

# Technologie využití kombinace různých měřících systémů k určování pohybů mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru



Milan Talich, Jan Havrlant, Lubomír Soukup, Filip Antoš



Michal Polák, Pavel Ryjáček, Jiří Litoš, Tomáš Plachý, Martin Macho, Vojtěch Stančík

Prosinec 2022

# Obsah

Obsah	2
1. Úvod	3
2. Radarová interferometrie s IBIS	3
3. Fotogrammetrie s korelací digitálního obrazu	9
4. Standardní metody měření	16
4.1. Měření svislých průhybů relativními snímači dráhy	16
4.2. Měření kmitání absolutními snímači zrychlení	18
5. Potenciální využití jednotlivých metod při experimentech na mostních objektech a dalších stavebních konstrukcích	20
5.1. Měření statických posunů a průhybů	21
5.1.1 Měření statických posunů a průhybů vodorovné nosné konstrukce mostů ve střední části polí	21
5.1.2 Měření svislých zatlačení ložisek a svislých poklesů podpěr	23
5.1.3 Speciální případy měření statických posunů a průhybů radarovou interferometrií	24
5.1.4 Střednědobé měření kvazistatických posunů a průhybů	25
5.2. Měření statických poměrných deformací	25
5.3. Měření dynamických posunů, průhybů a výchylek	27
5.4. Měření dynamických poměrných deformací	30
5.5. Měření dynamického součinitele	31
5.6. Měření zrychlení	31
5.7. Měření frekvencí a tvarů vlastního kmitání	31
6. Kombinace různých experimentálních metod při experimentech na mostních objektech	33
7. Seznam použité literatury	33

## Přílohy:

1. Zpráva o provedeném ověřovacím měření na železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou
2. Protokol o ověření technologie

# 1. Úvod

Tento dokument popisuje ověřenou technologii zaměřenou na využití kombinace různých měřících systémů k určování pohybů (svislých průhybů, podélných posunů, výchylek nebo zrychlení) nosných konstrukcí mostů současně v podélném i svislém směru. Do této ověřené technologie jsou zařazeny tři typy metod. První metodou je určování svislých a podélných posunů nosných konstrukcí mostů za pomoci dvou pozemních interferometrických radarů IBIS-S nebo IBIS-FS (radarová interferometrie (RI)). Druhou metodou je sledování svislých a podélných pohybů nosných konstrukcí fotogrammetrií s korelací digitálního obrazu (DIC). Do třetího typu metod jsou zařazeny experimentální postupy standardně používané při statických a dynamických zkouškách na mostních objektech.

## 2. Radarová interferometrie s IBIS

Radarová interferometrie s radarem IBIS (ground-based microwave radar interferometry by the Image By Interferometric Survey of Structures (IBIS-S) system) je moderní bezkontaktní experimentální metoda, která využívá souvislé elektromagnetické frekvenční modulované vlny a interferometrii. Tato metoda je používána obecně pro identifikaci, zaměření a určení vzdálenosti objektu od měřicího přístroje – radaru IBIS.

Současné radary využívané při RI umožňují výchylky nosné konstrukce mostu snímat dynamicky s dostatečně vysokou vzorkovací frekvencí (až 200 Hz) a dosáhnout přitom přesnosti měřených výchylek až 0.01 mm.

Rozlišovací schopnost jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, (tzn. šířka radiální spádové oblasti) je 0,75 m. Maximální dosah radaru je až 1 km, závisí ovšem na velikosti odrazné plochy cíle a vyzařovacím úhlu použité antény radaru.

K radaru IBIS je standardně dodávána anténa typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39). Horizontální vyzařovací úhel této antény je 12° při ztrátě 3dBi a 25° při ztrátě 10dBi. Vertikální vyzařovací úhel je 39° při ztrátě 3dBi a 69° při ztrátě 10dBi. K radaru je v případě potřeby možno připevnit i další výrobcem dodávané typy antén, které se liší zejména horizontálním a vertikálním vyzařovacím úhlem.

K upevnění radaru na geodetický stativ slouží adaptér se závitem na šroub stativu a šroubem pro závit 3D hlavy radaru nebo adaptér do geodetické trojnožky. Dále 3D hlava, která je převzata z fotostativu Manfrotto dodaného výrobcem. 3D hlava umožňuje otáčení radaru podél svislé osy a náklon ve dvou kolmých směrech.

Na stavebních konstrukcích je radarová interferometrie využívána jak ke krátkodobým měřením, která trvají řádově jednotky sekund až desítky minut, tak i ke střednědobým experimentům, jejichž délka se pohybuje v řádu jednotek, nebo desítek hodin až jednotek dnů. V geotechnice je RI aplikována také při dlouhodobých experimentech zaměřených na soustavné sledování svahových sesuvů.

Radarová interferometrie je využívána při experimentálních analýzách, které jsou zaměřeny na sledování statických, kvazistatických nebo dynamických výchylek stavební konstrukce v několika jejích bodech současně. Pomocí radarové interferometrie se standardně měří výchylky sledovaných bodů konstrukce ve směru radarem vysílaného signálu (LOS). Při experimentech určených pro verifikaci této ověřené technologie bylo použito inovativní uspořádání měření, kdy ke sledování výchylek nosné konstrukce byly současně použity dva radary. Výsledkem takto uspořádaného experimentu jsou dvě složky výchylek sledovaných bodů konstrukce. U mostních objektů se v současně sledovaných bodech zpravidla vyhodnocují svislé průhyby a vodorovné výchylky ve směru podélné osy mostu. Podrobnější popis je uveden v dokumentaci ověřené technologie „Technologie určování dynamických pohybů mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií“ [1].

Při aplikacích metody RI na ocelových mostech nebo stavebních konstrukcích zhotovených z jiných kovů není obvykle potřebné sledované body konstrukce signalizovat, neboť ocelová (obecněji kovová) nosná konstrukce často poskytuje dostatečně kvalitní odraz radarového signálu. Při tomto uspořádání experimentu vyhodnocené výchylky ve většině případů nejsou vázány na konkrétní bod konstrukce. Radar typu IBIS dokáže rozlišovat detekované objekty (ocelové části nosné konstrukce mostu) jen v jednom rozměru, a to ve směru vysílaného signálu. Nachází-li se více detekovaných objektů v jedné radiální spádové oblasti, jejíž šířka je u radaru IBIS 0,75 m, nelze je od sebe odlišit a posuny měřené na jednotlivých objektech se ve výsledku průměrují. Podrobnější popis této problematiky je uveden v [1].



*Obr. 1: Odražeče instalované na vodorovné nosné konstrukci silničního betonového mostu u Pelhřimova.*



*Obr. 2: Dva radary IBIS-S (vlevo) a IBIS-SF (vpravo) umístěné pod nosnou konstrukcí ocelového železničního mostu přes řeku Sázavu v Ratajích.*



*Obr. 3: Radar IBIS-SF s upevněným inklinometrem Statotest při měření na ocelovém železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích v roce 2021.*

Při experimentech na betonových mostech je většinou potřebné do sledovaných bodů konstrukce osadit kovové odražeče (viz Obr. 1), protože betonový povrch konstrukce má nízkou odrazivost radarového signálu. Odražeče mohou být instalovány i na ocelových mostech, výhodou tohoto uspořádání experimentu je, že je přesněji definován bod konstrukce, ve kterém jsou výchylky měřeny.

Pro experimenty, při kterých se vyhodnocují svislé průhyby a vodorovné výchylky ve směru podélné osy mostu, je potřebné použít dva radary IBIS-S nebo IBIS-FS popřípadě jejich kombinaci (viz Obr. 2). Při měření lze radar nastavit do dvou pracovních režimů: statického a dynamického. Při dynamickém režimu radar snímá signály odražené ve sledovaných bodech konstrukce s nastavitelnou vzorkovací frekvencí 1 až 200 Hz. Při vzorkovací frekvenci 200 Hz je možné zachytit kmitání nosné konstrukce mostu ve frekvenční oblasti od 0 Hz až do cca 80 Hz. Tento frekvenční interval je dostatečný pro zachycení převážné většiny dynamických dějů, ke kterým na mostních objektech při jejich provozu dochází.

Při experimentu na mostech u Pelhřimova a v Ratajích byl radar řízen programem IBIS Surveyor instalovaném na odolném notebooku Panasonic. Ke zpracování měření se používá program IBIS Data Viewer. Oba tyto programy se dodávají spolu s radarem.

Pro doplňková měření, která jsou potřebná pro kvalitní dokumentaci uspořádání experimentu a pro kvalitní vyhodnocení výsledků, se použijí další vhodné geodetické přístroje. Důležité je vytvoření 3D modelu měřené situace (zkoumaného mostního objektu, terénu pod mostem a polohy radarů) buď pomocí 3D laser scanneru nebo pomocí průsekové fotogrammetrie či kombinací obou metod. Pro měření jednotlivých vzdáleností lze použít i ruční dálkoměr nebo pásma.

Vhodné je také použít videokameru k pořízení záznamu, na kterém je zachyceno zatížení mostu v průběhu experimentu (např. průjezdy nákladních automobilů na silničním mostu nebo železničních souprav na železničním mostu), aby bylo možné ztotožnit výsledky radarového měření (měřené dynamické průhyby mostu) s aktuálním zatížením nosné konstrukce mostu. Záznamy je možné následně použít při vizualizaci a prezentaci výsledků experimentu.



*Obr. 4: Dva radary IBIS-S (vlevo) a IBIS-FS (vpravo) umístěné pod nosnou konstrukcí betonového silničního mostu u Pelhřimova.*



*Obr. 5: Dva radary IBIS-S a IBIS-FS umístěné pod nosnou konstrukcí lávky pro chodce přes slepé rameno Labe Jesípek u Hradce Králové.*

Při experimentu, který je realizován dvěma radary, je důležitá časová synchronizace datových řad LOS posunů měřených jednotlivými radary. Pro časovou synchronizaci je potřebné datově propojit obslužné notebooky obou radarů. V závislosti na vzdálenosti radarů

je možné pro jejich datové propojení použít ethernetový kabel (pro vzdálenosti do 100 m), optickou linku nebo bezdrátové pojitko v případě, že nelze mezi počítači natáhnout kabel.

Při experimentech prováděných v rámci přípravy a verifikace této ověřené technologie byla měřicí linka pro měření metodou radarové interferometrie postupně optimalizována pro sledování statického a kvazistatického chování nosných konstrukcí mostů a zejména pak pro využití RI při dynamických experimentech. Například, aby bylo možné kompenzovat nestabilitu upevnění radaru na stativu nebo postupné sedání těchto stativů při dlouhodobém sledování kvazistatických jevů, byly na radarech instalovány inklinometry založené na snímačích zrychlení vyrobené firmou Statotest. Inklinometry byly upevněny na horním povrchu radarů (viz Obr. 3) a jsou dobře patrné i na Obr. 2. Dále byla optimalizována konstrukce odražečů pro jejich univerzální využití při experimentech na mostních objektech.

Během přípravných a verifikačních experimentů pro tuto ověřenou technologii byla rozvíjena metodika sledování a zejména vyhodnocení výchylek zkoumaných bodů nosných konstrukcí mostních objektů současně ve svislém směru a v podélném směru (ve směru vodorovném rovnoběžném s podélnou osou mostu) z dat měřených současně dvěma radary. Mimo jiné byly ověřovány dvě varianty umístění radarů. Při první variantě byly radary umístěny na protilehlých stranách sledované oblasti vodorovné nosné konstrukce mostu. Toto uspořádání bylo použito například při experimentech na železničním mostu v Ratajích, kde byly radary umístěny v blízkosti opěr (viz Obr. 2), nebo na silničním mostu u Pelhřimova, kde byl první radar umístěn v prostoru pod 2. polem mostu v blízkosti pilíře mezi 2. a 3. polem a druhý radar se nacházel pod 5. polem u pilíře mezi 4. a 5. polem mostu (viz Obr. 4). Při druhé variantě se oba radary nacházely na shodném okraji sledované oblasti vodorovné nosné konstrukce mostního objektu. Toto uspořádání bylo použito při experimentu realizovaném na železničním mostu v Púchově a na lávce pro chodce přes slepé rameno Labe Jesípek u Hradce Králové (viz Obr. 5). Umístění radarů ovlivňuje, jak velkou část vodorovné nosné konstrukce je možné při experimentu sledovat. Výhodnější je první varianta, kdy jsou radary umístěny na protilehlých stranách, při ní je možné obecně sledovat delší úsek nosné konstrukce. Druhá varianta, kdy jsou radary umístěny na stejné straně sledované oblasti, je méně výhodná, protože sledovaný úsek nosné konstrukce je obecně kratší. Použita byla v situacích, kdy radar na protilehlé straně nebylo možné umístit. Na mostu v Púchově to bylo kvůli hlubokému vodnímu toku, na lávce pro chodce u Hradce Králové to bylo kvůli překážce nacházející se zhruba uprostřed rozpětí lávky (viz Obr. 5), kde vzrostlá vegetace bránila přenosu signálu radarů do druhé poloviny nosné konstrukce lávky.

U radarové interferometrie, na rozdíl od metody DIC, která je popsána v Kap. 3, průvodní jevy počasí, při kterém je experiment prováděn, tolik neovlivňují kvalitu měřeného signálu. Nicméně radarová technika využívá šíření elektromagnetických vln vzduchem, proto jsou prováděná měření ovlivněna podmínkami tohoto prostředí, kterými jsou především teplota a vlhkost vzduchu. Vliv atmosférických podmínek se ale projevuje pouze u časově delších statických měření a pouze u sledovaných bodů konstrukce, které se nacházejí ve větší vzdálenosti od zdroje signálu, kterým je radar. Při verifikačních experimentech bylo radarovou interferometrií například měřeno i za deště, jehož intenzita byla různá. Kvalitu měřeného signálu dešťové srážky výrazně nezhoršovaly.

Na základě zkušeností získaných postupně při realizovaných experimentech bylo možné identifikovat nejčastější zdroje nejistot při měření in situ, realizovaného metodou radarové

interferometrie, a navrhnout sled dílčích opatření pro jejich minimalizaci. Jedním z navržených opatření bylo aplikování inklinometrů na těla radarů (viz Obr. 2 a 3). Na základě měřených údajů z inklinometrů je možné kompenzovat vliv nestability polohy těla radaru, která je způsobena malou tuhostí originálního upevnění radaru na stativu nebo postupným sedáním stativu při dlouhodobém sledování kvazistatických jevů na nosné konstrukci mostu.

Pro aplikaci metody radarové interferometrie realizované dvěma radary platí následující obecné zásady:

- a) Pozemní interferometrický radar s reálnou aperturou (dále jen radar) měří pouze relativní výchylky sledované nosné konstrukce mostu po určitou dobu, kterou vhodně zvolí obsluha radaru. Relativní posuny sledovaných bodů od času  $t = 0$  s počáteční hodnotou  $d = 0$  lze určit při jednom postavení radaru. Na provedená měření nelze navázat později při jiném postavení radaru. Navázat na provedená měření nelze i v situaci, kdy postavení radaru zůstane stejné, ale měření radarem je přerušeno (např. kvůli výpadku napájení radaru) a sledovaná konstrukce se před tím, než je měření obnoveno, přemístí ve směru vysílaného signálu o více než 4,38 mm.
- b) Radar měří posuny sledované nosné konstrukce mostu pouze ve směru vysílaného signálu, tzn. ve směru spojnice radaru a sledovaného bodu (angl. Line of Sight, zkráceně LOS). Není proto schopen zaznamenat výchylky konstrukce kolmé na záměrnou přímkou (resp. přesněji řečeno posuny po kulové ploše procházející sledovaným bodem a mající střed ve fázovém centru radaru).
- c) Při experimentu realizovaném pouze jedním radarem se předpokládají posuny sledovaných bodů zkoumané nosné konstrukce mostu pouze ve svislém směru. Pokud by se některý sledovaný bod pohyboval i v jiných směrech, zavádělo by to do vyhodnoceného výsledku chybu, kterou nelze na základě dat měřených pouze jedním radarem odhalit.
- d) Pro současné určování svislých průhybů a vodorovných výchylek ve směru podélné osy mostu je třeba použít dva radary. Při vyhodnocování měření provedeného dvěma radary se předpokládají posuny sledovaných bodů pouze v podélném a svislém směru. Pokud by se některý sledovaný bod pohyboval i v příčném směru (vodorovně ve směru kolmém k podélné ose mostu), zavádělo by to do výsledku chybu, kterou nelze odhalit. Nicméně pokud jsou při experimentu radary umístěny pod podélnou osou sledovaného mostu, je na základě skutečnosti popsané výše v odstavci b) vliv příčných výchylek sledovaného bodu mostu na vyhodnocované hodnoty posunů ve svislém a podélném směru minimální. Jinými slovy, svislá a podélná slož celkového posunu bude určena správně, příčná složka určena nebude.
- e) Pro měření posunů sledovaných bodů nosných konstrukcí do všech tří stran (skutečných, resp. reálných 3D posunů) je potřeba použít minimálně tři radary.

Základní výhodou metody radarové interferometrie je bezkontaktní měření ve větším množství bodů nosné konstrukce mostu současně.

Výhoda bezkontaktního měření RI se projeví zejména u mostních objektů nebo jejich částí, u kterých je pod nimi možné umístit radar nebo radary a zároveň je větší část terénu obtížně přístupná nebo zcela nepřístupná.

Na druhou stranu, metodu RI je možné aplikovat pouze na konstrukci, která je ve sledovaných částech nezakrytá. Mezi radary a určitým sledovaným bodem nosné konstrukce nesmí být trvalá a ani dočasná překážka, překážkou může být například plný mostní pilíř nebo vzrostlá vegetace. I osoba, která přejde před radarem, může na chvíli sledování dynamického chování konstrukce přerušit.

### 3. Fotogrammetrie s korelací digitálního obrazu

Fotogrammetrie s korelací digitálního obrazu (Digital Image Correlation (DIC)) je moderní bezkontaktní optická experimentální metoda, která je používána obecně pro vyhodnocení kinematických polí ze série fotogrammetrických digitálních snímků sledovaného objektu založených na pixelech.

Na stavebních konstrukcích nebo konstrukčních prvcích je metoda DIC aplikována jak při krátkodobých měřeních, která trvají řádově jednotky sekund až desítky minut, tak i při střednědobých experimentech, jejichž délka se pohybuje v řádu jednotek, nebo desítek hodin až jednotek dnů.

