenat jeden dlouhý výpadek nebo mnoho krátkodobých výpadků. Právě kontinuita dokáže mezi těmito dvěma případy rozlišit a definovat, jaká maximální délka výpadku je povolena.

## Integrita

Integrita je schopnost systému včas a bezchybně informovat uživatele, že systém nemůže být použit pro operace daného postupu:

$$P(|s_i - s_{m,i}| \leq \varepsilon_5) \geq \gamma_5 \quad (1.15)$$

tedy rozdíl mezi požadovanou dobou nahlášení poruchy  $s_i$ , tedy např. zpráva o překročení daného limitu (AL – Alert Limit) a naměřenou hodnotou doby hlášení poruchy  $s_{m,i}$  nepřekročí hodnotu  $\varepsilon_5$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_5$ .

Integrita vyjadřuje schopnost systému včas diagnostikovat překročení předdefinovaných parametrů a za požadovaný časový interval o této skutečnosti informovat uživatele/obsluhu.

## Bezpečnost

Bezpečnost je schopnost systému, že v případě vzniku poruchy nedojde k poškození systému nebo k materiálním ztrátám či ztrátám na lidském životě. Kvantifikace vychází z provedené analýzy a klasifikace rizik:

$$P(|W_i - W_{m,i}| \leq \varepsilon_6) \geq \gamma_6 \quad (1.16)$$

tedy rozdíl mezi požadovanou rizikovou situací  $W_i$  a skutečnou rizikovou situací  $W_{m,i}$  nepřekročí hodnotu  $\varepsilon_6$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_6$ .

Bezpečnost, jako systémový parametr, rozděluje chyby/poruchy na ty, které se vyvíjejí bezpečným směrem, pak jde o výpadky a jsou charakterizovány spolehlivostí, kontinuitou, integritou atd., a na ty, které se vyvíjejí nebezpečným směrem. Zjištění bezpečných a nebezpečných stavů systému je součástí klasifikace a analýz rizik.

## 1.4.2 Telekomunikační performační indikátory

Systémové parametry komunikačních systémů jsou definovány rovněž z důvodu kvantifikace jejich vlastností, z hlediska poskytovaných služeb. Definované parametry vycházejí z principu neutrality, tj. nezáleží na technickém řešení komunikační sítě, ale na kvalitě poskytované služby, kterou je možné kvantifikovat díky těmto parametrům.

### Aktivační doba dostupnosti služby

Aktivační doba dostupnosti služby je schopnost telekomunikačního systému zahájit poskytování služby telematické aplikace v definovaném čase, tj.

$$P(|a_i - a_{m,i}| \leq \varepsilon_1) \geq \gamma_1 \quad (1.17)$$

tedy rozdíl požadovaného času úspěšné  $i$ -té aktivace systému  $a_i$  a naměřeného aktivačního času  $a_{m,i}$  nepřekročí hodnotu  $\varepsilon_1$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_1$ .

### Dostupnost služby

Dostupnost služby (např. virtuálního okruhu) je schopnost okruhu plnit požadované funkce bez přerušení během daného postupu v průběhu definovaného časového intervalu:

$$P(|ca_t - ca_{m,t}| \leq \varepsilon_2) \geq \gamma_2, t \in (0, T) \quad (1.18)$$

tedy rozdíl mezi požadovanými parametry  $ca_t$  a měřeními (skutečnými) parametry  $ca_{m,t}$  nepřesáhne hodnotu  $\varepsilon_2$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_2$  v každém čase  $t$  v intervalu  $(0, T)$ .

### Doba mezi dvěma poruchami (MTBF)

Doba mezi dvěma poruchami je schopnost telekomunikačního systému poskytovat požadovanou službu minimálně po definovaný časový interval mezi dvěma výpadky služby, tj.

$$P(|f_i - f_{m,i}| \leq \varepsilon_3) \geq \gamma_3 \quad (1.19)$$

tedy  $i$ -tý rozdíl vzorku požadované doby mezi dvěma poruchami  $f_i$  a skutečné hodnoty tohoto parametru  $f_{m,i}$ , který je menší než  $\varepsilon_3$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_3$ .

### **Doba obnovení služby (MTTR)**

Doba obnovení služby je schopnost telekomunikačního systému obnovit po výpadku poskytování požadované služby v definovaném časovém intervalu, tj.

$$P(|rc_i - rc_{m,i}| \leq \varepsilon_4) \geq \gamma_4 \quad (1.20)$$

tedy rozdíl požadované  $rc_i$  a skutečné hodnoty  $rc_{m,i}$   $i$ -tého obnovení funkcionality po poruše sítě je menší než  $\varepsilon_4$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_4$ .

### **Zpoždění**

Zpoždění je schopnost telekomunikačního systému dodávat pakety prostřednictvím své sítě od zdroje/vysílače k příjemci v definovaném čase, tj.

$$P(|d_t - d_{m,t}| \leq \varepsilon_5) \geq \gamma_5, t \in \langle 0, T \rangle \quad (1.21)$$

tedy rozdíl požadované hodnoty zpoždění  $d_t$  a měřené hodnoty zpoždění  $d_{m,t}$  nepřesáhne hodnotu  $\varepsilon_5$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_5$ . Zpoždění má akumulární charakter a je mimo jiné ovlivněno:

- přenosovou rychlostí rozhraní,
- velikostí paketu/rámce/buňky a
- zatížením každého z uzlů, kterými spojení prochází.

