

STOCHASTICKÝ MODEL SPOLEHLIVOSTI MODERNIZOVANÉ MOTOROVÉ LOKOMOTIVY

STOCHASTIC RELIABILITY MODEL OF MODERNIZED DIESEL LOCOMOTIVE

Jan Famfulík¹

Anotace: Modernizace motorových lokomotiv je v současnosti často používaná metoda obnovy parku hnacích vozidel. Otázky spojené s tímto postupem souvisí mimo jiné i s dosažením očekávané vyšší úrovně bezporuchovosti a udržitelnosti po provedení modernizace. Řešení této problematiky je obsahem článku.

Klíčová slova: hnací vozidla, modernizace, bezporuchovost, udržitelnost

Summary: The modernization of diesel locomotives is often used method of powered vehicles fleet restoration in present. The issues associated with this process are related with achievement of expected higher level of reliability and maintainability after modernization realization. This problem solution is content of the paper.

Key words: powered vehicles, modernization, reliability, maintainability

1. ÚVOD

Modernizace motorové lokomotivy je postup, kdy v rámci obnovy (opravy) lokomotivy jsou některé konstrukční části opraveny a jiné, morálně i fyzicky opotřebené, jsou nahrazeny novými, moderními. Nově dosazené celky mají zpravidla vyšší spolehlivost než původní, změní se tak i spolehlivost modernizované lokomotivy. Z hlediska teorie obnovy dochází ke změně střední doby mezi poruchami (MTBF) a střední doby obnovy (MTTR) lokomotivy.

Základním předpokladem stochastického modelu obnovy technického objektu je nutnost stejných fyzikálních rozměrů vstupujících náhodných veličin, např. časových, tj. střední doba mezi poruchami (MTBF) a střední doba obnovy (MTTR). Uvedený předpoklad je determinující, a pokud není splněn, je nutné provést vzájemný převod jednotek. Tento převod jednotek však přináší jisté problémy, příkladem mohou být motorové lokomotivy. Typickou jednotkou používanou k hodnocení provozní práce je ujetá dráha, v závislosti na této veličině je uvedena bezporuchovost vozidla. Doba údržby se však sleduje v hodinách, není tak splněna podmínka stejných fyzikálních rozměrů vstupujících veličin. Problémem je, jak vzájemně provést převod jednotek, jak např. vyjádřit dobu údržby pomocí ujeté dráhy vozidla nebo opačně. K řešení problému je možné využít nově zavedené definice mise vozidla a v souvislosti s touto definicí použít náhodný vektor pro hodnocení spolehlivosti modernizované lokomotivy.

¹ Ing. Jan Famfulík, Ph.D., Vysoká škola báňská – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 17. listopadu 15, 708033 Ostrava – Poruba, Tel: +420 596 994 553, E-mail: jan.famfulik@vsb.cz

1.1 Definice mise vozidla

Mise vozidla je definována jako druh globálně pojatého úkolu [1], jehož plnění v přesně definovaném okamžiku začíná a v jiném, přesně definovaném okamžiku končí. Jeho splnění se požaduje za předem stanovených podmínek s vynaložením daných prostředků údržby. Mise se skládá s konečného počtu souboru fází a funkcí, realizovaných vozidlem za účelem splnění cílů mise. Pravděpodobnost splnění mise je pravděpodobnost, s jakou v okamžiku ukončení mise bude vozidlo plnit požadované funkce.

2. SESTAVENÍ MODELU MISE

Model mise sestavíme ve třech krocích. V prvním kroku navrhne model provozu vozidla s uvážením pravděpodobnosti vzniku poruchy a pravděpodobnosti odstranění poruchy. V druhém kroku navrhne model údržby s uvážením dvou náhodných veličin, doby vyčleněné na údržbu v průběhu plnění mise a náklady na údržbu. Ve třetím kroku provedeme spojení obou modelů.