DIC je využívána k experimentálním analýzám, které jsou zaměřeny na sledování polí poměrných deformací, na měření polí posunů nebo pro určení posunů a průhybů vybraných konkrétních bodů sledovaných konstrukcí.



*Obr. 6: Aplikace metody korelace digitálního obrazu při sledování polí poměrných deformací a posunů na čepch kotvení mostu na krajní opěře.*



*Obr. 7: Srovnání výsledků získaných aplikací DIC na čepch kotvení mostu ze stavu před a po zatížení mostu a ukázka vyhodnocených svislých deformací v ploše.*

Při experimentech na stavebních konstrukcích nebo konstrukčních prvcích se ke snímání digitálních snímků používají digitální fotografické aparáty a průmyslové digitální kamery s vysokým rozlišením. Fotoaparáty je vhodné aplikovat pouze při sledování kvazistatických jevů, zatímco kamery je možné použít jak při kvazistatických měřeních, tak i při dynamických experimentech. S podstatným nárůstem kapacity paměťových médií počítačů, s výrazným rozvojem výpočetní techniky, měřicích a vyhodnocovacích programů a optických přístrojů využitelných při aplikaci metody DIC je možné nyní zkoumat nejen chování malých laboratorních vzorků, ale i rozsáhlých stavebních konstrukcí, mezi které patří i mostní objekty. Rozvoj techniky umožnil také přechod z korelace digitálního obrazu ve 2D na DIC ve 3D a to je možné považovat za jeden z hlavních milníků při rozvoji této optické metody.

Základní rozdíl mezi 2D a 3D variantou metody DIC spočívá v možnosti stanovení posunů sledovaného objektu i ve směru kolmém na rovinu měřeného povrchu. Při 3D metodě DIC jsou použity dvě synchronizované kamery, které cílí na stejnou měřenou plochu (field of view – FOW) sledovaného objektu. Pomocí 3D metody DIC je tedy možné měřit posuny a natočení zkoumaného objektu prostorově. Použití stereosystému kamer (tj. stereofotogrammetrie, resp. 3D metody DIC) umožňuje eliminovat chyby měření plynoucí z vychýlení měřeného povrchu objektu z jeho roviny (dále jen příčná výchylka) a dosáhnout tak při velmi krátké záměrné vzdálenosti kamer od sledovaného vzorku (cca 0,2 m až 1,0 m) velkého rozlišení digitálního obrazu a tím velmi velké přesnosti, která umožňuje určit pole poměrných pretvoření.

Měření 2D metodou DIC může být naopak příčnou výchylkou velmi negativně ovlivněno. Chyba měření je v tomto případě nepřímo úměrná poměru mezi velikostí příčné výchylky a délkou záměry. Je tedy zřejmé, že na mostních objektech při měření na větší vzdálenost (cca 5 m až 80 m) i v případě použití 2D metody DIC přestává být chyba způsobená příčnou výchylkou významná. Při běžném použití 2D metody DIC je také problematické měření nezávislých vodorovných podélných posunů sledovaných bodů konstrukce. Zachycený vodorovný posun digitálního obrazu totiž může být výslednicí vodorovného podélného a vodorovného příčného posunu sledovaného bodu. Výsledky měření svislého posunu bývají zkruseny vodorovnou příčnou výchylkou sledovaného bodu konstrukce jen zřídka. Chyba měření svislých posunů v důsledku vodorovné příčné výchylky sledovaného bodu by byla

významná pouze v případě, kdy je záměra kamery na měřený bod vedena ve významném odklonu od vodorovné roviny (při strmých záměrech) a kdy současně dochází k nezanedbatelným vodorovným příčným výchylkám sledovaného bodu konstrukce.

Tyto výše zmíněné chyby měření 2D metodou DIC je možné eliminovat vhodným umístěním kamer vzhledem ke sledovaným bodům konstrukce. Pokud je kamera umístěna tak, že její osa je kolmá ke sledovanému povrchu (FOW) konstrukce, je jednoznačně eliminována chyba vyplývající z příčné výchylky sledovaného bodu. Za předpokladu, že jsou příčné výchylky sledovaných bodů konstrukce prokazatelně zanedbatelné, je možné měřit také kamerami, jejichž záměra je šikmá, ale v těchto případech je potřebné provést opravu citlivosti (kalibraci) použité konfigurace měřicí linky pro měření se šikmou záměrou. Případně je možné chyby měření 2D metodou DIC vyplývající z příčné výchylky sledovaného bodu redukovat použitím další nezávislé kamery, která měří příčné výchylky sledovaného bodu, a skutečné posuny následně vyhodnotit dodatečným vyčíslením složek celkového vektoru posunu v tomto sledovaném bodu konstrukce. Nicméně 2D metoda DIC má své nesporné výhody, umožňuje současně měřit více synchronizovanými kamerami (v případě softwaru Correlated Solutions Vic-Snap až šesti kamerami), které mohou cílit na libovolné oblasti (FOW) na konstrukci. Přesnost této metody při standardním uspořádání měřicí linky je dostatečná pro měření posunů sledovaných bodů konstrukce se záměrnou vzdáleností až do cca 80 m. Pokud jsou použity speciální objektivy kamer, může být záměrná vzdálenost i delší.

Při měření metodou DIC je třeba měřený povrch opatřit skvrnitým vzorem. Ideální skvrnitý vzor je tvořen mračnem bodů (skvrn) o přibližně shodném průměru, které jsou umístěny v přibližně pravidelném rastru tak, aby celková plocha všech bodů (skvrn) přibližně odpovídala ploše prostoru mezi těmito body. Pro dosažení vysoké přesnosti měření 3D metodou DIC (při měření pole poměrného přetvoření) musí být velikost skvrn vzoru přizpůsobena rozlišení digitálního obrazu měřeného FOW (jedna skvrna odpovídá cca 10 pixelům digitálního obrazu). Pokud je cílem experimentu měřit pole posunů ve vybraném detailu konstrukce, je možné měřit posuny osamělých bodů pomocí 2D metody a to i na značnou vzdálenost. Skvrnitě vzory bývají na měřeném povrchu zpravidla vytvořeny uměle. U některých materiálů je však možné využít i jejich přirozenou texturu (např. u některých betonů). V každém případě platí, pokud má být použita metoda DIC, musí být přirozená textura materiálu nebo uměle vytvořený skvrnitý vzor dostatečně kontrastní.

Přesnost výsledků experimentu provedeného měřicí linkou pro DIC je u sledovaného povrchu (FOW) konstrukce možné hodnotit na základě kalibračního poměru daného počtem pixelů digitálního obrazu na jednotku délky FOW. Tento kalibrační poměr závisí na zvolené kombinaci objektivu a fotoaparátu nebo kamery. Měřicí linku pro DIC je možné modifikovat pro kvazistatická měření, kdy se použije nastavení s nižší vzorkovací frekvencí (do cca 30 Hz) ale s vyšším rozlišením FOW, nebo pro dynamická měření, kdy se aplikuje nastavení s vyšší vzorkovací frekvencí (až zhruba 150 Hz) ale s nižším rozlišením FOW. Je však nutné poznamenat, že skutečně dosažitelná vzorkovací frekvence při konkrétním experimentu je ovlivněna aktuálním osvětlením konstrukce, respektive potřebnou dobou expozice fotoaparátu či kamery, která je na aktuálním osvětlení konstrukce závislá.

U experimentů prováděných v rámci verifikace této ověřené technologie byla měřená data zaznamenávána prostřednictvím DIC systému firmy ISI-Sys Correlated Solutions.

Zaznamenávání měřených dat bylo v rámci tohoto DIC systému řízeno pomocí softwaru VIC-Snap, přičemž vyhodnocení naměřených dat probíhalo v programech VIC-2D (pro 2D metodu DIC) nebo VIC-3D (pro 3D metodu DIC). Měřicí linka DIC byla standardně složena z měřicího notebooku a dvou až pěti USB kamer upevněných na stativu (viz Obr. 8 a 9). Pro kvazistatická 2D i 3D měření byly použity průmyslové USB kamery Basler acA4096-30 $\mu$ m s rozlišením 8,9 Mpix a maximální vzorkovací frekvencí 32 Hz. Pro dynamická 2D měření byly použity kamery Basler acA1920-155 $\mu$ m s rozlišením 2,3 Mpix, které umožňují použít vzorkovací frekvenci až 164 Hz. Na kamery byly namontovány objektivy firmy Kowa (viz Obr. 8 a 9) s ohniskovými vzdálenostmi od 16 do 75 mm v závislosti na konkrétních potřebách experimentů.

Při experimentech prováděných v rámci přípravy a verifikace této ověřené technologie byla měřicí linka pro měření metodou DIC postupně optimalizována pro sledování statického a kvazistatického chování nosných konstrukcí mostů a zejména pak pro využití DIC při dynamických experimentech. Zkoumána byla pole poměrných deformací, pootočení a posunů např. na čtyřech čepích kotvení mostu ve Skřečoni v oblasti uložení na opěře mostu za účelem diagnostiky atypického chování jeho nosné konstrukce v podporové oblasti (viz Obr. 6 a 7), nebo při detekci trhlin a při sledování chování dopředu identifikovaných trhlin v ocelové části nosné konstrukce železničního mostu přes Olomouckou ulici v Brně. Při experimentu na mostu ve Skřečoni byla použita 2D varianta metody DIC a na mostu v Brně pak 3D varianta této metody.

Dále byla rozvíjena metodika sledování posunů vybraných konkrétních bodů nosných konstrukcí mostních objektů na velkou vzdálenost. Použití DIC při střednědobém experimentu bylo testováno na silničním mostu u Pelhřimova a na železničním mostu v Ratajích nad Sázavou. V obou případech bylo 2D variantou metody DIC současně měřeno několik vzájemně vzdálených bodů konstrukce. Pro měření posunů 2D metodou DIC byly v rámci těchto experimentů vytvořeny tuhé terče se skvrnitým vzorem, které byly navrženy tak, aby je bylo možné relativně snadno upevnit na libovolnou konstrukci bez nutnosti jakéhokoli zásahu do nosné konstrukce (viz Obr. 10 až 12).

Do měřených míst na vodorovných nosných konstrukcích obou mostů byly osazeny vyrobené terče s kontrastním skvrnitým vzorem. Na mostu u Pelhřimova i na mostu v Ratajích byly sledovány tři body konstrukce (viz Obr. 10 a 11) a dva statické body (viz Obr. 12). Vzdálenost kamer od terčů osazených ve sledovaných bodech se pohybovala od cca 10 m (pro nejbližší terč) až po cca 80 m (pro nejvzdálenější terč) a použity byly objektivy s ohniskovou vzdáleností  $f = 50$  mm (bližší terče), respektive  $f = 75$  mm (vzdálenější terče). Měření bylo realizováno ve všech částech dne při jasné i při zatažené obloze a také za umělého osvětlení terčů během noci. Osvětlení každého terče bylo provedeno USB lampičkou, která byla pevně připojena k terči (viz Obr. 11 a 12) a napájena byla z akumulátoru (powerbanky). Vedle prokazatelných přínosů osvětlení terčů byla zjištěna i jedna jeho nevýhoda. Osvětlení přitahovalo hmyz, který poletoval kolem terče nebo na něj usedl, a tím způsoboval lokální zkreslení měření změnou kontrastního vzoru terčů. Toto zkreslení bylo ale možné v naprosté většině případů při vyhodnocení výsledků eliminovat.

Vzorkovací frekvence (snímková frekvence kamer) byla volena různě s ohledem na jev, který byl na sledovaném mostním objektu pozorován. Při měření dynamických průhybů konstrukce během přejezdů železničních vlakových souprav, nebo silničních vozidel byla

použita vzorkovací frekvence v rozmezí 50 až 70 Hz. Tímto nastavením byla na železničním mostu v Ratajích pro bližší terč dosažena průměrná rozšířená nejistota měření cca  $\pm 0,005$  mm, zatímco pro nejvzdálenější terč byla vyhodnocena průměrná rozšířená nejistota o hodnotě cca  $\pm 0,015$  mm.

Na základě zkušeností získaných postupně při realizovaných experimentech bylo možné identifikovat nejčastější zdroje nejistot při měření in situ metodou DIC a navrhnout sled dílčích opatření pro jejich minimalizaci. Obecně lze nejistoty měření metodou DIC rozdělit na nejistoty měřicí linky a na nejistoty způsobené změnami podmínek prostředí (ambientními nejistotami), ve kterém je experiment realizován.



*Obr. 8: Kamery upevněné na stativu při experimentu na betonovém silničním mostu u Pelhřimova.*



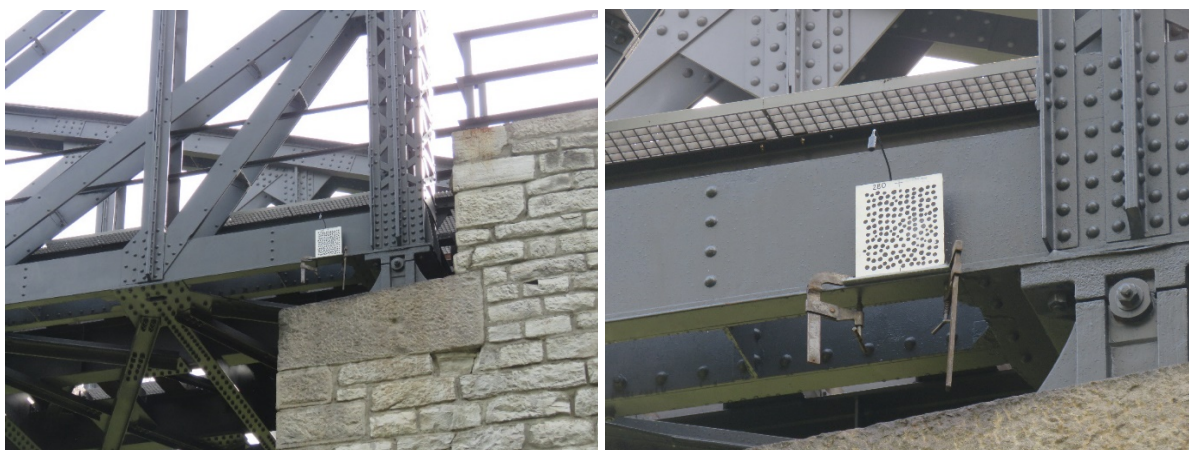
*Obr. 9: Kamery upevněné na stativu při experimentu na ocelovém železničním mostu v Ratajích.*



*Obr. 10: Terče s kontrastním skvrnitým vzorem umístěné ve sledovaných bodech ve 4. poli silničního mostu u Pelhřimova.*



*Obr. 11: Terč s kontrastním skvrnitým vzorem umístěný ve sledovaném bodu v polovině rozpětí (vlevo) a ve třech čtvrtinách rozpětí (vpravo) vodorovné nosné konstrukce ocelového železničního mostu přes řeku Sázavu v Ratajích.*



*Obr. 12: Terč s kontrastním skvrnitým vzorem umístěný ve sledovaném bodu vodorovné nosné konstrukce nad opěrou železničního ocelového mostu přes řeku Sázavu v Ratajích.*

Nejistoty měřicí linky DIC zahrnují nedokonalosti pořízených digitálních snímků, které jsou svázány s jejich ostrostí (rozišením) a světlostí. Tyto nejistoty je možné standardně vyčíslit na základě nastavení použitého měřicího systému. Oproti tomu vyčíslení vlivu ambientních nejistot je problematické. Mezi ambientní nejistoty je možné zařadit například nejistoty vyplývající z refrakce světelných paprsků při významném oteplení vzduchu a s tím spojeným sáláním tepla do prostředí. Další ambientní nejistoty jsou způsobeny změnou teploty kamery a objektivu, rušivými světelnými jevy způsobenými odrazem světelných paprsků např. od vodní hladiny, změnou polohy kamer v důsledku sedání stativu postaveného na nedostatečně pevném podkladu a nežádoucími vibracemi soustavy stativ – příčník – kamery s objektivu. Velikost těchto nejistot lze kvantifikovat jen velmi obtížně, ale sledem vhodných opatření lze jejich dopad na výsledky experimentu snížit.

Při sledování dynamického chování mostních konstrukcí při přejezdech těžkých silničních nebo železničních vozidel, kdy se jedná o krátkodobá měření trvající několik sekund nebo nejvýše několik desítek sekund, je možné dosáhnout vyšší přesnosti měření, než při dlouhodobějších experimentech, protože se výrazně redukuje vliv ambientních nejistot na výsledky měření. Během relativně krátké délky záznamu nedochází k velkým změnám teploty vzduchu, osvětlení konstrukce nebo sedání stativu s kamerami.

Vlivy refrakce světelných paprsků ve vzduchu a světelných odrazů je možné při některých experimentech in situ eliminovat volbou úseku dne, ve kterém je experiment realizován. Kratší měření může být realizováno například při stálé mírné teplotě a zatažené obloze nebo v noci. Pro noční experimenty byl navržen spolehlivý způsob osvětlení terčů umístěných do měřených bodů a dále byl kladen důraz na omezení zbývajících ambientních nejistot. Tato opatření byla vyzkoušena během noční části střednědobých experimentů na mostech u Pelhřimova a v Ratajích, které trvaly 24 hodin.

Při experimentech na mostech u Pelhřimova a v Ratajích byla také testována možnost eliminace zbylých ambientních nejistot využitím kompenzačních kamer namířených na statické body, které se při zkoumaných jevech nepohybovaly, nebo jejich pohyb byl minimální. Do těchto statických bodů byly rovněž umístěny terče s kontrastními vzory (viz Obr. 12). Kompenzační kamery namířené na statické body byly umístěny spolu s měřicími kamerami na jednom tuhém příčníku. Na Obr. 8 a 9 jsou dvě kompenzační kamery umístěny na krajích příčníku, tři měřicí kamery jsou upevněny v jeho střední části.

Efekt ambientních vlivů (například vliv sedání stativu s kamerami) se projevuje zdánlivým přemístěním statických bodů. Při kompenzaci ambientních vlivů na výsledky měření byla fiktivní přemístění statických bodů lineárně interpolována pro pozice sledovaných bodů na vodorovné nosné konstrukci mostu. Vlastní kompenzace byla provedena odečtením těchto interpolovaných hodnot fiktivních posunů v statických bodech od posunů naměřených ve sledovaných bodech.