### **Ztráta paketů**

Ztráta paketů je schopnost telekomunikačního systému doručit definovaný počet paketů prostřednictvím své sítě od zdroje/vysílače k příjemci, tj.

$$P((pl_{t,d} - pl_t) \geq \varepsilon_6) \geq \gamma_6, t \in \langle 0, T \rangle \quad (1.22)$$

tedy podíl počtu dodaných paketů  $pl_{t,d}$  a celkového počtu odeslaných paketů  $pl_t$  je roven nebo větší než  $\varepsilon_7$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_7$ , pro každý čas  $t$  z intervalu  $\langle 0, T \rangle$ .

### **Bezpečnost**

Bezpečnost je schopnost systému, kdy v případě vzniku poruchy nedojde k poškození vlastní funkcionality komunikačního systému:

$$P(|W_{C_i} - W_{C_{m,i}}| \leq \varepsilon_7) \geq \gamma_7 \quad (1.23)$$

tedy že rozdíl mezi *i*-tou požadovanou hodnotou rizikové situace  $W_{C_i}$  a skutečnou hodnotou rizikové situace  $W_{C_{m,i}}$  nepřekročí hodnotu  $\varepsilon_7$  na hladině pravděpodobnosti  $\gamma_7$ .

### 1.4.3 Přiřazení hodnot systémovým parametrům

Abychom mohli se systémovými parametry pracovat, zavádíme pro účely dalších úvah hodnoty jednotlivých systémových parametrů do 5 základních hodnotových hladin, které tvoří vektor fuzzy popisu:

<b>Velmi malá</b>
<b>Malá</b>
<b>Střední</b>
<b>Velká</b>
<b>Velmi velká</b>

**Obr. 2 – Hodnotové hladiny systémových parametrů (Zdroj: [3])**

Důležité je zde uvést, že parametry jsou vždy vztaženy k prvkům subsystému či vnitřním službám/funkcím.

Z tohoto rozdělení tedy dostáváme následující stavové funkce:

- $T_1$  – telematická stavová funkce;
- $T_2$  – telekomunikační stavová funkce.

Pro telematickou stavovou funkci dostáváme následující systémové parametry:

- $a_{11}$  – Přesnost;
- $a_{12}$  – Spolehlivost;
- $a_{13}$  – Dostupnost;
- $a_{14}$  – Kontinuita;
- $a_{15}$  – Integrita;
- $a_{16}$  – Bezpečnost;

Pro komunikační stavovou funkci dostáváme následující systémové parametry:

- $a_{21}$  – Aktivační doba dostupnosti služby;
- $a_{22}$  – Dostupnost služby;
- $a_{23}$  – Střední doba mezi dvěma poruchami;
- $a_{24}$  – Střední doba obnovení služby;
- $a_{25}$  – Zpoždění;
- $a_{26}$  – Ztráta paketů;

Pakliže budeme brát v úvahu všechny systémové parametry, ovlivňující kooperativní systémy, dostáváme následující maticový zápis:

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{111} & S_{112} & S_{113} & S_{114} & S_{115} & S_{116} & S_{121} & S_{122} & S_{123} & S_{124} & S_{125} & S_{126} \\ S_{211} & S_{212} & S_{213} & S_{214} & S_{215} & S_{216} & S_{221} & S_{222} & S_{223} & S_{224} & S_{225} & S_{226} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta a_{11} \\ \Delta a_{12} \\ \Delta a_{13} \\ \Delta a_{14} \\ \Delta a_{15} \\ \Delta a_{16} \\ \Delta a_{21} \\ \Delta a_{22} \\ \Delta a_{23} \\ \Delta a_{24} \\ \Delta a_{25} \\ \Delta a_{26} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Dle výše uvedené matice lze stanovit rovnici pro výpočet jednotlivých citlivostí následovně:

$$S_{a_i}^{T_{ij}} = \frac{\Delta T_{ij}(a_i)}{\Delta a_i} \cdot \frac{a_i}{T_i} \quad (1.25)$$

kde  $i \in \{11, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 26\}$  a  $j \in \{1, 2\}$ .

Každé  $a_i$  může nabývat 5 základních fuzzy hodnot, což celou úlohu částečně zjednodušuje. Postup hodnocení resp. ladění linearizovaného kooperativního systému je realizován s využitím vlastnosti citlivostní invariance, kdy pro lineární resp. linearizovaný systém platí, že součet všech citlivostí v systému je konstantní.

## 2 VYUŽITÍ CITLIVOSTNÍ ANALÝZY PŘI NÁVRHU KOOPERATIVNÍCH SYSTÉMŮ

Kooperativní systémy dělíme na dvě hlavní kategorie Vehicle-2-Vehicle a Vehicle-2-Infrastructure. Každou kategorií aplikací kooperativních systémů je možné popsat systémovými parametry, nicméně jejich vliv se v jednotlivých kategoriích bude značně lišit, v závislosti na systémové architektuře.

Je korektní uvést, že definované systémové parametry jsou pravděpodobnostními veličinami a že pracujeme v pravděpodobnostním stavovém prostoru, ve kterém je možné identifikovat vzájemně závislé proměnné, tj. že výskyt jednoho jevu může být obecně ovlivněn jiným jevem.