2.1 Sestavení modelu provozu

Vozidlo má splnit misi, která představuje ujetou dráhu l km a během plnění mise je možné použít pouze omezené prostředky údržby do výše u . Prostředky údržby jsou chápány jako dvourozměrná náhodná veličina, podrobněji je pojednána v rámci modelu údržby. Pokud v průběhu mise vznikne porucha, obecně potřeba údržby, kterou se jistou pravděpodobností nepodaří odstranit v rámci vymezených prostředků údržby u , vozidlo misi nesplní. Model provozu je sestaven za těchto podmínek:

- poruchy v parku vozidel jsou náhodné jevy, na sobě nezávislé,
- na jednom vozidle může v jeden okamžik nastat pouze jedna porucha,
- poruchu je možné odstranit pouze s vynaložením prostředků údržby,
- proces vzniku poruch a jejich odstranění s vynaložením prostředků údržby se u každého vozidla v rámci parku náhodně opakuje.

Za těchto předpokladů mohou nastat tři disjunktní jevy:

Jev A:

Během plnění mise v délce l vznikne u vozidla porucha, její odstranění se podaří v rámci vyčleněných prostředků údržby u . V tomto případě je mise splněna. Pravděpodobnost vzniku jevu je možné vyjádřit pomocí simultánní hustoty pravděpodobnosti (1):

$$P(A) = \int_0^l \int_0^u f(l, u) du dl \quad (1)$$

Jev B:

Během plnění mise v délce l nevznikne žádná porucha, není nutné vynaložit žádné prostředky údržby. Mise je splněna, pravděpodobnost vzniku jevu je dána vztahem (2):

$$P(B) = \int_l^\infty \int_0^\infty f(l, u) du dl \quad (2)$$

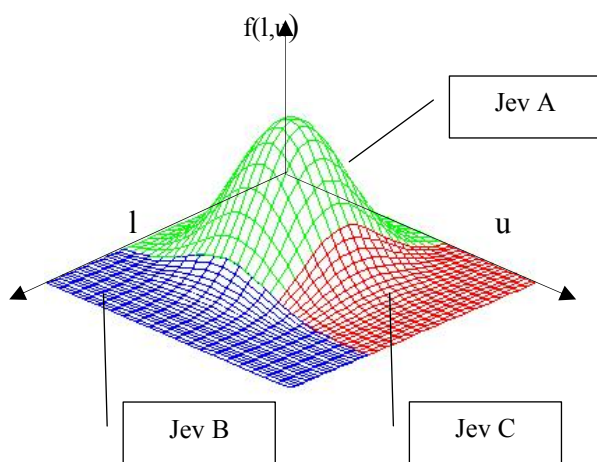
Jev C:

Během plnění mise v délce l vznikne u vozidla porucha, její odstranění se nepodaří v rámci vyčleněných prostředků údržby u . V tomto případě mise není splněna. Pravděpodobnost vzniku jevu je dána vztahem (3):

$$P(C) = \int_0^l \int_u^\infty f(l, u) du dl \quad (3)$$

Jevy A, B a C vyjadřují podmínku úplné množiny všech možných disjunktních jevů (Obr. 1), součet pravděpodobností nastoupení jevů A, B, C je proto:

$$P(A) + P(B) + P(C) = 1 \quad (4)$$



Zdroj: Autor

Obr. 1 - Hustota rozdělení pravděpodobnosti modelu provozu

Definujme náhodný jev F, který vyjadřuje splnění mise. Pravděpodobnost tohoto jevu vyjádříme pomocí vztahu (5):

$$P(F) = P(A) + P(B) \quad (5)$$

Dosazením vztahu (5) do (4) a dalšími úpravami získáme pravděpodobnost splnění mise:

$$P(F) = P(l, u) = 1 - P(C) \quad (6)$$

S využitím vztahu (3), který popisuje pravděpodobnost nastoupení jevu C, lze vyjádřit pravděpodobnost splnění mise:

$$P(l, u) = 1 - \int_0^l \int_u^\infty f(l, u) du dl \quad (7)$$

Za předpokladů statistické nezávislosti marginálních rozdělení $f(l)$ a $f(u)$ je pravděpodobnost splnění mise:

$$P(l, u) = 1 - \int_0^l f(l) dl \cdot \int_u^\infty f(u) du \quad (8)$$

$$P(l, u) = 1 - F(l) \cdot R(u)$$

$$P(l, u) = 1 - [F(l) \cdot (1 - F(u))] \quad (9)$$

Kde:

$P(l, u)$ je pravděpodobnost splnění mise [1].

$F(l)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - ujeté dráhy mezi poruchami [1].

$F(u)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - vynaložených prostředků údržby [1].

