

1. Některé výsledky z měření na mostě ev. č. 152-007

Testy systému monitorování mostní konstrukce probíhaly na mostu ev. č. 152-007 přes řeku Moravská Dyje na trase mezi Starým Hobzím a Slavonicemi v letech 2021-2023.

Most byl postaven v roce 2017. Během stavby byl most vybaven optickými senzory uvnitř i vně mostní konstrukce.

V roce 2021 byla u mostu, ve směru na Slavonice, provedena instalace systému vysokorychlostního vážení vozidel (WIM) a kamerového systému pro monitorování pohybu vozidel po mostní konstrukci.

V roce 2021 a 2022 probíhaly na mostě řízené testy s dodatečným doplněním prvního mostního pole akcelerometry. Některé průběžné poznatky z těchto testů jsou uvedeny v následujících kapitolách.



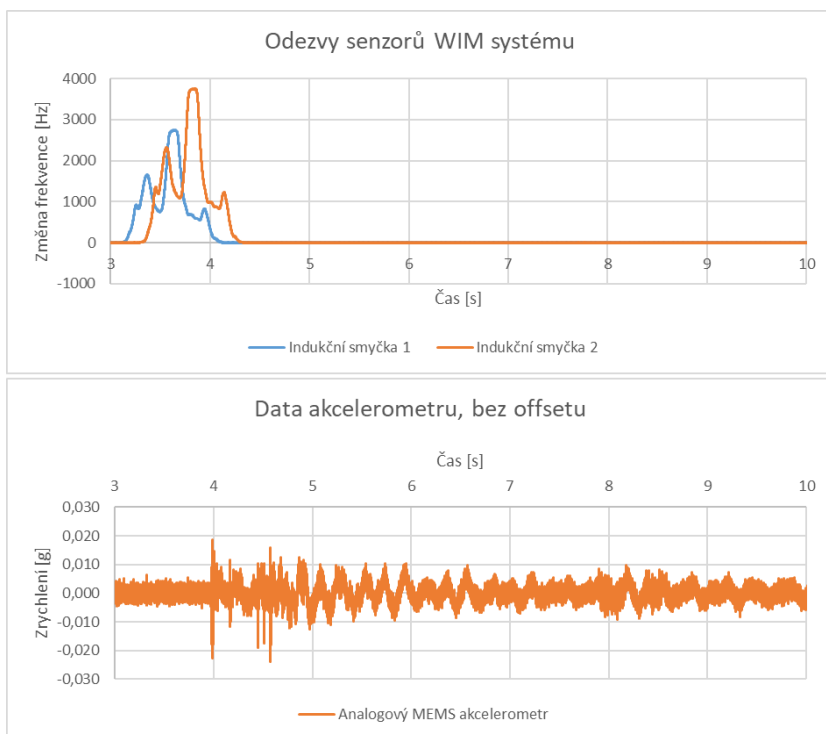
Obrázek 1: Kamera a její pohled na těleso mostu s projíždějícím testovacím vozidlem



Obrázek 2: Senzory vážního systému instalované ve vozovce (indukční smyčky a nápravové senzory)

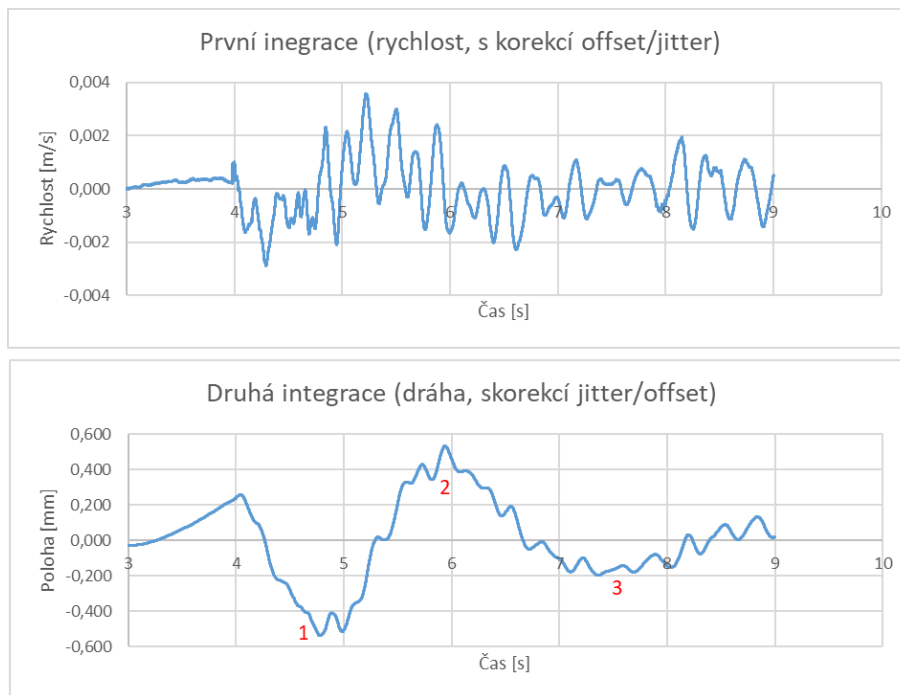
1.1. Princip zpracování odezev akcelerometrů

Na obrázku níže je ilustrován příklad zpracování synchronních dat analogového MEMS akcelerometru při měření nákladního vozidla, kamionu s pěti nápravami, o hmotnosti 18 tun. Data jsou synchronní s WIM systémem. V čase 3 sekundy vjíždí nákladní vozidlo na indukční smyčky WIM systému a v čase 4 sekundy se dostává na mostní konstrukci, kterou projíždí přibližně dalších 6 sekund. Data akcelerometrů jsou pak automaticky zpracována za účelem určení pohybu mostní konstrukce.



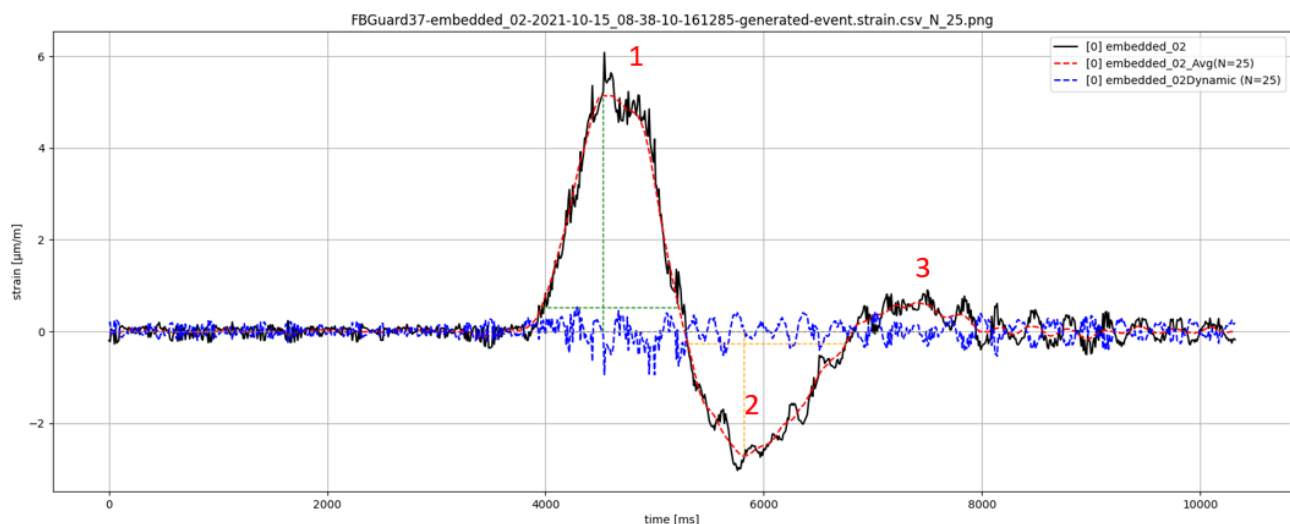
Obrázek 3: Synchronní data WIM systému (indukční smyčky) a analogového MEMS akcelerometru

Jak je patné na grafu níže, mostní konstrukce ve Starém Hobzí při tomto zatížení vykazuje rozkmit přibližně 1,2 mm. V bodě 1 najíždí vozidlo na první segment mostu, který klesá dolů společně s akcelerometry. V bodě 2 se vozidlo nachází na druhém segmentu a principem páky (díky svázání mostních segmentů) naopak zvedá první segment. V bodě 3 se vozidlo nachází na třetím segmentu, což se na první segment přenáší jako pokles.



Obrázek 4: Výpočet změny polohy mostní konstrukce na základě dat získaných MEMS akcelerometrem

Správnost zpracování dat akcelerometrů byla potvrzena porovnáním s optickými snímače relativního přetvoření mostní konstrukce. V grafu níže je relativní přetvoření mostu měřené optickým snímačem zabetonovaným v mostní konstrukci. Graf je inverzní k výstupům akcelerometrů, protože při pohybu konstrukce směrem dolů dochází k prodloužení spodní strany oblouku a opačně. Jak je zřejmé, jednotlivé body (extrémy) zjištěné zpracování akcelerometrů časově koreluje s výsledkem měření optických snímačů.



Obrázek 5: Odezva optického senzoru pro porovnání s výsledkem zpracování dat akcelerometru

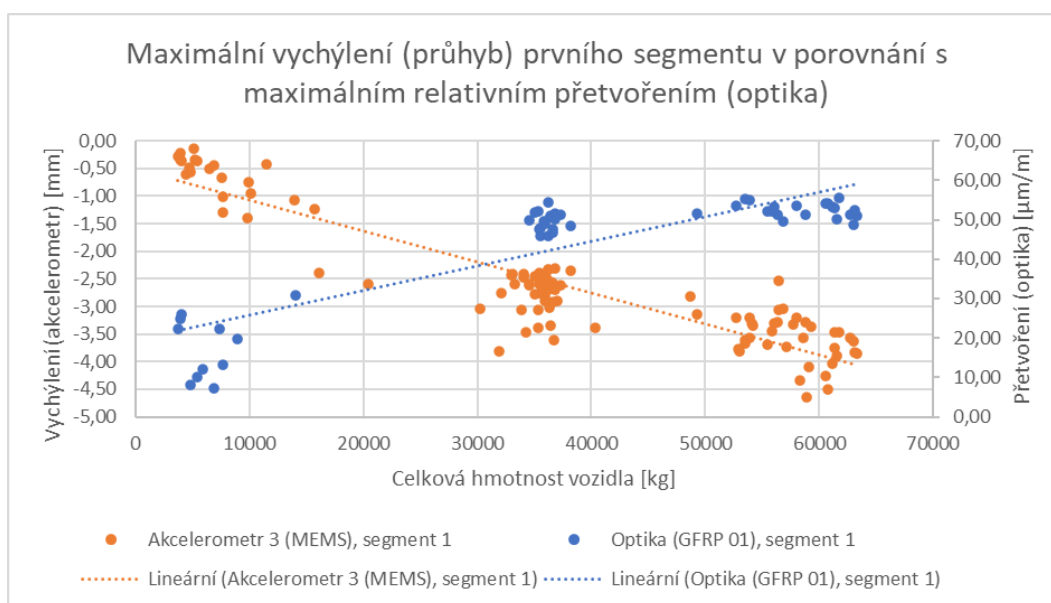
1.2. Průhyb a přetvoření mostní konstrukce ve vztahu k zatížení

Při řízených testech integrace akcelerometrů s WIM systémem byla používána testovací vozidla o známé zátěži. Během testu byl na mostní konstrukci ve Starém Hobzí přítomen i běžný provoz ostatních vozidel.



Obrázek 6: Testování vybraných digitálních MEMS akcelerometrů pro potřeby vývoje jejich integrace s WIM systémem

Testy umožnily, mimo jiné, získat data o závislosti mezi hmotností vozidla a vertikálním pohybem mostní konstrukce. Získaná data bylo rovněž možno porovnat s optickými senzory přetvoření mostní konstrukce. Porovnání a popis výsledků jednoho z provedených testů je níže.



Obrázek 7: Průhyb a relativní přetvoření prvního segmentu při průjezdu vozidel s různou hmotností

Při zatížení kolem 55 tun vykazuje mostní konstrukce ve Starém Hobzí průhyb přibližně -4 mm a přetvoření prvního mostního segmentu dosahu přibližně 55 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Shluk kolem 35 tun a kolem 55 tun z většiny (byl přítomen i další provoz) odpovídá opakovaným průjezdům testovaných vozidel. Rozptyl bodů ve směru osy x (hmotnost) odpovídá nejistotě měření hmotnosti vozidla na WIM systému (instalovaný pracuje s chybou měření kolem $\pm 10\%$).

Rozptyl bodů v ose y (přetvoření a průhyb) odpovídá nejistotě měření výchylky a relativního přetvoření na mostních senzorech.

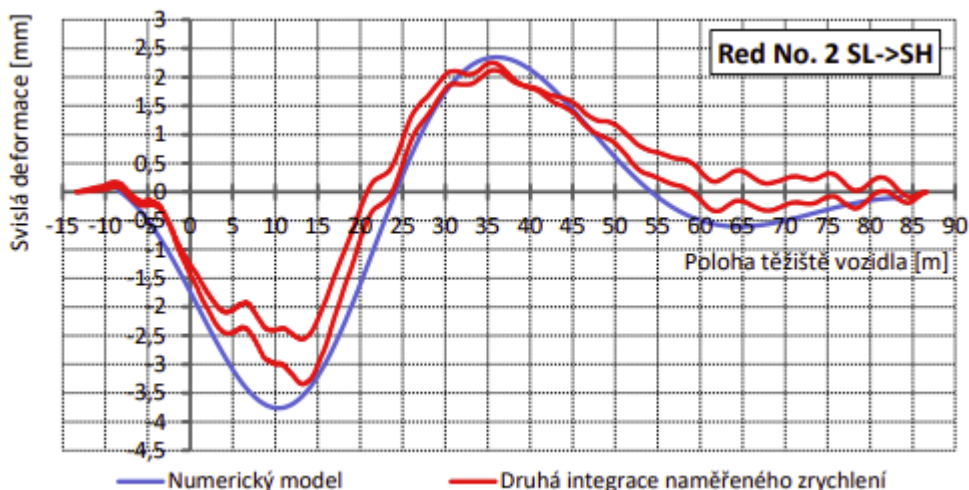
Jak je z grafu patrné, s hmotností roste prodloužení spodní části mostní konstrukce (povrchový optický snímač je umístěn zespodu segmentu) a střed mostního oblouku odpovídajícím způsobem klesá.

Vozidlo o hmotnosti 35 tun způsobuje mírně vyšší průhyb a relativní přetvoření, nežli by odpovídalo jeho hmotnosti. Toto je způsobeno faktem, že lehčí vozidlo bylo mnohem kompaktnější (4 nápravy, 10 m) nežli těžší vozidlo (3+3 nápravy, 19 m) a působilo tak na mostní konstrukci více bodově. Toto pozorování, z hlediska teorie očekávané, potvrzuje význam WIM systému pro systém monitorování mostní konstrukce. WIM systém poskytuje nejenom informaci o hmotnosti vozidla, ale rovněž podstatnou informaci o jejím rozložení.

Jak je rovněž patrné, systém vážení vozidel za jízdy a jejich trasování umožňuje získat velmi cennou relaci mezi přetvořením a pohybem mostní konstrukce a hmotností (a jejím rozložení) jednotlivých vozidel.

1.3. Porovnání s numerickou simulací (modelem) mostní konstrukce

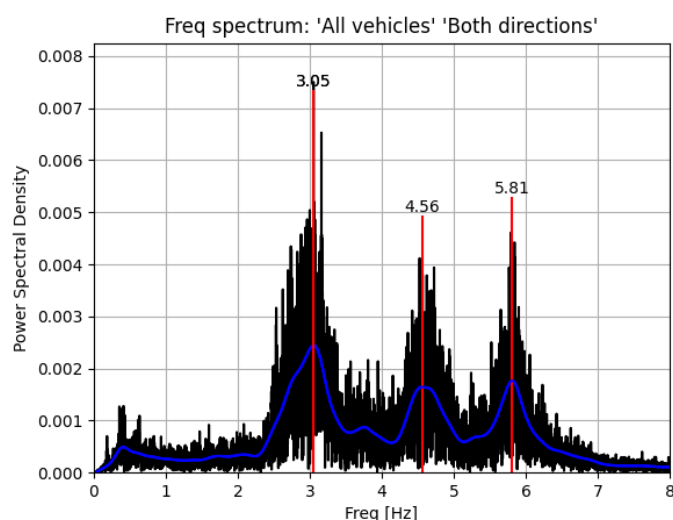
Za účelem ověření získaných výsledků byla, ve spolupráci s externí odbornou firmou BESTEX, provedena analýza chování testovací mostní konstrukce ve Starém Hobzí. Byly porovnány a zhodnoceny výsledky numerické simulace předmětné mostní konstrukce a měření s použitím akcelerometrů. Závěrečná zpráva konstatovala, že měření s akcelerometry je, za dodržení určitých podmínek, možné a správné. Hodnoty měřeného pohybu mostní konstrukce odpovídaly simulacím provedeným pro testovací vozidla.



Obrázek 8: Příklad porovnání numerické simulace mostní konstrukce a výstupů zpracování MEMS akcelerometrů pro šestinápravové těžké vozidlo (cca 55 tun) (Zdroj: BESTEX)

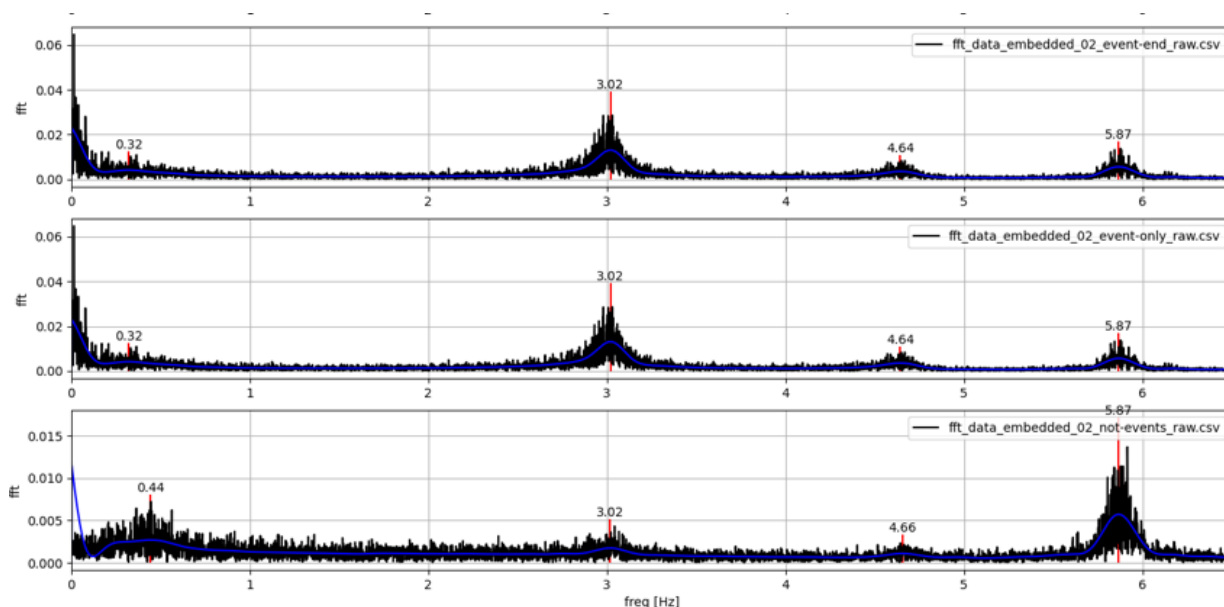
1.4. Vlastní frekvence mostní konstrukce

Během testů byla rovněž ověřena možnost monitorování vlastních kmitů mostní konstrukce a jejich frekvence. Na obrázky níže je ukázka frekvenčního spektra získaná frekvenční analýzou dat akcelerometrů všech průjezdů testovacích vozidel při jednom z provedených testů. V tomto frekvenčním spektru jasně vystupují vlastní kmity mostní konstrukce.



Obrázek 9: Analýza frekvenčního spektra dat akcelerometrů

Podobně byla rovněž provedena frekvenční analýza nad daty optických senzorů. Při zanedbání frekvencí <1 Hz, které odpovídají pohybu vozidla po mostní konstrukci, byly opět pozorovány vlastní kmity mostní konstrukce jejichž frekvence přibližně odpovídá hodnotám zjištěným na základě zpracování dat akcelerometrů.



Obrázek 10: Analýza frekvenčního spektra dat optických senzorů