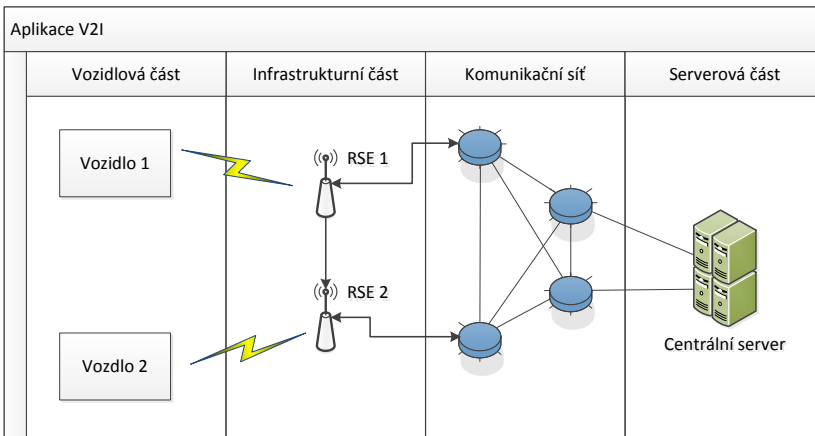
Abychom ale mohli nadále popsanou úlohu řešit standardními aritmetickými nástroji, budeme předpokládat, že se pohybujeme v deterministickém prostoru a že jednotlivé parametry jsou nezávisle proměnné. Výsledkem řešení je tak pouze první iterace, která je ale velmi významná pro hodnocení vnitřních systémových souvislostí kooperativního systému a v etapě jeho optimalizace může analytikovi zásadně pomoci v rozhodování o úpravě konkrétních parametrů, neboť může jednoduše dovodit, jak se tyto změny projeví.

### 2.1 Citlivostní analýza pro V2I koncept

Aplikace kooperativních systémů komunikující mezi vozidlem a infrastrukturou vycházejí z předpokladu, že vozidlo se pohybuje a jeho poloha resp. poloha OBU se v čase mění, zatímco technické vybavení na infrastruktuře RSE má polohu statickou. Navíc je nutné zohledňovat také vliv komunikace s centrálním serverem, ve kterém probíhá zpracování dat a jejich další distribuce zpět k dalším vozidlům. Tento vliv je však velmi složité kvantifikovat, neboť je vždy závislý na konkrétní topologii komunikační sítě a rovněž na konkrétní implementaci centrálního serveru.

Rámcová architektura komplexního kooperativního systému vozidlo-infrastruktura je uveden na následujícím Obr. 3.





**Obr. 3 – Architektura konceptu kooperativních systémů V2I (Zdroj: Autor)**

Citlivostní matici, uvedenou v kapitole 1.1, je možné díky identifikaci parametrů signifikantně ovlivňujících kooperativní systém upravit (ostatní parametry jsou zanedbány, vzhledem k jejich marginálnímu vlivu).

Dostaneme tak následující seznam parametrů:

- $a_{11}$  – Přesnost
- $a_{12}$  – Spolehlivost
- $a_{15}$  – Integrita
- $a_{16}$  – Bezpečnost
- $a_{22}$  – Dostupnost služby
- $a_{25}$  – Zpoždění
- $a_{26}$  – Ztráta paketů

Přičemž parametry  $a_{11}$  – Přesnost,  $a_{25}$  – Zpoždění a  $a_{26}$  – Ztráta paketů jsou přímo měřitelné v průběhu provozu systému, a proto tyto parametry budeme považovat za řídicí, ostatní parametry jsou řízené. Dostáváme tak následující tvar citlivostní matice:

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{111} & S_{112} & S_{115} & S_{116} & S_{122} & S_{125} & S_{126} \\ S_{211} & S_{212} & S_{215} & S_{216} & S_{222} & S_{225} & S_{226} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta a_{11} \\ \Delta a_{12} \\ \Delta a_{15} \\ \Delta a_{16} \\ \Delta a_{22} \\ \Delta a_{25} \\ \Delta a_{26} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Dle výše uvedené matice lze stanovit rovnici pro výpočet jednotlivých citlivostí následovně:

$$S_{a_i}^{T_{ij}} = \frac{\Delta T_{ij}(a_i)}{\Delta a_i} \cdot \frac{a_i}{T_i} \quad (1.27)$$

kde  $i \in \{11, 12, 15, 16, 22, 25, 26\}$  a  $j \in \{1, 2\}$ .

Každé  $a_i$  nabývá 5 základních fuzzy hodnot, které řešení celé úlohy usnadňují. Postup hodnocení resp. ladění linearizovaného telematického systému vychází z vlastnosti citlivostní invariance, kdy platí, že součet všech citlivostí v systému je konstantní.

Pokud dále budeme předpokládat, že:

- **$a_{11}$  – Přesnost** – udává přesnost určení polohy vozidla v celém systému a je dána součtem

$$(a_{11v} + a_{11r}),$$

kde:

- $a_{11v}$  – přesnost detekce polohy vozidla, která je ovlivněná rychlostí vozidla, přesností využívané technologie globálního navigačního satelitního systému (GNSS) a zpožděním komunikačního kanálu;
- $a_{11r}$  – přesnost detekce polohy RSE, která je ovlivňovaná pouze využívanou technologií globálního navigačního satelitního systému (GNSS) a zpožděním komunikačního kanálu.

- **$a_{25}$  – Zpoždění** – udává zpoždění paketů celého kooperativního systému a je dán součtem

$$(a_{25i} + a_{25k} + a_{25s}),$$

kde:

- $a_{25i}$  je zpoždění na infrastrukturní části tj. bezdrátové technologii;
  - $a_{25k}$  je zpoždění na komunikační síti tj. kabelové síti;
  - $a_{25s}$  je zpoždění na serverové části.
- $a_{26}$  – **Ztráta paketů** – udává parametr v celém kooperativním systému a je dán součtem

$$(a_{26i} + a_{26k} + a_{25s}),$$

kde:

- $a_{26i}$  je ztráta paketů na infrastrukturní části tj. bezdrátové technologii;
- $a_{26k}$  je ztráta paketů na komunikační síti tj. kabelové síti;
- $a_{26s}$  je ztráta paketů na serverové části.

Citlivostní invariance je pak dána následující rovnicí:

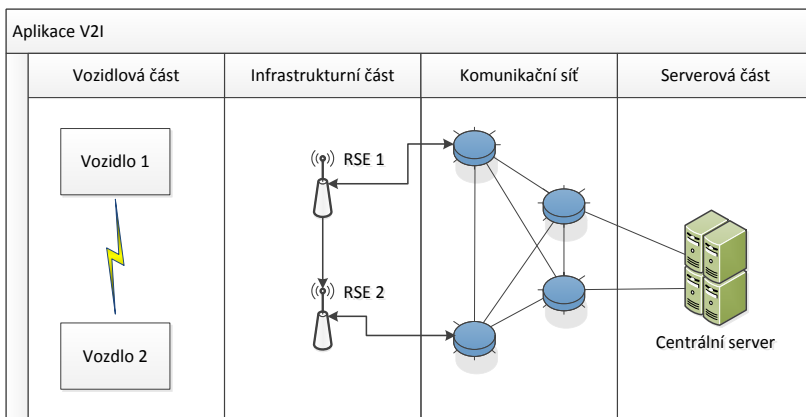
$$\sum S_{a_i}^{Tij} = \textit{konstantní}, \quad (1.28)$$

kde  $i \in \{11, 12, 15, 22, 25, 26\}$  a  $j \in \{1, 2\}$ .

## 2.2 Citlivostní analýza pro V2V koncept

Aplikace kooperativních systémů komunikující mezi dvěma resp. n vozidly, vycházejí z předpokladu, že všechna komunikující vozidla se pohybují, tzn. jejich poloha, resp. poloha jejich OBU, se v čase mění, komunikace probíhá vzájemně vždy mezi dvěma vozidly, z tohoto důvodu můžeme tuto aplikaci pro další úvahy zjednodušit pouze na tuto komunikaci.

Rámcová architektura komplexního kooperativního systému vozidlo-vozdlo je uveden na následujícím Obr. 4.



**Obr. 4 – Architektura konceptu kooperativních systémů V2V (Zdroj: Autor)**

Citlivostní matici, uvedenou v kapitole 1.1, je možné díky identifikaci parametrů významně ovlivňujících kooperativní systém upravit (ostatní parametry jsou zanedbány, vzhledem k jejich marginálnímu vlivu).

Dostaneme tak následující seznam parametrů:

- $a_{11}$  – Přesnost;
- $a_{12}$  – Spolehlivost;
- $a_{15}$  – Integrita;
- $a_{16}$  – Bezpečnost;
- $a_{22}$  – Dostupnost služby;
- $a_{25}$  – Zpoždění;
- $a_{26}$  – Ztráta paketů.

Přičemž pouze parametry  $a_{11}$  – Přesnost,  $a_{25}$  – Zpoždění a  $a_{26}$  – Ztráta paketů jsou měřitelné v průběhu provozu systému, a proto tyto parametry budeme považovat za řídicí, ostatní parametry jsou říditelné. Dostáváme tak následující tvar citlivostní matice:

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} S_{111} & S_{112} & S_{115} & S_{116} & S_{122} & S_{125} & S_{126} \\ S_{211} & S_{212} & S_{215} & S_{216} & S_{222} & S_{225} & S_{226} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta a_{11} \\ \Delta a_{12} \\ \Delta a_{15} \\ \Delta a_{16} \\ \Delta a_{22} \\ \Delta a_{25} \\ \Delta a_{26} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Dle výše uvedené matice lze stanovit rovnici pro výpočet jednotlivých citlivostí následovně:

$$S_{a_i}^{T_{ij}} = \frac{\Delta T_{ij}(a_i)}{\Delta a_i} \cdot \frac{a_i}{T_i} \quad (1.30)$$

kde  $i \in \{11, 12, 15, 16, 22, 25, 26\}$  a  $j \in \{1, 2\}$ .

Každé  $a_i$  nabývá 5 základních fuzzy hodnot, které celou úlohu zjednodušují. Postup hodnocení resp. ladění linearizovaného telematického systému vychází z vlastnosti citlivostní invariance, kdy platí, že součet všech citlivostí v systému je konstantní.

Pokud dále budeme předpokládat, že:

- **$a_{11}$  – Přesnost** – udává přesnost určení polohy vozidla v celém systému a je dána součtem

$$(a_{11m} + a_{11n}),$$

kde:

- $a_{11m}$  – přesnost detekce polohy vozidla  $m$ , která je ovlivněna rychlostí vozidla, přesností využívané technologie globálního navigačního satelitního systému (GNSS) a zpožděním komunikačního kanálu;
- $a_{11n}$  – přesnost detekce polohy vozidla  $n$ , která je ovlivněna rychlostí vozidla, přesností využívané technologie globálního navigačního satelitního systému (GNSS) a zpožděním komunikačního kanálu;
- **$a_{25}$  – Zpoždění** – udává zpoždění paketů celého kooperativního systému a je dán vlastnostmi komunikační sítě, která je vyžita ke komunikaci mezi vozidly;

- **$a_{26}$  – Ztráta paketů** – udává parametr v celém kooperativním systému a je dán vlastnostmi komunikační sítě, která je využita ke komunikaci mezi vozidly.

Citlivostní invariance je pak dána následující rovnicí:

$$\sum S_{a_i}^{T_{ij}} = \textit{konstantní}, \quad (1.31)$$

kde  $i \in \{11, 12, 15, 22, 25, 26\}$  a  $j \in \{1, 2\}$ .

### 3 NÁVRH TELEMATICKÉHO SYSTÉMU S VYUŽITÍM CITLIVOSTNÍ INVARIANCE

Z definice citlivostní invariance je patrné, že pokud dojde ke změně jednoho parametru resp. jeho citlivosti, je třeba, aby došlo zároveň ke změně jiného parametru resp. jeho citlivosti, aby součet všech sledovaných citlivostí byl i nadále konstantní. Těto vlastnosti je možné využít i při optimalizaci kooperativního systému a nastavování jeho parametrů tak, aby bylo dosaženo požadovaných výkonnostních parametrů.

Dále je možné využít znalosti, že některé řídicí parametry mohou být určeny několika složkami (např. zpoždění paketů ve V2I aplikacích), což dává možnost optimalizovat každou složku zvlášť, a celkově dosahovat stabilní hodnoty citlivosti, vedoucí ke konstantní hodnotě citlivosti na daný vnitřní parametr. Optimalizace vlastností dílčích parametrů je však limitovaná fyzickými možnostmi implementované technologie.

Pokud již není možné efektivně nastavit dílčí parametr a dosáhnout tak požadovaných vlastností systému, je třeba tento stav reflektovat v dalších parametrech resp. citlivostech, například v přesnosti detekce polohové informace, integritě nebo bezpečnosti.

Jedná se tedy hledání optimálního nastavení jednotlivých parametrů tak, aby systém jako celek splňoval požadované vlastnosti a zároveň jsme tohoto cíle dosáhli s odpovídajícím využitím systémových prostředků. Tento přístup používají zejména japonské automobilky, které citlivostní analýzu využívají při vývoji svých motorů. Tento postup obecně nazýváme ladění systému.

Abychom však mohli přistoupit k vlastnímu ladění systému, tedy úpravě jednotlivých parametrů, je třeba postupovat systematicky. Z tohoto důvodu je v této kapitole navržena metodika pro komplexní ladění telematického systému respektující postupy stanovené teorií systémů.

Metodika ladění telematických systémů sestává z následujících kroků:

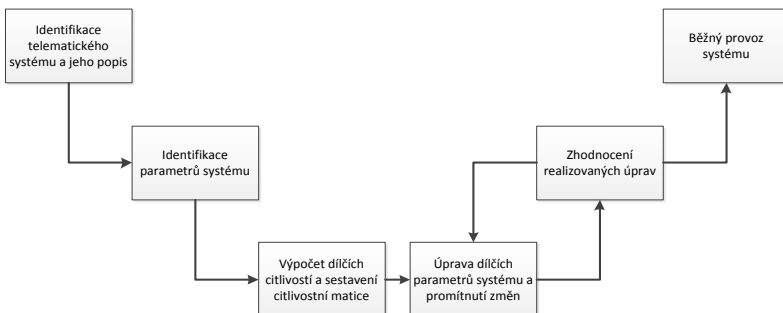
- 0) **Definice požadovaných parametrů systému** – celému procesu ladění systému musí předcházet vlastní definice požadovaných parametrů telematického systému, ačkoliv to není přímo součástí metodiky, z důvodu přehlednosti je uveden jako bod nula;
- 1) **Identifikace telematického systému a jeho popis** – aby bylo možné se systémem reálně pracovat, je třeba provést jeho identifikaci, tj. popis jednotlivých prvků a jejich vzájemných vazeb

(v případě, že se jedná o neregulární vazby, využijeme standardní postupy pro jejich regularizaci);

- 2) **Identifikace parametrů telematického systému** – v tomto kroku identifikujeme jednotlivé systémové parametry telematického systému, neboť jej ladíme jako celek, identifikované parametry v následném kroku vstupují do výpočtu dílčích citlivostí a sestavení vlastní citlivostní matice;
- 3) **Výpočet dílčích citlivostí a sestavení citlivostní matice** – v tomto kroku se již dostáváme k využití teorie citlivostí, neboť vypočítáváme dílčí citlivosti jednotlivých parametrů, které dosazujeme do citlivostní matice a vypočítáme součet všech vypočtených citlivostí, který budeme následně považovat za konstantní a po celou dobu ladění telematického systému neměnný;
- 4) **Úprava dílčích parametrů systému** – čtvrtý krok metodiky je již vlastní ladění systému, při kterém měníme některé dílčí parametry s dodržením premisy, že součet všech citlivostí zůstal i nadále konstantní, tzn., využíváme vlastnosti citlivostní invariance;
- 5) **Zhodnocení realizovaných úprav** – provedené úpravy parametrů telematického systému je nutné důkladně zhodnotit, zdali jsme provedenými úpravami vlastnosti celého systému spíše nezhoršili (či nedostali systém na mez stability, případně jej celý nerozkmitali) anebo zda provedené úpravy přinesly očekávaný výsledek, pokud nikoliv, vrátíme zpět do čtvrtého kroku metodiky a úpravu provádíme znovu, dokud nedosáhneme požadovaných vlastností systému;
- 6) **Běžný provoz systému** – dosažením požadovaných vlastností systému je ladění ukončeno a systém může přejít do rutinního provozu.