2.2 Sestavení modelu údržby

Uvažujme situaci, kdy se poruchu vozidla vzniklou při plnění mise nepodaří odstranit v rámci vymezených prostředků údržby. Prostředky údržby představují dvě náhodné veličiny, doba údržby a náklady na údržbu. Pokud je překročena předem stanovená doba údržby, nebo překročeny stanovené náklady na údržbu, není splněn úkol údržby v rámci vymezených prostředků údržby. Proces lze popsat pomocí simultánní pravděpodobnosti dvou náhodných veličin, v tomto případě dobou údržby a náklady na údržbu.

Model je sestaven za těchto podmínek:

- doba údržby vozidel je náhodná veličina,
- náklady na údržbu vozidel je náhodná veličina,
- každý údržbový zásah vyřadí vozidlo na určitou dobu z provozu, tato doba je rovna době údržby,
- doby údržby a výše nákladů na údržbu se u každého vozidla v rámci parku náhodně opakuje.

Za těchto předpokladů mohou nastat čtyři disjunktní jevy:

Jev D:

Údržbu se podaří úspěšně ukončit v rámci vymezené doby t , při vynaložení nákladů nejvýše do velikosti n . V tomto případě je úkol údržby splněn, pravděpodobnost vzniku tohoto jevu lze vyjádřit pomocí simultánní hustoty pravděpodobnosti:

$$P(D) = \int_0^t \int_0^n f(t, n) dn dt \quad (10)$$

Jev E:

Údržbu se podaří úspěšně ukončit v rámci vymezené doby t , ale při vynaložení vyšších nákladů než n . Úkol údržby není splněn, pravděpodobnost vzniku tohoto jevu je dána vztahem:

$$P(E) = \int_0^t \int_n^\infty f(t, n) dn dt \quad (11)$$

Jev H:

Údržbu se nepodaří úspěšně ukončit v rámci vymezené doby t , při vynaložení nákladů nejvýše do velikosti n . Úkol údržby není splněn, pravděpodobnost vzniku tohoto jevu je dána vztahem:

$$P(H) = \int_t^\infty \int_0^n f(t,n) dn dt \quad (12)$$

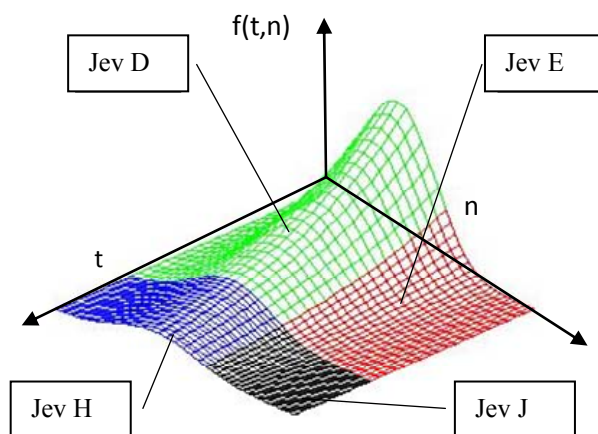
Jev J:

Údržbu se nepodaří úspěšně ukončit v rámci vymezené doby t , při vynaložení vyšších nákladů než n . Úkol údržby není splněn, pravděpodobnost vzniku tohoto jevu je dána vztahem:

$$P(J) = \int_t^\infty \int_n^\infty f(t,n) dn dt \quad (13)$$

Jevy D, E, H a J vyjadřují podmínku úplné množiny všech možných jevů (Obr.2), součet pravděpodobností vzniku jevů D, E, H, J je proto:

$$P(D) + P(E) + P(H) + P(J) = 1 \quad (14)$$



Zdroj: Autor

Obr. 2 - Hustota rozdělení pravděpodobnosti modelu provozu

Z postupu sestavení modelu je zřejmé, že splnění úkolu údržby představuje pouze jev D, proto lze přímo vyjádřit hledanou pravděpodobnost splnění úkolu údržby:

$$P(D) = P(t,n) = \int_0^t \int_0^n f(t,n) dn dt \quad (15)$$

Za předpokladů statistické nezávislosti marginálních rozdělení $f(t)$ a $f(n)$ je distribuční funkce pravděpodobnosti splnění úkolu údržby:

$$F(t,n) = \int_0^t f(t) dt \cdot \int_0^n f(n) dn$$

$$F(t, n) = F(t) \cdot F(n) \quad (16)$$

Kde:

$F(t, n)$ je distribuční funkce náhodné proměnné - splnění úkolu údržby [1].

