

VEHICLE DEPENDABILITY: RELATED COST ANALYSIS AND REQUIREMENTS OPTIMIZATION

A. Weiter*

Summary: *Life cycle cost analysis is the process of economic analysis to assess the total cost of acquisition, proprietary and disposal of vehicles. This analysis provides important inputs to the decision making process of the product design, development, use and disposal. Vehicle suppliers can optimise their designs through evaluation of alternatives and through performing trade-off studies. They can evaluate various operating, maintenance and disposal strategies to optimise life cycle cost (LCC).*

1. Úvod

Optimalizací nákladů životního cyklu vozidla rozumíme metody, s jejichž pomocí lze optimalizovat určitý záměr při racionálním využití daných možností. Optimalizace je chápána jako souhrn opatření, které se realizují za účelem nalezení nejvhodnějších hodnot. Z logické úvahy plyne, že mají být **optimální** z hlediska vhodně volených a zdůvodnitelných kritérií optimalizace. Při volbě kritéria optimalizace je účelné vycházet z následné obecné úvahy:

- základním požadavkem na vozidlo je, aby bylo schopné vykonávat požadovanou funkci
- dalším požadavkem je, aby tuto funkci vykonávalo za optimálních podmínek provozu při uvážení všech působících činitelů při minimálních nákladech

Každá optimalizace by měla splnit dvě základní podmínky:

1. Co se bude optimalizovat \Rightarrow **cílová funkce** (např. náklady)
2. Podle jakých kritérií bude optimalizace provedena \Rightarrow **kritériální funkce** (např. min. náklady, max. výkony)

K tomu je pak potřeba zvolit vhodný matematický aparát:

- sestavit „model“ cílové funkce
- zvolit postup hledání optima (např. analyticky, graficky, numericky)

Pro model optimalizace požadavků na spolehlivost vozidel z hlediska LCC je třeba popsat jednotlivé závislosti úrovně spolehlivosti vozidla a výše uvedených nákladů nutných pro jejich zajištění. Prioritním zdrojem takových informací jsou převážně ekonomické rozborů z praxe.

* Ing. Aleš Weiter, Vojenská akademie v Brně, Fakulta vojenskotechnická-druhů vojsk, Kounicova 65, 612 00 Brno, Tel.: +420 973 44 2718, Fax.: +420 973 44 3420, Email.: Ales.Weiter@seznam.cz

Musíme také brát v úvahu, že:

- přestože u výrobku, u kterého nejsou požadovány žádné spolehlivostní vlastnosti, se musí vynaložit určité prostředky na vývoj a výrobu
- nelze vyrobit zcela spolehlivý výrobek
- vyšší úroveň spolehlivosti vyžaduje vyšší náklady na vývoj a výrobu
- úroveň spolehlivosti a množství nákladů nutných na její zajištění je závislé na době provozu

Při hledání optimální hodnoty ukazatelů spolehlivosti je třeba zdůraznit, že většina rozhodnutí má v konečném důsledku vliv na celkové náklady životního cyklu vozidla. V dnešní době je jedním z hlavních cílů technicko-ekonomické optimalizace snížit tyto náklady. Za hlavní nástroje při zabezpečování tohoto strategického cíle se považují metody prediktivní analýzy a dále metody ověřování (demonstrace) spolehlivosti při použití matematického modelování.

2. Obecná specifikace požadavků na spolehlivost

Před zahájením vlastního návrhu a vývoje vozidla se nejdříve stanoví základní koncepce zadávání požadavků na spolehlivost vozidel. Odborné a jednoznačné zadávání požadavků na spolehlivost vozidel, je významnou součástí návrhu a vývoje, protože právě v této etapě životního cyklu techniky jsou stanoveny základy spolehlivosti vozidel a provádí se první analýzy nákladů životního cyklu.

