

MEASUREMENT OF OPERATIONAL STRESSES OF 14TRSF TROLEYBUS REAR AXLE MĚŘENÍ PROVOZNÍHO NAMÁHÁNÍ MOSTU ZADNÍ NÁPRAVY TROLEJBUSU 14TRSF

Jaroslav Václavík¹, Milan Kotas¹, Jiří Půda²

Abstract: Total amount of 273 single and articulated trolleybuses have been delivered from ŠKODA Ostrov s.r.o and its American partner ETI to San Francisco, USA in the end of the last century to operate at MUNI routes. Serious failure has appeared on Raba rear axle housing welded joint after some tens of thousand miles of trolleybus operation. ŠKODA VÝZKUM s.r.o. has performed strain gauge measurements of operational stresses of the axle housing and suspension beams at original and several modified axle to suspension beam seatings in the years 2004 to 2006. Following tests were performed: bump test by over crossing of set of vertical obstacles, braking and acceleration tests, left and right curve tests and road test along the most serious chosen set of MUNI routes (32.4 miles). Some modifications were then made according tests and FEA calculations, to avoid the critical joint, leading to new design of lower axle seating between suspension beam and axle. Additional mobile measuring system was used for the tests with final axle version during four days at different MUNI trolleybus lines (517.3 miles). Service life estimation was also made with probabilistic approach using the Monte Carlo method through procedures developed inside MS Excel.

Keywords: strain gauges, service life, measurement, operational stresses, trolleybus.

1. Úvod

V roce 1998 byla zahájena dodávka rozsáhlé série sólo a kloubových trolejbusů 14TrSF a 15TrSF pro dopravní podnik MUNI v San Franciscu, USA. Trolejbusy byly dodávány firmou ŠKODA Ostrov s.r.o. a jejím americkým partnerem ETI. Po několika desítkách tisíc kilometrů začaly vznikat trhliny v místě uchycení tělesa zadní nápravy maďarského výrobce Rába k nosníkům pérování, které se poměrně rychle šířily přes celou tloušťku tělesa (obr.1.).



Obr. 1. Místa vzniku trhlin na původní nápravě trolejbusů 14/15 TrSF

¹ Ing.Jaroslav Václavík, Ing. Milan Kotas, ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Dynamická zkušebna, Tylova 57, 316 00 Plzeň, e-mail: jaroslav.vaclavik@skodavyzkum.cz

² Ing.Jiří Půda, CSc., ŠKODA OSTROV s.r.o., Klínovecká 1407, 363 29 Ostrov, e-mail: jiri.puda@skoda.cz



Obr. 2. Distribuční funkce reálné únavové životnosti

Úprava kritického spoje byla řešena na základě MKP výpočtů, které prováděla americká i maďarská strana a na základě měření na několika variantách uchycení, realizovaných ŠKODOU VÝZKUM s.r.o. v letech 2004 až 2006 [1]. Na obr. 3. je detail kritického místa původního řešení - konec vertikálního svaru spodní patky nápravy s vybroušenou trhlinou. Opravy trhlin ani lokální úpravy kritického místa však růst trhlin nezastavily.



Obr. 3. Kritické místo původní varianty







Obr. 5. Finální varianta - nová místa s nízkou životností označena C, D

Na obr. 4. a obr. 5. je výsledné řešení, kde se na místo přivařených patek použilo nově zkonstruované sedlo, vložené mezi nosník pérování a těleso nápravy. Toto řešení předpokládá výměnu všech těles náprav za nové. Kromě úpravy kritického místa, které se nyní přesunulo do místa konce horizontálního svaru na horním sedle (bod C, obr. 5.) byla snaha snížit lokální napětí svázáním volných konců nosníků pérování pomocí příček z uzavřených pravoúhlých

profilů. Toto řešení sice přineslo očekávané snížení napětí v kritickém místě C, avšak rovněž jeho přesunutí do venkovní oblasti mezi nosník pérování a kola zadní nápravy (bod D, obr. 5.), doprovázené zvýšením namáhání nosníků pérování.

2. Realizované testy

Cílem prováděných měření bylo především získat okrajové podmínky pro výpočty MKP a rovněž ověření vypočtených hodnot pro jednotlivé varianty v místech s lokálními špičkami napětí. Měřena byla napětí v lokálních a nominálních místech nápravy pomocí jednoduchých tenzometrů a tenzometrických růžic, zdvihy vypružení pomocí indukčních snímačů a zrychlení v několika místech nápravy. Měření bylo realizováno pomocí sestavy 8 ks tenzometrických ústředen SPIDER8 s celkovým počtem současně vzorkovaných kanálů 64. Všechna použitá instrumentace byla od firmy HBM.

Byly prováděny následující testy. Přejezd přes sadu normalizovaných vertikálních překážek (obr. 6.), rozjezd a brždění, rychlá jízda do pravé a levé pravoúhlé zatáčky a jízda městem po vybraných úsecích linek San Francisca o délce 32,4 mil. Tyto zkoušky byly prováděny s prázdným a naloženým trolejbusem.



Obr. 6. Trolejbus 14TrSF při přejezdu překážek na Industrial Street, San Francisco

Kromě těchto krátkodobých zkoušek bylo na finální variantě realizováno dlouhodobé čtyřdenní tenzometrické měření ve vybraných místech mobilním měřicím systémem, který je vyvíjen společně s firmou ing. Pohl. Při tomto měření byl trolejbus provozován po 4 různých městských linkách při běžném provozu s pasažéry o celkové délce 517,3 mil.

3. Zpracování naměřených dat a získané výsledky

Data získaná z krátkodobých zkoušek sloužila pro porovnání jednotlivých měřených variant. Místo původního předpokladu, že hlavní příčina poškození nápravy je namáhání v důsledku vertikálního buzení bylo zjištěno, že příčinou poškození nápravy je působení horizontálních sil, vznikajících při brždění a rozjíždění vozu. To je dokumentováno na obr. 7a), kde jsou pro původní variantu porovnány průběhy napětí filtrované horní a dolní frekvenční propustí při mezní frekvenci filtru f = 1 Hz, čímž se separovaly nízkofrekvenční účinky jízdních manévrů od vyšších frekvencí vertikálního buzení. Na obr. 7b) jsou pak porovnány histogramy četnosti amplitud těchto filtrovaných časových řad.

Data z jízdních zkoušek městským okruhem s prázdným a plným vozem sloužila k odhadu mediánových hodnot životnosti jednotlivých měřených variant pomocí vlastního programu Expert ŠKODA VÝZKUM s.r.o. nominálním přístupem. Pro jednotlivé měřené uzly byly

odhadnuty tvary Wöhlerových křivek a časové řady napětí byly dekomponovány na amplitudy metodou rainflow; byla prováděna rovněž korekce na asymetričnost cyklu. Pro výpočet životnosti byla použita modifikovaná metoda Palmgren Miner. Byla vypočtena i kombinovaná životnost za předpokladu, že vůz jezdí 50% provozní doby prázdný a 50% provozní doby naložený.



Obr. 7. Filtrovaný průběh napětí v kritickém místě při jízdní zkoušce (a) a odpovídající histogramy četnosti amplitud metodou rain-flow (b)

Na obr. 8. je provedeno porovnání mediánových hodnot životností pro několik zkoušených variant pro nejkritičtější místo na nápravě (a) nebo nosníku pérování (b). Zatímco na původní variantě byl kritickým uzlem vertikální svar spodní patky nápravy (obr. 1, obr. 3.), na upravené variantě konec horizontálního svaru dolní patky, u konečného řešení je místo z nejvyšším napětím konec horizontálního svaru horního sedla (obr. 4., obr. 5.). Konečná varianta přinesla podstatný nárůst životnosti nápravy pouze pro případ svázání konců nosníků pérování.



Obr. 8. Porovnání životností kritických míst na nápravě (a) a na nosníku pérování (b)

Na obr. 9. je provedeno porovnání kumulovaných histogramů četnosti amplitud, získaných z krátkodobé zkoušky o délce 32,4 mil pro kombinaci provozu prázdný/plný 50%/50% a z dlouhodobé jízdní zkoušky. Přitom četnosti amplitud z krátkodobé zkoušky jsou extrapolovány na délku úseku dlouhodobé zkoušky. Na obr. 10. je provedeno porovnání odhadnutých mediánových hodnot životností pro jednotlivé režimy krátkodobé a dlouhodobé zkoušky. Z výsledků je zřejmé, že výběr tratě pro krátkodobou zkoušku byl proveden konzervativně (kombinace kopcovitých linek #1 a #24 a linky #5 s rychlými úseky a prudkým bržděním). Nejvyšší poškození při dlouhodobé zkoušce je dosahováno u linek s kopcovitým

terénem (linka #1), zatímco poškození u linek, vedoucích městem po rovině, je nízké, i když povrch vozovek je značně nekvalitní.



zkoušek

zkoušek

4. Pravděpodobnostní přístup pro vyhodnocení životnosti při vysokocyklové únavě

Pro kritické místo konce horizontálního svaru horního sedla na finální verzi nápravy byl odhad životnosti proveden rovněž pravděpodobnostním přístupem. Vstupními daty a metodami pro únavové posouzení spolehlivosti uzlu bylo spektrum napěťové odezvy, křivka životnosti, metoda pro zohlednění střední složky napětí a hypotéza kumulace únavového poškození. Z naměřené časové řady napětí v kritickém místě byl metodou rainflow zpracován histogram četnosti amplitud pro 16 tříd amplitud a 16 tříd střední složky cyklu. Takto získaná matice představuje jednu realizaci provedené zkoušky (náhodného procesu), ze které nelze usuzovat na statistiky procesu. Zmíněná dekompozice a další vyhodnocení byly prováděny jak pro data, získaná z krátkodobé, tak pro data získaná z dlouhodobé zkoušky.

Ze všech četností matice pro jednotlivé střední hodnoty lze pak vytvořit jeden histogram, kde každý prvek histogramu odkazuje na odpovídající amplitudu a střední hodnotu cyklu [2]. Z histogramu je nutno zkonstruovat empirickou distribuční funkci. Na základě této distribuční funkce lze inverzním postupem pomocí generátoru náhodných čísel s rovnoměrným rozdělením generovat amplitudy napětí, jejichž rozložení i rozložení jejich středních hodnot odpovídá této distribuční funkci. Opakovaným generováním amplitud do dosažení četnosti staré matice lze zkonstruovat novou matici rainflow. Takto lze opakovaně vytvářet další matice, které nejsou shodné, ale pravděpodobnostně si odpovídají; tyto matice lze považovat za různé realizace jednoho náhodného procesu a mohou být využity opakovaně jako vstupy do výpočtu distribuční funkce únavové životnosti. Wöhlerovu křivku uzlu lze zapsat v následujícím tvaru

$$\log N = \log N_c + B \cdot (\log \sigma_a - \log \sigma_c) + d \cdot s_{\log N}$$
⁽¹⁾

- *N* … počet cyklů do porušení při amplitudě napětí σ_a
- počet cyklů do bodu zlomu $N_c \dots$
- sklon šikmé větve *B* ...
- mez únavy σ_c ...
- d ... kvantil log-normálního rozdělení o střední hodnotě 0 a směrod. odchylce slogN

Je použit model s logaritmicko-normálním rozložením počtu cyklů do porušení na jednotlivých napěťových hladinách. Variabilita počtu cyklů do porušení *N* je určována velikostí směrodatné odchylky s_{logN} . Směrodatná odchylka je uvažována nezávislá na počtu cyklů. Její hodnota byla zvolena dle [3] pro kategorii detailu T, $s_{logN} = 0,2484$. Hodnota kvantilu *d* odpovídá hodnotě toleranční meze pro určenou pravděpodobnost výskytu základního souboru. Pro generování jednotlivých bodů distribuční funkce únavové životnosti lze tedy na základě (1) vytvářet jednotlivé realizace Wöhlerovy křivky pomocí inverzní distribuční funkce log-normálního rozdělení. Vstupem je náhodné číslo s rovnoměrným rozdělením v inervalu (0;1), výstupem je kvantil *d*. Hodnota *B* je zvolena na základě [3] konstantní B = -3. Hodnoty σ_c a N_c jsou voleny podle tvaru uzlu. Použitá Wöhlerova křivka je zobrazena na obr. 11.



Obr. 11. Použitá Wöhlerova křivka



Jako hypotéza kumulace únavového poškození je zvolena v souladu s metodikou přijatou v [3] hypotéza Palmgren-Minerova, používá se dvakrát zalomená Wöhlerova křivka. Třídy amplitud, vyskytující se v matici rain-flow, jsou z důvodu zohlednění kladné střední hodnoty cyklu σ_m nahrazeny efektivními hodnotami σ_{ae} dle vztahu

$$\sigma_{ae} = \sigma_a + m \cdot \sigma_m \tag{2}$$

m.. citlivost materiálu uzlu na asymetrii cyklu.

Celý postup vytváření distribuční funkce únavové životnosti je znázorněn na obr. 13. Jednotlivé body distribuční funkce se počítají pomocí uvedené hypotézy z dvojic náhodných realizací matice rain-flow a Wöhlerovy křivky. Postup je realizován v listu MS Excel za použití interních funkcí a makra, zpracovaného v jazyku VBA.



Obr. 13. Postup konstrukce distribuční funkce únavové životnosti

Na obr. 14 a) jsou uvedeny vypočtené hodnoty distribučních funkcí únavové životnosti pro krátkodobou i dlouhodobou jízdní zkoušku. Prezentované distribuční funkce jsou sestrojeny z 1000 bodů. Je zřejmá velmi konzervativní volba okruhu pro krátkodobou jízdní zkoušku, kdy mediánová hodnota distribuční funkce, vypočtené na základě krátkodobé zkoušky odpovídá zhruba 10% pravděpodobnosti poškození, vypočtené na základě dlouhodobé zkoušky. Poměry při nevhodné volbě zkušebního úseku mohly být i obrácené. Z výsledků je patrné, že skutečný reprezentativní úsek je možno získat pouze na základě dlouhodobého měření. V prezentovaném postupu byla použita empirická distribuční funkce, získaná na základě měření. Rozšířením tohoto postupu může být aproximace kumulativního spektra amplitud vhodným rozdělením a extrapolace distribuční funkce původní rainflow matice tohoto rozložení do oblasti vyšších amplitud napětí s nižší pravděpodobností výskytu, jak je ukázáno v pravděpodobnostním papíru na obr. 14 b).



Obr. 14. Distribuční funkce únavové životnosti kritického uzlu konečné varianty (a) a rozdělení amplitud v pravděpodobnostním papíru pro dlouhý i krátký test (b)

5. Závěr

V příspěvku bylo stručně nastíněno řešení problematiky porušených náprav trolejbusů v San Franciscu a výsledky odhadu životnosti na základě krátkého a dlouhého testu deterministicky a pomocí pravděpodobnostního přístupu. Cílem bylo ukázat důležitost správné volby reprezentativních provozních režimů a odpovídající dostatečné délky měření. Pokud některé režimy v záznamu chybí nebo jsou zastoupeny v nesprávném poměru, nejsou odhady životnosti dostatečně věrohodné ani v případě, pokud jsou odhady provedeny pravděpodobnostním přístupem.

Poděkování: Příspěvek byl podpořen výzkumným záměrem MŠMT MSM 4771868401.

Literatura

- [1] Operational tests of trolleybus 14TrSF with new axle. VYZ-0654-0090/02N Testing report ŠKODA VÝZKUM s.r.o., November 7, 2006.
- [2] Culek, B. Jr., Culek, B.: *Probabilistic assessment of the service life of undercarriage railway frame.* Proceedings of the international conference "Reliability and diagnostics of transport structures and means", University of Pardubice, September 2002.
- [3] *Code of practice for Fatigue design and assessment of steel structures.* British standard BS 7608:1993.