Na základě zkušeností s osvětlením terčů s kontrastními vzory při nočním měření na mostech u Pelhřimova a v Ratajích byla navržena vylepšená konstrukce jejich osvětlení. Její hlavní součástí je USB LED reflektor napájený z akumulátoru (powerbanky). Reflektor je připevněn na konci ocelové trubky dlouhé cca 0,7 m, tato trubka je na druhém konci jako konzola ukotvena na ocelovém terči s kontrastními vzory. Osa trubky je vedena pod úhlem cca 100° k rovině terče tak, aby byl při záměře kamery co nejméně zastíněn skvrnitý vzor.

Tuhost celého systému terče s konzolou a osvětlením byla nastavena tak, aby byla minimalizována možnost rezonance a nadměrného kmitání tohoto systému při sledování dynamických dějů na sledované konstrukci. Základní výhody navrženého způsobu osvětlení terčů jsou jeho nízká hmotnost, nízká náročnost na zdroj elektrické energie a možnost umístit jej prakticky kamkoli na sledované konstrukci bez potřeby zásahu do této konstrukce.

Základní výhodou metody korelace digitálního obrazu je bezkontaktní měření ve více bodech nosné konstrukce mostu současně bez nutnosti oslabit nebo jakkoli zasáhnout do nosné konstrukce mostu při rychlém a snadném zprovoznění měřicí linky.

Výhoda bezkontaktního měření metodou DIC se projeví zejména u mostních objektů nebo jejich částí, u kterých je obtížně přístupný nebo zcela nepřístupný terén pod nimi (například když je pod mostem vodní tok nebo vodní plocha).

Na druhou stranu, metodu DIC je možné použít pouze na konstrukci, která je minimálně ve sledovaných částech viditelná. Mezi kamerou a sledovaným bodem nosné konstrukce nesmí být trvalá a ani dočasná překážka. I osoba, která přejde před kamerami, může na chvíli sledování dynamického chování konstrukce přerušit.

## 4. Standardní metody měření

Při standardních experimentech běžně prováděných na mostních objektech, mezi které patří statické zatěžovací zkoušky, experimentální modální analýzy nebo dynamické zatěžovací zkoušky, jsou pro sledování pohybů nosných konstrukcí mostů používány především tyto standardní metody měření: měření svislých průhybů relativními snímači dráhy, měření kmitání nosných konstrukcí absolutními snímači výchylek, rychlosti a zrychlení a měření poměrných deformací odporovými tenzometry. Dále budou podrobně rozebrány standardní metody, které byly využity během přípravných a verifikačních experimentů provedených na podporu této ověřené technologie.

### 4.1. Měření svislých průhybů relativními snímači dráhy

Při tomto způsobu měření je využíván relativní snímač průhybu (viz Obr. 13), který je složen z těchto částí: ocelový rám s upevněným tělem induktivního snímače dráhy, který je umístěn ve vztažném bodu pod konstrukcí – napínací pružina – struna – jádro induktivního snímače dráhy – verifikační přípravek – struna – konstrukce uchycení struny ve sledovaném bodu na nosné konstrukci mostu.

Ve vztažném bodu pod sledovaným bodem nosné konstrukce mostu se umísťuje pomocná konstrukce, ve které je uchyceno tělo snímače dráhy. Při verifikačních experimentech byl použit masivní ocelový rám, jehož tíha byla navýšena ocelovým závažím (viz Obr. 13 vlevo). K rámu bylo připevněno válcové tělo induktivního snímače dráhy (viz Obr. 13 vpravo). V rámu byla uchycena pružina (viz Obr. 13 vlevo), která předpínala systém struna – jádro induktivního snímače dráhy- verifikační přípravek – struna. Na Obr. 13 vpravo jsou jádro procházející válcovým tělem induktivního snímače dráhy a na něm upevněný verifikační přípravek dobře rozeznatelné. Verifikační přípravek slouží k ověření konstanty citlivosti

relativního snímače dráhy a k její opravě na základě simulace přesně definované velikosti průhybu (cca 10 mm nebo 20 mm) ve sledovaném bodu.

K uchycení struny ve sledovaném bodu na ocelové konstrukci je možné použít výhodně neodymový magnet opatřený háčkem. Tento způsob byl použit na ocelovém železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích. Na betonové konstrukci může být struna upevněna pomocí vrutu zašroubovaného do hmoždinky ukotvené v betonu nebo pomocí přípravku přilepeného k povrchu konstrukce. Při experimentu na betonovém silničním mostu u Pelhřimova byl použit další možný způsob upevnění struny. Na revizním chodníku byla uchycena ocelová konzola, jejíž konec přesahoval přes okraj římsy. Na tomto konci byl přichycen neodymový magnet s háčkem, do kterého byla upevněna ocelová struna (viz Obr. 10 vlevo, konec konzoly je viditelný vlevo od odražeče).



*Obr. 13: Relativní snímač dráhy – celkový pohled na ocelový rám umístěný ve vztažném bodu pod sledovanou nosnou konstrukcí železničního mostu v Ratajích (vlevo) a detail induktivního snímače dráhy LVDT-ISDL-50-KD-2405 upevněného v ocelovém rámu s jádrem a verifikačním přípravkem (vpravo).*

Při dynamických experimentech je důležité, aby vlastní frekvence podélného kmitání soustavy předpínací pružina – struna – jádro snímače – verifikační přípravek – struna byla co nejvyšší. Tato frekvence ovlivňuje frekvenční rozsah relativního snímače dráhy, který je od 0 Hz do cca poloviny této vlastní frekvence podélného kmitání soustavy. V běžných případech takto uspořádaných relativních snímačů je jejich frekvenční rozsah od 0 Hz (snímač je schopen měřit statické a kvazistatické posuny konstrukce) do cca 20 Hz.

Při experimentech na mostech v Pelhřimově a v Ratajích byly vždy použity dva relativní snímače dráhy, ve kterých byly použity induktivní snímače LVDT-ISDL-50-KD-2405 od německého výrobce Inelta Sensorsysteme (viz Obr. 13), jejichž rozsah je  $\pm 25$  mm. Tyto snímače byly připojeny k měřicí ústředně EMS DV 803 Pohl, jejímž výrobcem je Ing. Miroslav Pohl z Brna. Tato ústředna je určena pro rozsáhlé dynamické i statické experimenty v průmyslovém prostředí a ve stavebnictví. Umožňuje přímé měření až 32 kanálů, které jsou rozděleny do čtyř sekcí. Standardně je možné k ústředně připojit odporové tenzometry, termočlánky a další čidla v různých kombinacích. Pro induktivní snímače dráhy je potřebné

použit speciální desku pro osm kanálů osazenou do jedné sekce ústředny. Součástí každého kanálu je předzesilovač a samostatný šestnáctibitový A/D převodník se vzorkovací frekvencí až 3 200 Hz. Měřicí ústředna je určena k samostatným krátkodobým i dlouhodobým experimentům. Ústředna je vybavena velkou interní pamětí typu Compact Flash, která umožňuje přenášení dat z ústředny do počítače v intervalu dlouhém několik týdnů až měsíců. Součástí ústředny je také akumulátor, který je schopen ústřednu udržet v provozu po několik hodin např. v případě, že je realizován krátkodobý experiment a externí napájení není k dispozici, nebo pokud při dlouhodobém experimentu dojde ke krátkodobému výpadku externího napájení ústředny. K obsluze ústředny slouží program Monitor, který je využíván k nastavení parametrů měření, ke správě měření, grafickému zobrazování naměřených dat a k jejich exportu do jiných běžných textových formátů. Správu ústředny a přenos naměřených dat je možné realizovat pomocí počítače připojeného k ústředně kabelem přes ethernetové rozhraní, nebo bezdrátovým připojením přes GSM modem nebo modul bezdrátového ethernetu WiFi.

V relativních snímačích dráhy je ale možné použít i jiné typy induktivních snímačů (např. induktivní snímače dráhy řady WA vyráběné firmou HBM). K jejich řízení lze využít i další měřicí ústředny (např. ústřednu QuantumX od firmy HBM nebo některou z ústředěn řady DEWE od výrobce Dewetron nebo ústřednu z řady Sirius od výrobce DEWEsoft).

## 4.2. Měření kmitání absolutními snímači zrychlení

Při experimentech na mostních objektech, při kterých je kmitání nosné konstrukce měřeno absolutními snímači zrychlení, je jeho kvalita značně ovlivněna citlivostí použitých snímačů a jejich frekvenční charakteristikou citlivosti. Při přípravných a verifikačních experimentech provedených na podporu této ověřené technologie byly použity speciální absolutní snímače zrychlení 8344. Tyto seismické piezoelektrické snímače zrychlení jsou vyráběny firmou Brüel&Kjaer. Vlastní frekvence těchto snímačů je vyšší než 10 kHz, jejich pracovní frekvenční rozsah udávaný výrobcem je v intervalu 0,2 Hz až 3 kHz. Citlivost snímače je cca 2500 mV/g. Pracovní teplotní rozsah se pohybuje od -50 do +100°C. Příčná citlivost snímače je menší než 5%.

Výjimečně nízká dolní hranice pracovního frekvenčního intervalu tohoto typu snímače zrychlení a jeho vysoká citlivost umožňuje využití těchto snímačů i při experimentech na velkých silničních a železničních mostech nebo lávkách pro chodce, jejichž základní vlastní frekvence je nižší než 1 Hz.



*Obr. 14: Pohled na tři absolutní snímače zrychlení 8344 umístěné ve sledovaném bodu na železničním ocelovém mostu v Ratajích (vlevo) a na silničním betonovém mostu u Pelhřimova (vpravo).*



*Obr. 15: Pohled na měřicí ústřednu Sirius 8ACC při experimentu na silničním mostu u Pelhřimova v roce 2022 (vlevo) a na měřicí ústřednu Sirius 6ACC-2ACC+ při experimentu na železničním mostu v Ratajích v roce 2021 (vpravo).*

Při verifikačních experimentech na ocelových mostních objektech byly tyto snímače ve sledovaných bodech nosných konstrukcí uchyceny pomocí speciálních neodymových magnetů přišroubovaných k snímači (viz Obr. 14 vlevo). Na betonových mostech byla do sledovaných bodů umisťována ocelová závaží a snímače zrychlení byly pomocí neodymových magnetů přichyceny k těmto závažím (viz Obr. 14 vpravo). Snímače zrychlení 8344 byly při měřeních připojovány k dvěma ústřednám patřícím do řady Sirius, která je vyráběna firmou DEWEsoft. Používány byly měřicí ústředna Sirius 6ACC-2ACC+ a Sirius 8ACC (viz Obr. 15). Obě tyto elektronické měřicí ústředny jsou osmikanálové. Řízeny jsou pomocí osobního počítače trvale připojeného k ústřednám přes USB port. Všechna elektronická zařízení pro obsluhu jednotlivých kanálů a provádění měření jsou zabudována v

jediné skříňce a ovládat je lze pouze pomocí programu DEWESoft přes řídicí počítač. Měřicí ústředny Sirius jsou především určeny pro elektrická měření vibrací pomocí osmi napěťových vstupů. Všechny kanály mají svůj vlastní 2 x 24 bitový A/D převodník, tzv. DualCore, který je schopen měřit s výjimečným dynamickým rozsahem až 160 dB. Pro zajištění současného měření na všech aktivních kanálech jsou A/D převodníky navzájem synchronizovány.

Výjimečný dynamický rozsah až 160 dB je docílen tím, že, když je úroveň měřeného signálu menší než 1 V, je pro jeho převod do digitální podoby použit první 24 bitový A/D převodník s rozsahem  $\pm 1$  V. Pokud se úroveň měřeného signálu zvýší, je pro jeho převod použit druhý A/D převodník s rozsahem  $\pm 10$  V, což je zároveň rozsah měřicí ústředny. Tato vlastnost ústředny Sirius umožňuje měřit kmitání sledovaných konstrukcí, při kterém se výrazně mění úroveň měřeného signálu, se srovnatelnou chybou, která vyplývá z převodu signálu z analogové do digitální podoby, jak při velkých tak i malých úrovních signálu.

Zrychlení měřená těmito snímači je možné převést na výchylky pomocí dvojnásobné integrace v časové oblasti. K integraci záznamů zrychlení pořízených během verifikačních experimentů této ověřené technologie bylo použito Simpsonovo 3/8 pravidlo. Ve většině případů jsou dynamické výchylky sledovaných bodů vyhodnocené pomocí této dvojnásobné integrace dostatečně přesné až pro frekvence kmitání vyšší zhruba než 1 Hz, ale tato dolní hranice frekvenčního intervalu pro vyhodnocované dynamické výchylky je závislá na konkrétních dynamických parametrech zkoumané nosné konstrukce a podmínkách realizace experimentu.

Při experimentech na mostech u Pelhřimova a v Ratajích byly snímače zrychlení 8344 použity ke dvěma cílům experimentu. Snímače zrychlení připojené k měřicí ústředně Sirius 8ACC (viz Obr. 15 vlevo) byly rozmístěny ve shodných bodech nosných konstrukcí mostů, kde bylo prováděno měření i dalšími metodami (viz např. Obr. 14 vpravo), aby bylo možné výsledky získané z jednotlivých metod mezi sebou porovnat. Ústředna Sirius 6ACC-2ACC+ (viz Obr. 15 vpravo) a k ní připojené snímače zrychlení byly využity k experimentu zaměřenému na stanovení frekvencí a tvarů vlastního kmitání sledovaných mostů.

## 5. Potenciální využití jednotlivých metod při experimentech na mostních objektech a dalších stavebních konstrukcích

V této kapitole je shrnuto možné využití výše popsaných metod pro jednotlivé standardní i nestandardní experimentální úlohy realizované na existujících i nových mostních objektech. Dále je zde popsáno doplnění i dalšími experimentálními metodami v oblastech, kde metoda radarové interferometrie nedosahuje nejlepších výsledků, nebo v oblastech, kde radarovou interferometrii nelze využít.

Základní ustanovení pro přípravu, provádění a vyhodnocení standardních statických a dynamických zatěžovacích zkoušek nosných konstrukcí mostních objektů jsou popsána v ČSN 736209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [3]. Tuto normu lze využít i při

zatěžovacích zkouškách studijního charakteru, při kterých se norma [3] využije v přiměřeném rozsahu.

Doporučení pro provedení studijních zatěžovacích zkoušek ocelových a spřažených ocelobetonových mostů a pro možné aplikace různých experimentálních metod pro validace výpočtových modelů vyšetřovaných železničních mostů jsou také popsána v příloze L předpisu SŽ S5/1 [4].

Podrobněji popsaná doporučení pro využití experimentálních metod a jimi získaných výsledků při studijních statických zkouškách nebo při studijních dynamických zkouškách mostních objektů jsou potom uvedeny v publikaci [5].

Experimentální metody a zejména inovace a rozvoj jejich postupu měření a vyhodnocení výsledků, které jsou předmětem této ověřené technologie, je možné aplikovat i v rámci situací a zásad popsaných v [3], [4] nebo [5].

Využitím radarové interferometrie a dalších experimentálních metod při nedestruktivní diagnostice v oblasti železničních mostů se zabývá také publikace [6] z roku 2018.

## 5.1. Měření statických posunů a průhybů

Měření statických posunů a průhybů je zpravidla prováděno při statických zatěžovacích zkouškách nebo statických studijních zkouškách prováděných podle ČSN 736209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [3]. Na nových nebo rekonstruovaných mostech jsou statické zatěžovací zkoušky prováděny kvůli ověření jejich spolehlivosti před jejich uvedením do provozu. Na existujících mostech se statickou zatěžovací zkouškou nebo statickou studijní zkouškou ověřuje jejich aktuální spolehlivost a na základě získaných výsledků se zpravidla ověřuje výstižnost teoretického modelu, který má být použit k návrhu rekonstrukce tohoto mostu, nebo se identifikují parametry teoretického modelu tak, aby bylo dosaženo co největší míry shody mezi výsledky experimentu a výpočtu.

### 5.1.1 Měření statických posunů a průhybů vodorovné nosné konstrukce mostů ve střední části polí

**Radarová interferometrie:** Radarovou interferometrii realizovanou dvěma vhodně umístěnými radary je možné využít k měření statických průhybů vodorovné nosné konstrukce mostu ve střední části jeho polí jak ve svislém, tak vodorovném podélném směru. Přesnost měřených posunů se pohybuje od setin do desetin milimetru v závislosti na podmínkách a uspořádání konkrétního experimentu.

Použití RI je výhodné zejména v částech nosné konstrukce mostu, kde není možné umístit standardní relativní snímač dráhy a kde je možné radary umístit pod osou vodorovné nosné konstrukce. Při nesymetrických zatěžovacích stavech, kdy dochází ke zkroucení vodorovné nosné konstrukce mostu kolem její podélné osy, je vhodné použít odražeče na okrajích

příčného řezu. Toto uspořádání RI umožňuje zkroucení sledované nosné konstrukce zachytit.

Pokud je při experimentu použit pouze jediný radar, je potřebné se vyhnout riziku popsanému na konci Kap. 2 v odstavci c).

Vliv atmosférických podmínek se u RI projevuje pouze u časově delších statických měření a pouze u sledovaných bodů konstrukce, které se nacházejí ve větší vzdálenosti od zdroje signálu, kterým je radar. Kvalita výsledků získaných RI je denní dobou a změnami atmosférických podmínek, ve které je experiment realizován, ovlivňována výrazně méně, než tomu je u zbývajících experimentálních metod měření statických posunů a průhybů, které jsou popsány v této ověřené technologii. Metoda RI je tedy vhodná pro realizaci střednědobých experimentů, při kterých jsou sledovány posuny vybraných bodů nosné konstrukce mostu, které jsou vyvolány změnami atmosférických podmínek, a z nich zejména změnami teploty vzduchu a změnami oslunění, a s nimi souvisejícími změnami teploty sledované nosné konstrukce mostu.

**Metoda fotogrammetrie s korelací digitálního obrazu (DIC):** K měření statických svislých průhybů nosné konstrukce mostu je možné použít i korelaci digitálního obrazu (DIC). Použití 2D metody DIC pro měření posunů sledovaného bodu konstrukce ve vodorovném podélném směru je problematické, podrobnější vysvětlení je uvedeno v Kap. 3. Použití DIC je výhodné zejména v částech nosné konstrukce mostu, kde není možné umístit standardní relativní snímač dráhy a kde je možné do sledovaných bodů umístit terče s kontrastními skvrnitými vzory. Poloha bodu, ve kterém jsou instalovány kamery zaměřené na terče ve sledovaných bodech konstrukce, není vázána na jiné speciální podmínky než na to, že z tohoto bodu musí být všechny sledované body konstrukce viditelné a že vzdálenost kamery od sledovaného bodu není větší než zhruba 80 m (viz Kap. 3). Nicméně je výhodné, když bod s kamerami je zhruba shodně vzdálen od všech jednotlivých sledovaných bodů konstrukce, potom chyby měřených dat jsou ve všech sledovaných bodech obdobné. Přesnost měření realizovaného DIC se obvykle pohybuje v desetinách milimetru. Kvalita výsledků měření metodou DIC může být negativně ovlivněna denní dobou, ve které je experiment prováděn. Výhodné je měřit v konstantních světelných podmínkách, což je splněno například v noci, nevýhodné je měření, kdy jsou sledované terče nebo pozorované části povrch konstrukce se skvrnitými vzory vystaveny proměnlivému slunečnímu svitu.

**Standardní relativní snímače průhybu:** Při statických zatěžovacích zkouškách se standardní relativní snímače průhybu používají běžně. Přesnost měření realizovaného relativními snímači dráhy se obvykle pohybuje v setinách milimetru. Teplotní změny vzduchu během experimentu ovlivňují negativně výsledky měření těmito snímači. Tento vliv je možné snížit použitím struny vyrobené z invaru, což je speciální slitina oceli, která má ve srovnání se standardní ocelí podstatně menší objemové změny způsobené teplotou. Ale oproti standardní oceli u invarové struny může docházet k větším prokluzům v místech připevnění této struny k dalším členům systému relativního snímače dráhy, a to v závislosti na síle předpínací pružiny. Pro statické aplikace kde lze použít pouze závaží, je tento efekt nižší. Základní nevýhodou standardních relativních snímačů průhybu je to, že je nelze instalovat v částech sledované konstrukce, kde se pod mostem nachází překážka, která brání umístění ocelového rámu. Může to být například hluboké údolí, vodní plocha, vodní tok, provozovaná železniční trať nebo neuzavřená kapacitní silniční komunikace. Další nevýhodou oproti

zbývajícím metodám je delší doba potřebná k jejich instalaci a nutnost zajištění přístupu ke sledovanému bodu na nosné konstrukci mostu.

**Optické geodetické metody:** Optické geodetické metody jsou běžně využívány ke sledování jak svislých průhybů nosných konstrukcí mostů, tak pozorování změny jejich polohy. Přesnost těchto metod se běžně pohybuje v desetinách milimetru. Při statických zkouškách, při kterých se geodetickými metodami měří svislé průhyby ve střední části pole, se nivelační přístroj umísťuje mimo nosnou konstrukci mostu. Ve sledovaných bodech, které se zpravidla nachází na horním povrchu mostovky, se pak umístí nivelační lať, využívá se metoda velmi přesné nivelace. Výhodou takto uspořádané nivelace je rychlá příprava experimentu a nezávislost na podmínkách pod mostem. K nevýhodám nivelace patří snižující se přesnost výsledků měření s narůstající délkou záměry a ovlivnění klimatickými podmínkami. Další nevýhodou oproti jiným výše popsaným metodám je to, že je možné sledovat pouze body, které jsou viditelné z pozice nivelačního přístroje. Toto často komplikují železniční soupravy nebo silniční nákladní vozidla použitá jako statické zatížení mostu, která jsou během zkoušky rozmístěna na mostovce. A nevýhodou nivelace je především malý počet reálně souběžně měřených míst, větší počet geodeticky sledovaných bodů může experiment podstatně prodloužit. V závislosti na velikosti měřených průhybů je možné rovněž využít totální stanice a odrazné hranoly, upevněné na konstrukci mostu.

**Měření náklonů:** Jedná se o nepřímé měření statických vertikálních průhybů sledovaného mostního objektu. Pro měření náklonů se používají velmi přesné inklinometry. Na základě změřené velikosti náklonů a na základě znalosti numerickým výpočtem stanovené průhybové křivky mostu od zkušebního zatížení použitého při statické zatěžovací zkoušce je možné potom stanovit velikost průhybu v důležitých bodech sledované části vodorovné nosné konstrukce mostu. Zásadní podmínkou použití tohoto postupu je validace numerického modelu, který má být využit k výpočtu teoretické průhybové křivky mostu, na základě parametrů použitého zkušebního zatížení a naměřených náklonů. Pouze v případě velmi jednoduchých konstrukcí a dostatečného počtu použitých snímačů je možné se numerickému modelu vyhnout. Jedná se o nepřímou metodu, jejíž využití se doporučuje v případech, kdy nelze efektivně využít jiné výše uvedené metody. Na druhou stranu je možné tuto nepřímou metodu efektivně využít pro dlouhodobé sledování konstrukce, kdy je již teoretická deformační křivka mostu známá a řádně validovaná. Přesnost tohoto postupu se v závislosti na přesnosti stanovení deformační křivky mostu pohybuje až v desetinách milimetru.

## 5.1.2 Měření svislých zatlačení ložisek a svislých poklesů podpěr

**Radarová interferometrie:** Radarovou interferometrii při standardním uspořádání měření svislých zatlačení mostních ložisek a svislých poklesů podpěr (pilířů nebo krajních opěr) není možné použít.

**Metoda korelace digitálního obrazu (DIC):** Metodu DIC je v principu možné využít k měření svislých poklesů podpěr nebo zatlačení ložisek. Ale použití standardních postupů je jednodušší, efektivnější a přesnější.



*Obr. 16: Pohled na uspořádání měření svislého zatlačení ložiska relativním snímačem dráhy při statické zatěžovací zkoušce železničního mostu v Púchově, celkový pohled (vlevo) a detailní pohled na indukční snímač dráhy s odpruženým hrotem DTA-1G-CA vyrobený firmou Micro-Epsilon (vpravo).*

**Standardní relativní snímač dráhy:** Relativní snímače dráhy se při statických zatěžovacích zkouškách standardně používají k měření svislých zatlačení mostních ložisek. Přesnost tohoto způsobu měření se běžně pohybuje v setinách milimetru. Měření je uspořádáno tak, že se relativním snímačem dráhy měří změna vzdálenosti mezi úložným prahem podpěry a spodním povrchem vodorovné nosné konstrukce mostu (viz Obr. 16). Vztažný bod na úložném prahu (horním povrchu) podpěry je fixován masivní základnou stojánku (viz Obr. 16 vlevo), indukční snímač dráhy je upevněn v horní části stojánku, kde je jeho odpružený hrot opřený o spodní líc vodorovné nosné konstrukce mostu v ose ložiska (viz Obr. 16 vpravo).

**Optické geodetické metody:** Při statických zatěžovacích zkouškách mostů se standardně používá velmi přesná nivelace k měření svislých poklesů podpěr. Niveláčnický přístroj se umísťuje mimo nosnou konstrukci mostu do blízkosti sledované podpěry (pilíře nebo krajní opěry). Do sledovaných bodů podpěr se pak upevní například ocelové měřítko nebo měřítko s čárovým kódem. Je-li podpěra osazena ocelovými niveláčnickými značkami, využívá se i standardní niveláčnická lať. Přesnost takto uspořádaného měření se běžně pohybuje v desetínách až setinách milimetru.

### 5.1.3 Speciální případy měření statických posunů a průhybů radarovou interferometrií

Existují statické úlohy, kdy je metoda radarové interferometrie jediná, kterou je možné smysluplně použít. U těchto úloh se využívá základní vlastnost radarové interferometrie, že se pomocí RI měří primárně posuny zkoumaného objektu ve směru vysílaného signálu. Jako příklad je možné uvést úlohu, při které byl na železničním „Losím mostě“ při brzdné zkoušce sledován vodorovný posun dřívku opěry ve směru podélné osy mostu od statického zatížení.

Při takovéto úloze je radar standardně nastaven na vodorovný směr a umístěn je v ose mostu. Nebo obecněji řečeno, osa radaru leží v rovině kolmé k povrchu dřívku opěry.

## 5.1.4 Střednědobé měření kvazistatických posunů a průhybů

Střednědobé a dlouhodobější měření kvazistatických posunů a průhybů nosných konstrukcí mostů, které jsou způsobeny především změnami teploty nosné konstrukce během dne, není jednoduchá úloha. Teplotní změny ovlivňují nejen sledovanou konstrukci mostu, ale působí i na členy měřících linek, které jsou použity pro zachycení tohoto jevu.

Například měření tohoto jevu pomocí metody DIC je negativně ovlivněno změnou světelných podmínek během dne, nebo měření standardními relativními snímači průhybu (viz Kap. 4.1) je podstatně ovlivněno objemovými změnami jednotlivých částí snímače způsobených jejich změnou teploty v průběhu experimentu.

Na základě výsledků verifikačních experimentů pro dlouhodobější sledování kvazistatických posunů a průhybů při vhodném uspořádání měření je z prověřovaných metod radarová interferometrie nejvhodnější.

## 5.2. Měření statických poměrných deformací

**Radarová interferometrie:** Radarovou interferometrii pro měření poměrných deformací není možné použít.

**Metoda korelace digitálního obrazu (DIC):** Metoda DIC je používána pro experimentální analýzu, která je zaměřena na sledování pole poměrných deformací ve vybrané sledované oblasti konstrukce. Ve vybrané sledované oblasti musí být buďto dostatečně kontrastní přirozená textura materiálu nebo na povrchu konstrukce musí být uměle vytvořen kontrastní skvrnitý vzor (viz Obr. 7). Velkou výhodou metody DIC oproti níže popsáním tenzometrům, které měří poměrnou deformaci v definovaném směru v konkrétním bodu konstrukce, je to, že ze získaného výsledku, kterým je pole poměrných deformací, mohou dodatečně vyhodnocovat poměrné deformace v libovolném směru v kterémkoliv bodu vybrané sledované oblasti konstrukce. Více podrobností je uvedeno v Kap. 3.

**Elektrické odporové tenzometry:** Pro měření poměrných přetvoření na mostních objektech se nejčastěji používají elektrické odporové tenzometry, které jsou nalepeny do vybraných sledovaných bodů nosné konstrukce mostu. Přesnost měření realizovaného odporovými tenzometry se obvykle pohybuje kolem 1 %. Odporový tenzometr se skládá z mřížky a podložky, na které je mřížka připevněna. Mřížka tenzometru je vyrobena z materiálu (např. z konstantanu), u kterého existuje lineární závislost mezi relativní změnou jeho odporu a poměrnou deformací, které je mřížka vystavena.

Při vlastním experimentu se měří změna odporu tenzometru vyvolaná změnou poměrné deformace konstrukce, které je tenzometr vystaven. Tato změna odporu je následně použita ke stanovení velikosti měřeného poměrného přetvoření. Renomovaní výrobci tenzometrů (např. firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)) vyrábějí široký sortiment tenzometrů.

Mimo jiné jsou vyráběny tenzometry, které se navzájem liší délkou mřížky, která se pohybuje od 0,6 mm do cca 150 mm. Tenzometry s krátkými mřížkami je možné použít k měření poměrné deformace na relativně malé ploše konstrukce. Kvůli homogenitě materiálu ocelových konstrukcí je možné na nich použít tenzometry s relativně krátkou délkou mřížky. Na betonových konstrukcích je délka použitého tenzometru ovlivněna nehomogenitou betonové směsi. Je doporučováno použít tenzometr s délkou mřížky rovnou alespoň trojnásobku největšího rozměru zrna kameniva, které bylo použito při výrobě betonové směsi, pokud tento údaj není známý, je vhodné použít tenzometr dlouhý alespoň 100 mm.

Při měření statických poměrných deformací, které jsou vyvolány známým statickým zatížením, pomocí odporových tenzometrů je nezbytné použít opatření, na základě kterých je zjištěn nebo kompenzován vliv změny teploty sledovaného místa konstrukce na měřené poměrné deformace. Základním opatřením používaným při experimentech na mostních objektech je použití kompenzačního odporového tenzometru.

Použití odporových tenzometrů pro dlouhodobé experimenty přináší některé problémy, které v laboratorních podmínkách nenastávají. Jedná se zejména o jejich ovlivnění vnějším prostředím (průnik vlhkosti k mřížce tenzometru, rušení měřeného signálu způsobené elektromagnetickým polem vznikajícím v důsledku blízkých vedení elektrického napětí, mechanické poškození mřížky). V důsledku tohoto ovlivnění může docházet nejen k celkovému poškození a zničení tenzometru, ale také k ovlivnění nulového čtení tenzometru a tím k znehodnocení celého měření tímto tenzometrem. Je proto vhodné tenzometry v kritických uzlech (významných pro monitoring) zdvojit, aby v případě ovlivnění jednoho tenzometru nebylo znehodnoceno celé měření.

**Strunové tenzometry:** Při experimentech na mostních objektech se k měření poměrných deformací používají také strunové tenzometry. Přesnost měření realizovaného strunovými tenzometry je srovnatelná s odporovými tenzometry. Strunové tenzometry se vyrábí standardně v délkách pohybujících se zhruba od 100 mm do 200 mm. Měřená poměrná deformace je vyhodnocována na základě měřené změny vlastní frekvence předepnuté struny, která se nachází v těle strunového tenzometru. Vyrábějí se příložné strunové tenzometry, které jsou určeny k měření poměrných deformací na povrchu sledované nosné konstrukce, u tohoto typu jsou ale výsledky ovlivněny nezanedbatelnou chybou měření, která spočívá v nejistotě polohy vztažných bodů pod ukotvením snímače, podle typu kotvení a délky příložného strunového tenzometru se může tato chyba pohybovat v řádu jednotek procent. A vedle nich se vyrábějí také strunové tenzometry, které jsou předurčeny pro trvalé zabudování do těla masivní betonové konstrukce. Velkou předností strunových tenzometrů je časová stálost citlivosti (vztahu mezi vlastní frekvencí struny a měřenou poměrnou deformací) a vyšší míra odolnosti konstrukce strunového tenzometru proti mechanickému poškození, proto je tento typ tenzometrů často používán při dlouhodobých experimentech zaměřených na dlouhodobé sledování statického chování mostních objektů. Nevýhodou strunových tenzometrů je jejich délka, která omezuje jejich použití při zkoumání detailů konstrukcí, kde dochází k velké změně napjatosti.

Při měření statických poměrných deformací, které jsou vyvolány známým statickým zatížením, pomocí strunových tenzometrů je nezbytné použít opatření, na základě kterých je zjištěn nebo kompenzován vliv změny teploty sledovaného místa konstrukce na měřené poměrné deformace. Základním opatřením používaným při experimentech na mostních

objektech je měření teploty konstrukce ve sledovaném místě nebo použití kompenzačního strunového tenzometru.

**Optovláknové tenzometry nebo optické tenzometry:** Při experimentech na mostních objektech se k měření poměrných deformací stále častěji používají optovláknové tenzometry nebo optické tenzometry (např. vyráběné firmou Safibra nebo Hottinger Baldwin Messtechnik). Jedná se ale především o odlišný obchodní název zboží, protože princip měření poměrné deformace je u obou typů obdobný. Přesnost měření realizovaného strunovými tenzometry je srovnatelná s odporovými tenzometry. Optovláknové a optické tenzometry se vyrábějí v různých délkách pohybujících se zhruba od 40 mm do 150 mm. Princip tenzometrů je založen na Braggově mřížce. Jedná se optický pasivní systém sestávající z optického vlákna, do něhož je koherentním ultrafialovým zářením vytvořena Braggova mřížka vykazující periodické změny indexu lomu světla procházejícího optickým vláknem. Optické skelné vlákno je součástí optovláknového tenzometru a prochází jím bílé světlo vysílané měřicí aparaturou. Na Braggově mřížce se odrazí složka světla, jejíž vlnová délka odpovídá rozměrům mřížky (Braggově periodě mřížky). Měřená poměrná deformace konstrukce se při experimentu přenesení na tenzometr, tím dojde k protažení Braggovy mřížky a ke změně vlnové délky odražené složky světla. Tato změna vlnové délky je využívána ke stanovení měřené poměrné deformace. U tohoto typu se vyrábějí tenzometry určené k přilepení k povrchu konstrukce, nebo příložné optovláknové tenzometry, které se používají k měření poměrných deformací na povrchu sledované nosné konstrukce (opět s chybou měření odpovídající příložným strunovým tenzometrům), a vedle nich se vyrábějí také optovláknové tenzometry, které jsou předurčeny pro trvalé zabudování do těla masivní betonové konstrukce.

Při vyšetřování statických poměrných deformací je ale nezbytné použít teplotní čidla pro kompenzaci závislosti vlnové délky, na základě které se velikost poměrné deformace vyhodnocuje, na teplotě. Standardně se před snímač přetvoření předřazuje teplotní čidlo.

Velkou předností optovláknových tenzometrů je, že na jedno optické vlákno je možné připojit více tenzometrů, že jsou zcela necitlivé na elektromagnetické rušení a protože k měření nevyužívají elektrický signál, jsou vhodné pro experimenty realizované v potenciálně výbušném prostředí. I u optovláknových tenzometrů platí, že jejich nevýhodou oproti odporovým tenzometrům je jejich délka, která omezuje jejich použití při zkoumání detailů konstrukcí, kde dochází k velké změně napjatosti. Další nevýhodou optovláknových tenzometrů je i vyšší náročnost jejich osazení na konstrukci a jejich zapojení k měřicí aparatuře a také relativně vyšší cena.

### 5.3. Měření dynamických posunů, průhybů a výchylek

Měření dynamických posunů, průhybů a výchylek je na mostních objektech zpravidla prováděno při dynamických zatěžovacích zkouškách nebo dynamických studijních zkouškách prováděných podle ČSN 736209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ [3]. Na nových nebo rekonstruovaných mostech jsou dynamické zatěžovací zkoušky prováděny kvůli ověření jejich dynamického chování a spolehlivosti před jejich uvedením do provozu. Na existujících mostech se dynamickou zatěžovací zkouškou nebo dynamickou studijní

zkouškou ověřuje jejich aktuální dynamické chování a spolehlivost a na základě získaných výsledků se zpravidla ověřuje výstižnost teoretického modelu, který má být použit k dynamickým výpočtům při návrhu rekonstrukce tohoto mostu, nebo se identifikují parametry teoretického modelu tak, aby bylo dosaženo co největší míry shody mezi výsledky dynamického experimentu a dynamického výpočtu.

Při dynamických zkouškách se metody měřicí posuny, průhyby a výchylky používají většinou k sledování dynamického chování vodorovné nosné konstrukce mostu ve střední části jeho polí.

**Radarová interferometrie:** Radarovou interferometrii realizovanou dvěma vhodně umístěnými radary je možné využít k měření dynamických průhybů vodorovné nosné konstrukce mostu ve střední části jeho polí jak ve svislém tak vodorovném podélném směru. Přesnost měřených posunů se ve shodě s měřením statických posunů pohybuje od setin do desetin milimetru v závislosti na podmínkách a uspořádání konkrétního experimentu.

V současnosti interferometrické radary používané pro experimenty na stavebních konstrukcích umožňují nastavit vzorkovací frekvenci na cca 200 Hz. To znamená, že jimi zachycené kmitání mostního objektu je využitelné pro zkoumání dynamického chování mostu ve frekvenčním rozsahu od 0,0 Hz do cca 80 Hz. Tento frekvenční rozsah je pro většinu potenciálních experimentálních dynamických úloh realizovaných na mostních objektech dostatečný a je větší než u standardních relativních snímačů průhybu.

I při dynamických experimentálních analýzách je použití RI výhodné zejména v částech nosné konstrukce mostu, kde není možné umístit standardní relativní snímač dráhy a kde je možné radary umístit pod osou vodorovné nosné konstrukce. Při kmitání, při kterém dochází ke zkroucení vodorovné nosné konstrukce mostu kolem její podélné osy, je vhodné použít odražeče na okrajích sledovaných příčných řezů. Toto uspořádání RI umožňuje zkroucení sledované nosné konstrukce zachytit.

I při dynamických zatěžovacích zkouškách, pokud je při experimentu použit pouze jediný radar, je potřebné se vyhnout riziku popsanému na konci Kap. 2 v odstavci c).

Metodou radarové interferometrie je možné zachytit jak statickou tak i kvazistatickou složku průhybu vodorovné nosné konstrukce mostu vyvolaného zkušebním zatížením. Tuto experimentální metodu je tedy možné využít k stanovení dynamického součinitele podle článku 8.3.2 odstavce c) v ČSN 73 6209 [3]. O velikosti dynamického součinitele ve většině případů rozhoduje kmitání mostu v jeho nejnižších vlastních frekvencích a RI je schopna tento charakter kmitání dostatečně přesně zachytit.

Při měření dvěma radary, které je zaměřeno na stanovení dynamického součinitele, je potřebné kontrolovat, zda výsledky nejsou potenciálně podstatně ovlivněny frekvenčními složkami, které mohou být potenciálně obsaženy v měřeném signálu a které vznikají v důsledku interference signálů z obou radarů. Při verifikačních experimentech byly tyto rušivé frekvenční složky pozorovány při všech konfiguracích a postaveních radarů a závisely také na typu sledovaného mostního objektu.

**Metoda korelace digitálního obrazu (DIC):** I metodu DIC je možné použít k měření dynamických svislých průhybů nosné konstrukce. Stejně jako u statických zatěžovacích

zkoušek i při dynamických experimentech je použití DIC výhodné zejména v částech nosné konstrukce mostu, kde není možné umístit standardní relativní snímač dráhy a kde je možné do sledovaných bodů umístit terče s kontrastními skvrnitými vzory.

V současnosti měřicí linky DIC, které je možné použít pro experimenty na stavebních konstrukcích, umožňují při ideálních podmínkách nastavit vzorkovací frekvenci až zhruba na 150 Hz. Při verifikačních experimentech, když byly měřeny dynamické průhyby nosných konstrukcí mostů během přejezdů železničních vlakových souprav nebo silničních nákladních vozidel, byla použita vzorkovací frekvence DIC v rozmezí 50 až 70 Hz. To znamená, že kmitání mostního objektu zachycené DIC bylo využitelné pro zkoumání dynamického chování mostu ve frekvenčním rozsahu od 0,0 Hz do cca 20 až 27 Hz. Tento frekvenční rozsah je pro většinu potenciálních experimentálních dynamických úloh realizovaných na větších mostních objektech dostatečný a je srovnatelný s relativními snímači průhybu.

Metodou DIC je možné zachytit jak statickou tak i kvazistatickou složku průhybu vodorovné nosné konstrukce mostu vyvolaného zkušebním zatížením. Tuto experimentální metodu je tedy možné využít k stanovení dynamického součinitele podle článku 8.3.2 odstavce c) v ČSN 73 6209 [3]. O velikosti dynamického součinitele ve většině případů rozhoduje kmitání mostu v jeho nejnižších vlastních frekvencích a DIC je schopna tento charakter kmitání dostatečně přesně zachytit.

Záznamy kmitání mostního objektu, které jsou pořizovány v průběhu dynamických experimentů, jsou většinou krátké, jejich délka se pohybuje zpravidla v řádu sekund nebo desítek sekund, delší záznamy někdy trvají několik minut. Během relativně krátké délky záznamu nedochází k velkým změnám teploty vzduchu, osvětlení konstrukce nebo sedání stativu s kamerami a vliv ambientních nejistot na výsledky měření se také podstatně redukuje ve srovnání se statickými experimenty.

Ostatní podmínky pro aplikaci metody DIC jsou obdobné podmínkám pro statické zatěžovací zkoušky.

**Standardní relativní snímače průhybu:** Standardní relativní snímače průhybu se při dynamických zatěžovacích zkouškách používají často.

Vlastní frekvence podélného kmitání soustavy relativního snímače průhybu závisí zejména na délce ocelové struny a předpínací síle vyvinuté předpínací pružinou a u jednotlivých relativních snímačů průhybu použitých při konkrétním experimentu je zpravidla odlišná a většinou se pohybuje v intervalu 30 Hz až 60 Hz. Tato vlastní frekvence ovlivňuje frekvenční rozsah měření provedeného relativním snímačem průhybu, který je od 0 Hz do cca poloviny této vlastní frekvence podélného kmitání soustavy relativního snímače průhybu. V běžných případech takto uspořádaných relativních snímačů je tedy jejich frekvenční rozsah od 0,0 Hz do cca 15 Hz až 30 Hz.

Relativními snímači průhybu je možné zachytit jak statickou tak i kvazistatickou složku průhybu vodorovné nosné konstrukce mostu vyvolaného zkušebním zatížením. Tento typ snímače je tedy možné využít k stanovení dynamického součinitele podle článku 8.3.2 odstavce c) v ČSN 73 6209 [3].

**Absolutní snímače zrychlení 8344:** Jak bylo podrobněji popsáno v Kap. 4.2, zrychlení měřená absolutními piezoelektrickými snímači 8344 je možné převést na dynamické výchylky pomocí dvojnásobné integrace v časové oblasti. Ve většině případů jsou dynamické výchylky sledovaných bodů vyhodnocené tímto způsobem dostatečně přesné až pro frekvence kmitání vyšší zhruba než 1 Hz, ale tato dolní hranice pro vyhodnocované dynamické výchylky je závislá na konkrétních dynamických parametrech zkoumané nosné konstrukce mostu a podmínkách realizace experimentu.

## 5.4. Měření dynamických poměrných deformací

**Radarová interferometrie:** Radarovou interferometrii pro měření poměrných deformací není možné použít.

**Metoda korelace digitálního obrazu (DIC):** Metodu DIC je možné použít pro dynamickou experimentální analýzu, která je zaměřena na sledování pole poměrných deformací ve vybrané sledované oblasti konstrukce, je ale potřebné uvážit šum v úrovni cca 20 až 50  $\mu\text{s}$ . Tato úroveň šumu pak omezuje využití metody na lokální sledování více zatížených detailů ocelových a betonových konstrukcí nebo na sledování trhlin.

**Elektrické odporové tenzometry:** Elektrické odporové tenzometry jsou často využívány k měření poměrných přetvoření na mostních objektech při dynamické experimentální analýze. Frekvenční rozsah těchto měření je obecně větší než u RI, DIC i relativních snímačů průhybu.

Elektrickými odporovými tenzometry je možné zachytit jak statickou tak i kvazistatickou složku poměrné deformace ve sledovaném bodu nosné konstrukce mostu vyvolané zkušebními zatíženími. Tyto tenzometrické snímače je tedy možné využít k stanovení dynamického součinitele.

Ostatní podmínky pro aplikaci elektrických odporových tenzometrů jsou obdobné podmínkám pro statické zatěžovací zkoušky.

**Optovláknové tenzometry nebo optické tenzometry:** Optovláknové tenzometry lze použít k měření poměrných deformací při dynamické experimentální analýze mostů. Frekvenční rozsah těchto měření je obecně větší než u RI, DIC i relativních snímačů průhybu.

Optovláknovými tenzometry je možné zachytit jak statickou tak i kvazistatickou složku poměrné deformace ve sledovaném bodu nosné konstrukce mostu vyvolané zkušebními zatíženími. Tyto tenzometrické snímače je tedy možné využít k stanovení dynamického součinitele. Při vyšetřování statické složky je ale nezbytné použít teplotní čidla pro kompenzaci závislosti vlnové délky, na základě které se velikost poměrné deformace vyhodnocuje, na teplotě. Standardně se před snímač přetvoření předřazuje teplotní čidlo.

Ostatní podmínky pro aplikaci optovláknových tenzometrů jsou obdobné podmínkám pro statické zatěžovací zkoušky.

## 5.5. Měření dynamického součinitele

Dynamický součinitel je parametr, který se běžně používá k popisu dynamického chování nosné konstrukce mostu. Využívá se například při přejezdu zkušební železniční soupravy přes železniční most nebo při přejezdu skupiny zkušebních silničních nákladních vozidel přes silniční most. Dynamický součinitel se vyhodnocuje podle článku 8.3.2 odstavce c) v ČSN 73 6209 [3]. Jak již bylo uvedeno výše, k určení dynamického součinitele lze využít radarovou interferometrii, metodu DIC, standardní relativní snímače průhybu, odporové tenzometry a optovláknové tenzometry.

## 5.6. Měření zrychlení

Na mostních objektech je při dynamických experimentech zrychlení měřeno často. Na lávkách pro chodce je často simulován běžný provoz podle článku 7.7.5 z ČSN 73 6209 [3], kdy přes lávku přechází různé skupiny osob, a naměřené úrovně zrychlení mostovky jsou potom posuzovány na základě článku 8.3.5 z hlediska 2. mezního stavu použitelnosti s ohledem na účinky vibrací na lidský organismus. Na železničních mostech se také ověřuje úroveň zrychlení mostovky a porovnává se s mezními hodnotami předepsanými v článku A2.4.4.2.1 normy ČSN EN 1990.

**Absolutní snímače zrychlení:** K měření zrychlení mostovek se na mostech využívá široká škála snímačů zrychlení, které jsou vyráběny různými výrobci. Autorům textu této ověřené technologie se při různých experimentech na mostních objektech osvědčily piezoelektrické snímače zrychlení 8344 vyráběné firmou Brüel&Kjaer, které je možné použít k měření zrychlení sledovaných bodů konstrukce v pracovním frekvenčním intervalu 0,2 Hz až 3 kHz, který udává jejich výrobce. Podrobnější popis je uveden v Kap. 4.2.

**Radarová interferometrie:** Radarovou interferometrii pro měření zrychlení je možné použít jen omezeně. Naměřený signál RI v měřítku výchylek je možné pomocí dvojnásobné derivace ve frekvenční oblasti převést na zrychlení, ale vzhledem k větší úrovni šumu obsaženému v měřeném signálu je takto získané zrychlení méně přesné ve srovnání s daty získanými snímači zrychlení.

## 5.7. Měření frekvencí a tvarů vlastního kmitání

Tato experimentální úloha je v odborné literatuře také často nazývána „experimentální modální analýza“. Experimentálně určené frekvence vlastního kmitání, jim příslušné tvary vlastního kmitání a odpovídající útlum jsou přirozené dynamické charakteristiky konstrukce (také nazývané modální charakteristiky konstrukce nebo charakteristiky vlastního kmitání konstrukce), které popisují její dynamické vlastnosti ovlivněné pouze její okamžitou tuhostí, hmotností a konstrukčním uspořádáním, proto jsou využívány pro experimentální ověření dynamické funkce zkoušené konstrukce, nebo je lze s výhodou použít pro ověření výstižnosti (validaci) nebo pro identifikaci výpočtových modelů této konstrukce, a to zejména tehdy, pokud tyto modely mají být použity k dynamickým výpočtům.

Kritéria pro posouzení shody experimentálně stanovených charakteristik vlastního kmitání vyšetřovaného mostního objektu s výpočtem stanovenými charakteristikami jsou stanovena

v článku 8.2.8 v ČSN 73 6209 [3], kde v odst. a) je uveden postup posouzení míry shody porovnávaných změřených a vypočtených vlastní frekvencí s limitními hodnotami odchylek stanovenými v Tab. 1.

V současné době jsou také rozvíjeny a ověřovány metody detekce a lokalizace poškození stavebních konstrukcí, které jsou založeny na změně jejich modálních charakteristik.

K určení charakteristik vlastního kmitání mostního objektu je možné využít především absolutní snímače zrychlení. V omezené míře v části konstrukce pokryté signálem je možné použít radarovou interferometrii. Aplikace metody DIC nebo relativních snímačů průhybu je omezena pouze na sledované body a stejně tak i využití odporových nebo optovláknových tenzometrů.

**Absolutní snímače zrychlení:** K experimentální modální analýze se na mostních objektech využívá široká škála absolutních snímačů zrychlení nebo rychlosti, které jsou vyráběny různými výrobci. Autorům textu této ověřené technologie se při různých experimentech na nosných konstrukcích mostů osvědčily piezoelektrické snímače zrychlení 8344 vyráběné firmou Brüel&Kjaer, které je možné použít k měření zrychlení sledovaných bodů konstrukce v pracovním frekvenčním intervalu 0,2 Hz až 3 kHz, který udává jejich výrobce. Podrobnější popis těchto snímačů je uveden v Kap. 4.2.

Základní výhodou aplikace snímačů zrychlení 8344 je, že při jednodenním experimentu je možné vyšetřit kmitání nosné konstrukce mostu ve vyšších desítkách až nižších stovkách jejích bodů.

Měření kmitání mostu v měřítku zrychlení je pro vyšetřování jeho vyšších vlastních frekvencí a s nimi svázaných vlastních tvarů výhodnější než měření kmitání v měřítku výchylek, protože úroveň zrychlení je oproti výchylkám zesílena v závislosti na druhé mocnině frekvence, ve které konstrukce kmitá.

Snímače zrychlení 8344 díky jejich vysoké citlivosti a nízké dolní hranici jejich frekvenčního rozsahu je možné využít i na mostech s velkým rozpětím polí pro vyšetřování nejnižších vlastních frekvencí (a jim odpovídajících vlastních tvarů), které jsou nižší než 1 Hz.

**Radarová interferometrie:** Radarová interferometrie zaznamenává kmitání nosné konstrukce mostu v měřítku výchylek. To je výhodné pro vyšetřování nejnižších vlastních frekvencí a s nimi svázaných vlastních tvarů a to zejména na mostech s velkým rozpětím polí, jejichž základní vlastní frekvence jsou nízké a tedy i úroveň kmitání v měřítku zrychlení je většinou nízká. Podíl frekvenčních složek výchylek pro vyšší vlastní frekvence se oproti nejnižším vlastním frekvencím v zaznamenaném kmitání zpravidla snižuje, proto je použití radarové interferometrie pro vyšetřování vyšších vlastních frekvencí omezené úrovní sledovaného kmitání mostu a parametry měřeného signálu (např. úrovní šumu). Vlastní tvary nosné konstrukce mostu je možné radarovou interferometrií vyšetřit v části konstrukce pokryté signálem. Při přemístění radarů během experimentu do několika pozic (například u spojitě nosné konstrukce mostu do několika jejích polí) je možné vlastní tvary vyšetřit v několika oddělených částech konstrukce, ale takto získané části vlastních tvarů nejsou na sebe navázány společným měřítkem.

**Metoda korelace digitálního obrazu (DIC):** I metoda DIC zaznamenává kmitání nosné konstrukce mostu v měřítku výchylek. Jak bylo uvedeno u RI, to je výhodné zejména pro vyšetřování nejnižších vlastních frekvencí a to zejména na mostech s velkým rozpětím polí, jejichž základní vlastní frekvence jsou nízké a tedy i úroveň kmitání v měřítku zrychlení je většinou nízká. Podíl frekvenčních složek výchylek pro vyšší vlastní frekvence se oproti nejnižším vlastním frekvencím v zaznamenaném kmitání zpravidla snižuje, proto je použití DIC pro vyšetřování vyšších vlastních frekvencí omezené úrovní sledovaného kmitání mostu a parametry měřeného signálu. Metodou DIC je možné vyšetřit pouze pořadnice vlastních tvarů nosné konstrukce mostu v omezeném počtu bodů, ve kterých jsou umístěny terče se skvrnitým vzorem.

## 6. Kombinace různých experimentálních metod při experimentech na mostních objektech

V této ověřené technologii jsou popsány základní parametry dvou experimentálních metod, radarové interferometrie (RI) a korelace digitálního obrazu (DIC), které jsou nově využívány při experimentech realizovaných na mostních objektech, zároveň jsou shrnuty i jejich výhody a nevýhody a popsány jsou také možnosti jejich aplikace při experimentech na mostních objektech.

Mostní stavitelství přináší různé situace, ve kterých je potřebné využít experiment realizovaný v podobě statické zatěžovací zkoušky, statické studijní zkoušky, experimentální modální analýzy, dynamické zatěžovací zkoušky nebo dynamické studijní zkoušky.

Každá mostní konstrukce je unikátní a uspořádání experimentu je tedy ovlivněno konkrétními parametry mostu, na kterém má být experimentální analýza provedena, a možnostmi jednotlivých metod, které jsou pro realizaci experimentu k dispozici.

Cílem této ověřené technologie bylo shrnout informace o RI, DIC a dalších standardních experimentálních postupech, aby při přípravě určitého konkrétního experimentu bylo možné kvalifikovaně rozhodnout o nasazení kombinace různých experimentálních metod, které je vhodné k připravovanému experimentu použít tak, aby byly cíle experimentu naplněny v co nejvyšší míře.

## 7. Seznam použité literatury

- [1] Talich, M. – Havlant, J. – Soukup, L. – Antoš, F. – Polák, M. – Ryjáček, P. – Litoš, J. – Plachý, T. – Macho, M.: Technologie určování dynamických pohybů mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií, ÚTIA AV ČR, prosinec 2020.
- [2] Talich, M. – Havlant, J. – Soukup, L. – Antoš, F. – Polák, M. – Ryjáček, P. – Litoš, J. – Plachý, T. – Macho, M.: Technologie určování vlivu teplotních či dalších změn na pohyby mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií, ÚTIA AV ČR, prosinec 2021.
- [3] ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), září 2019.

- [4] Předpis SŽ S5/1 Diagnostika, zatížitelnost a přechodnost železničních mostních objektů. Správa železnic, státní organizace, 2021.
- [5] Ryjáček, P.: Příloha 11 Návrh na doplnění metodického pokynu: PŘÍLOHA K - Doporučení pro provedení kontrolních zatěžovacích zkoušek ocelových a spřažených ocelobetonových mostů pro validaci výpočetního modelu. Výstup projektu Nové nedestruktivní diagnostické metody v oblasti železničních mostů, říjen 2018.
- [6] Vodehnal, L. – Ryjáček, P. – Glöckner, M. – Karmazýn, K. – Polák, M. – Demuth, J.: ČÁST A – Souhrnná část: Analýza nových diagnostických metod mostních konstrukcí - radarová interferometrie, DIC, využití velmi přesných inklinometrů, snímačů na bázi optických vláken a metodika jejich použití. Výstup projektu Nové nedestruktivní diagnostické metody v oblasti železničních mostů, říjen 2018.

Tento výsledek byl podpořen Ministerstvem vnitra České republiky, v rámci programu BV III/1-VS, projekt „*Pokročilá technologie rychlého určování deformací mostů radarovou interferometrií a její využití v diagnostice*“ č. VI20192022167.

## Zpráva o provedeném ověřovacím měření na železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou

Milan Talich, Jan Havrlant, Lubomír Soukup, Filip Antoš, Tomáš Plachý, Michal Polák, Pavel Ryjáček, Jiří Litoš, Martin Macho, Vojtěch Stančík

Pro ověření technologie využití kombinace různých měřících systémů k určování pohybů mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru bylo provedeno měření na existujícím železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou.

Při tomto experimentu byly ke sledování nosné konstrukce mostu použity tyto experimentální metody: radarová interferometrie realizovaná dvěma radary (RI), korelace digitálního obrazu (DIC), standardní relativní snímače průhybu, standardní snímače zrychlení.

### 1. Stručný popis mostního objektu

U mostního objektu proběhla před experimentem jeho rekognoskace. Posuzovala se konstrukce objektu, možnosti umístění interferometrických radarů, odrazivost radarových vln od mostovky, možnosti umístění kamer pro metodu korelace digitálního obrazu a terčů s kontrastními skvrnitými vzory.

Pro experiment byl využit existující železniční ocelový most přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou (viz *Obr. 1*). Přesná poloha mostu je vyznačena na *Obr. 2*. Přes tento most vedou dvě regionální železniční tratě 212 Čerčany – Světlá nad Sázavou, která je také nazývána „Posázavský Pacifik“, a 014 Kolín - Ledčsko.

Most byl dokončen v roce 1899 a převáděné železniční tratě byly uvedeny do provozu v roce 1901. Před mostem (ve směru staničení mostu) se nachází železniční tunel nazývaný Ratajský tunel II. Statická zatěžovací zkouška byla na mostu provedena 29. června 1901. Nosná konstrukce mostu byla v roce 1961 a v roce 2021 renovována. V roce 2021 byla mimo jiné původní dřevěná podlaha mostovky nahrazena protiskluzovým kompozitním roštem.

Popis mostního objektu je platný pro stav po renovaci v roce 2021. Most je přímý a kolmý. Celková délka vodorovné nosné konstrukce mostu je 72,6 m, jeho rozpětí je 72,0 m a světlé rozpětí (vzdálenost mezi líci opěr) je 70,0 m.

Vodorovná nosná konstrukce mostu se skládá ze dvou nýtovaných příhradových nosníků s obloukovým horním pasem a s dolní mostovkou. Šířka příčného řezu mostu je 5,23 m, osová vzdálenost hlavních nosníků je 4,65 m a světlá šířka je 4,12 m.

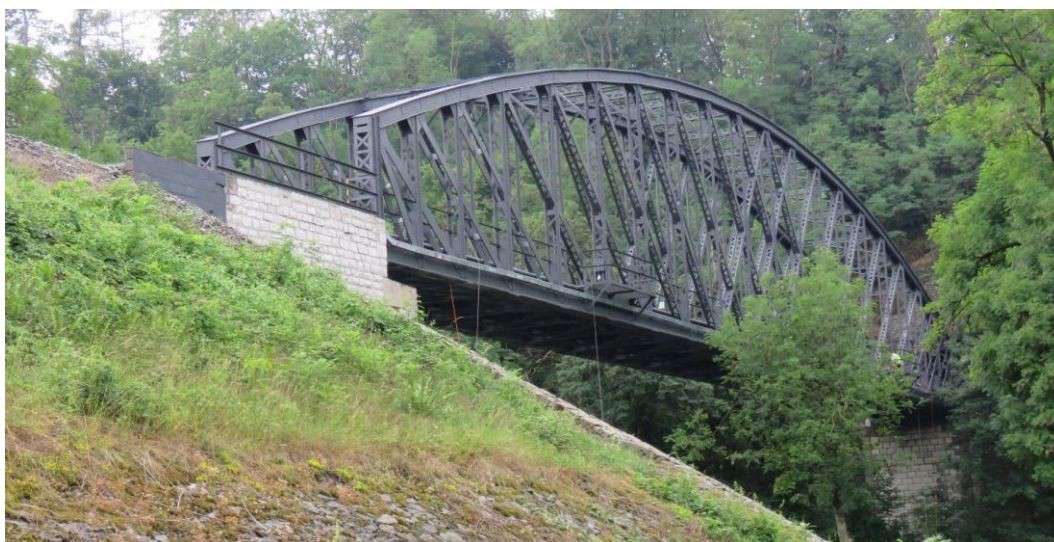
Výška hlavních nosníků je kvůli obloukovému hornímu pasu proměnná (viz *Obr. 1*) a mění se od 3,60 m do 10,30 m. Hlavní nosníky jsou příhradové, skládají se z parabolického horního pasu, z přímého dolního pasu, ze svislic a diagonál. Jednotlivé prvky jsou navzájem propojeny ve styčnicích. Svislice a diagonály jsou členěné nýtované pruty složené ze čtyř úhelníků s příhradovými spojkami (viz *Obr. 4*). Dolní pasy jsou také členěné pruty sestavené ze dvou nýtovaných prutů s průřezem ve tvaru obráceného písmene T navzájem propojených rámovými spojkami (viz *Obr. 3*). Horní pasy jsou nýtované pruty s průřezem ve tvaru písmene pí (viz *Obr. 4*). Zavětrování v úrovni horních pasů hlavních nosníků je příhradové (viz *Obr. 4*).

Jak je patrné z *Obr. 3*, mostovka se skládá ze dvou podélníků, na kterých jsou uloženy železniční

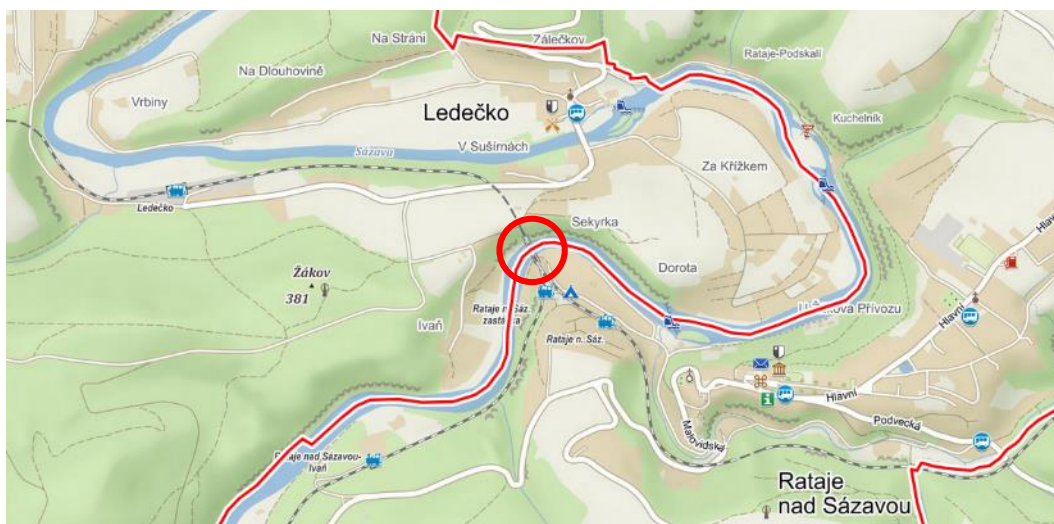
pražce, z podélného ztužení podélníků sestaveného z profilů U 140, z příčniců, které podpírají podélníky a z vodorovného příhradového zavětrování mostovky sestaveného z profilů U 200. Příčnicíky se nachází ve shodných řezech, ve kterých mají hlavní nosníky svislice. Osová vzdálenost podélníků je 1,80 m, jejich příčný řez je ve tvaru písmene I a jejich výška je 500 mm. Příčnicíky jsou nýtované pruty s průřezem ve tvaru písmene I, jejichž výška se mění v rozmezí 720 až 724 mm.

Svislice nad ložisky mostu je členěný nýtovaný prut sestavený z osmi úhelníků s příhradovými spojkami.

Vodorovná nosná konstrukce mostu je na opěrách uložena na ocelolitinová ložiska. Obě opěry jsou zděné z přírodního kamene, křídla jsou rovnoběžná (viz *Obr. 1*).



*Obr. 1 – Železniční most přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou.*



*Obr. 2 – Poloha železničního mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou.*

Konstrukční uspořádání železničního mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou, kdy je tento most ocelový s příčnicíky na dolní mostovce, kdy má jen jedno pole a kdy je jeho vodorovná nosná konstrukce dostatečně vysoko nad překonávanou překážkou, umožňuje měřit dynamické chování jeho mostovky interferometrickým radarem bez nutnosti použít koutové odražeče. Ocelové příčnicíky jsou v dostatečných rozestupech tak, že každý příčnicíky spadá do jiné radiální spádové oblasti (Rbin).



*Obr. 3 – Spodní pohled proti směru staničení mostu na vodorovnou nosnou konstrukci.*



*Obr. 4 – Spodní pohled proti směru staničení mostu horní pas, svislice a diagonály pravého hlavního nosníku a na horní zavětrování hlavních nosníků.*

## 2. Podmínky během měření

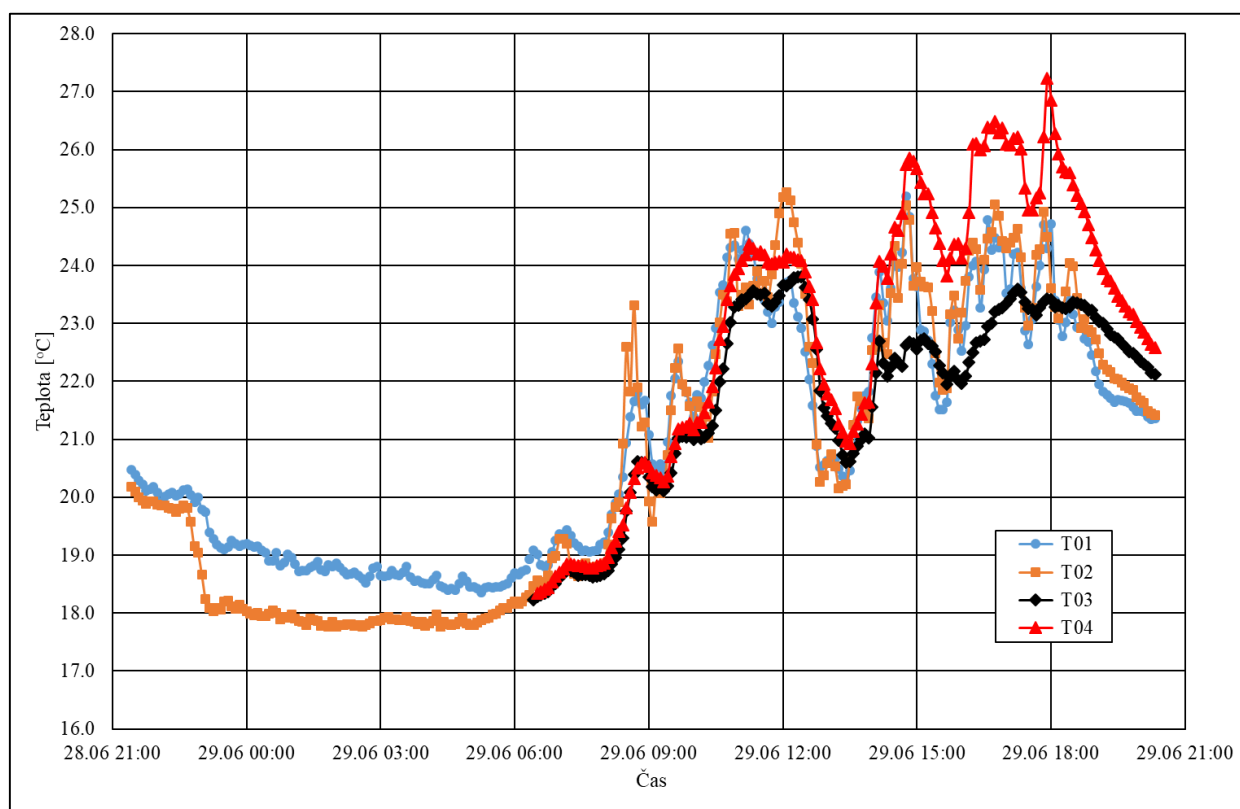
Měření bylo zahájeno dne 28. 6. 2022 ve 20:57 a ukončeno bylo 29. 6. 2022 20:17. Chování nosné konstrukce mostu bylo sledováno kontinuálně, sledovány byly účinky změn klimatických podmínek během jednoho celého dne a běžného železničního provozu.

Tab. 1 – Klimatické podmínky během měření

Klimatické podmínky	
Teplota	18,4 – 25,2 °C
Vlhkost	83 – 96 %

Počasí bylo proměnlivé. Během jednodenního experimentu se oblačnost pohybovala v širokém rozmezí jasno až zataženo. Během dne několikrát intenzivně pršelo - mezi cca 22:40 až 0:35, mezi cca 3:30 až 6:00, mezi cca 8:40 až 9:05, mezi cca 12:30 až 13:40, mezi cca 14:55 až 15:40 a mezi 17:15 až 17:40.

Na Obr. 5 je vyneseno zaznamenaný průběh teploty vzduchu ve stínu v prostoru pod sledovaným mostem (T01), teploty vzduchu ve stínu ve výšce cca jeden metr nad mostovkou (T02), teploty dolního pasu levého hlavního nosníku ve třech čtvrtinách rozpětí mostu (T03) a teploty dolního pasu pravého hlavního nosníku ve třech čtvrtinách rozpětí mostu (T04). K měření teploty byla použita ústředna Comet MS5D a čtyři teplotní sondy N1ATG7 s teplotním čidlem Ni1000.



Obr. 5 – Průběh teploty vzduchu a dolních pasů hlavních nosníků při experimentu na železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou.

### 3. Použité měřické přístroje

#### Radarová interferometrie (RI):

Pro měření byly použity dva Radary IBIS výrobce IDS. Byla použita varianta, kdy radary byly umístěny na protilehlých stranách prostoru pod sledovanou vodorovnou nosnou konstrukcí mostu.

Konfigurace radaru  $R_1$ , který byl umístěn v prostoru pod 1. opěrou na levém břehu Sázavy:

IDS Radar IBIS –FS Plus (viz *Obr. 6* vlevo),

SN 010-19-000314,

Antény: IBIS-ANT3-H17V15, záběr v horizontálním směru je  $17^\circ$  při ztrátě 3dB a  $34^\circ$  při ztrátě 10dB,

Inklinometr Statotest.

Konfigurace radaru  $R_2$ , který byl umístěn v prostoru pod 2. opěrou na pravém břehu Sázavy:

IDS Radar IBIS – RU 172 (viz *Obr. 6* vpravo),

SN 053,

Antény: IBIS-ANT3-H17V15, záběr v horizontálním směru je  $17^\circ$  při ztrátě 3dB a  $34^\circ$  při ztrátě 10dB.

Inklinometr Statotest.



*Obr. 6* – Dva radary IBIS-FS (vlevo) a IBIS-S (vpravo) umístěné pod nosnou konstrukcí ocelového železničního mostu přes řeku Sázavu v Ratajích.

Během měření byly zaznamenávány klimatické podmínky pomocí meteostanice Davis Vantage Vue a část dne pořizován videozáznam provozu na mostě. Místní situace a postavení radarů bylo zaměřeno podrobným laserovým skenováním a následně byl sestaven 3D model.

#### Metoda korelace digitálního obrazu (DIC):

Do měřených míst na vodorovné nosné konstrukci byly osazeny vyrobené terče s kontrastním skvrnitým vzorem (viz *Obr. 7* vpravo). Sledovány byly tři body konstrukce, všechny se nacházely na svislicích pravého hlavního nosníku. První byl umístěn v 1. čtvrtině rozpětí, druhý se nacházel v polovině rozpětí a třetí byl ve 3. čtvrtině rozpětí. Dále byly použity dva statické body. Vzdálenost kamer od terčů osazených ve sledovaných bodech se pohybovala od cca 10 m (pro nejbližší terč) až po cca 80 m (pro nejvzdálenější terč) a použity byly objektivy s ohniskovou vzdáleností  $f = 50$  mm (bližší terče), respektive  $f = 75$  mm (vzdálenější terče) (viz *Obr. 7* vlevo).