Obecná koncepce zadávání požadavků, se řídí doporučeními IEC/TC 56 a respektuje důsledně systémový přístup k zabezpečování spolehlivosti vozidel z logiky procesu vzniku, provozu a zániku vozidla. Celkový život vozidla je možné rozdělit do šesti relativně samostatných etap:

1. etapa: Volba koncepce, definice objektu a stanovení cílových požadavků na spolehlivost.
2. etapa: Výzkumu a vývoje vozidla.
3. etapa: Sériová výroba vozidla.
4. etapa: Instalace vozidla.
5. etapa: Provozu a údržby vozidla.
6. etapa: Vypořádání a likvidace vozidla.

V procesu aktivní tvorby spolehlivosti se v současnosti za nejdůležitější považují první dvě etapy, kdy se rozhoduje o koncepci spolehlivosti objektu, jeho budoucích vlastnostech a odbornou formulací požadavků se vytváří budoucí úroveň spolehlivosti. Jedny z dílčích požadavků na vozidlo jsou právě požadavky na spolehlivost. Mezi základní parametry pro popis spolehlivosti výrobků patří bezporuchovost, udržovatelnost, zajištěnost údržby a pohotovost. Při specifikaci požadavků na tyto dané vlastnosti vozidel vycházíme ze základních úvah, že musí:

- být realistické, posuzovatelné, nerozporné
- odpovídat současnému stavu technologie
- být jasné, plně srozumitelné, praktické
- vycházet ze vzájemné dohody mezi výrobcem a odběratelem
- ekonomicky zdůvodnitelné, přijatelné a dosažitelné

Je třeba zdůraznit, že by nemělo docházet k neopodstatněnému specifikování požadavků. Všechny požadavky na spolehlivost vozidel se mají vyjadřovat pokud možno kvantitativně, ale mohou se uvádět ve specifikacích i kvalitativně. Obecné předepisování a zadávání

požadavků na spolehlivost se provádí v úplné formě. Pro zodpovědné posouzení úrovně plnění požadavků na spolehlivost, je pak třeba stanovit soubor objektivně měřitelných ukazatelů na její vyhodnocení. Mohou se používat i dodatečné ukazatele pro popis konkrétních objektů.

Pro vhodné zadání požadavků na spolehlivost platí, že se zadávají v následující skladbě:

- nomenklatura (konečná množina) ukazatelů spolehlivosti, která dostatečně charakterizuje analyzovaný objekt z hlediska spolehlivosti
- číselné hodnoty ukazatelů spolehlivosti (kvantifikace)
- provozní podmínky objektu a podmínky prostředí, pro které ukazatele platí dle IEC (operační, prostředí)
- etapa života objektu, pro které ukazatele platí (prototyp, ověřovací série, sériová výroba, provoz)
- definici poruch a mezního stavu objektu
- kritéria určená k ověření požadavků na spolehlivost (kritéria verifikace)

Všeobecně se číselné hodnoty ukazatelů spolehlivosti určují několika možnými způsoby:

- pomocí odborného odhadu
- akceptováním požadavků odběratele
- využitím výsledků získaných ze sledování spolehlivosti obdobného objektu a převedením na nový objekt
- optimalizací hodnot ukazatelů dle definovaných kritérií (např. náklady životního cyklu)

3. Analýza nákladů životního cyklu

Na základě všeobecně známých informací lze prohlásit, že při zvyšování úrovně spolehlivosti vozidla rostou náklady na jeho výzkum, vývoj a výrobu (pořizovací náklady), ale současně se snižují náklady na zabezpečování provozuschopného stavu vozidla v uživatelské sféře (vlastnické náklady). Je zřejmé, že při nízké úrovni spolehlivosti vozidla bude tento vztah opačný. Vzhledem k tomu, že vozidlo má sloužit především uživateli, mělo by být prioritní uživatelské hledisko. Vedle toho však musí být respektováno též výrobní hledisko, takže optimální je, jestliže je i úroveň spolehlivosti většiny technických objektů výsledkem optimalizačního řešení, které zajišťuje minimalizaci celkových nákladů při stanovené úrovni výkonnosti nebo maximalizaci výkonnosti objektu při stanovených celkových nákladech. Celkově to lze shrnout do několika aspektů, které rozhodují o prodejnosti vozidla na trhu:

- splnění technických parametrů (určení)
- akceptovatelná cena (pro výrobce i uživatele)
- splnění parametrů spolehlivosti

Mezi nejzákladnější metody posouzení ekonomické efektivity patří zejména posouzení nákladů životního cyklu (LCC-Life Cycle Cost). Jedná se o celkové náklady na vozidlo v celém životním cyklu (life cycle) tzn. od koncepce výrobku až po jeho likvidaci. Základním cílem analýzy nákladů životního cyklu je vyhodnocení nebo optimalizace nákladů životního cyklu výrobku při splnění specifikovaných požadavků na výkonnost, bezpečnost, bezporuchovost, udržovatelnost a jiné vlastnosti. Účelem je poskytnout vstupní údaje pro rozhodnutí činěná ve všech šesti etapách životního cyklu vozidla popsaných v předchozí kapitole.

Obecnou rovnici vyjadřující náklady životního cyklu lze psát ve tvaru:

$$LCC = C_{poř} + C_{vlast} + C_{likv} \quad (1)$$

kde značí:

$C_{poř}$ -náklady na pořízení vozidla, které lze vyhodnotit před vlastním zahájením vývoje a výroby

C_{vlast} -náklady na vlastnictví vozidla, které jsou dominantními náklady, ale nejsou snadno predikovatelné

C_{likv} -náklady na likvidaci vozidla

Provozní náklady lze vyjádřit v těchto základních skupinách:

- **kumulativní náklady $C(t)$** , které představují běžně popisovanou ekonomickou veličinu a jsou chápány jako součet všech nákladů od počátku t_0 až do libovolného okamžiku t v průběhu provozu vozidla
- **měrné (průměrné jednotkové) náklady $c(t)$** , které vyjadřují jakou průměrnou hodnotou je zatížena jednotka doby provozu v jakémkoliv okamžiku t . Matematické vyjádření měrných nákladů je možné psát jako podíl kumulativních nákladů $C(t)$ v čase (provozu) t .

$$c(t) = \frac{C(t)}{t} \quad (2)$$

- **okamžitá hodnota nákladů $v(t)$** , kterou lze vyjádřit z kumulativních nákladů vztahem