$F(t)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - doby údržby [1].

$F(n)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - nákladů na údržbu [1].

Vyjádříme pravděpodobnost splnění mise funkcí $P(l, t, n)$, určenou bezporuchovostí, udržovatelností a náklady na údržbu. V modelu provozu, popsaném vztahem (9) vystupuje pravděpodobnost vynaložení prostředků údržby $F(u)$. Protože pravděpodobnost $F(u)$ formálně popisuje stejný jev, jako model údržby, je možné do vztahu (9) dosadit z rovnice (16) a získat tak hledanou funkci $P(l, t, n)$:

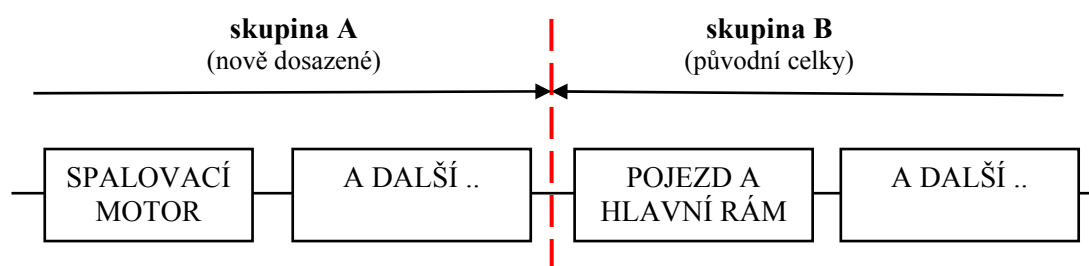
$$P(l, t, n) = 1 - [F(l) \cdot (1 - F(t) \cdot F(n))] \quad (17)$$

3. STOCHASTICKÝ MODEL SPOLEHLIVOSTI MODERNIZOVANÉ MOTOROVÉ LOKOMOTIVY

Cílem následujících postupů je stanovit parametry spolehlivosti nově dosazených celků vozidla, zejména parametry bezporuchovosti a udržovatelnosti.

3.1 Sestavení modelu vozidla

Vozidlo je možné v modelu prezentovat jako soustavu se sériovým uspořádáním prvků, kde prvky představují hlavní konstrukční skupiny vozidla. Sériové uspořádání je zvoleno proto, že při poruše jednoho celku se neprovozuschopným stává celé vozidlo. Skupinu nově dosazených celků (modernizovaných) označíme jako celky A, původní nemodernizované konstrukční celky označíme B, jak ukazuje obrázek č. 3. Výčet konstrukčních celků na obrázku je pouze informativní.



Zdroj: Autor

Obr. 3 - Uspořádání konstrukčních celků v modelu vozidla

Uspořádáním konstrukčních celků na dvě skupiny můžeme uplatnit tyto předpoklady:

- skupina A (modernizované celky) bude vykazovat nové charakteristiky spolehlivosti, tj. změní se její bezporuchovost, udržovatelnost i náklady na údržbu,

- skupina B bude vykazovat původní charakteristiky spolehlivosti, t.j. nezmění se její bezporuchovost, udržovatelnost ani náklady na údržbu.

Za předpokladu nezávislosti vzniku náhodných jevů v soustavě lze vyjádřit vlastnosti soustavy takto:

- vozidlo je v bezporuchovém stavu pouze tehdy, jsou-li v bezporuchovém stavu všechny celky vozidla, potom:

$$\begin{aligned}R_{AB}(l) &= R_A(l) \cdot R_B(l) \\ F_{AB}(l) &= 1 - R_A(l) \cdot R_B(l)\end{aligned}\tag{18}$$

Kde:

- $F_{AB}(l)$ - distribuční funkce náhodné proměnné – ujetá dráha mezi poruchami soustavy [1].
- $R_A(l)$ - bezporuchovost skupiny A - modernizované celky [1].
- $R_B(l)$ - bezporuchovost skupiny B - původní, nemodernizované celky [1].