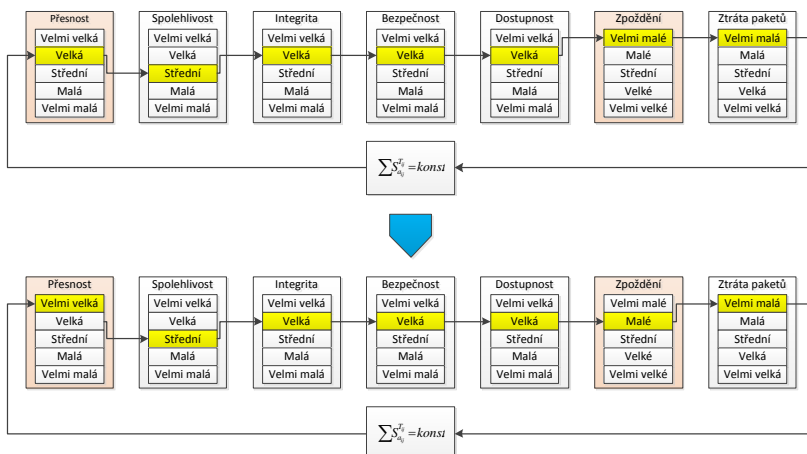
Postup ladění je lépe patrný na následujícím schématu, kde je zachycen iterativní přístup k ladění systému, tedy opakovaným úpravám dílčích parametrů systému a promítnutím těchto změn.





**Obr. 5 – Proces ladění systému s využitím citlivostní invariance (Zdroj: Autor)**

V modelovém případě by se ladění systému, kdy se významně zhorší parametr zpoždění přenosu telekomunikačního řešení, dalo realizovat například korekcí polohové informace, vedoucí k vyšší přesnosti detekce vozidla s využitím systému EGNOS či rozesláním korekce polohové informace na základě znalosti přesné polohy RSE, umístěného na konstrukcích dopravní infrastruktury. Tím je dodržena premisa citlivostní invariance a součet všech citlivostí telematického systému je i nadále konstantní. Graficky by bylo možné tyto změny charakterizovat s využitím fuzzy logiky.

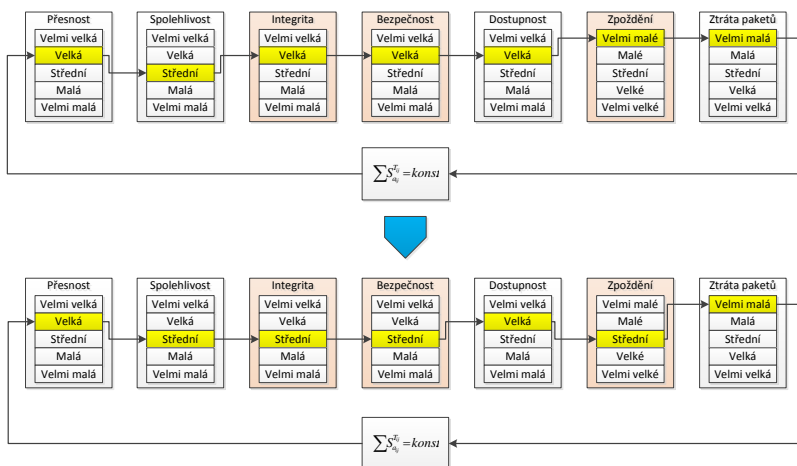


**Obr. 6 – Proces ladění úpravou řídicích parametrů (Zdroj: Autor)**

Pakliže není možné dosáhnout změny řídicích parametrů, které jsou ovlivnitelné přímo, je nutné z důvodu dodržení premisy citlivostní

invariance, přistoupit ke změně statistických parametrů celého systému, tj. bezpečnosti a integrity, které v případě dosahování signifikantně horších systémových parametrů nemohou být dodrženy, jak je patrné na Obr. 7. V praxi může znamenat zhoršení citlivosti bezpečnostního parametru například zvýšení vzdálenosti od rizikové situace, na kterou je řidič o této situaci informován případně o rozšíření bezpečnostního perimetru vozidla, vůči okolnímu světu. Tento přístup se hojně využívá v železniční dopravě, která se otázkou bezpečnosti a integrity dlouhodobě zabývá. Příkladem může být situace, pokud nejsme schopni jednoznačně určit, kde se nachází vlak mezi dvěma stanicemi, pak celý tento úsek je hodnocen jako obsazený a není možné, aby jej pojížděla další souprava (pakliže není tento úsek rozdělen na jednotlivé kolejové úseky a osazen zabezpečovací technikou, např. autoblokem). Tyto koncepty jsou zpracovány v železničních bezpečnostních standardech RAMS (zkratka RAMS představuje Reliability, Availability, Maintainability a Safety).

V případě kooperativních systémů se tedy při ladění systémů mění jeho kvalitativní vlastnosti, neboť není možné technicky zlepšit vlastnosti řídicích parametrů, jako je zpoždění, přesnost atp.



Obr. 7 – Proces ladění úpravou řízených parametrů (Zdroj: Autor)

## 4 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁK, Mirko: Integrované funkční bloky, SNTL, 1978, 1. vydání, ISBN 04-513-78
- [2] MITRA, Sanjit Kumar: Analysis and Synthesis of Linear Active Networks, John Wiley & Sons, Inc., 1969, 1. vydání, ISBN 471-61180-8
- [3] LOKAJ, Zdeněk: Metody jednoznačné elektronické identifikace vozidel, disertační práce, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, 2011
- [4] SVÍTEK, Miroslav, ZELINKA, Tomáš: Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví, Grada Publishing, 2009, 1. vydání, 218 s., ISBN 978-80-247-3232-9
- [5] PROKEŠ, Jiří, KOUBSKÝ, Zbyšek, LOKAJ, Zdeněk, ŠROTÝŘ, Martin: TE-VOGS – Testovací metodika a výsledky testů, Techniserv spol. s r.o., 2013
- [6] VOLNÝ, Martin, STÁREK, Tomáš, LOKAJ, Zdeněk, BUREŠ, Petr: Zvýšení bezpečnosti silničního provozu pomocí vozidlových spolupracujících systémů zajišťující komunikaci vozidla s ostatními vozidly nebo s inteligentní dopravní infrastrukturou (BaSIC), Průběžná zpráva za rok 2013, Projekt v rámci výzvy BETA, Technologická agentura ČR
- [7] Next-generation Vehicle-Infrastructure Cooperative Service [online]. 2012 [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: [http://www.toyota-global.com/innovation/intelligent\\_transport\\_systems/world\\_congress/2012vienna/next\\_generation\\_service.html](http://www.toyota-global.com/innovation/intelligent_transport_systems/world_congress/2012vienna/next_generation_service.html)
- [8] THOMAS, Chris: 802.16m and WiMAX Release 2.0 [online]. 2010 [cit. 2013-11-25]. Dostupný z WWW: <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-10/ftp/wimax2/index.html>
- [9] ONISHI, Hiro, MLINARSKY, Fanny: Wireless Technology Assessment for Automotive Applications. In: [online]. 19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 22/26 October 2012 [cit. 2013-10-25]

## 5 ODBORNÝ ŽIVOTOPIS

**Ing. ZDENĚK LOKAJ, Ph.D.**

### Vzdělání:

- 2011 Ph.D. (doktor); ČVUT v Praze, Fakulta dopravní (obor Inženýrská informatika v dopravě a spojích)
- 2005 Ing. (inženýr); ČVUT V Praze Fakulta dopravní (obor Automatizace v dopravě a telekomunikacích)

### Zaměstnání:

- 2012 – dosud odborný asistent, ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická
- 2005 – dosud odborný asistent, ČVUT v Praze, Fakulta dopravní
- 2011 – 2012 Partner, Inoxive s.r.o., Praha
- 2009 – 2011 Projektový manažer, Telematix Services a.s., Praha
- 2008 – 2009 Engagement Manager, Microsoft s.r.o., Praha
- 2005 – 2008 Analytik, Accenture Central Europe B.V., organizační složka, Praha

### Vědecká činnost:

- vedení projektu Elektronické identifikační systémy v dopravně-přepravním procesu (e-IDENT) - projekt MPO 2A-2TP1/108, program Trvalá prosperita, Telematix Services a.s., 2009-2011
- vedení projektu Komunikační modul pro dopravně telematické aplikace (DOTEK) - projekt MPO 2A-2TP1/15, program Trvalá prosperita, Telematix Services a.s., 2009-2010
- vedení projektu Systémové požadavky a architektura Univerzální telematické vozidlové jednotky - projekt MPO 2A-1TP1/138, program Trvalá prosperita, Telematix Services a.s., 2009-2010
- vedení projektu Studie proveditelnosti vybudování testovacího koridoru pro GNSS aplikace, studie pro Škoda Auto a.s., Telematix Services a.s., 2009
- vedení projektu TE-VOGS - Vehicle On-board Guidance System, výzkumně-vývojový projekt pro Letiště Praha a.s., Telematix Services a.s., 2009-2011
- vedení projektu Výzkum způsobu odhadu následků dopravních nehod a jejich využití v systému eCall - VaV - CG911-102-702, Telematix Services a.s., 2010

- vedení projektu Matematický aparát pro odvození identifikátorů fyzických osob, vývojový projekt pro Informační systém základních registrů ČR, Telematix Services a.s., 2010-2011
- vedení projektu Jednotná architektura platebních systémů v dopravě - MD VaV - 1F81C/048/190, Telematix Services a.s., 2010
- vedení projektu Studie aplikací mezi vozidly a mezi vozidlem a infrastruktury, studie pro Škoda Auto a.s., Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, 2012
- vedení projektu Studie aplikací kooperativních systémů v prostředí městské aglomerace se zaměřením na možnost jejich využití v hl.m.Praze, studie pro Technickou správu komunikací hl.m.Prahy, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, 2013
- vedení projektu Zvýšení využití parkovací kapacity na dálnicích za pomoci predikčních modelů - projekt TAČR v programu Alfa - TA02031411, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, 2012-2014
- vedení projektu Systémy identifikace a zpracování signalizačních a přenosových protokolů, projekt Ministerstva vnitra ČR, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, 2013-2015
- vedení projektu TE-VOGS - Vehicle On-board Guidance System, výzkumně-vývojový projekt pro Letiště Praha a.s., Techniserv spol. s r.o., od 2012 do současnosti
- člen projektového týmu projektu Kamelot: Komplexní řešení distribuce dopravních informací - projekt TAČR v programu Alfa, TA04031524, 2014-2016
- člen projektového týmu projektu Zvýšení bezpečnosti silničního provozu pomocí vozidlových spolupracujících systémů zajišťující komunikaci vozidla s ostatními vozidly nebo s inteligentní dopravní infrastrukturou - projekt TAČR v programu Beta, TB0100MD073, 2012-2014

### **Pedagogická činnost:**

- přednášky z volitelného předmětu „Procesní informační systémy v dopravě“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, magisterské studium od 2010 do současnosti
- přednášky z předmětu „Telekomunikace“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, bakalářské studium, 2009-2012 (1/4 přednášek)
- přednášky z předmětu „Informační systémy“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, bakalářské studium, 2009-2011 (1/2 přednášek)
- přednášky z předmětu „Teorie systémů“, Fakulta informačních

technologií, ČVUT v Praze, magisterské studium, 2010-2012 (1/2 přednášek)

- cvičení z předmětu „Základy informatiky“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, bakalářské studium, od 2012 do současnosti
- cvičení z předmětu „Úvod do programování“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, bakalářské studium, od 2012 do současnosti
- vedení projektu „Člověk a globální komunikace“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, od 2006 do současnosti
- vedení projektu „Družicové navigace a její využití v dopravě“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, 2008-2011
- vedení projektu „Optimalizace přepravy zboží s využitím inteligentních dopravních systémů“, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, od 2014 do současnosti

### **Jiné aktivity:**

- člen redakční rady on-line časopisu Svet dopravy, SK – ISSN 1338-9629
- člen programového výboru mezinárodní konference WMSCI 2013 - 2015, Orlando, FL, USA
- člen programového výboru mezinárodní konference ROSALIA 2013, SK

### **Publikační činnost:**

- 4 články v impaktovaném časopise
- 1 článek v mezinárodní monografii
- 5 článků v mezinárodním recenzovaném časopise
- 15 příspěvků ve sborníku na mezinárodních konferencích
- 2 původní články v českém vědeckém a odborném časopise
- 9 vyzvaných přednášek na mezinárodní konferenci
- 5 citací (1 mezinárodní, 4 v ČR)

### **Výběr publikací:**

- Svitek, M.; Jeřábek, M.; Lokaj, Z.: The Complex Information Systems with Safe Access Control, 10th WSEAS International Conference on APPLIED INFORMATICS AND COMMUNICATIONS, Conference proceedings, Taipei, TW, 2010, p.188-192, ISBN 978-960-474-216-5, ISSN 1792-460X (WoS 000290651300041)
- Lokaj, Z.; Šrotýř, M.: Wi-Fi Data Services as an alternative for CALM-based ITS solutions; Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on DATA NETWORKS, COMMUNICATIONS,

COMPUTERS (DNCOCO '09), Baltimore: 8th WSEAS International Conference on DATA NETWORKS, COMMUNICATIONS, COMPUTERS, 2009, p. 199-204, ISSN 1790-5109, ISBN 978-960-474-134-2 (WoS 000276626300028)

- Zelinka, T.; Lokaj, Z.: Adaptive Multi-path Wireless Telecommunications Services Quality
- Management, 10th WSEAS International Conference on APPLIED INFORMATICS AND COMMUNICATIONS, Conference proceedings, Taipei, TW, 2010, p.57-63, ISBN 978-960-474-216-5, ISSN 1792-460X (WoS 000290651300017)
- Svitek, M; Faltus, V; Lokaj, Z.: Pilot testing of certification method developed for ITS applications using GNSS systems, Transport Systems Telematics, Springer-Verlag, Berlin, DE, 2010, p. 178-285, ISBN 978-3-642-16471-2 (WoS 000288691200031)
- Svitek, M; Faltus, V; Lokaj, Z: Pilot Testing of Certification Methods Developed for ITS Applications Based on GNSS Systems, Proceedings of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Madeira, PT, 2010, p.1019-1024, ISBN 978-1-4244-7658-9
- Zelinka, T.; Lokaj, Z.: Data Security in Transportation Solutions, The 15th World
- Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, USA - FL, 2011, p.160-165, ISBN 978-1-936338-29-0, Session's Best Paper Award
- Zelinka, T.; Lokaj, Z.; Svitek, M.: Specific telecommunications solutions for ITS applications,
- Circuits, Systems, Signal and Telecommunications Conference, Applied mathematics in electrical and computer engineering proceedings, Cambridge, Harvard, USA - MA, 2012, p. 315 - 322, ISBN 978-1-61804-064-0
- Zelinka, T., Lokaj, Z., Srotyr, M.: Service Quality Management in the ITS Telecommunications Systems, The 16th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, USA - FL, 2012, p.91-96, ISBN 978-1-936338-62-7, Session's Best Paper Award
- Zelinka, T., Jerabek, M., Lokaj, Z.: Authentication and Data Security in ITS Telecommunications Solutions, The 17th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, USA - FL, 2013, p. 295-300, ISBN 978-1-936338-87-0, Session's Best Paper Award