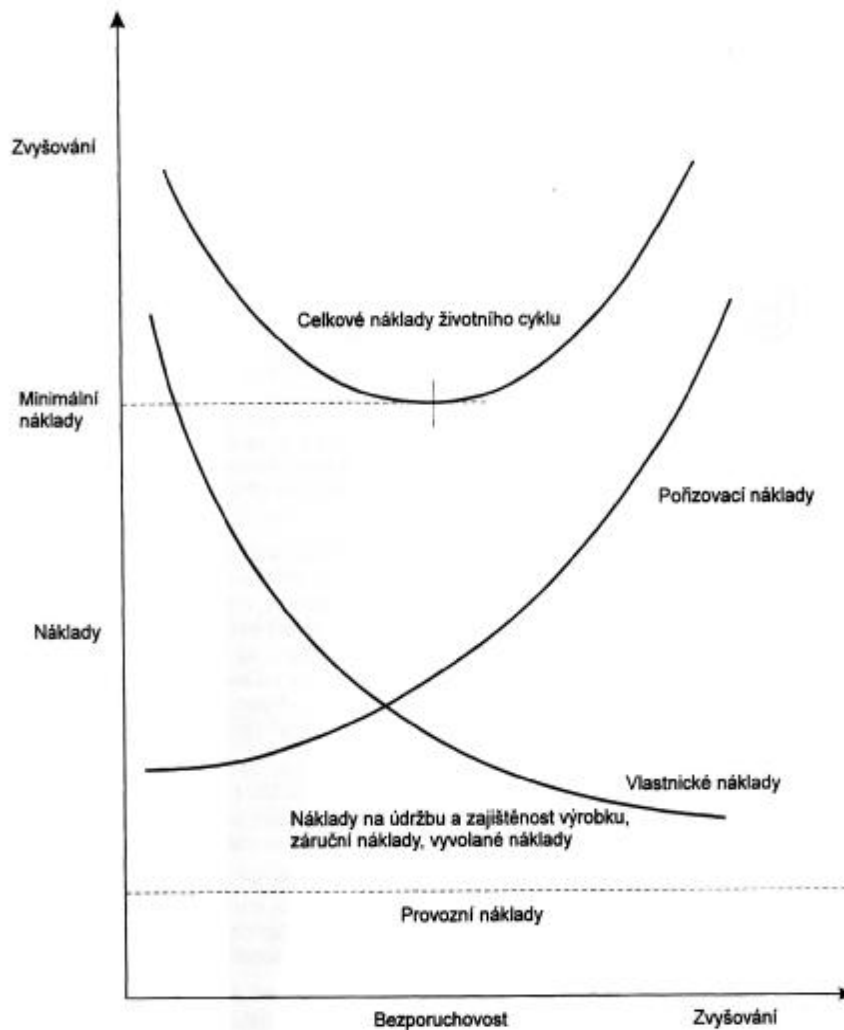
$$v(t) = \frac{dC(t)}{dt} \quad (3)$$

a vyjadřuje rychlost s jakou jsou náklady spotřebovány v jakémkoliv časovém okamžiku. Z předchozích vztahů pak platí:

$$C(t) = c(t) \cdot t = \int_0^t v(x) \cdot dx \quad (4)$$

Aby bylo možné náklady porovnávat, musí být vyjádřeny ve stejných jednotkách. U vozidel se používají různé druhy vyjádření celkových (měrných) nákladů např. [Kč.Mh⁻¹], [Kč.litr spotřebovaného paliva⁻¹], [Kč.km⁻¹] apod. V tomto případě se nejvhodnějším řešením jeví použití matematického vyjádření měrných nákladů v Kč na 1 km průběhu vozidla [Kč.km⁻¹].

Spolehlivost výrobku je souhrnný termín, který se používá k popisu pohotovosti výrobku a činitelů, které ji ovlivňují, jako je bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby. Výkonnost a všechny uvedené oblasti mohou mít významný dopad na náklady životního cyklu. Vyšší počáteční náklady mohou vést ke zlepšení bezporuchovosti nebo udržovatelnosti a tudíž mohou zlepšit pohotovost s následným snížením provozních nákladů a nákladů na údržbu jak je patrné z obr.1. Například může být méně nákladné používat součásti s vyšší jakostí nebo odlehčené (méně zatížené) součásti, aby se vynaložily menší náklady na poruchy a údržbu během etapy provozu vozidla.



Obrázek 1 Závislost nákladů na bezporuchovosti.

3.1. Pořizovací náklady

Z pohledu uživatele tvoří tuto nákladovou položku prodejní cena vozidla, ve které jsou již zahrnuty náklady výrobce na výzkum, vývoj a výrobu atd. Tato položka je důležitá, ale nikoliv nejvýznamnější vzhledem k tomu, že tvoří pouze část z celkových nákladů a v konečném důsledku může být i zanedbatelná. V mnoha případech však zvýšení pořizovacích nákladů, pokud znamená např. vyšší úroveň spolehlivosti, může výrazně snížit náklady vlastnické.

Pořizovací cena v Kč je výchozím kritériem pro ekonomický model nákladů, protože představuje jednorázový vklad do vozidla a lze ji vyjádřit takto:

$$C_{poř} = \frac{C_{poř}}{t} \quad (5)$$

kde značí:

$c_{poř}$ – měrné náklady na pořízení vozidla [Kč.km⁻¹]

$C_{poř}$ – celkové náklady na pořízení vozidla [Kč]

t – doba provozu vozidla v libovolném okamžiku [km]

3.2. Vlastnické náklady

Vlastnické náklady tvoří hlavní část nákladů životního cyklu a lze je rozdělit do dvou položek:

- náklady na vlastní provoz vozidla
- náklady na údržbu vozidla, související s udržením vozidla v provozuschopném stavu

Do položky nákladů na provoz vozidla lze zahrnout veškeré spotřební předměty vozidel, související s provozem vozidla, zejména pohonné hmoty a maziva, pneumatiky, akumulátorové baterie, různé druhy filtrů, čistící potřeby, dálniční známky apod. Do této položky se zahrnují i náklady na technické prohlídky, měření emisí a pojištění, které jsou u vozidel povinné z hlediska legislativy. Pro hodnocení ekonomické efektivity vozidel (např. spotřeby PHM) je zapotřebí používat stejné metodiky, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Vzhledem k tomu, že náklady na provoz nesouvisí přímo s úrovní spolehlivosti, nebudou dále rozebírány. V dalším budou popsány pouze náklady na obecnou údržbu, které přímo souvisejí s úrovní spolehlivosti vozidla.

Do položky nákladů na údržbu zahrnujeme nejen náklady na náhradní díly (jejich standardizaci a unifikaci), ale i náklady spojené se školením dílenských specialistů, náklady na použití progresivních diagnostických přístrojů nutné pro údržbu a defektaci vozidla a materiálně technické zabezpečení jak stacionárních tak i mobilních dílenských prostředků. V případě, že se vozidla budou muset podrobovat v nějakém pravidelném intervalu kontrole u dodavatele je třeba započítat i náklady na pracnost v dodavatelském servisu. Celkem tyto náklady patří k nejdůležitějším, které v konečném důsledku ovlivňují celkové vlastnické náklady na vozidla. Mohou se lišit vzhledem k typům vozidel. Kritériem jsou náklady na provedení všech druhů údržby v Kč na 1 km proběhu. Obecnou údržbu vozidla dělíme na preventivní a nápravnou a taktéž i náklady, které můžeme vyjádřit vztahem:

$$c_{\dot{u}} = c_{\dot{u}P} + c_{\dot{u}N} \quad (6)$$

kde značí:

$c_{\dot{u}}$ - měrné náklady na provedení preventivní a nápravné údržby [Kč.km⁻¹]

$c_{\dot{u}P}$ - měrné náklady na provedení preventivní údržby vozidla [Kč.km⁻¹]

$c_{\dot{u}N}$ - měrné náklady na provedení nápravné údržby vozidla [Kč.km⁻¹]

Preventivní údržba:

K tomu, aby se technika udržovala v bezporuchovém stavu nám slouží preventivní údržba. Preventivní údržbou rozumíme údržbu prováděnou v předem stanovených intervalech nebo podle předepsaných kritérií se zaměřením na snížení pravděpodobnosti výskytu poruchy nebo k zamezení snížení funkční schopnosti objektu. Preventivní údržba je plánovaná a vozidla jsou dopravována do servisních zařízení za účelem pravidelného seřízení, promazání, výměny náplní atd. Potřebné plánování preventivní údržby se provádí na základě pokynů výrobce nebo dle potřeby uživatele. Náklady na provedení preventivní údržby zahrnují náklady na materiál, energii a potřebné lidské zdroje zabezpečující provedení preventivní údržby.

Vzhledem k tomu, že vozidla podléhají různým druhům preventivní údržby, které se pohybují v různých cenových relacích je nutné použít přesnějšího matematického vyjádření.

$$C_{\dot{U}P} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{C}_{\dot{U}P_i} \left(\frac{t}{\bar{t}_{\dot{U}i}} - 1 \right)}{t} \quad (7)$$

kde značí:

$\bar{C}_{\dot{U}P_i}$ – střední náklady na provedení preventivní údržby i-tého stupně [Kč]

$\bar{t}_{\dot{U}i}$ – střední doba mezi preventivními údržbami i-tého stupně [km]

i – počet stupňů preventivní údržby

Střední náklady na provedení preventivní údržby i-tého stupně vyjádříme vztahem:

$$\bar{C}_{\dot{U}P_i} = \bar{C}_{M\dot{U}P_i} + \bar{C}_{P\dot{U}P_i} + \dots \quad (8)$$

kde značí:

$\bar{C}_{M\dot{U}P_i}$ – střední náklady na materiál potřebný pro provedení preventivní údržby i-tého stupně [Kč]

$\bar{C}_{P\dot{U}P_i}$ – střední náklady za práci vykonanou při provedení preventivní údržby i-tého stupně [Kč]

Střední náklady za práci vykonanou při provedení preventivní údržby i-tého stupně vyjádříme vztahem:

$$\bar{C}_{P\dot{U}P_i} = \bar{t}_{\dot{U}P_i} \cdot \bar{C}_{\dot{U}P_{i\text{hod}}} \quad (9)$$

kde značí:

$\bar{t}_{\dot{U}P_i}$ – střední pracnost preventivní údržby i-tého stupně [Nh]

$\bar{C}_{\dot{U}P_{i\text{hod}}}$ – náklady za 1 normohodinu práce při provedení preventivní údržby i-tého stupně [Kč.Nh⁻¹]

Pozn.: Náklady za 1 normohodinu práce při provedení preventivní údržby i-tého stupně se mohou lišit dle stupně preventivní údržby.

Nápravná údržba:

Nápravnou údržbou rozumíme vlastnost vozidla spočívající ve způsobilosti ke zjišťování příčin vzniku poruch a odstraňování jejich následků opravou. Do nákladů na provedení nápravné údržby je třeba zahrnout náklady na lokalizaci techniky a s tím spojenou dopravu do servisního zařízení, očištění techniky, odbornou defektaci, náklady na vlastní opravu (náklady na materiál, energii a potřebné lidské zdroje zabezpečující provedení nápravné údržby) a náklady na otestování po opravě.

Měrné náklady na provedení nápravné údržby připadající na jednotku doby provozu vyjádříme vztahem:

$$c_{\dot{U}N} = \frac{C_{\dot{U}N}}{t} \quad (10)$$

kde značí:

$c_{\dot{U}N}$ – měrné náklady na provedení nápravné údržby [Kč.km⁻¹]

$C_{\dot{U}N}$ – celkové náklady na provedení nápravné údržby [Kč]

Vzhledem k tomu, že náklady na nápravnou údržbu nelze přesně predikovat vycházíme při jejich vyjádření ze středních hodnot $\bar{C}_{\dot{U}N}$, které jsou součtem všech nákladů na materiál včetně patřičné dokumentace, energii a potřebné lidské zdroje zabezpečující provedení nápravné údržby. Dále sem zahrnujeme záruční náklady, protože záruka poskytuje zákazníkům ochranu tím, že je zabezpečuje proti nákladům na odstraňování poruch vozidla zejména během počátečních etap provozu. Tyto náklady závisejí na znacích bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištění údržby výrobku a jsou ve většině případů zahrnuty dodavatelem v pořizovacích nákladech a pro uživatele to nejsou přímé náklady. Záruka se u vozidel zpravidla vztahuje na proběh kilometrů nebo je omezena na léta provozu. Celkové náklady na provedení nápravné údržby pak vyjádříme vztahem:

$$C_{\dot{U}N} = \frac{t - t_z}{MTBF} \cdot \bar{C}_{\dot{U}N} \quad (11)$$

kde značí:

$\bar{C}_{\dot{U}N}$ – střední náklady na provedení nápravné údržby [Kč].

$MTBF$ – střední doba provozu mezi poruchami [km]

(Mean operating time between failures)

t_z - doba, po kterou je poskytována záruka a nápravná údržba je prováděna na náklady dodavatele [km]

Z popsaného matematického vyjádření je patrné, že většina nákladů na vlastnictví vozidla jsou ovlivněny úrovní dvou subvlastností spolehlivosti a to bezporuchovostí a udržovatelností vozidla.

3.3. Náklady na vypořádání a likvidaci

Do této kategorie se zahrnují náklady spojené s vyřazením vozidla prezentovanými náklady na zastavení provozu, rozebrání, odklizení, recyklování nebo bezpečnou ekologickou likvidaci, která je v dnešní době velice aktuální. O její aktuálnosti svědčí i to, že se připravuje její začlenění do příslušných norem IEC, i přestože se spolehlivostí přímo nespojuje. Jedná-li se o vozidla, které je možné v souladu s platnou legislativou prodat za zbytkovou cenou, může být tato položka pro uživatele zisková. Je však možné, že náklady na likvidaci mohou být velice vysoké, bude-li se jednat o složité druhy techniky. Je vhodné z pohledu uživatele žádat po skončení technického života vozidla provedení jeho likvidace na náklady dodavatele (výrobce). S těmito náklady je třeba počítat již při nákupu vozidla, protože mohou významně ovlivnit celkové náklady.

Náklady na likvidaci po použití vozidla tvoří s náklady pořizovacími a vlastnickými základní parametry pro popis nákladů životního cyklu a vyjádříme je vztahem:

$$C_L = \frac{C_L}{t} \quad (12)$$

Tento přehled nákladů je pouze základní, který vychází ze současných poznatků a literatury. Do celkových nákladů na vozidla vstupují i jiné jako např.:

- náklady na modernizaci vozidla
- náklady na skladování náhradních dílů
- náklady z odpovědnosti za škody způsobené objektem

Tyto náklady však nemají přímou souvislost se zajišťováním spolehlivosti vozidel, proto nejsou v této práci popisovány.

Dalšími jsou náklady z důvodu nepohotovosti vozidla, které znamenají v komerčním sektoru pro uživatele finanční ztrátu. Při nekomerčním využití vozidel pro potřeby armády, policie, hasičů nebo záchranné služby tyto náklady nemají význam, protože většinou nejsou spojeny s finanční ztrátou.

4. Závěr

V dnešní době, ve které při pořizování a následném vlastnictví vozidla hrají rozhodující roli finanční prostředky, může odborná analýza nákladů životního cyklu vozidla a následná optimalizace hodnot ukazatelů spolehlivosti, v konečném důsledku znamenat ekonomické úspory.

5. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Vnitřní grantové agentury Vojenské akademie v Brně.

6. Literatura

Blishke, W. R. & Murthy D. N. P. (1992) *Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization*. New York: John Wiley.

Ebeling, E. CH. (1996) *Reliability and Maintainability Engineering*. Mc Graw Hill.

Elsayed, A. E. (1996) *Reliability Engineering*. New York: Addison-Wesley Publishing Co.

Holub, R., Vintr, Z. (2001) *Základy spolehlivosti*. Skripta VA Brno.

Holub, R., Vintr, Z. (2001) *Aplikované techniky spolehlivosti. Část I. Specifikace požadavků na spolehlivost*. Skripta VA Brno.

Vintr, Z. (1999) *Optimization of reliability requirements from manufacturers point of view*. Reliability & Maintainability symposium.

ARMP - 4: *Spojenecká publikace pro bezporuchovost a udržitelnost - Směrnice pro tvorbu dokumentů NATO s požadavky na bezporuchovost a udržitelnost. (Guidance for writing NATO reliability and maintainability requirements documents)*.

ČSN IEC 50 (191) - *Spolehlivost a jakost služeb, kapitola 191-Mezinárodní elektrotechnický slovník*.

ČSN IEC 300-3-3: *Management spolehlivosti, Část 3: Návod k použití, Oddíl 3: Náklady životního cyklu*.

ČSN IEC 300-3-4, *Management spolehlivosti. Část 3: Návod k použití. Oddíl 4: Pokyny ke specifikaci požadavků na spolehlivost*.

ČSN 010606 - *Spolehlivost v technice. Postup volby nomenklatury normovaných ukazatelů spolehlivosti*.