U vozidla je ukončena prováděná údržba pouze tehdy, je-li ukončená u všech udržovaných celků, a potom:

$$F_{AB}(t) = F_A(t) \cdot F_B(t)\tag{19}$$

Kde:

- $F_{AB}(t)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - doba údržby soustavy [1].
- $F_A(t)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - doba údržby skupiny A [1].
- $F_B(t)$ - distribuční funkce náhodné proměnné - doba údržby skupiny B [1].

Provedením modernizace je možné očekávat i změnu nákladů na údržbu. Vyjádřit vliv nově dosazených celků na změnu nákladů na údržbu je složité. Je možné konstatovat, že pokud budou nově dosazené celky vykazovat nižší hladinu nákladů na údržbu než původní, sníží se i hodnota středních nákladů na údržbu celého vozidla a opačně. Některé zkušenosti ukazují, že nově dosazené celky, např. spalovací motor, vykazují sice nižší nároky na pracnost údržby, obecně vyšší spolehlivost, ale současně jsou výrazně dražší náhradní díly, služby spojené s údržbou i používané provozní hmoty (motorový olej, chladící kapalina). Obecně lze proto pouze předpokládat, že po modernizaci se změní parametry rozdělení nákladů na údržbu, včetně možnosti zvýšení střední hodnoty nákladů na údržbu. Proto jediným ze zdrojů zvýšení efektivity provozu po provedení modernizace nemůže být pouze hladina nákladů na údržbu, ale je nutné požadovat zlepšení bezporuchovosti a udržovatelnosti vozidla po modernizaci.

3.2 Odhad parametrů bezporuchovosti nově dosazených celků

Odhad parametrů bezporuchovosti a udržovatelnosti nově dosazených celků vozidla vychází z předpokladu ekonomicky zdůvodněného požadavku na snížení počtu záložních

vozidel. Snížení počtu záložních vozidel je možné dosáhnout změnou součinitele zálohy [3], daného vztahem:

$$z = 1 - P(l, t, n) \quad (20)$$

Stanovme funkční závislost mezi parametry spolehlivosti nově dosazených celků a součinitelem zálohy. Dosazením rovnic (18) a (19) do vztahu (17) lze získat vyjádření součinitele zálohy pro sériové uspořádání skupin A a B.

$$z = (1 - R_A(l) \cdot R_B(l)) \cdot (1 - F_A(t) \cdot F_B(t) \cdot F(n)) \quad (21)$$

Dosaďme do vztahu (21) konkrétní rozdělení náhodných veličin. U bezporuchovosti původních i nově dosazených celků uvažujeme exponenciální rozdělení pravděpodobnosti vzniku poruchy, tedy rozdělení charakteristické pro ustálený provoz s konstantní intenzitou poruch. K vyjádření parametrů udržitelnosti použijeme také exponenciální rozdělení, náklady na údržbu mají normální rozdělení [2]. Dosazením konkrétních typů rozdělení a úpravou vztahu (21) získáme:

$$\frac{t_A}{T_{SA}} = -\ln \left[\frac{1 - \frac{z}{1 - \exp\left(-\frac{L_v}{L_{SA}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{L_v}{L_{SB}}\right)}}{1 - \exp\left(-\frac{T_p}{T_{SB}}\right) \cdot \Phi\left(\frac{n - \mu}{\sigma}\right)} \right] \quad (22)$$

Kde:

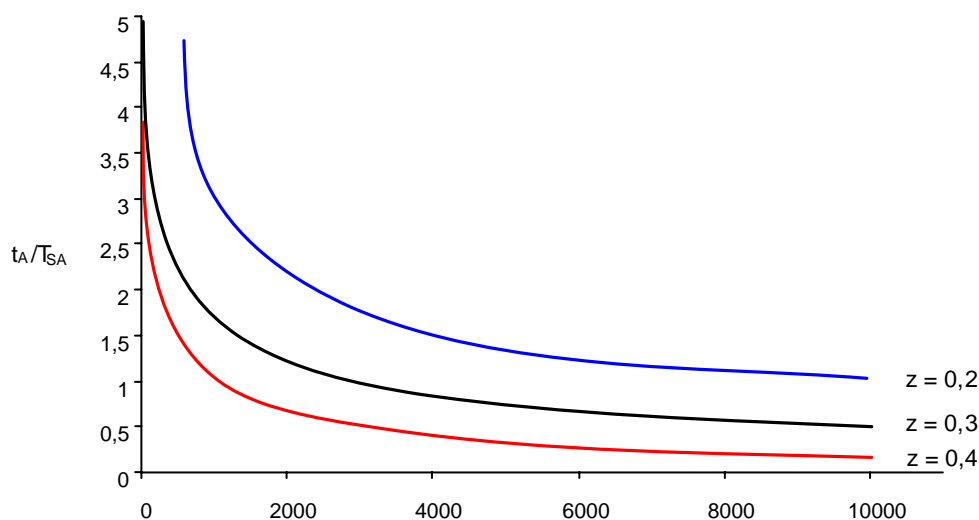
- t_A je doba údržby nově dosazených celků, skupina A [h].
- T_{SA} - střední doba údržby celků skupiny A [h].
- L_v - ujetá dráha vozidla v rámci plnění mise [km].
- L_{SA} - střední ujetá dráha mezi poruchami celků skupiny A [km].
- L_{SB} - střední ujetá dráha mezi poruchami nemodernizovaných celků, skupina B [km].
- T_p - doba vyčleněná na údržbu vozidla [h].
- T_{SB} - střední doba údržby celků skupiny B [h].
- z - součinitel zálohy [-].
- n - náklady na údržbu po modernizaci [Kč].
- μ - střední hodnota nákladů na údržbu po modernizaci [Kč].
- σ - směrodatná odchylka nákladů na údržbu po modernizaci [Kč].
- Φ - distribuční funkce normovaného normálního rozdělení

Sestavme průběh funkce (22) s uvažováním různých hodnot součinitele zálohy (Obr. 4). Z obrázku je patrné, že s rostoucí hodnotou střední dráhy mezi poruchami L_{SA} u nově dosazených celků klesá doba potřebná na údržbu. Počáteční rychlý pokles doby

údržby se s rostoucí hodnotou L_{SA} postupně zpomaluje, až se přiblíží ustálené hodnotě. Prakticky to znamená, že nově dosazené celky nemusí mít bezpodmínečně velmi vysokou střední hodnotu dráhy mezi poruchami L_{SA} (např. spalovací motor), protože tento parametr nezajistí další snížení střední doby trvání údržby. Vstupní hodnoty proměnných použitých při konstrukci grafu jsou v tabulce 1 a pocházejí ze zdroje [2].

Tab. 1 - Vstupní hodnoty pro výpočet

Náklady na údržbu		Bezporuchovost a udržovatelnost		Délka mise	
μ (peněžních jednotek)	1	L_v (km)	1500	L_v (km)	1500
σ (peněžních jednotek)	0,2	T_p (h)	12,5		
n (peněžních jednotek)	1,6	T_{sb} (h)	8		



Zdroj: Autor

Obr. 4 - Vztah bezporuchovosti a udržovatelnosti nově dosazených celků

4. ZÁVĚR

Obecně popsáný princip stochastického modelu pravděpodobnosti splnění mise byl použit k odhadu parametrů bezporuchovosti a udržovatelnosti modernizované motorové lokomotivy. Lokomotiva je chápána jako sériová soustava složená z jednotlivých konstrukčních celků a posuzujeme dopad náhrady původních konstrukčních celků novými. Model umožňuje stanovit požadavky na bezporuchovost a udržovatelnost nově dosazených konstrukčních celků.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VINTR, Z., HOLUB, R. *A Model of Vehicle Dependability Evaluation*. In: Transport Means 2003 - Proceedings of International Conference. Kaunas: Kauno technologijos universitetas 2003, pp 161 – 165. ISBN 9955-09-511-3

- [2] ŠIROKÝ, J.; NEUGEBAUER, J. *Podklady pro ověřování LCC v provozu vozidel*. In: TD 2005 – Diagon 2005. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2005. ss: 172. s: 30-35. ISBN 80-7318-293-9
- [3] FAMFULÍK, J. *Příspěvek k využití vektoru spolehlivosti vozidla*. In sborník „Opotřebení, spolehlivost, diagnostika 2007“. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2007, s 73-79. ISBN 978-80-7231-294-8

Recenzenti: Ing. Pavel Praks, Ph.D.
VŠB-Technická Univerzita Ostrava, FEI, Katedra aplikované matematiky
prof. Ing. Milan Lánský, DrSc.
Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky