

Česká společnost pro jakost, Novotného lávka 5, 110 00 Praha 1



Analýza nákladů životního cyklu (LCC) drážních aplikací

**Materiály z 97. semináře Odborného centra Spolehlivost
konaného dne 9. 6. 2026 na Univerzitě obrany v Brně**

**Odborní garanti semináře:
prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.
Ing. Michal VINTR, Ph.D.**

Obsah

Analýza nákladů životního cyklu (LCC) – Základy a souvislosti	3
<i>Ing. Michal VINTR, Ph.D.</i>	
<i>Nezávislý expert na spolehlivost, bezpečnost a RAMS/LCC</i>	
Využití LCC při optimalizaci údržby	18
<i>prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.</i>	
<i>Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany</i>	
Praktické zkušenosti s analýzami LCC drážních aplikací	27
<i>Ing. Michal VINTR, Ph.D.</i>	
<i>Nezávislý expert na spolehlivost, bezpečnost a RAMS/LCC</i>	

Analýza nákladů životního cyklu (LCC) – Základy a souvislosti

Ing. Michal VINTR, Ph.D.

Nezávislý expert na spolehlivost, bezpečnost a RAMS/LCC

mvintr@mvintr.cz – www.mvintr.cz

1 Úvod

Článek představuje základní principy analýzy nákladů životního cyklu (LCC), nejčastěji využívané modely a jejich klíčové vazby na RAMS, tedy bezporuchovost, pohotovost, udržovatelnost a bezpečnost. Článek nejprve definuje základní pojmy a popisuje jednotlivé etapy životního cyklu – od koncepce a vývoje až po etapu používání a konečné vyřazení z provozu. Následně je pozornost zaměřena na strukturu nákladových položek a na objasnění faktu, jak významně je celková ekonomická náročnost ovlivňována spolehlivostí a s ní spojenou údržbou preventivní a po poruše. Závěrečná část příspěvku detailně mapuje zasazení problematiky LCC do kontextu norem železničního průmyslu, konkrétně ČSN EN 50126-1 a ČSN EN ISO 22163.

Tento článek je aktualizovanou a rozšířenou verzí článku [3], který autor prezentoval na jednom z dřívějších seminářů zaměřených na spolehlivost a ekonomiku.

2 Zkratky

FRACAS	Failure Reporting, Analysis, and Corrective Action System Systém podávání zpráv o poruchách, analýzy a opatření k nápravě
LCC	Life Cycle Cost Náklady životního cyklu
RAM	Reliability, Availability and Maintainability Bezporuchovost, pohotovost a udržovatelnost
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety Bezporuchovost, pohotovost, udržovatelnost a bezpečnost

3 Základní pojmy

Na úvod je nezbytné vymezit základní pojmy. Ty jsou převzaty z platných norem z oblasti spolehlivosti [5], [8].

Objekt (*item*): Uvažovaný předmět.

Objekt může být samostatný díl, součást, přístroj, funkční jednotka, zařízení, podsystém nebo systém. Objekt se může skládat z hardwaru, softwaru, lidí nebo jejich kombinace.

Systém (*system*): Množina vzájemně souvisejících objektů, které společně plní požadavek.

Spolehlivost (*dependability*): Schopnost fungovat tak, jak je požadováno, a tehdy, když je to požadováno.

Životní cyklus (*life cycle*): Řada identifikovatelných etap, kterými objekt prochází od etapy koncepce a stanovení požadavků po vypořádání (likvidaci).

Náklady životního cyklu (*life cycle cost – LCC*): Celkové náklady vynaložené během životního cyklu.

Analýza nákladů životního cyklu (nebo také stanovení nákladů životního cyklu) (*life cycle costing*): Proces ekonomické analýzy s cílem posoudit náklady na objekt v celém jeho životním cyklu nebo v jeho části.

Nákladová položka (*cost element*): Součást nákladů životního cyklu, pro kterou jsou nebo mohou být sbírána data o nákladech.

4 Životní cyklus

4.1 Obecný životní cyklus

Životní cyklus je řadou identifikovatelných etap, kterými objekt prochází od etapy koncepce a stanovení požadavků po vypořádání (likvidaci).

Z hlediska spolehlivosti rozlišujeme následujících šest etap obecného životního cyklu [6]:

- koncepce;
- vývoj;
- realizace;
- používání;
- zdokonalování;
- vyřazení.

Etapa koncepce je počáteční vizionářská etapa pro určitý objekt. Zahrnuje činnosti, jako je identifikace potřeb trhu nebo jiných potřeb, stanovení/identifikace obecného provozního prostředí používání a časového přehledu, lidská hlediska, požadavky předpisů a nařízení (jako je sledovatelnost, bezpečnost, životní prostředí, udržitelnost, vyřazení a likvidace odpadu) a další omezení. Z toho je možné určit a analyzovat funkční a mimofunkční požadavky a předběžné požadavky na spolehlivost a na základě širokých technických specifikací může být identifikován proveditelný návrh nebo nákupní řešení. V této etapě má být identifikována potenciální potřeba optimalizace nákladů a přínosů mezi bezpečností a spolehlivostí. K dosažení vysokého stupně předvídání spolehlivosti může být použito modelování a pravděpodobnostní přístupy s cílem zvolit předběžnou architekturu a politiky údržby a podporovatelnosti, které pravděpodobně splní požadavky předpisů a nařízení a požadavky na spolehlivost. Posuzování rizik během etapy koncepce se má zaměřit na proveditelnost návrhu koncepce a volbu technologie pro implementaci projektu. Volba z volitelných možností návrhů je založena na nejlepších praktických inženýrských přístupech s cílem dosáhnout splnění požadavků a řídit rizika s uloženými omezeními [6].

Účelem této etapy je [7]:

- identifikovat potřeby zúčastněných stran;
- prozkoumat koncepty;
- navrhnout životaschopná řešení.

Etapa vývoje následuje po počáteční etapě koncepce, jakmile byla ověřena proveditelnost. Středem pozornosti je naplánovat a provést zvolená inženýrská řešení návrhu pro realizaci funkcí objektu. To se promítne do příslušného úsilí spojeného s návrhem a vývojem zahrnujícím návrhovou architekturu systému, inženýrské modelování a výrobu a zkoušení prototypu. Jsou identifikována rozhraní mezi prvky systému a subsystému a je vykonáváno systematické hodnocení integrovaných funkcí objektu a jeho interakcí s vnějšími prostředími, aby mohla být validována závěrečné konfigurace. Jsou podrobněji posuzována rizika spojená se zvoleným návrhem a je specifikováno ošetřování rizik. Před realizací objektu má být patřičně zavedeno plánování pro přístup při údržbě podporovatelnosti, pro provozní postupy a prokazování, jakož i pro procesy podpory. V této etapě může být použito příslušné modelování a pravděpodobnostní přístupy k získání podrobných předpovědí o spolehlivosti, jejichž cílem je sjednotit architekturu s politikami údržby a podporovatelnosti zvolenými v etapě koncepce a ověřit, zda mohou být splněny požadavky předpisů a nařízení a požadavky na spolehlivost [6].

Účelem této etapy je [7]:

- upřesnit požadavky;
- vytvořit popis řešení;
- sestavit systémy nebo produkty;
- ověřit a potvrdit, že jsou potřeby a požadavky splněny.

V **etapě realizace** jsou implementována rozhodnutí vyrobit/nakoupit pro akvizici a/nebo výrobu konečného objektu a jeho součástí. Do realizačního úsilí se zahrnují takové činnosti, jako je vývoj technologie, vybavení náradím, výroba, balení a dodávky materiálů s cílem zajistit úplnou transformaci od návrhu ke specifikovanému objektu nebo součástí subsystému. Realizované objekty nebo součásti mohou obsahovat kombinací hardwarových a softwarových funkcí. Realizace zahrnuje simulace součástí a modulů, analýzy a zkoušky včetně zkoušek integrace a také činnosti, jako je montáž součástí, integrace funkcí objektu, verifikace subsystémů a instalace objektu. Se zákazníkem mají být ustanoveny přejímací postupy s možným vyzkoušením ve skutečném provozním prostředí před oficiálním uvedením do provozu. Validace má být součástí vyzkoušení, aby mohl být poskytnut objektivní důkaz shody se specifikacemi [6].

Účelem této etapy je [7]:

- vyrobit nebo pořídit systém;
- ověřit a potvrdit, že jsou potřeby a požadavky splněny.

Etapa používání následuje tehdy, když je objekt umístěn pro poskytování funkčnosti nebo služby s podporou pro jeho provozní způsobilost prostřednictvím údržby. Činnosti spojené s tímto procesem zahrnují provozování a udržování objektu v souladu s požadavky na funkčnost, výcvik obsluhy a údržbářů s cílem udržet si kvalifikační kompetenci, styčné body se zákazníkem s cílem stanovit služební vztahy, provádění záznamů o stavu funkčnosti objektu a podávání hlášení o poruchových nehodách s cílem zahájit včasné preventivní zásahy a zásahy po poruše. Funkčnost objektu má být pravidelně monitorována a kontrolována, aby se zajistilo, že jsou cíle spolehlivosti, předpisů a nařízení a kvality služby splněny. K odhadu spolehlivosti služby může být použit sběr dat a vzorkování. Při posuzování rizika během provozu a údržby je možné se zabývat problémy, které vyvstanou následkem měnících se podmínek [6].

Účelem této etapy je [7]:

- provozovat za účelem uspokojení potřeb uživatelů;
- udržovat a podporovat systém nebo produkt pro zajištění trvalé funkčnosti;
- přizpůsobovat se měnícím se potřebám.

Etapa zdokonalování může být potřebná ke zlepšení funkčnosti objektu pomocí přídavných vlastností s cílem vyhovět rostoucím požadavkům uživatele, prodloužit provozní dobu života nebo zaměřit se na zastarávání. Činnosti tohoto procesu mohou zahrnovat vylepšení nebo doplňky hardwaru nebo softwaru, zlepšení údržby, zjednodušení postupů ke zlepšení provozní účinnosti nebo managementu zastarávání. V této etapě mohou být použity příslušné postupy modelování nebo pravděpodobnostní postupy s cílem posoudit dopad možného zdokonalování a zvolit nejlepší řešení. Při posuzování rizik během etapy zdokonalování se často hledí na náklady oproti přínosům a na návratnost investic [6].

Etapa vyřazení nastává na konci života objektu. Po ukončení používání objektu může být objekt rozebrán, přemístěn pro další použití, dán k dispozici pro opakované použití materiálu a součástí nebo v některých případech zanechán na místě (jako je potrubí). To vše má být zohledněno od etapy koncepce. U složitých objektů může být zřízena strategie oficiálního vyřazení z provozu s cílem formalizovat plánování a implementaci procesu vyřazení z provozu, aby byly splněny požadavky předpisů a nařízení. U jiných objektů mohou existovat pravidla týkající se navrácení a opakovaného používání nebo likvidace [6].

Účelem této etapy je [7]:

- uskladnit, archivovat nebo zlikvidovat systém;
- dosáhnout udržitelného a ekologicky šetrného ukončení používání.

V konkrétních případech se můžeme setkat se specifickěji definovanými etapami životního cyklu, jako například [6]:

- koncepce a stanovení požadavků;
- návrh a vývoj;
- výroba a instalace;
- provoz a údržba;
- vylepšení uprostřed technického života nebo prodloužení života;
- vyřazení z provozu a likvidace.

4.2 Životní cyklus drážních aplikací

Norma ČSN EN 50126-1 [10] rozděluje životní cyklus podrobněji, protože u drážních aplikací jsou obvyklé vysoké požadavky na bezpečnost, prokazatelnost a koordinaci mezi zúčastněnými stranami. Detailnější členění umožňuje efektivněji řídit RAMS. Konkrétní etapy životního cyklu jsou:

1. Koncept
2. Definice systému a provozní souvislosti
3. Analýza rizika a jeho hodnocení
4. Specifikace systémových požadavků
5. Architektura a rozdělení požadavků na systém

6. Návrh a implementace
7. Výroba
8. Integrace
9. Validace systému
10. Přijetí systému
11. Provoz, údržba a sledování výkonnosti
12. Vyřazení z provozu

Podrobnosti o uvedených etapách lze nalézt v kapitole 6.2 normy ČSN EN 50126-1.

5 Náklady životního cyklu

5.1 Struktura nákladů životního cyklu

Náklady životního cyklu tvoří souhrn nákladů vznikajících ve všech jeho etapách. Každá etapa zahrnuje specifické aktivity, které přímo ovlivňují celkové náklady. Následující přehled uvádí typické činnosti a náklady charakteristické pro jednotlivé etapy životního cyklu [8].

Etapa koncepce:

- průzkum trhu;
- management projektu;
- analýza koncepce systému a předběžného návrhu;
- ověření proveditelnosti;
- vypracování funkční specifikace systému.

Etapa vývoje:

- management projektu;
- inženýrství systému a návrhu včetně záležitostí týkajících se bezporuchovosti, udržitelnosti a podporovatelnosti;
- nákup a s tím sdružené smluvní funkce pro řešení „nakoupit“;
- dokumentace návrhu;
- výrobení prototypu;
- vývoj softwaru a hardwaru;
- zkoušení a hodnocení;
- inženýrství a plánování produktivity;
- volba prodejce;
- prokazování a validace prototypů;
- management rizik;
- management kvality;
- management konfigurace.

Etapu realizace:

Jednorázové činnosti/náklady:

- analýza průmyslového inženýrství a provozu;
- konstrukce vybavení;
- vybavení výrobními nástroji a zkušebním zařízením;
- speciální podpůrné a zkušební zařízení;
- počáteční náhradní díly a soupravy pro opravy;
- počáteční výcvik;
- dokumentace;
- software;
- zkoušení (kvalifikační zkoušky).

Pravidelné (opakované, běžné) činnosti/náklady:

- výrobní management a inženýrství;
- údržba vybavení;
- zhotovení (pracovní síly, materiály apod.);
- řízení a kontrola jakosti;
- montáž;
- instalace a výstupní kontrola;
- balení, skladování, naložení a přeprava;
- průběžný výcvik;
- pojištění.

Etapu používání:

Provoz:

- pracovníci a jejich výcvik;
- materiály a spotřební materiály pro provozní proces;
- energie (např. elektrická energie nebo palivo);
- podpůrné zařízení (např. simulátory) a vybavení;
- změny konfigurace.

Údržba:

- pracovníci a jejich výcvik;
- podpůrné zařízení/strojní zařízení a vybavení;
- smluvené služby;
- náhradní díly a materiál.

Obecné zajištění zdrojů:

- podpora informačních technologií a příslušný informační management;
- skladovací vybavení;
- balení, manipulace, skladování a přeprava (logistika).

Podpůrné služby:

- korporátní služby;
- administrativní podpora;
- pojištění a certifikace.

Etapa zdokonalování:

- aktualizace/povýšení (upgrade) hardwaru a softwaru;
- sběr a analýza dat, které se specificky týkají způsobilosti ověřování existujících systémů a jejich podpůrných režimů;
- posouzení funkčnosti procesu a systému;
- vývoj plánů údržby a provozu;
- modifikace systémů s cílem dosáhnout změn požadavků a určitějších dat.

Etapa vyřazení:

- management odpojení a skladování;
- rozebrání a příprava na přepravu;
- opatření pro recyklaci a/nebo stabilizaci;
- pasivace a trvalé skladování/distribuce.

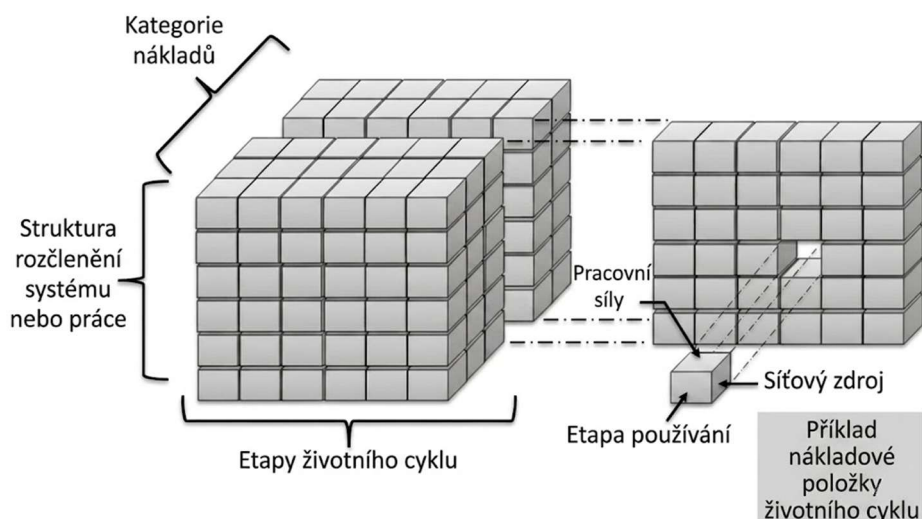
Případné negativní náklady (příjmy) plynoucí z:

- regenerace/recyklace;
- prodeje;
- nového rozmístění.

5.2 Nákladové položky

Při analýze LCC je žádoucí celkové náklady strukturovat do konkrétních nákladových položek, které propojují nákladové kategorie se strukturou rozpadu systému a práce. K definování těchto položek se standardně využívá trojrozměrná matice (viz Obr. 1), která zohledňuje [8]:

- rozčlenění systému na nižší úrovně rozčlenění (tj. strukturu rozčlenění systému/práce);
- dobu v životním cyklu, kdy se provede práce nebo činnost (tj. etapu životního cyklu);
- kategorie nákladů na použitelné zdroje, jako jsou pracovní síly, materiály, palivo/energie, režie, přeprava/cestovné (tj. nákladovou kategorii).

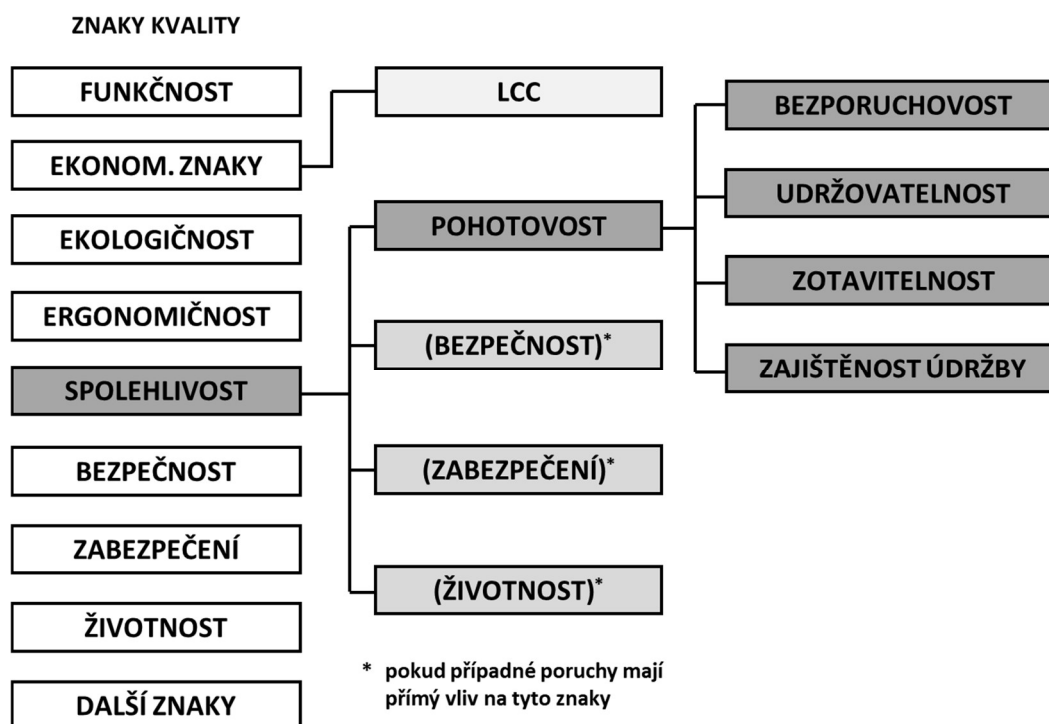


Obr. 1: Matice rozčlenění LCC na nákladové položky [8]

6 Vazba spolehlivosti a LCC

Spolehlivost je definována jako schopnost fungovat tak, jak je požadováno, a tehdy, když je to požadováno [5]. Přičemž do spolehlivosti se zahrnuje pohotovost, bezporuchovost, zotavitelnost, udržitelnost a zajištěnost údržby a v některých případech i jiné charakteristiky, jako je životnost, bezpečnost a zabezpečení. V širším kontextu se spolehlivost používá jako souhrnný termín pro charakteristiky kvality objektu, které se vztahují k času.

Vzájemné vazby mezi uvedenými charakteristikami a náklady životního cyklu jsou uvedeny na Obr. 2.

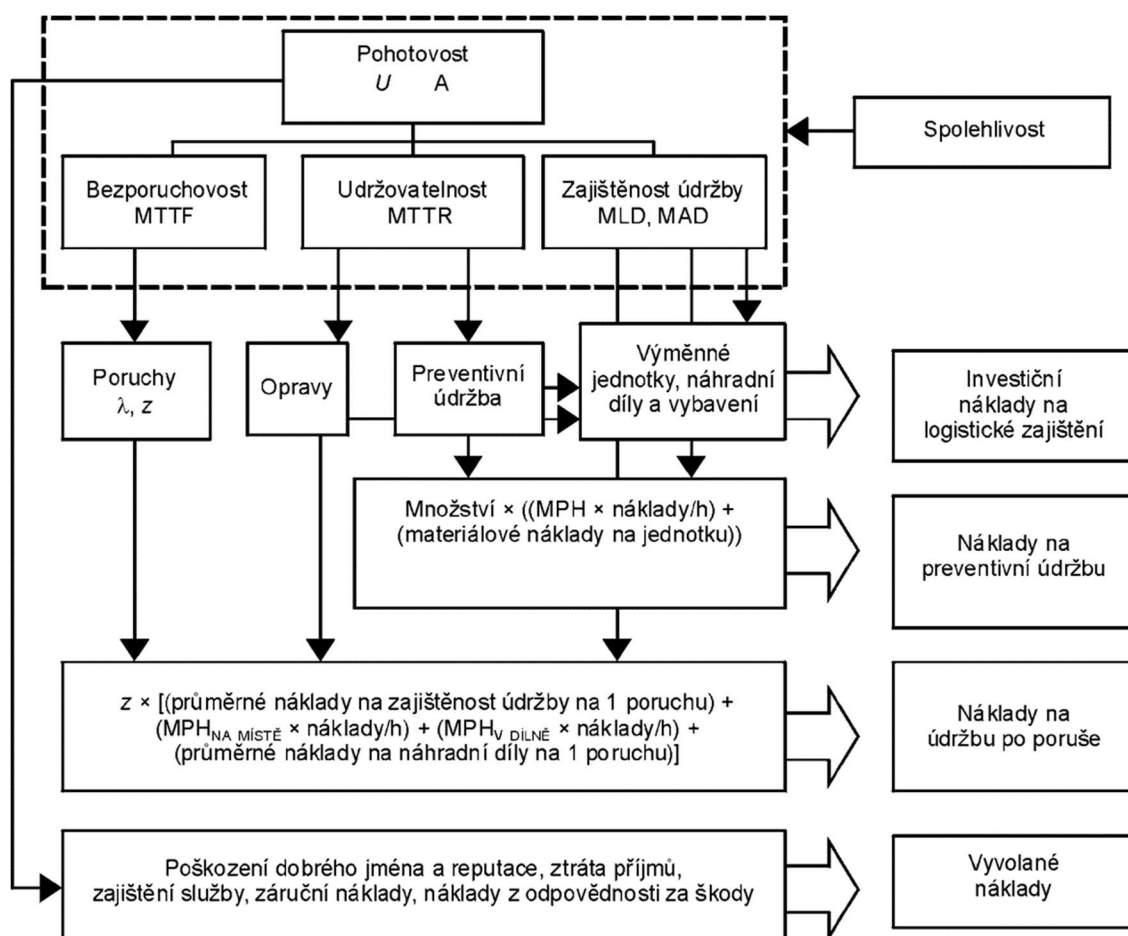


Obr. 2: Vztah kvality, spolehlivosti a LCC

Náklady životního cyklu představují klíčový ekonomický znak kvality a jsou přímo ovlivňovány charakteristikami spolehlivosti. Intenzita tohoto vlivu se nicméně v různých etapách životního cyklu mění. Náklady spojené se spolehlivostí zahrnují zejména [9]:

- náklady na obnovu systému, včetně nákladů na údržbu po poruše;
- náklady na preventivní údržbu;
- vyvolané náklady.

Vztah mezi charakteristikami spolehlivosti a náklady životního cyklu je znázorněn na Obr. 3.



Obr. 3: Vztah spolehlivosti a LCC [9]

7 Analýza nákladů životního cyklu

Analýza nákladů životního cyklu (nebo také stanovení nákladů životního cyklu) je proces ekonomické analýzy s cílem posoudit náklady na objekt v celém jeho životním cyklu nebo v jeho části [8].

Analýzu LCC lze aplikovat v průběhu celého životního cyklu objektu, případně v jeho vybraných etapách či jejich kombinacích. Jejím primárním cílem je poskytovat podklady pro rozhodovací procesy v jakékoli etapě životního cyklu objektu. Činnosti spojené s analýzou nákladů je proto vhodné integrovat přímo do plánu spolehlivosti.

Analýza LCC je především inženýrsko-ekonomický nástroj umožňující činit manažerská rozhodnutí. Uplatňuje se při hledání optimálního kompromisu mezi výkonností, celkovými náklady a časovým harmonogramem, a to zejména při [8]:

- plánování projektu;
- sestavování rozpočtu a financování;
- procesu pořizování;
- studii proveditelnosti;
- vypracování koncepce;
- volbě alternativních řešení návrhu;
- posouzení zbývajících doby života;
- porovnání mezi pořízením nového systému a obnovou stávajícího systému.

Dodavatelé používají analýzu LCC nejčastěji pro:

- optimalizaci konstrukce;
- porovnání odlišných konstrukčních řešení.

Zákazníci používají analýzu LCC nejčastěji pro:

- hodnocení a porovnávání různých (konkurenčních) variant objektů;
- hodnocení realizovatelnosti projektů.

Analýza nákladů životního cyklu má i jisté nevýhody:

- je časově náročná;
- je nákladná;
- má diskutabilní přesnost dat;
- získání dat pro analýzu je náročný úkol.

Norma ČSN EN 60300-3-3 [8] nahlíží na analýzu LCC jako na proces, který má tyto hlavní kroky [8]:

- stanovení organizačního kontextu;
- naplánování analýzy;
- vymezení přístupu k analýze;
- provedení analýzy;
- dokončení analýzy.

Stanovení organizačního kontextu zahrnuje zejména:

- sestavení kontextu;
- zjišťování alternativ.

Plánování analýzy zahrnuje:

- vymezení rozsahu a cílů analýzy;
- vymezení úkolů a přispívajících osob;

- zjišťování omezení;
- zjišťování příslušných finančních parametrů.

Vymezení přístupu k analýze spočívá zejména ve:

- stanovení pravidel / metodiky;
- volbě nebo vývoji modelu LCC;
- vymezení struktury rozčlenění nákladů;
- zjišťování oblastí nejistoty.

Provedení analýzy zahrnuje:

- stanovení metod pro odhad nákladových položek;
- sběr dat o nákladech;
- seskupení nákladů na objekt pro každou etapu nebo časové období;
- provedení analýzy LCC a citlivosti;
- přezkoumání analýzy;
- posouzení splnění cílů analýzy.

Dokončení analýzy zahrnuje zejména:

- zjištění následných opatření;
- dokumentace analýzy.

8 Modely nákladů životního cyklu

Klíčovým krokem analýzy LCC je volba či sestavení modelu, který musí plně reflektovat stanovené cíle. Tento model představuje zjednodušené znázornění skutečnosti s účetní strukturou, jež využívá matematické vztahy k odhadu nákladů. Zatímco normy a literatura nabízejí širokou škálu různých přístupů k tvorbě modelu, tento příspěvek se detailněji zaměřuje na nejrozšířenější modely a specifický model s přímou vazbou na spolehlivost.

8.1 Model LCC založený na etapách životního cyklu

Dále popsáný model je založen na nákladech vynaložených v jednotlivých etapách životního cyklu.

Na první úrovni rozčlenění jsou náklady životního cyklu dány následujícími položkami:

$$LCC = C_C + C_D + C_R + C_U + C_E + C_{Re}$$

kde:

C_C – náklady na etapu koncepce,

C_D – náklady na etapu vývoje,

C_R – náklady na etapu realizace,

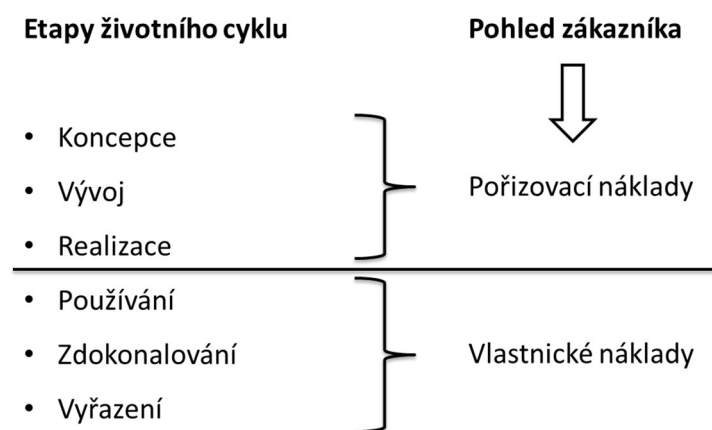
C_U – náklady na etapu používání,

C_E – náklady na etapu zdokonalování,

C_{Re} – náklady na etapu vyřazení.

8.2 Model LCC založený na pořizovacích a vlastnických nákladech

Model LCC založený na pořizovacích a vlastnických nákladech patří k nejrozšířenějším modelům v této oblasti. Uplatňuje se především ve fázi akvizice k predikci a vyhodnocení celkové ekonomické náročnosti spojené s vlastnictvím objektu. Tento přístup reflektuje čistě zákaznickou perspektivu hodnocení nákladů životního cyklu, což schematicky znázorňuje Obr. 4.



Obr. 4: Zákaznický pohled na LCC

Na první úrovni jsou náklady životního cyklu dány následujícími položkami:

$$LCC = C_A + C_O$$

kde:

C_A – pořizovací náklady,

C_O – vlastnické náklady.

Pořizovací náklady zahrnují náklady z následujících etap životního cyklu:

- koncepce;
- vývoj;
- realizace.

Vlastnické náklady zahrnují náklady z následujících etap životního cyklu:

- používání;
- zdokonalování;
- vyřazení.

8.3 Model LCC souvisejících se spolehlivostí

Zatímco dosud popsané základní modely reflektují kompletní životní cyklus objektu, v technické praxi se často uplatňují modely s omezeným rozsahem, které se zaměřují pouze na vybrané etapy či konkrétní nákladové položky. Typickým příkladem jsou akviziční procesy, kde se pro porovnání alternativních řešení využívají modely LCC omezené na vlastnické náklady (přímo či nepřímo ovlivněné spolehlivostí systému). Hlavním cílem tohoto

selektivního přístupu je kvantifikovat spolehlivost srovnatelných objektů a vyjádřit ji pomocí jednotného ekonomického ukazatele – nákladů životního cyklu.

Na základní úrovni lze výše popsaný model vyjádřit následovně:

$$C_{OD} = C_{CM} + C_{PM} + C_{ID}$$

kde:

C_{OD} – vlastnické náklady související se spolehlivostí,

C_{CM} – náklady na údržbu po poruše,

C_{PM} – náklady na preventivní údržbu,

C_{ID} – vyvolané náklady související se spolehlivostí.

Podrobnější informace o uvedených nákladových položkách jsou zřejmé z Obr. 3.

9 LCC a normy v oblasti železničního průmyslu

9.1 ČSN EN 50126-1

Ačkoli je norma ČSN EN 50126-1 základním pilířem pro specifikaci a prokázání RAMS v drážních aplikacích, problematice nákladů životního cyklu se věnuje pouze okrajově. Konkrétně se jedná o následující pasáže:

- V úvodu normy je uvedeno:
 - *Tato evropská norma podporuje spolupráci mezi zainteresovanými subjekty v železniční dopravě při dosažení optimální kombinace parametrů RAMS a nákladů u drážních zařízení.*
- V kapitole 5.4 (RAMS železnic a kvalita služeb) je, bez bližších informací, uvedeno:
 - *RAM má také významný vliv na celkové náklady životního cyklu.*
- V kapitole 5.6.3 (Faktory ovlivňující RAMS železnic / Odvození detailních ovlivňujících faktorů specifických pro železnici) je uvedeno, že subjekt odpovědný za železnici by měl ve svých tendrech specifikovat požadavky na životnost systému, včetně požadavků na náklady životního cyklu.
- V kapitole 7.12.2 (Etapu 11: Provoz, údržba a sledování výkonosti / Činnosti) je uvedeno:
 - *Postupy pro provoz a údržbu musí být implementovány zejména s ohledem na výkonnost systému a na náklady životního cyklu.*
- V tabulce A.1 (v příkladu osnovy základního plánu RAMS) je uvedeno, že v projektové etapě návrhu a implementace může být proveden odhad nákladů životního cyklu.
- Ve stejné tabulce je uvedeno, že v projektové etapě provoz/údržba může být provedeno posuzování nákladů životního cyklu.
- V kapitole A.4 (v seznamu vhodných metod a nástrojů pro provádění a řízení činností) je uvedeno následující:
 - *5) Postupy/nástroje pro provádění analýzy LCC (náklady životního cyklu) Pro analýzu LCC jsou k dispozici různé počítačové programy.*

- V tabulce B.5 (v příkladech parametrů logistické podpory) jsou uvedeny dva parametry s vazbou na LCC:
 - náklady provozu a údržby (O&MC);
 - náklady údržby (MC).

Zkratka LCC se v textu normy ČSN EN 50126-1 vyskytuje exaktně třikrát. Jednou v seznamu zkratk (kapitola 4) a dvakrát v rámci seznamu vhodných metod a nástrojů (kapitola A.4).

9.2 ČSN EN ISO 22163

Norma ČSN EN ISO 22163 [11] se analýze LCC věnuje detailně v samostatné kapitole 8.8.4 (Life cycle costing – Stanovování nákladů životního cyklu), která je součástí kapitoly věnované managementu RAMS a LCC. Odkazy na problematiku LCC jsou navíc systematicky integrovány i do dalších částí této normy.

Zajímavostí je, že norma pracuje s pojmem „life cycle costing“ (stanovování nákladů životního cyklu), který definuje jako proces vyhodnocování rozdílu mezi náklady životního cyklu dvou nebo více alternativních možností.

Ve zmíněné kapitole 8.8.4 norma definuje, že organizace by měla zavést, implementovat a udržovat proces managementu stanovování nákladů životního cyklu pro produkty a služby. Přičemž tento proces by měl zahrnovat [11]:

- výpočet údajů o LCC;
- implementaci opatření do návrhu a vývoje, výroby a údržby v rámci celého dodavatelského řetězce;
- sběr dat (např. provozních dat, dat o opravách) během činností po dodání, údržby, smluv o výměně nebo opravách;
- analýzu a porovnání s provozními daty a LCC z předchozích podobných produktů (např. 8D, FRACAS);
- monitorování cílů LCC.

Z pohledu požadavků normy ČSN EN ISO 22163 [11] (kapitola A.2) je proces managementu stanovování nákladů životního cyklu (LCC) doporučeným procesem. Procesy managementu RAM a managementu bezpečnosti (jen pro bezpečnostně relevantní produkty) jsou povinnými procesy.

10 Závěr

Analýza LCC představuje, zejména pro železniční průmysl, nepostradatelný inženýrsko-ekonomický nástroj. Umožňuje činit kvalifikovaná manažerská rozhodnutí a hledat optimální kompromis mezi výkonností drážních aplikací, jejich celkovými náklady a časovým harmonogramem. Jak je v článku ukázáno, náklady životního cyklu jsou přímým ekonomickým odrazem spolehlivosti, respektive RAM.

Přestože norma ČSN EN 50126-1 zmiňuje LCC primárně jako nástroj podpory pro dosažení optimální kombinace parametrů RAM a nákladů, oborová norma ČSN EN ISO 22163 jde mnohem dále a doporučuje zavedení, implementaci a udržování procesu managementu stanovování nákladů životního cyklu pro produkty. Integrace promyšlených a metodicky správných analýz LCC do firemních procesů tak není pouze konkurenční výhodou, ale nezbytným předpokladem k plnění požadavků norem a zákazníků.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory Projektu pro rozvoj organizace „DZRO Vojenské autonomní a robotické systémy VAROPS“.

Použité zdroje

- [1] BOUSSABAINÉ, Halim A. – Richard J. KIRKHAM. *Whole Life Cycle Costing – Risk and Risk Responses*. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.
- [2] DHILLON, Balbir S. *Life Cycle Costing for Engineers*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] VINTR, Michal. Analýza nákladů životního cyklu. In *Spolehlivost a ekonomika*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2015, s. 3–13. 978-80-02-02633-4.
- [4] VINTR, Zdeněk, David VALIŠ a Michal VINTR. *Základy spolehlivosti technických systémů*. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2020. ISBN 978-80-7582-303-8.
- [5] ČSN IEC 60050-192. *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [6] ČSN EN 60300-1 ed. 2. *Management spolehlivosti – Část 1: Návod pro management a použití*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [7] ČSN EN IEC 60300-1 ed. 3. *Management spolehlivosti – Část 1: Řízení spolehlivosti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2025.
- [8] ČSN EN 60300-3-3 ed. 2. *Management spolehlivosti – Část 3-3: Pokyn k použití – Stanovení nákladů životního cyklu*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [9] ČSN EN 60300-3-3. *Management spolehlivosti – Část 3-3: Pokyn k použití – Analýza nákladů životního cyklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005. (zrušená norma)
- [10] ČSN EN 50126-1 ed. 2. *Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti (RAMS) – Část 1: Generický proces RAMS*. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [11] ČSN EN ISO 22163. *Železniční aplikace – Systém managementu kvality na železnici – ISO 9001:2015 a specifické požadavky k aplikaci v železniční oblasti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2024.
- [12] MIL-HDBK-259 (Navy). *Life Cycle Cost in Navy Acquisitions*. Washington: Department of Defense, 1983.
- [13] MIL-HDBK-276-1 (MC). *Life Cycle Cost Model for Defense Material Systems Data Collection Workbook*. Washington: Department of Defense, 1984.
- [14] TR-SAS-054. *Methods and Models for Life Cycle Costing*. Neuilly-sur-Seine: RTO/NATO, 2007.

Využití LCC při optimalizaci údržby

prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.

Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany

zdenek.vintr@unob.cz

1 Úvod

U drážních aplikací se běžně uplatňuje politika údržby založená na principech plánované preventivní údržby, kdy se předepsané údržbové zásahy provádí po uplynutí předem stanovených intervalů doby provozu [1]. Cílem této politiky je systematické předcházení vzniku poruch a zajištění vysoké pohotovosti používané techniky. Běžnou součástí programů údržby, které jsou založeny na této politice údržby, bývají i preventivní výměny těch komponent systému, jejichž předpokládaný technický život je kratší než plánovaný životní cyklus celého systému [5]. Týká se to především těch komponent, kde během provozu dochází k jejich postupné degradaci či opotřebení (např. pryžové prvky, lišty pantografů, ložiska apod.)

U takových komponent zpravidla postupná degradace v jistém okamžiku dosáhne takové úrovně, která znemožní plnění požadovaných funkcí danou komponentou a může negativně ovlivnit i schopnost systému jako celku plnit požadované funkce. V praxi se snažíme takové nežádoucí situaci předejít preventivní výměnou dané komponenty ještě předtím, než je dosaženo kritické úrovně degradace vedoucí ke vzniku poruchy.

Určení správného okamžiku k provedení preventivní výměny komponenty však není triviální záležitostí a má významné ekonomické souvislosti [4]. Náklady spojené s preventivní výměnou komponenty jsou zpravidla výrazně nižší než náklady spojené s její neplánovanou výměnou či opravou po poruše. Zkracování předepsaného intervalu pro výměnu komponenty významně snižuje pravděpodobnost neočekávaných poruch dané komponenty (klesají náklady spojené s prováděním oprav), ale na druhé straně negativně ovlivňuje náklady životního cyklu (dále jen LCC), protože není plně využívána potenciální životnost dané komponenty. Na druhé straně prodlužování předepsaného intervalu pro výměnu komponenty sice umožňuje lepší využití potenciálu dané komponenty (pozitivní vliv na LCC), ale současně zvyšuje pravděpodobnost vzniku poruch a tím snižuje pohotovost systému a zvyšuje náklady spojené s prováděním neplánovaných oprav.

Obecně se při stanovení intervalu výměny komponenty vychází buď z požadavků na pohotovost či bezpečnost systému [2], nebo se bere ohled na LCC a hledá se optimální interval z hlediska nákladů. Tento příspěvek se dále věnuje druhému z uvedených přístupů a naznačuje možnosti optimalizace intervalu výměny komponenty z hlediska nákladů s využitím informací z provozu.

Prezentovaný přístup vychází z předpokladu, že v počátečním programu údržby daného systému byla předepsána preventivní výměna jisté komponenty po stanovené době provozu a následně jsou v provozu průběžně sledovány náklady spojené s prováděním preventivních výměn a náklady spojené s prováděním neplánovaných oprav dané komponenty [3].

Navržený postup potom umožňuje posoudit, zda interval výměny komponenty byl navržen vhodně a případně ho optimalizovat z hlediska LCC.

2 Použitý popis nákladů životního cyklu

K vyjádření zkoumaných závislostí využívá prezentovaný matematický model tři různé metody popisu LCC. Model vyjadřuje náklady jako kumulativní nebo průměrné jednotkové náklady, případně se používají tzv. okamžité jednotkové náklady [6].

Kumulativní náklady

V každém časovém okamžiku představují kumulativní náklady součet všech nákladů daného typu od začátku provozu až do daného časového okamžiku. Obecně se tyto náklady s dobou provozu postupně zvyšují.

V experimentech (v provozu) jsou kumulativní náklady obvykle nejjednodušší k identifikaci, protože se jedná o nejméně vyhodnocovanou ekonomickou hodnotu. Závislost kumulativních nákladů na době provozu obvykle nemá spojitý charakter, a proto tuto závislost často nahrazují různé matematické modely.

Průměrné jednotkové náklady

V daném časovém okamžiku t jsou průměrné jednotkové náklady definovány jako podíl kumulativních nákladů vynaložených během doby provozu t a doby provozu t :

$$c(t) = \frac{C(t)}{t} \quad (1)$$

kde:

t – doba provozu (může být měřena s využitím jakékoliv fyzikální veličiny charakterizující rozsah vykonané práce – hodiny provozu, počet ujetých km, počet vykonaných cyklů apod.),

$c(t)$ – průměrné jednotkové náklady během doby provozu t ,

$C(t)$ – kumulativní náklady během doby provozu t .

Průměrné jednotkové náklady vyjadřují průměrné náklady připadající na jednotku doby provozu v jakémkoli okamžiku doby provozu t .

Okamžité jednotkové náklady

Okamžité jednotkové náklady jsou definovány následujícím vztahem (pokud existuje příslušná derivace):

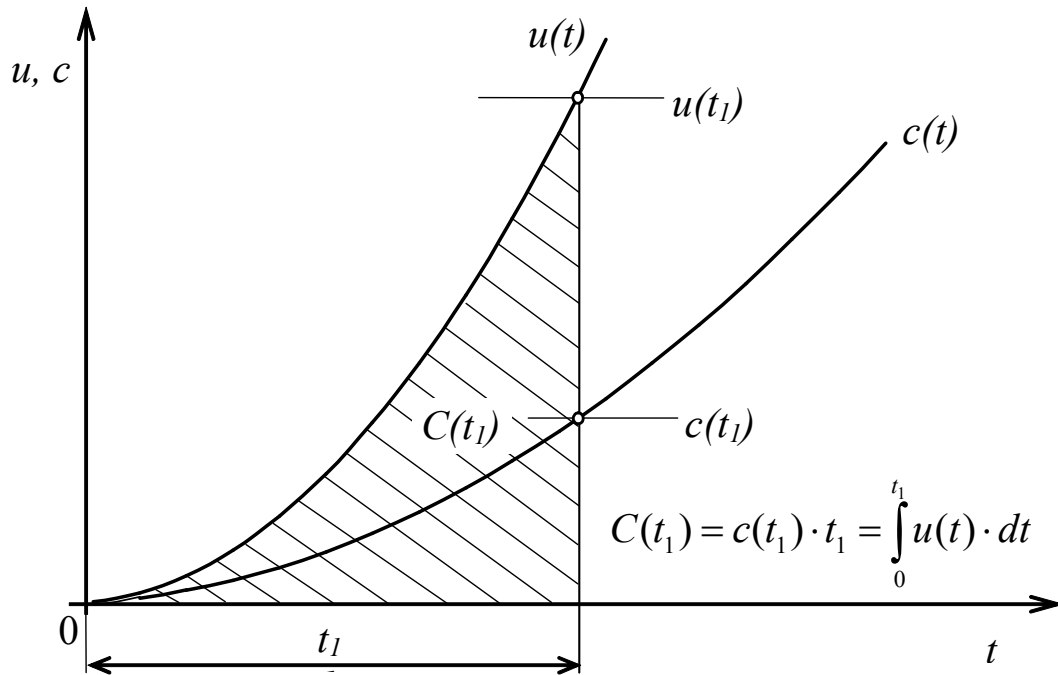
$$u(t) = \frac{dC(t)}{dt} \quad (2)$$

kde: $u(t)$ – okamžité jednotkové náklady v okamžiku provozní doby t .

Okamžité jednotkové náklady v každém okamžiku charakterizují „rychlost“, s jakou jsou příslušné náklady vynakládány. Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že platí:

$$C(t) = c(t) \cdot t = \int_0^t u(x) \cdot dx \quad (3)$$

Grafické znázornění závislostí vyjádřených rovnicí (3) je uvedeno na Obr. 1.



Obr. 1: Grafické znázornění vztahu mezi jednotkovými náklady a okamžitými jednotkovými náklady

3 Model optimalizace

Uvažujme drážní vozidlo, v jehož konstrukci je použita určitá komponenta, u které se provádí periodická výměna jako forma preventivní údržby. Poruchy komponenty zjištěné během provozu se odstraňují opravou, případně výměnou komponenty. Kromě toho prochází zkoumaná komponenta plánovanou preventivní údržbou spočívající v jednoduché kontrole a seřízení. Cílem optimalizace je určit dobu výměny komponenty tak, aby se minimalizovaly jednotkové náklady na životní cyklus vozidla. Předpokládejme, že jsou známy všechny potřebné technicko-ekonomické údaje o komponentě.

Navrhovaný optimalizační model nebere v úvahu ty složky LCC, které nejsou ovlivněny plánovanou údržbou a které nemohou ovlivnit naši optimalizaci. V tomto případě je možné vyjádřit celkové LCC komponenty jako [7]:

$$C_C = C_B + C_M + C_R \quad (4)$$

kde:

C_C – celkové náklady na životní cyklus komponenty,

C_B – pořizovací cena a náklady spojené s plánovanou výměnou komponenty,

C_M – celkové náklady na preventivní údržbu,

C_R – celkové náklady na opravy komponenty.

Dále se předpokládá, že pořizovací cena komponenty je konstantní a nezávisí na době provozu a že náklady na preventivní údržbu a náklady na opravy komponenty závisí na době provozu a s dobou provozu narůstají. Na základě těchto předpokladů a s použitím rovnice (4) lze průměrné jednotkové LCC komponenty vyjádřit jako funkci doby provozu:

$$c_C(t) = \frac{C_B}{t} + \frac{C_M(t)}{t} + \frac{C_R(t)}{t} \quad (5)$$

kde:

$c_C(t)$ – průměrné jednotkové náklady životního cyklu,

$C_M(t)$ – kumulativní náklady na preventivní údržbu během doby provozu t ,

$C_R(t)$ – kumulativní náklady na opravy během doby provozu t .

Všechny členy součtu na pravé straně rovnice (5) mají charakter průměrných jednotkových nákladů příslušného typu. Pro další řešení se předpokládá, že člen vyjadřující průměrné jednotkové náklady na preventivní údržbu je konstantní:

$$\frac{C_M(t)}{t} = c_M \quad (6)$$

Podrobné odůvodnění tohoto předpokladu je uvedeno v následující části. S tímto předpokladem můžeme rovnici (5) upravit do následujícího tvaru:

$$c_C(t) = \frac{C_B}{t} + c_M + \frac{C_R(t)}{t} \quad (7)$$

Cílem optimalizace je najít pro zkoumanou komponentu dobu provozu do výměny t , která zajistí minimalizaci jednotkových nákladů vyjádřených rovnicí (5). Naše řešení tohoto optimalizačního úkolu spočívá v identifikaci lokálního minima funkce $c_C(t)$. K tomu je třeba rovnici (7) derivovat podle času:

$$\frac{dc_C(t)}{dt} = \frac{d\left(\frac{C_B}{t}\right)}{dt} + \frac{dc_M}{dt} + \frac{d\left(\frac{C_R(t)}{t}\right)}{dt} = -\frac{C_B}{t^2} + \frac{\frac{dC_R(t)}{dt} \cdot t - C_R(t)}{t^2} \quad (8)$$

Použitím rovnic (1) a (2), které definují jednotkové náklady a okamžité jednotkové náklady, lze pro další řešení stanovit následující hodnoty:

- průměrné jednotkové náklady na pořízení komponenty a její plánovanou výměnu:

$$c_B(t) = \frac{C_B}{t} \quad (9)$$

- průměrné jednotkové náklady na opravy komponenty:

$$c_R(t) = \frac{C_R(t)}{t} \quad (10)$$

- okamžité jednotkové náklady na opravy:

$$u_R(t) = \frac{dC_R(t)}{dt} \quad (11)$$

Při použití těchto hodnot má rovnice (8) tvar:

$$\frac{dc_C(t)}{dt} = \frac{-c_B(t) + u_R(t) - c_R(t)}{t} \quad (12)$$

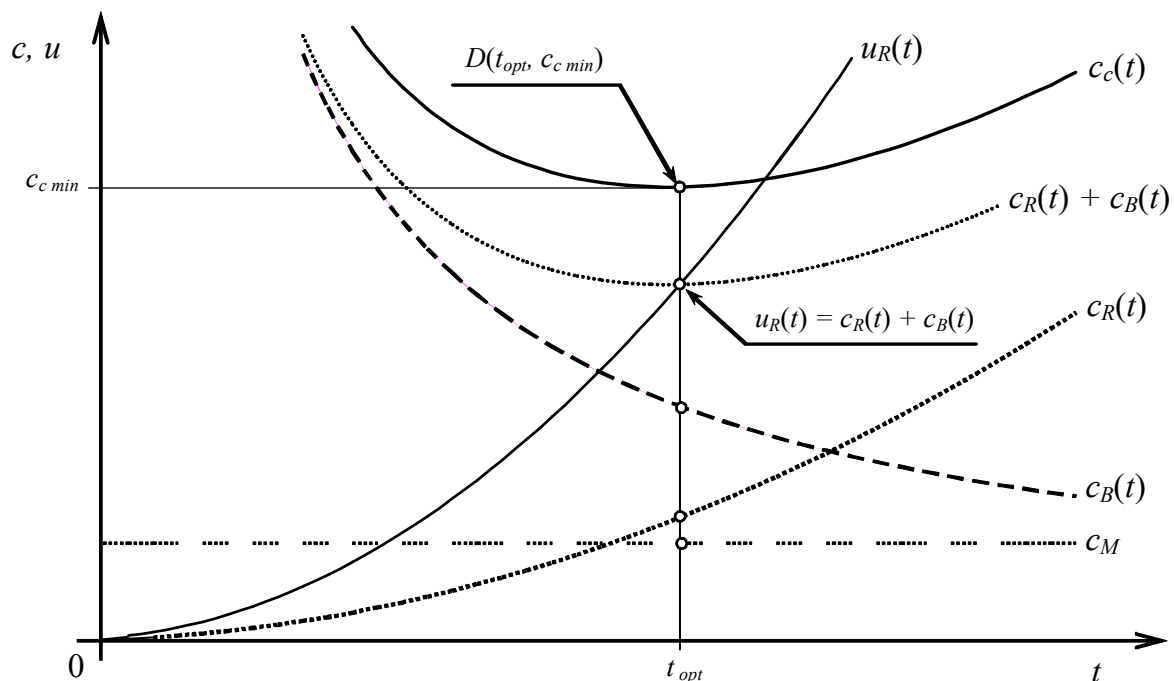
Pro potřeby identifikace lokálního minima funkce $c_C(t)$ položíme levou stranu rovnice (12) rovnu nule a tím dostaneme rovnici:

$$u_R(t) = c_B(t) + c_R(t) \quad (13)$$

Z této rovnice je zřejmé, že optimální délka intervalu výměny komponenty je taková hodnota t , pro kterou se okamžité jednotkové náklady na opravy rovnají součtu průměrných jednotkových nákladů na opravy a pořízení komponenty.

Obr. 2 zobrazuje grafické znázornění výše popsaného matematického modelu. Z Obr. 2 je zřejmé, že optimalizační podmínka vyjádřená rovnicí (13) je splněna pro dobu údržby t_{opt} , kde funkce $c_C(t)$ dosahuje svého minima (bod D na grafu této funkce). Pokud tedy bude zkoumaná komponenta vždy po době provozu t_{opt} demontována a nahrazena novou, budou jednotkové LCC komponenty minimalizovány:

$$c_C(t_{opt}) = c_{C\ min} \quad (14)$$



Obr. 2: Grafické znázornění optimalizačního modelu

4 Analýza optimalizačního modelu

Základní podmínkou pro použití popsané optimalizační metody je vhodný (konvexní) tvar křivky $c_C(t)$. Důležitou podmínkou pro optimalizaci je dostatečně silné lokální minimum v bodě D (t_{opt} , $c_C min$), které umožní relativně přesnou identifikaci polohy tohoto bodu. Tato část poskytuje podrobnější rozbor charakteru jednotlivých nákladových prvků (funkčních závislostí), které jsou zahrnuty do optimalizačního modelu, a možnosti, jak je určit.

Průměrné jednotkové náklady na pořízení a výměnu komponenty

Funkce $c_B(t)$ vyjadřující závislost průměrných jednotkových nákladů na pořízení a výměnu komponenty na dobu provozu je definována rovnicí (9). Grafické znázornění této funkce je rovnoosá hyperbola. Hodnota této funkce klesá s prodloužením doby provozu.

Průměrné jednotkové náklady na preventivní údržbu

Funkce $c_M(t)$ vyjadřuje závislost jednotkových nákladů na preventivní údržbu na dobu provozu:

$$c_M(t) = \frac{C_M(t)}{t} \quad (15)$$

kde $C_M(t)$ vyjadřuje součet všech nákladů spojených s prováděním preventivní údržby komponenty během doby provozu t . Zahrnuty jsou náklady na materiál, mzdy a podpůrné vybavení spojené s prováděním údržby. Předložený optimalizační model vychází z předpokladu, že preventivní údržba je prováděna v souladu s harmonogramem a spočívá v provádění pravidelných stanovených údržbových činností. Rozsah jednotlivých preventivních údržbových činností se s provozní dobou podstatně nemění, takže průměrné jednotkové náklady na preventivní údržbu lze považovat za konstantní:

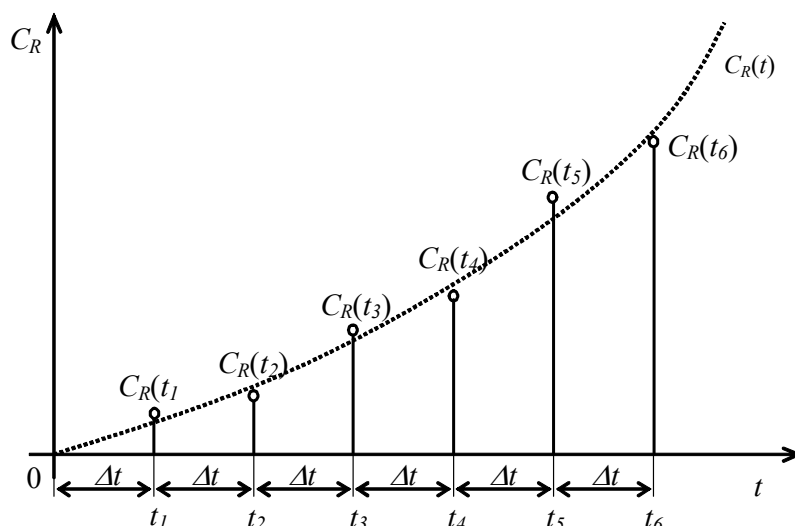
$$c_M(t) = c_M \quad (16)$$

Z tohoto závěru vyplývá, že pro optimalizaci není nutné znát náklady na provádění preventivní údržby. Jinými slovy, náklady na preventivní údržbu ovlivňují hodnotu celkových nákladů na životní cyklus subsystému – viz rovnice (5), ale nemají vliv na hodnotu optimální doby údržby t_{opt} – viz rovnice (13).

Průměrné jednotkové náklady na opravy komponenty

Předložený model předpokládá, že průběh funkce $c_R(t)$ bude vycházet z výsledků pozorování skupiny vozidel v provozu. Celá doba provozu komponenty bude rozdělena na konečný počet stejných časových úseků a v každém z těchto úseků budou sledovány kumulativní náklady vynaložené na opravy daných komponent ve všech vozidlech.

Z těchto nákladů lze snadno stanovit průměrné náklady na jednu komponentu v každém období provozu a z nich lze určit řadu diskrétních hodnot představujících časový vývoj kumulativních nákladů na opravu komponenty. Tyto diskrétní hodnoty lze pro účely dalšího řešení aproximovat vhodnou funkcí $C_R(t)$ (např. metodou nejmenších čtverců). Tuto funkci lze použít k získání průměrných jednotkových nákladů na opravy $c_R(t)$ a okamžitých jednotkových nákladů na opravy $u_R(t)$. Obr. 3 ukazuje příklad použití diskrétních hodnot k vytvoření funkce kumulativních nákladů na opravy.



Obr. 3: Aproximace diskrétních hodnot vhodnou funkcí

5 Příklad praktického použití optimalizačního modelu

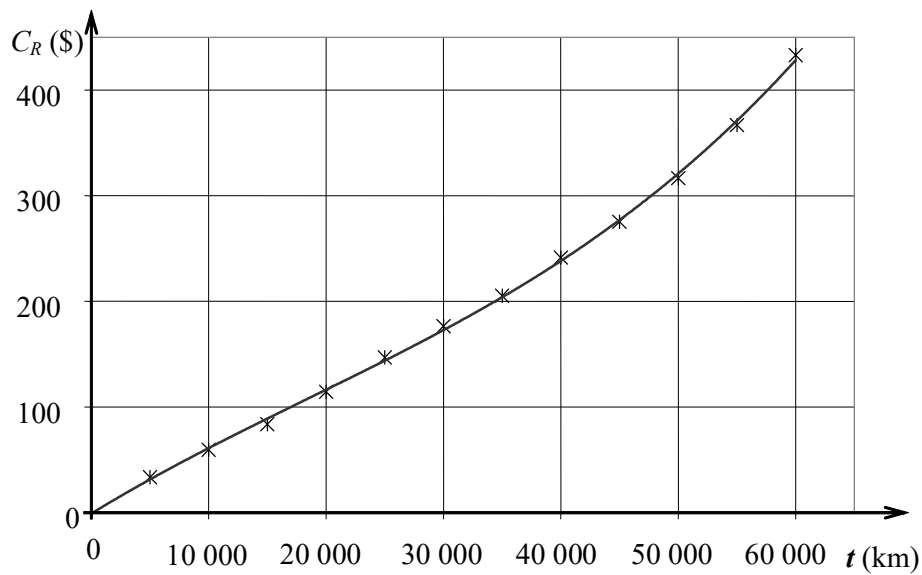
Navrhovaný matematický model byl použit pro optimalizaci koncepce údržby lišt pantografu. Použitá koncepce údržby vozidla vyžadovala provedení výměny lišty po ujetí 60 000 km. Na základě dlouhodobého sledování velkého počtu vozidel byly vyhodnoceny náklady související s opravami identifikovaných poruch lišt. Životní cyklus lišt byl rozdělen do 12 úseků (5000 km každý) a pro každý úsek provozu byly stanoveny průměrné náklady připadající na opravy lišt. Výsledky pozorování jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Přehled výsledků pozorování a vypočtených výsledků

Interval provozní doby (km)	Průměrné náklady na opravy (\$)	Časový vývoj kumulativních nákladů na opravy C_R (\$)
0 – 5 000	33	33
5 000 – 10 000	26	59
10 000 – 15 000	24	83
15 000 – 20 000	30	113
20 000 – 25 000	32	145
25 000 – 30 000	29	174
30 000 – 35 000	28	202
35 000 – 40 000	36	238
40 000 – 45 000	33	271
45 000 – 50 000	41	312
50 000 – 55 000	50	362
55 000 – 60 000	66	428

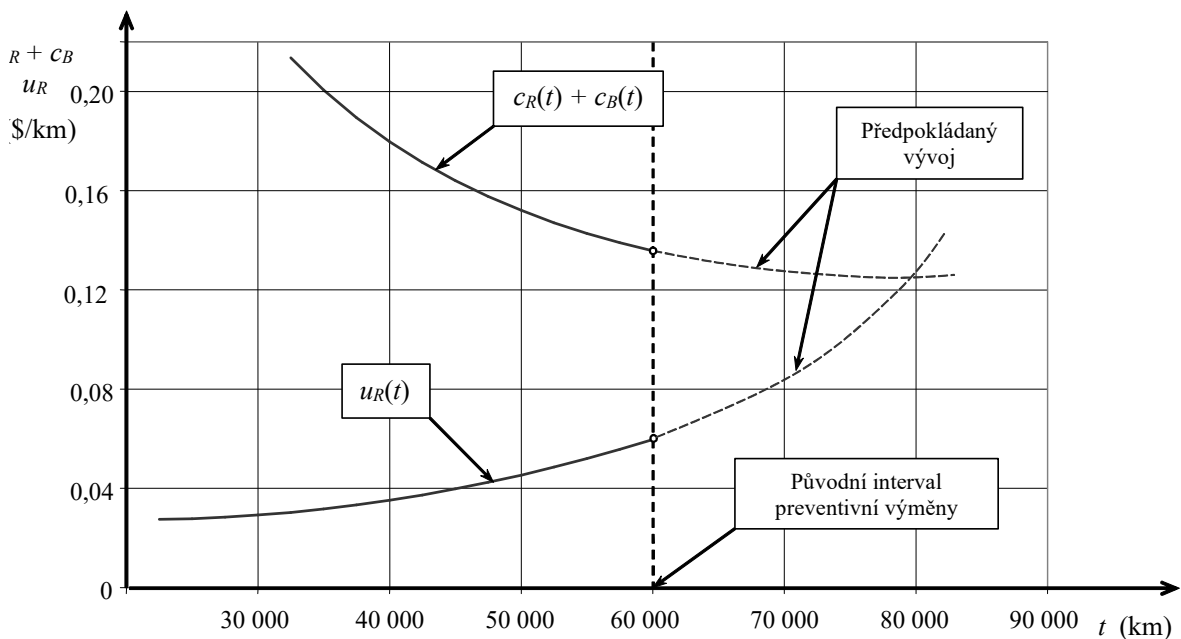
Z těchto údajů byly vypočítány hodnoty charakterizující časový vývoj kumulativních nákladů na opravy lišt. Tabulka 2 poskytuje přehled vypočítaných hodnot. Na tyto diskrétní hodnoty byla aplikována metoda nejmenších čtverců, aby se vytvořila polynomiální aproximace třetího řádu kumulativních nákladů na opravy subsystému (viz Obr. 4). Následně byla vhodnou konverzí této polynomiální funkce získána křivka průměrných jednotkových nákladů na opravy a okamžitých jednotkových nákladů na opravy. Jako jednotka doby provozu, ke které se

jednotkové náklady vztahují, byl použit počet ujetých kilometrů (1 kilometr). Z pořizovací ceny lišty a nákladů spojených s jejich výměnou byla odvozena časová závislost průměrných jednotkových nákladů na pořízení subsystému.



Obr. 4: Aproximace časového vývoje kumulativních nákladů na opravy

Grafické znázornění výsledných závislostí je uvedeno na Obr. 5. Jak je patrné z grafů, lišty jsou vyměňovány podstatně dříve, než je dosaženo jejich optimální doby životnosti. Pokud by lišty nebyly vyměněny a byly ponechány na vozidle pro další použití (až do dosažení optimální délky provozní doby), celkové jednotkové náklady by nadále klesaly. Výměna lišt po ujetí 60 000 km tedy není z hlediska nákladové efektivity optimální. V tomto případě není možné stanovit přesný interval výměny lišt, protože nejsou k dispozici žádné údaje o chování lišt po ujetí 60 000 km. Z grafů na Obr. 5 však lze předpokládat, že optimální doba provozu bude pravděpodobně v rozmezí 70 000 – 80 000 km. V souladu s výše uvedenými závěry lze doporučit změnu provozní doby do plánované výměny lišt z 60 000 km na 75 000 km.



Obr. 5: Grafický model optimalizace

6 Závěr

Předložený příklad ukazuje, že s využitím informací z provozu lze relativně jednoduše kontrolovat správnost nastavení periodicity výměn komponent s omezenou životností a případně stanovené termíny výměn optimalizovat z hlediska LCC. Je třeba však upozornit na to, že plně aplikovatelný je tento postup pouze v případě, kdy jediným hlediskem jsou LCC. V případě, že případné poruchy dané komponenty ovlivňují pohotovost či bezpečnost celého systému, musí být samozřejmě uplatněna především tato hlediska a náklady mohou hrát jen sekundární roli.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Projektu pro rozvoj organizace „DZRO Vojenské autonomní a robotické systémy VAROPS“.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 50126-1 ed. 2. *Drážní zařízení - Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS) - Část 1: Generický proces RAMS*. Praha: ČAS, 2019.
- [2] ČSN EN 50126-2. *Drážní zařízení - Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS) - Část 2: Systémový přístup k bezpečnosti*. Praha: ČAS, 2019.
- [3] ČSN EN 60300-3-2. *Management spolehlivosti - Část 3-2: Pokyn k použití - Sběr dat o spolehlivosti z provozu*. Praha: ÚNMZ, 2005.
- [4] ČSN EN 60300-3-3 ed.2. *Management spolehlivosti - Část 3-3: Pokyn k použití - Stanovení nákladů životního cyklu*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [5] ČSN IEC 60300-3-10. *Management spolehlivosti - Část 3-10: Návod k použití - Udržitelnost*. Praha: ÚNMZ, 2001.
- [6] VALIŠ, David, VINTR, Zdeněk. Development of preventive and corrective maintenance procedures optimisation for military vehicles. In: *Maintenance Modelling and Applications*. Oslo: Det Norske Veritas AS, 2011, s. 704-713. ISBN 978-82-515-0316-7.
- [7] VINTR, Zdeněk, HOLUB, Rudolf.: Preventive maintenance optimization on the basis of operating data analysis. In: *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Tampa: IEEE 2003, pp. 400 – 405. ISBN 0-7803-7717-6

Praktické zkušenosti s analýzami LCC drážních aplikací

Ing. Michal Vintr, Ph.D.

Nezávislý expert na spolehlivost, bezpečnost a RAMS/LCC

mvintr@mvintr.cz – www.mvintr.cz

1 Úvod

Zatímco první článek v tomto sborníku se věnoval teoretickým základům, tento text je plně zaměřen na specifika, reálné postupy a praktické provedení analýzy LCC v oblasti drážních aplikací. V železničním průmyslu má analýza LCC naprosto klíčový význam, neboť slouží jako zásadní hodnotící kritérium ve výběrových řízeních, a to jak ze strany provozovatelů, tak ze strany výrobců kolejových vozidel.

Článek demonstruje, že ačkoliv teoretické modely pokrývají celý životní cyklus, v praxi se výpočet LCC u dodavatelů subsystémů často zužuje především na predikci nákladů na preventivní údržbu a údržbu po poruše. Příspěvek detailně popisuje nezbytné kroky přípravy, sběr technických i finančních dat a vlastní postup provedení analýzy. Následně jsou představeny různé přístupy k dokumentaci analýzy LCC a je diskutován význam využívání interních podnikových formulářů při práci se zákaznickými formuláři, které se napříč trhem vyznačují značnou strukturální a výpočetní různorodostí.

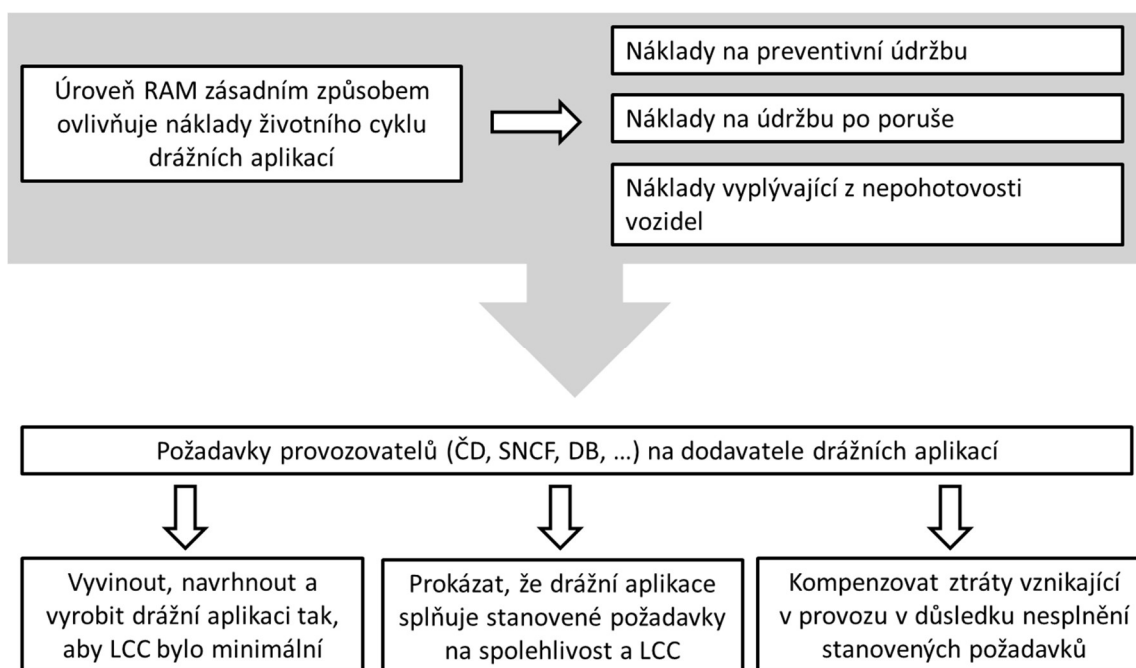
2 Zkratky

CM	Corrective Maintenance – Údržba po poruše
LCC	Life Cycle Cost – Náklady životního cyklu
LRU	Line Replaceable Unit – Jednotka vyměnitelná na místě
MMH	Maintenance Man-Hours – Pracnost údržby
MRT	Mean Repair Time – Střední doba opravy
MTBF	Mean Operating Time Between Failures – Střední doba provozu mezi poruchami
MTTR	Mean Time to Restoration – Střední doba do obnovy
PM	Preventive Maintenance – Preventivní údržba
RAM	Reliability, Availability and Maintainability – Bezporuchovost, pohotovost a udržovatelnost
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety – Bezporuchovost, pohotovost, udržovatelnost a bezpečnost
SRU	Shop Replaceable Unit – Jednotka vyměnitelná v dílně
UNIFE	Union des Industries Ferroviaires Européennes – Evropská asociace železničního průmyslu

3 Analýza LCC u drážních aplikací

Klíčový význam analýzy LCC v železničním průmyslu spočívá v tom, že tyto náklady slouží jako zásadní hodnoticí kritérium ve výběrových řízeních. Analýza LCC je vyžadována jak v dodavatelském řetězci (vztah dodavatel – výrobce kolejového vozidla), tak v rámci akvizičních procesů ze strany provozovatelů.

Klíčový význam analýzy LCC v železničním průmyslu dále ilustrují souvislosti graficky znázorněné na Obr. 1.



Obr. 1: Vazba mezi RAM a LCC v železničním průmyslu

V oblasti drážních aplikací – obzvláště u dodavatelů subsystémů kolejových vozidel – se analýza LCC často zužuje výhradně na hodnocení:

- nákladů na údržbu po poruše;
- nákladů na preventivní údržbu.

Za těchto podmínek má matematický model LCC následující formu:

$$LCC^* = C_{CM} + C_{PM}$$

kde:

LCC^* – účelové náklady životního cyklu,

C_{CM} – náklady na údržbu po poruše,

C_{PM} – náklady na preventivní údržbu.

Z výše uvedeného vyplývá, že ačkoli se v oblasti drážních aplikací deklaruje provádění analýzy LCC, v reálné praxi se subjekty často omezují pouze na hodnocení nákladů na údržbu. Výrobci kolejových vozidel však rozsah LCC standardně rozšiřují o další nákladové kategorie, mezi něž patří akviziční výdaje, náklady na zaškolení personálu, speciální servisní přípravky či

zpracování dokumentace údržby. Tento článek reflektuje primárně vztah mezi výrobcem kolejového vozidla a dodavatelem subsystému, a to specificky z perspektivy dodavatele.

Obecně lze postup analýzy LCC v oblasti železničního průmyslu rozdělit na následující části:

- přípravná část (shromáždění informací);
- provedení analýzy LCC;
- vyhodnocení analýzy (shrnutí výsledků, porovnání s požadavky, optimalizace, ...).

4 Vstupní informace pro analýzu LCC drážních aplikací

Prvním krokem analýzy LCC je přípravná část, jejíž hlavní náplní je shromáždění veškerých informací nezbytných pro provedení analýzy.

Nezbytné informace lze rozdělit do následujících skupin:

- požadavky na LCC;
- model LCC;
- podmínky provozu a údržby;
- konstrukce systému;
- údržba systému;
- analýzy bezporuchovosti a udržovatelnosti;
- logistika (zabezpečení) údržby;
- finanční informace (ceny).

Konkrétní nezbytné informace jsou nejčastěji následující:

- požadavky na LCC (kvalitativní, kvantitativní);
- model LCC (výpočtové vztahy, formulář pro záznam);
- podmínky provozu a údržby (životní cyklus systému, profil mise, ...);
- informace o konstrukci systému (výkresy, kusovníky, seznam LRU/SRU, ...);
- informace o údržbě (plán údržby, manuál údržby, ...);
- výsledky analýz udržovatelnosti a bezporuchovosti (MTTR, MRT, λ , MTBF, ...);
- ceny (a dodací lhůty) systému a náhradních dílů (LRU/SRU);
- ceny spotřebního materiálu;
- ceny oprav;
- cena práce a kvalifikace pracovníků údržby;
- ceny speciálního nářadí a přípravků.

Predikce ukazatelů bezporuchovosti a udržovatelnosti spolu se stanovením cen se v některých případech provádí teprve v rámci samotného provedení analýzy LCC, nikoli během její přípravné části.

5 Postup provedení analýzy LCC u drážní aplikace

Postup vychází z následujících předpokladů:

- jsou známy požadavky na LCC;
- existuje model LCC (byl vybrán nebo vytvořen dodavatelem nebo je požadován zákazníkem);
- jsou známy podmínky provozu a údržby;
- jsou k dispozici informace o konstrukci systému;
- jsou k dispozici informace o údržbě.

Postup lze rozdělit do dvou, relativně nezávislých, kroků:

- analýza nákladů spojených s realizací údržby po poruše;
- analýza nákladů spojených s realizací preventivní údržby.

Při analýze nákladů spojených s realizací údržby po poruše se u každého prvku systému (LRU/SRU) provádí především:

- předpověď četnosti výskytu poruch;
- identifikace způsobu a místa opravy (systém / dílna);
- posouzení pracnosti opravy, nezbytného počtu údržbářů a požadované kvalifikace údržbářů k provedení opravy;
- stanovení ceny náhradních dílů a materiálů nezbytných k provedení opravy;
- určení celkových nákladů na provedení opravy.

Při analýze nákladů spojených s realizací preventivní údržby se každého plánovaného údržbářského úkolu provádí především:

- identifikace prvku (LRU/SRU), kterého se daný údržbářský úkol týká;
- identifikace frekvence provádění údržbářského úkolu;
- identifikace způsobu a místa provedení úkolu;
- posouzení pracnosti údržbářského úkolu, nezbytného počtu údržbářů a požadované kvalifikace údržbářů k provedení úkolu;
- stanovení ceny náhradních dílů a materiálů nezbytných k provedení úkolu;
- určení celkových nákladů na provedení údržbářského úkolu.

6 Dokumentace analýzy LCC u drážní aplikace

Jednotlivé kroky analýzy LCC je nezbytné systematicky dokumentovat. V oblasti drážních aplikací se k tomuto účelu obvykle využívá dedikovaný formulář, který je buď:

- vlastní (vybraný nebo vytvořený dodavatelem);
- nebo definovaný (požadovaný) zákazníkem.

Tento dokument má v praxi nejčastěji podobu tabulky v aplikaci Microsoft Excel. Často se jedná o velmi komplexní a robustní modely využívající pokročilé matematické funkce, maticové vzorce a VBA makra.

6.1 Vlastní formuláře

Z pohledu autora je klíčové, aby dodavatelé pro interní evidenci a výpočty LCC prioritně využívali vlastní podnikové formuláře, a to i v případech, kdy zákazník striktně vyžaduje doložení analýzy v zákaznickém formátu. Má-li dodavatel garantovat výsledné hodnoty LCC (což je v praxi standardním smluvním závazkem), je nezbytné, aby disponoval nezávislým interním modelem. Zákaznické formuláře totiž často fungují jako „černá skříňka“ – bývají pro dodavatele netransparentní, metodicky nepřehledné nebo algoritmy výpočtu zcela skrývají.

Pouze existence a aktivní využívání interního formuláře garantuje dodavateli plnou kontrolu nad celým analytickým procesem a jeho výstupy, což je kritické zejména při smluvním zakotvení garantovaných hodnot LCC.

Pokud zákazník trvá použití zákaznického formuláře, je paralelní (či předcházející) zpracování analýzy ve vlastním formuláři dodavatele klíčovým předpokladem pro získání prokazatelných a validních výsledků.

Tento postup autor považuje za nezbytný, byť si plně uvědomuje, že vývoj vlastního robustního výpočetního formuláře klade vysoké nároky na čas i odbornou znalost.

6.2 UNILIFE a UNIDATA

V roce 1997 založila Evropská asociace železničního průmyslu (UNIFE) pracovní skupinu zaměřenou na standardizaci nákladů životního cyklu (LCC) v železničním průmyslu. Tato iniciativa reagovala na dlouhodobý problém, kdy zákazníci v tendrech požadovali údaje o LCC, v té době již více než deset let. Avšak dodavatelům chyběl jednotný standard a formát pro jejich výpočet.

K nápravě této neuspokojivé situace a ke zlepšení výměny dat vyvinulo UNIFE bezplatné softwarové modely UNILIFE a UNIDATA, které měly sjednotit predikce a modelování LCC v železničním průmyslu. Modely byly dokončeny a postoupeny k skutečnému použití kolem roku 2000.

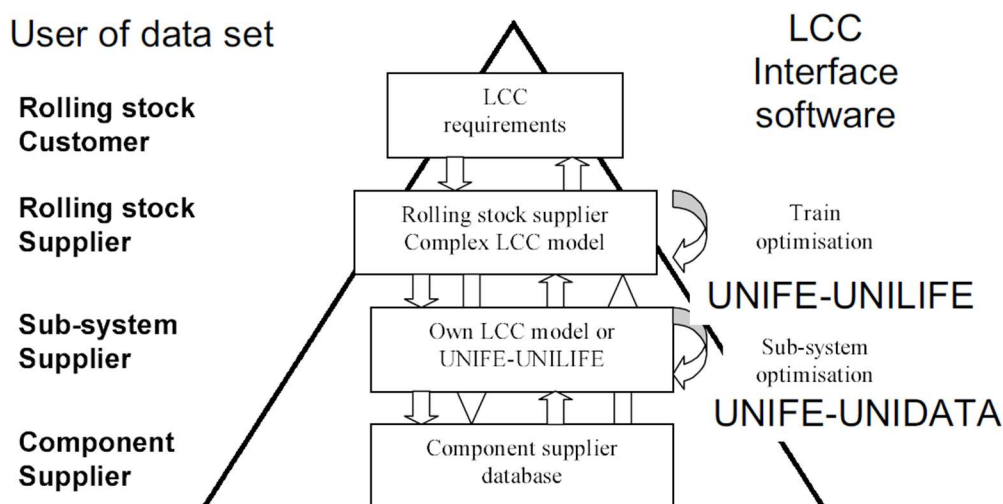
UNILIFE/UNIDATA je softwarový nástroj pro sběr dat, kontrolu kvality a přenos dat mezi dvěma stranami, například od dodavatele subsystému k výrobcí kolejového vozidla. Jedná se o aplikaci v programu Excel, v níž lze sdílet údaje o LCC. Údaje o LCC lze sestavit různými způsoby, což může vést k odlišným výsledkům. Proto je důležité, aby alespoň všichni dodavatelé kolejových vozidel sdíleli stejnou koncepci modelování. To bylo důvodem pro vytvoření nástrojů UNILIFE a UNIDATA [1].

UNIDATA má pevně dané názvy polí (stejně jako v UNILIFE), a je určený výhradně k výměně údajů o komponentách. UNIDATA představuje harmonizovaný nástroj rozhraní mezi výrobcí kolejových vozidel a dodavateli subsystémů a mezi dodavateli subsystémů a dodavateli komponent [1].

UNILIFE zahrnuje výpočetní funkce a kontrolu chyb. UNILIFE umožňuje dodavatelům subsystémů provádět některé výpočty, aby zjistili dopad svých údajů o LCC [1].

Vazba mezi zainteresovanými stranami a modely je patrná z Obr. 2.

The UNILIFE-UNIDATA Model



Obr. 2: Vazba mezi zainteresovanými stranami a modely UNILIFE a UNIDATA [8]

Oba tyto excelovské modely doplňuje rozsáhlá, několikadílná metodická příručka „Guidelines for Life Cycle Cost“. Tento dokument integruje teoretická východiska, terminologický aparát, exaktní matematický popis výpočtů a podrobný uživatelský manuál. V kontextu železničního průmyslu se tak jedná o metodicky nejlépe podložený a nejtransparentnější model LCC.

Čtvrtstoletí od představení modelů UNILIFE a UNIDATA ukazuje, že ambiciózní záměr jejich autorů se naplnil pouze částečně. Tyto modely sice nedosáhly statusu univerzálně akceptovaného průmyslového standardu a jejich současná míra implementace je marginální, nicméně sehrály klíčovou roli jako primární akcelerátor vývoje. Iniciovaly totiž u výrobců kolejových vozidel vývoj vlastních modelů a formulářů, přičemž u některých z nich je přímá koncepční kontinuita s modely UNILIFE/UNIDATA dodnes viditelná.

Aplikace, respektive vhodná modifikace modelu UNILIFE může dodavatelům výrazně usnadnit a urychlit vývoj vlastního výpočetního nástroje.

6.3 Zákaznické formuláře

Většina předních výrobců kolejových vozidel disponuje vlastními metodickými nástroji pro komplexní analýzu LCC na úrovni celého vozidla. Souběžně tito výrobci využívají dedikované formuláře určené k hodnocení nákladů životního cyklu nakupovaných subsystémů. Tyto zákaznické formuláře jsou zpracovány výhradně ve formátu Microsoft Excel. Pouze u některých výrobců je však uživatelský manuál integrován přímo do výpočetního souboru, případně distribuován jako samostatná průvodní dokumentace.

Současným standardem je požadavek výrobců kolejových vozidel na dokumentování analýzy LCC v jejich vlastních, zákaznických formulářích. Tento přístup na jedné straně usnadňuje výrobcům následnou konsolidaci dat, jelikož od všech subdodavatelů dostávají podklady v unifikované podobě. Na straně druhé to však výrazně zvyšuje administrativní a technickou zátěž pro dodavatele subsystémů, kteří musí analýzu LCC adaptovat a exportovat do mnoha odlišných formátů podle požadavků konkrétního zákazníka.

Zákaznické formuláře pro dokumentaci analýzy LCC vykazují mezi jednotlivými výrobci kolejových vozidel značnou různorodost, a to jak z hlediska uživatelského rozhraní, tak především v oblasti matematických modelů, metodiky zadávání dat a algoritmů výpočtu. Spektrum těchto nástrojů sahá od elementárních tabulek bez integrovaných výpočetních funkcí (případně s transparentními základními vzorci) až po robustní vícevrstvé modely. Ty často disponují skrytými automatizovanými výpočty, validací vstupních dat a pokročilou kontrolou vnitřní konzistence.

Autor článku se v rámci své dlouholeté praxe seznámil s formuláři většiny předních světových výrobců kolejových vozidel. Vybrané formuláře byly sice prezentovány účastníkům semináře, avšak tato prezentace obsahovala řadu specifických a neveřejných informací, které z důvodu ochrany know-how nelze v tomto textu publikovat.

6.4 Společné charakteristiky

Ačkoli vykazují všechny dosud uvedené formuláře určité specifické odlišnosti, sdílejí několik společných základních charakteristik.

Tyto formuláře standardně umožňují, respektive vyžadují zadání následujících informací:

- podmínek provozu a údržby (životní cyklus systému, profil mise, intervaly údržby, cena práce, ...);
- struktury / rozpadu systému s příslušnými informacemi (seznam LRU/SRU, ceny, dodací lhůty, ...);
- neplánovaných úkonů – údržba po poruše (doba údržby, informace o bezporuchovosti, pracnost, cena náhradních dílů a materiálu, cena opravy, ...);
- plánovaných úkonů – preventivní údržba (doba údržby, frekvence, pracnost, cena náhradních dílů a materiálu, ...).

Tyto formuláře zpravidla zajišťují:

- kvantifikaci konečných výsledků;
- tabulkovou a/nebo grafickou prezentaci vývoje nákladů v čase.

7 Výsledky analýzy LCC drážní aplikace

Formuláře umožňují kvantifikovat široké spektrum ukazatelů LCC, přičemž vybrané modely integrují i výpočty klíčových ukazatelů bezporuchovosti a udržitelnosti. Primárním výstupem analýzy jsou zpravidla náklady vztažené na jednotku doby provozu, případně predikce jejich rozložení v průběhu technického života systému.

Konkrétně tyto formuláře umožňují kvantifikovat například:

- náklady na provádění preventivní údržby;
- náklady na provádění údržby po poruše;
- náklady na materiál a náhradní díly;
- náklady na pracovní sílu;
- celkové náklady za celou dobu technického života systému.

Formuláře zpravidla kvantifikují specifické (jednotkové) náklady kalkulované na definovanou jednotku doby provozu:

- náklady na 1 km (nebo na 1000 km);
- roční náklady;
- náklady celého životního cyklu.

Formuláře v praxi nejčastěji kvantifikují následující kategorie nákladů:

- náklady na preventivní údržbu;
- náklady na údržbu po poruše;
- náklady na generální opravy.

V rámci vnitřní struktury formulářů se tyto kategorie nákladů dále podrobněji člení na následující položky:

- náklady na materiál;
- náklady na náhradní díly;
- náklady na pracovní sílu.

Pro ilustraci jsou níže uvedeny příklady konkrétních ukazatelů LCC, jejichž kvantifikaci tyto výpočetní formuláře standardně umožňují:

- náklady na pracovní sílu potřebnou pro provádění preventivní údržby (vyjádřené v Kč/km);
- náklady na náhradní díly potřebné pro provádění údržby po poruše (vyjádřené v Kč/rok);
- náklady na materiál potřebný pro provedení generálních oprav během celého technického života (vyjádřené v Kč).

Vybrané modely navíc umožňují kvantifikovat klíčové ukazatele bezporuchovosti a udržovatelnosti, nejčastěji:

- střední dobu do obnovy (MTTR);
- pracnost údržby (MMH);
- střední dobu provozu mezi poruchami (MTBF).

8 Závěr

Z praktických zkušeností autora článku jednoznačně vyplývá, že ačkoliv v železničním průmyslu hovoříme o komplexních analýzách LCC, těžiště reálné praxe u dodavatelů spočívá v precizním vyhodnocení a prokazování nákladů na realizaci údržby preventivní a po poruše.

Nejzásadnějším doporučením pro dodavatele v železničním průmyslu je vývoj a aktivní využívání vlastních interních výpočetních formulářů, a to paralelně se zákaznickými formuláři, které občas fungují jako metodicky nepřehledné „černé skříňky“. Jen díky internímu modelu a formuláři si může dodavatel zachovat plnou kontrolu nad svými daty, výpočty a výstupy, což je naprosto kritické pro schopnost smluvně garantovat výsledné hodnoty LCC.

Samotné výstupy z analýz LCC představují klíčové ukazatele, podle kterých se na dnešním železničním trhu mnohdy rozhoduje o obchodním úspěchu nabízeného systému.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory Projektu pro rozvoj organizace „DZRO Vojenské autonomní a robotické systémy VAROPS“.

Použité zdroje

- [1] KJELLSSON, Ulf and Oliver HAGEMANN. *UNIFE-UNILIFE And UNIFE-UNIDATA – The First European Life Cycle Cost Interface Software Model*. Brussels: UNIFE, 2001.
- [2] VINTR, Michal. Analýza nákladů životního cyklu. In *Spolehlivost a ekonomika*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2015, s. 3–13. 978-80-02-02633-4.
- [3] VINTR, Zdeněk, David VALIŠ a Michal VINTR. *Základy spolehlivosti technických systémů*. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2020. ISBN 978-80-7582-303-8.
- [4] ČSN IEC 60050-192. *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [5] ČSN EN IEC 60300-1 ed. 3. *Management spolehlivosti – Část 1: Řízení spolehlivosti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2025.
- [6] ČSN EN 50126-1 ed. 2. *Drážní zařízení – Stanovení a prokázání bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti (RAMS) – Část 1: Generický proces RAMS*. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [7] ČSN EN ISO 22163. *Železniční aplikace – Systém managementu kvality na železnici – ISO 9001:2015 a specifické požadavky k aplikaci v železniční oblasti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2024.
- [8] *Guidelines For Life Cycle Cost – Volume III, Part B – LCC Interface Software Model UNILIFE and UNIDATA Calculation Macros*. Brussels: UNIFE LCC GROUP, 2001.

Poděkování

Seminář „Analýza nákladů životního cyklu (LCC) drážních aplikací“ byl zorganizován a sborník příspěvků ze semináře byl vydán za podpory Projektu pro rozvoj organizace „DZRO Vojenské autonomní a robotické systémy VAROPS“.

Název: Analýza nákladů životního cyklu (LCC) drážních aplikací
Autoři: Zdeněk Víntr
Michal Víntr
Vydavatel: Univerzita Obrany, Brno
Tisk: Univerzita Obrany, Brno
Náklad: 45 ks
Počet stran: 36
Rok vydání: 2026
Vydání: první

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7582-665-7

ISBN 978-80-7582-666-4 (online ; pdf)