*Obr. 7 – Pohled na kamery s objektivy použité pro DIC (vlevo) a na terče s kontrastním skvrnitým vzorem umístěné na 1. opěře (statický bod) a ve sledovaných bodech vodorovné nosné konstrukce v 1. čtvrtině a v polovině jejího rozpětí (vpravo).*



*Obr. 8 – Relativní snímač dráhy (vlevo) a uchycení struny na dolním pasu hlavního nosníku (vpravo).*

#### **Standardní relativní snímače dráhy:**

Při experimentu na mostu v Ratajích byly použity dva relativní snímače dráhy, ve kterých byly použity indukční snímače LVDT-ISDL-50-KD-2405 od německého výrobce Inelta Sensorsysteme (viz *Obr. 8* vlevo), jejichž rozsah je  $\pm 25$  mm. Tyto snímače byly připojeny k měřicí ústředně EMS DV 803 Pohl, jejímž výrobcem je Ing. Miroslav Pohl z Brna.

Soustava relativního snímače dráhy (viz *Obr. 8* vlevo) se skládala z masivního ocelového rámu, jehož

tíha byla navýšena ocelovým závažím. K rámu bylo připevněno válcové tělo induktivního snímače dráhy. V rámu byla uchycena pružina, která předpínala systém struna – jádro induktivního snímače dráhy- verifikační přípravek – struna.

K uchycení struny ve sledovaném bodu na dolním povrchu vodorovné nosné konstrukce byl použit neodymový magnet opatřený háčkem (viz *Obr. 8* vpravo).

#### **Standardní absolutní snímače zrychlení 8344:**

Při experimentu na mostu v Ratajích byly snímače zrychlení 8344 použity ke dvěma cílům experimentu. Snímače zrychlení připojené k měřicí ústředně Sirius 8ACC (viz *Obr. 9* vpravo) byly rozmístěny ve shodných bodech nosných konstrukcí mostů, kde bylo prováděno měření i dalšími metodami, aby bylo možné výsledky získané z jednotlivých metod mezi sebou porovnat. Ústředna Sirius 6ACC-2ACC+ a k ní připojené snímače zrychlení byly využity k experimentu zaměřenému na stanovení frekvencí a tvarů vlastního kmitání sledovaných mostů (viz *Obr. 9* vlevo).



*Obr. 9 – Dva absolutní snímače zrychlení 8344 při experimentální modální analýze (vlevo) a dynamická měřicí ústředna Sirius 8ACC (vpravo).*

#### **4. Nastavení parametrů měření metodou radarové interferometrie**

Dynamické měření mostu probíhalo dvěma interferometrickými radary současně (viz *Obr. 6*). Radar  $R_1$  byl umístěn na levém břehu Sázavy u paty 1. opěry přibližně v ose mostovky a druhý radar  $R_2$  byl postaven na pravém břehu Sázavy.

Vertikální náklon obou radarů byl určen experimentálně tak, aby byla pokryta maximální délka hlavního pole (viz *Obr. 10*, a aby nedocházelo k významnému vzájemnému rušení radarového signálu.

Měření trvalo přibližně 24 hodin.

Nastavené parametry měření:

IDS Radar  $R_1$

Frekvence snímání:	200 Hz,
Dosah signálu:	185,5 m,
Radiální rozlišení:	0,75 m,
Vertikální náklon radaru:	21,2°.

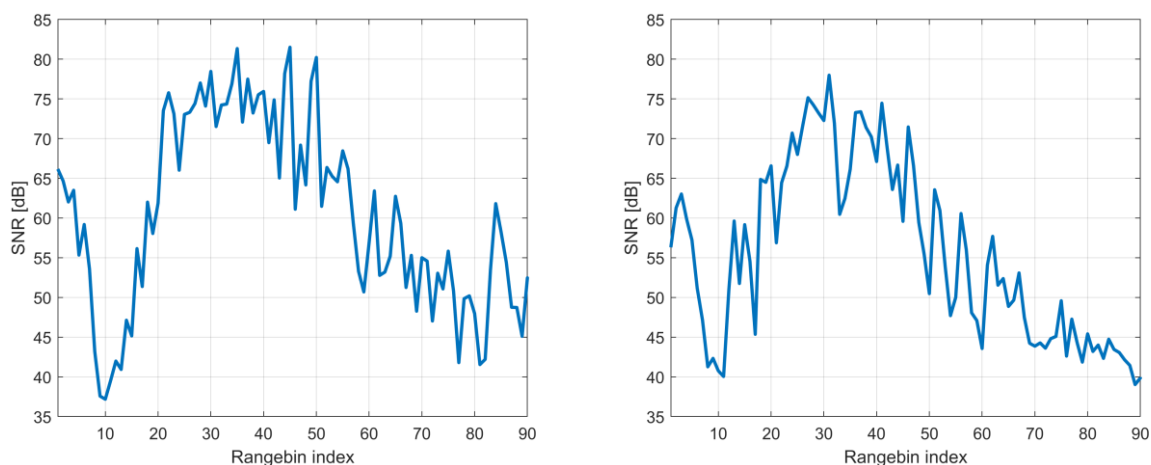
IDS Radar R<sub>2</sub>

Frekvence snímání:	199,79 Hz,
Dosah signálu:	108,5 m,
Radiální rozlišení:	0,75 m,
Vertikální náklon radaru:	21,7°.

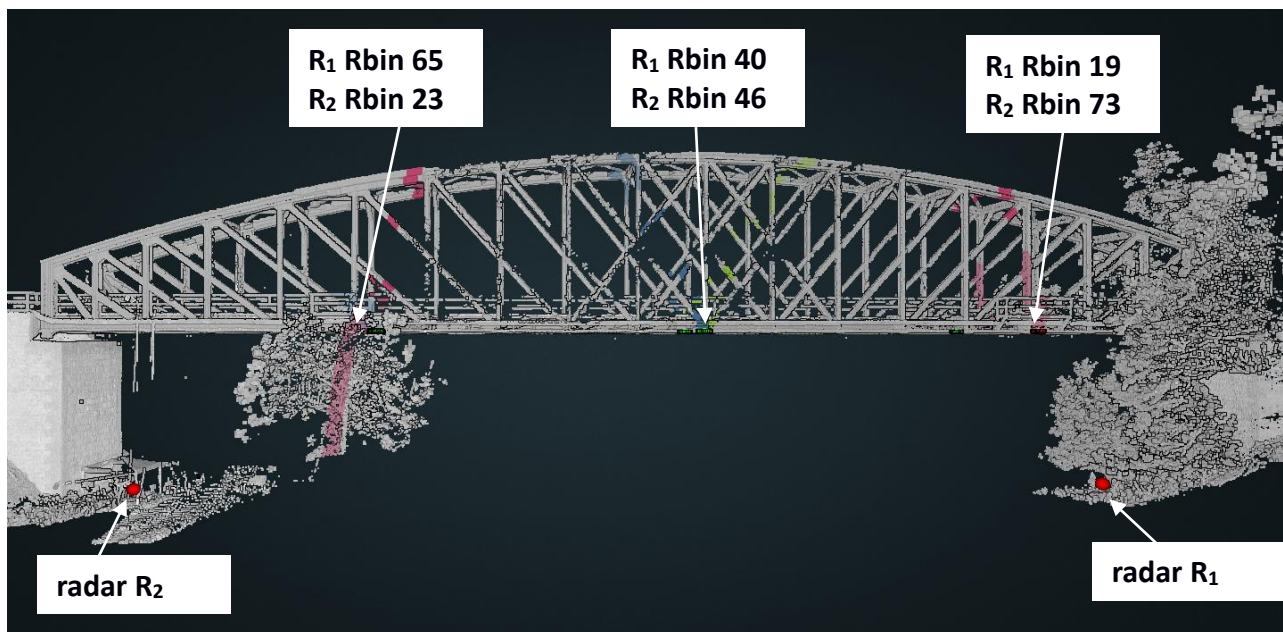


Obr. 10 – Pohled na ocelové příčníky mostu z pozice blízké stanoviště radaru R<sub>2</sub> (pohled proti směru staničení mostu od Ratajů směrem k tunelu).

Naměřená data metodou radarové interferometrie byla zpracována v programu IBIS Data Viewer v. 03.05.002. Na profilu odrazivosti obou radarů (Obr. 11) byla vybrána výrazná maxima, která odpovídají poloze ocelových příčníků mostní konstrukce. Podle rozmístění těchto maxim byly zvoleny radiální spádové oblasti Rbin. Přitom byly vybrány jen ty body, které mají dostatečnou sílu signálu na obou radarech. Vybrané příčníky jsou barevně zvýrazněny na Obr. 12.



Obr. 11 – Profil odrazivosti signálu radaru R<sub>1</sub> a R<sub>2</sub>

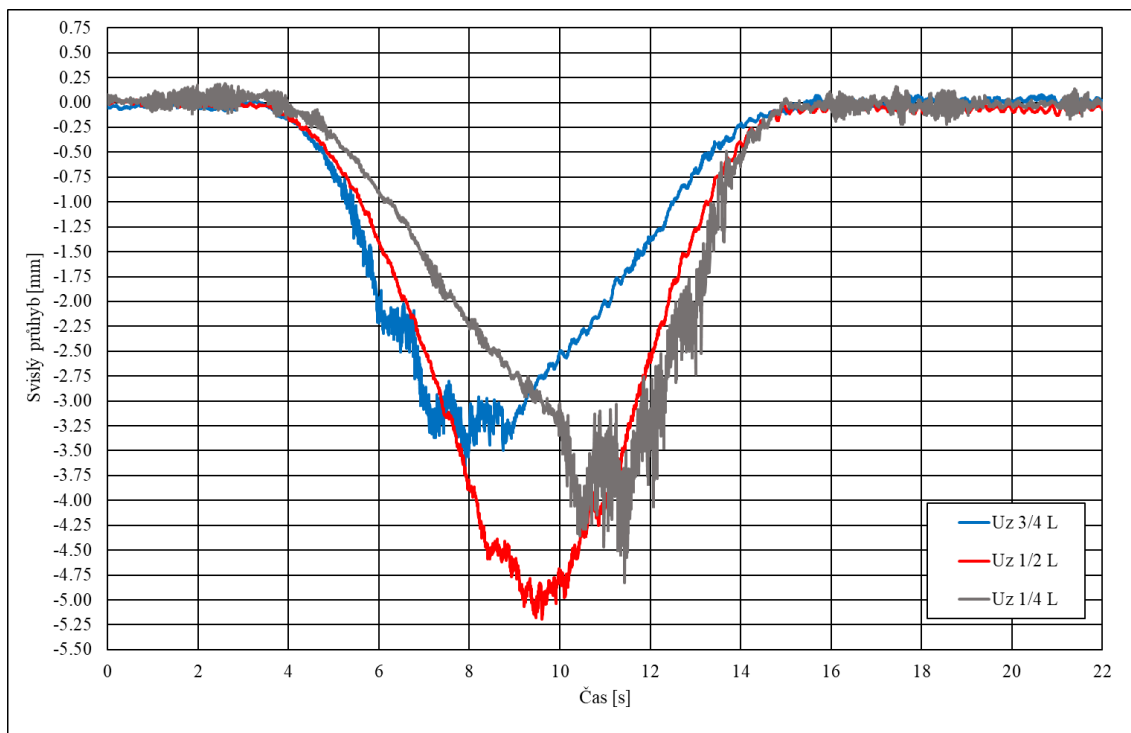


Obr. 12 – 3D model mostu s barevně zvýrazněnými Rbiny pro radary  $R_1$  a  $R_2$ , které se vyhodnocovaly

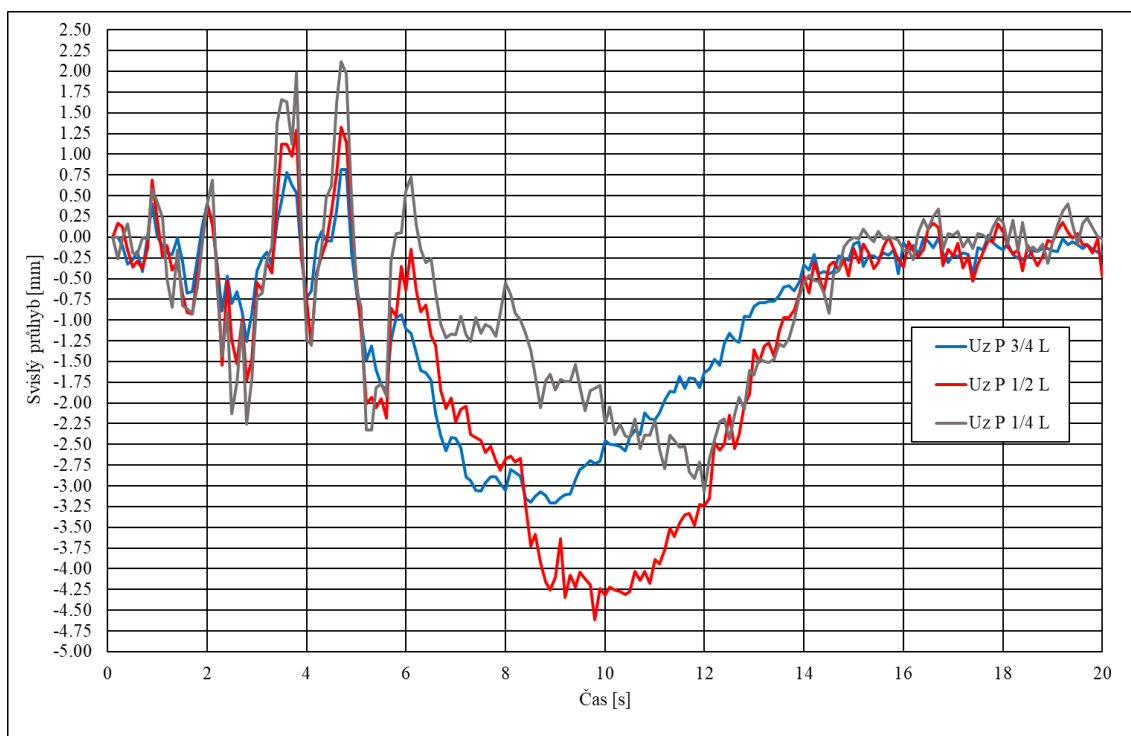
### 5. Vyhodnocené výsledky experimentu – přejezdy železničních souprav

V této kapitole jsou uvedeny vybrané výsledky popisovaného experimentu a výsledky získané jednotlivými měřicími systémy, které jsou popsány výše. V první části této kapitoly jsou upracovány záznamy vynuceného kmitání mostu pořízené při deseti vybraných přejezdech železničních souprav, v druhé části jsou uvedeny výsledky experimentální modální analýzy.

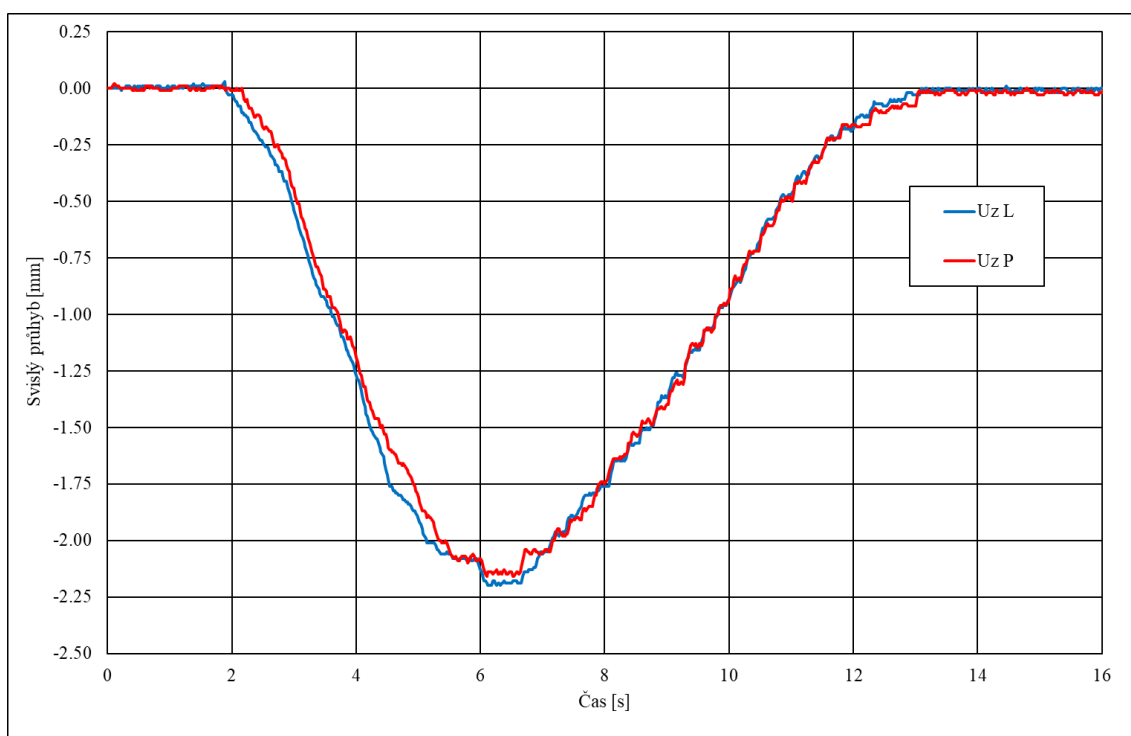
## Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu v cca 16:17 :



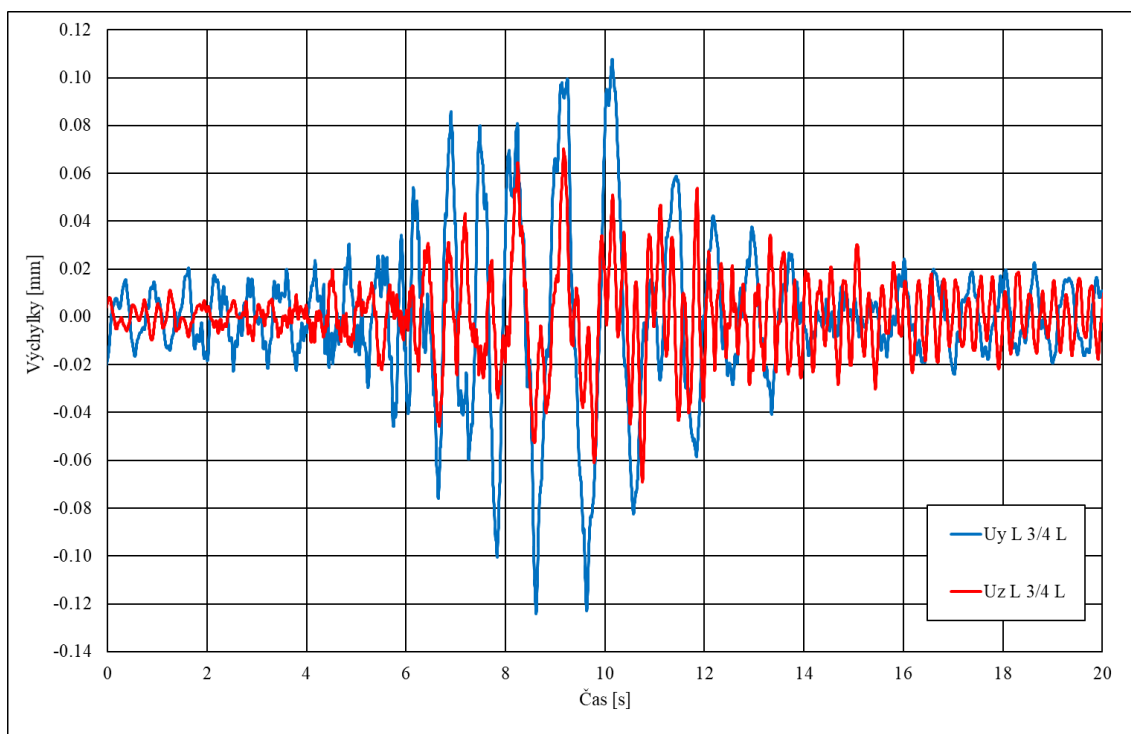
Obr. 13 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



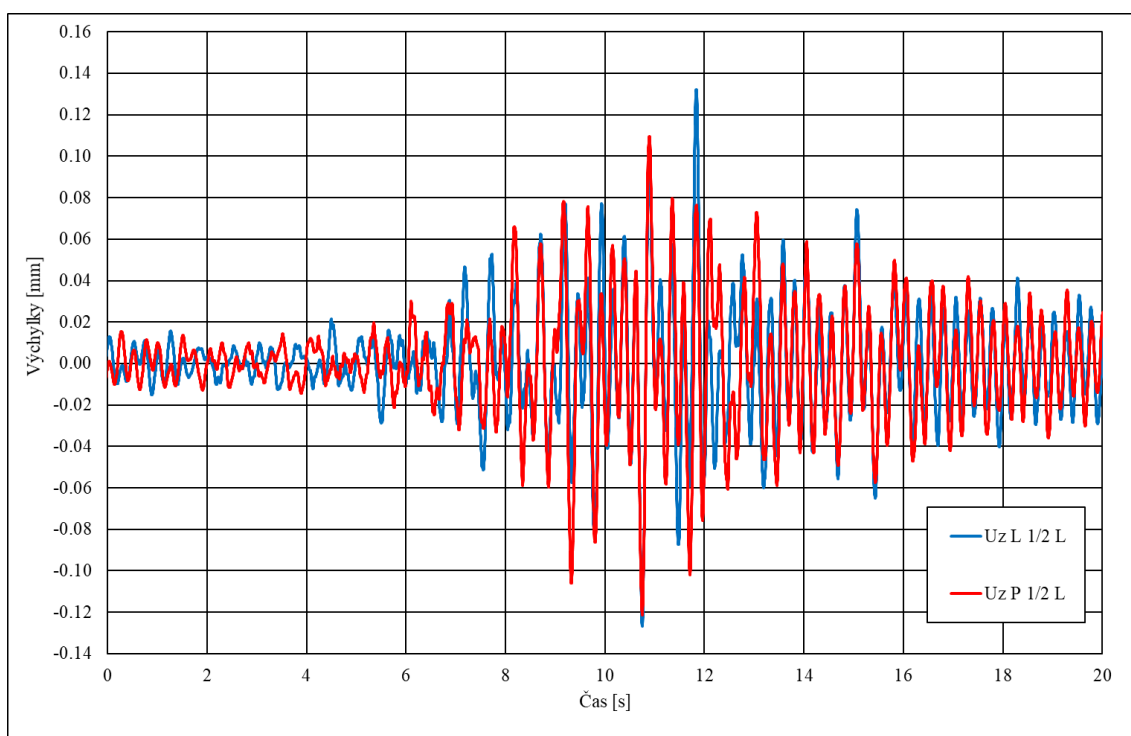
Obr. 14 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



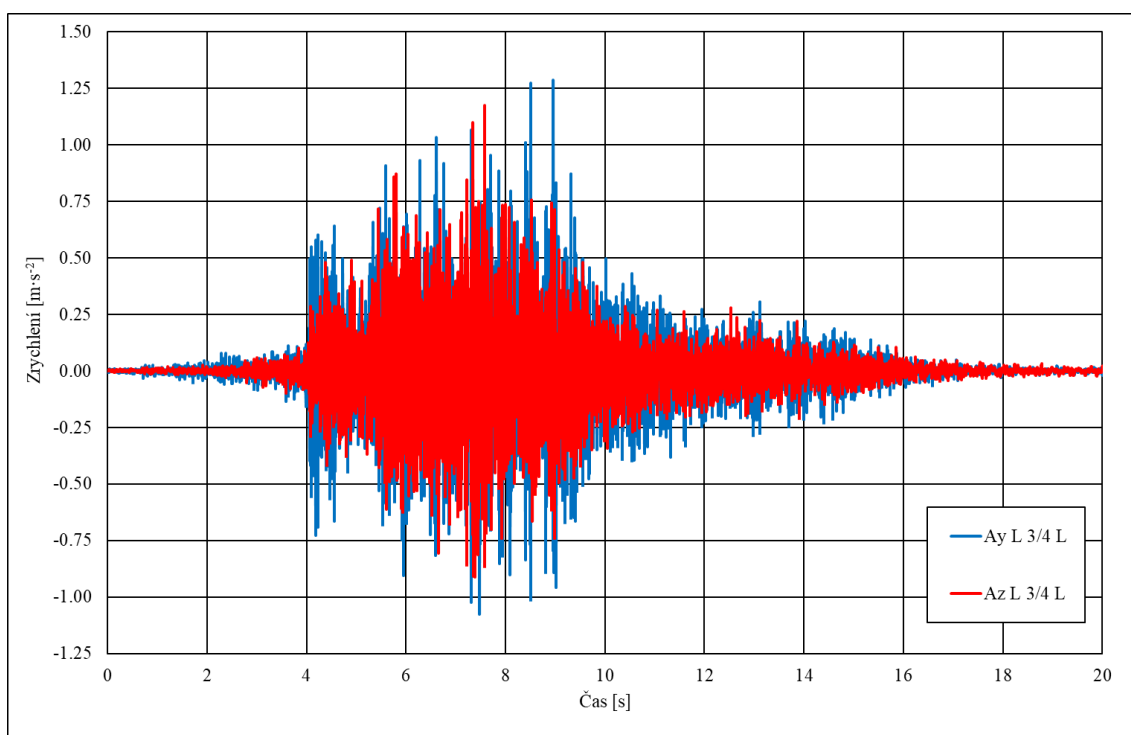
Obr. 15 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



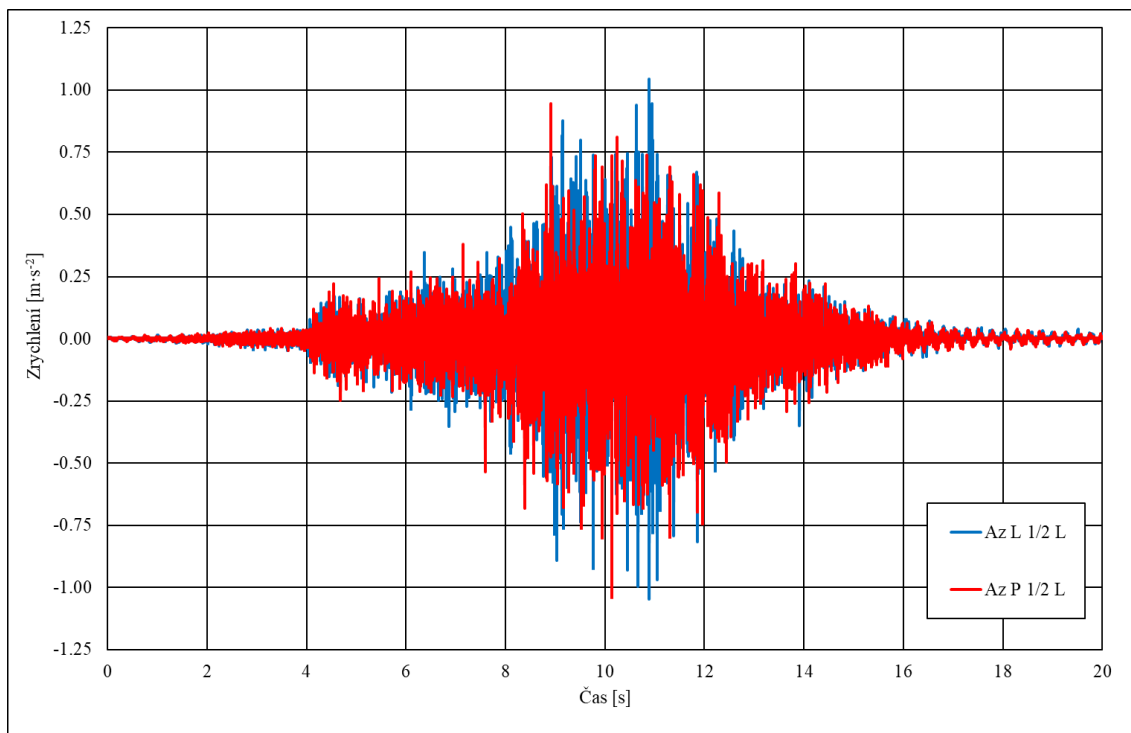
Obr. 16 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 17 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, svislé výchyly získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.

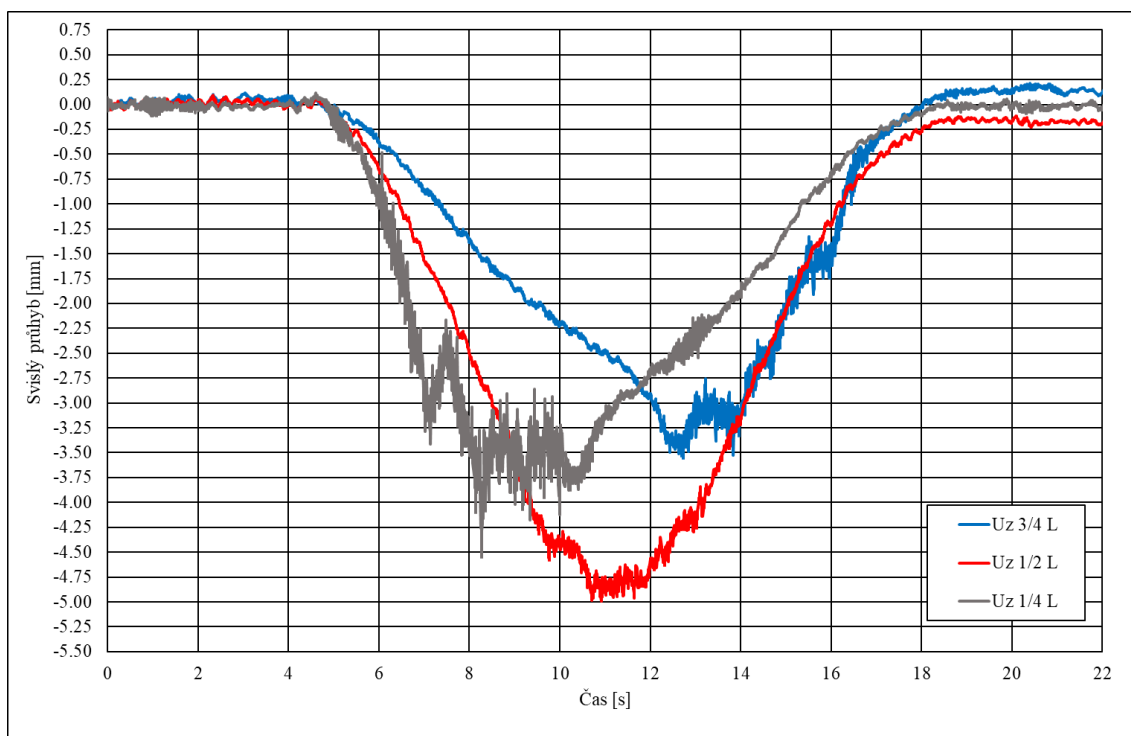


Obr. 18 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

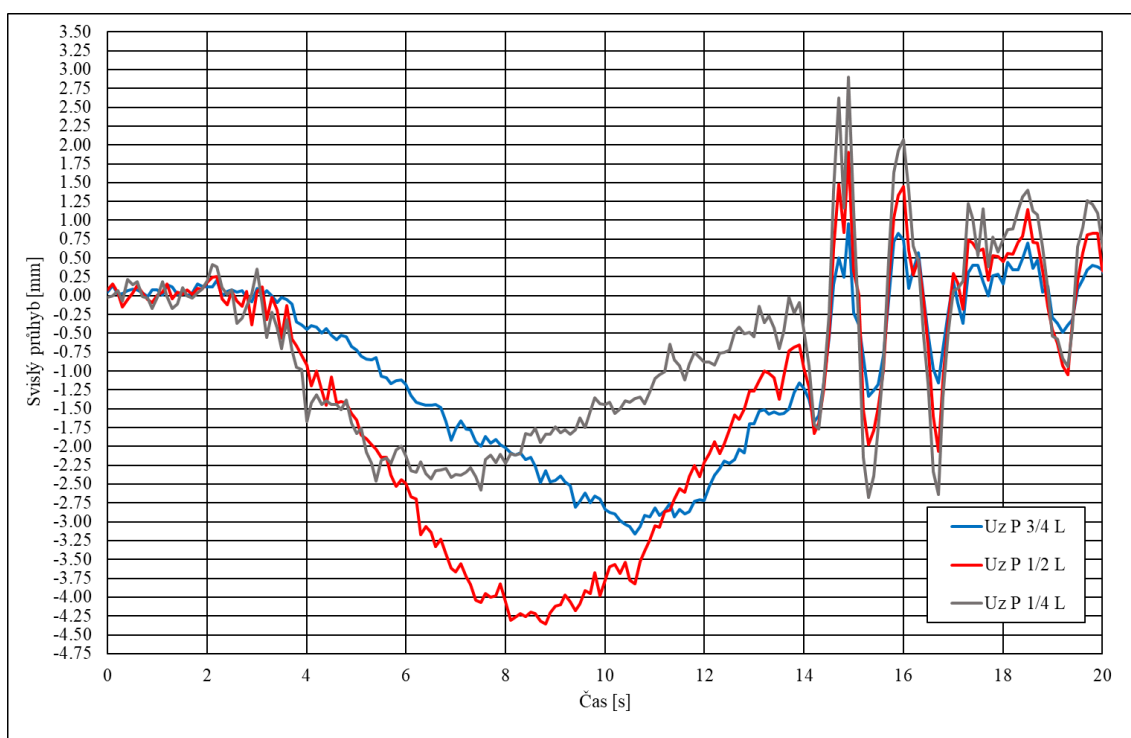


Obr. 19 – Přejezd železniční soupravy č. 01 proti směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

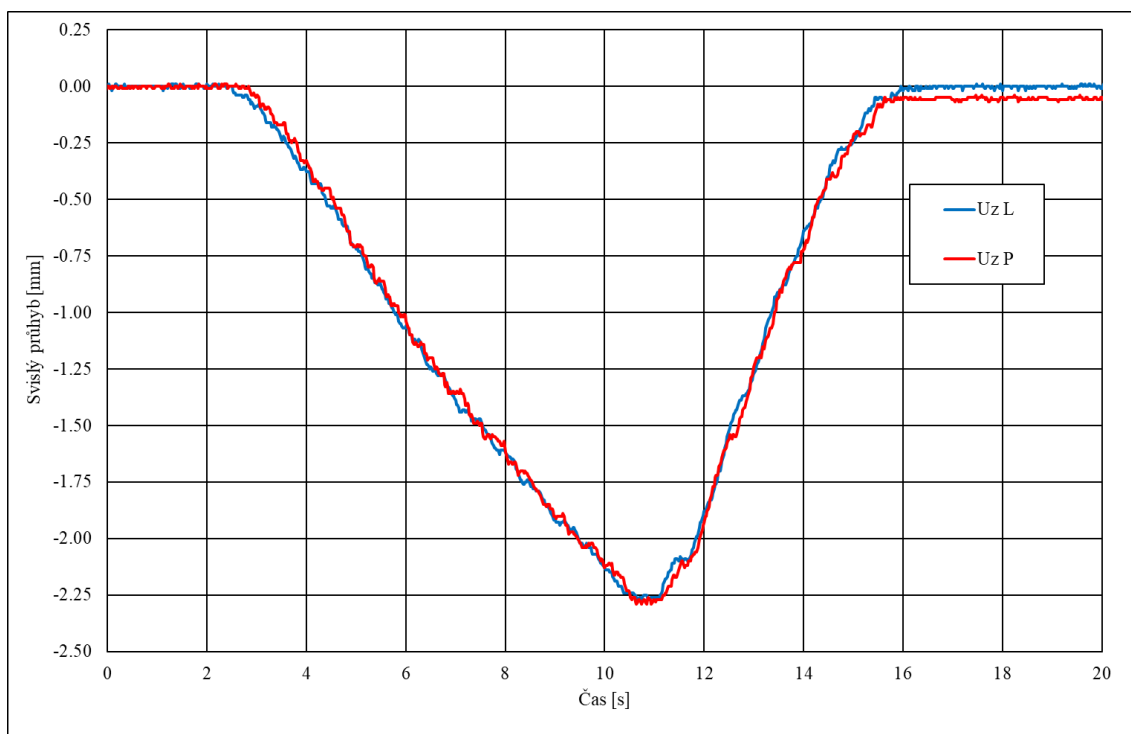
**Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu v cca 16:22:**



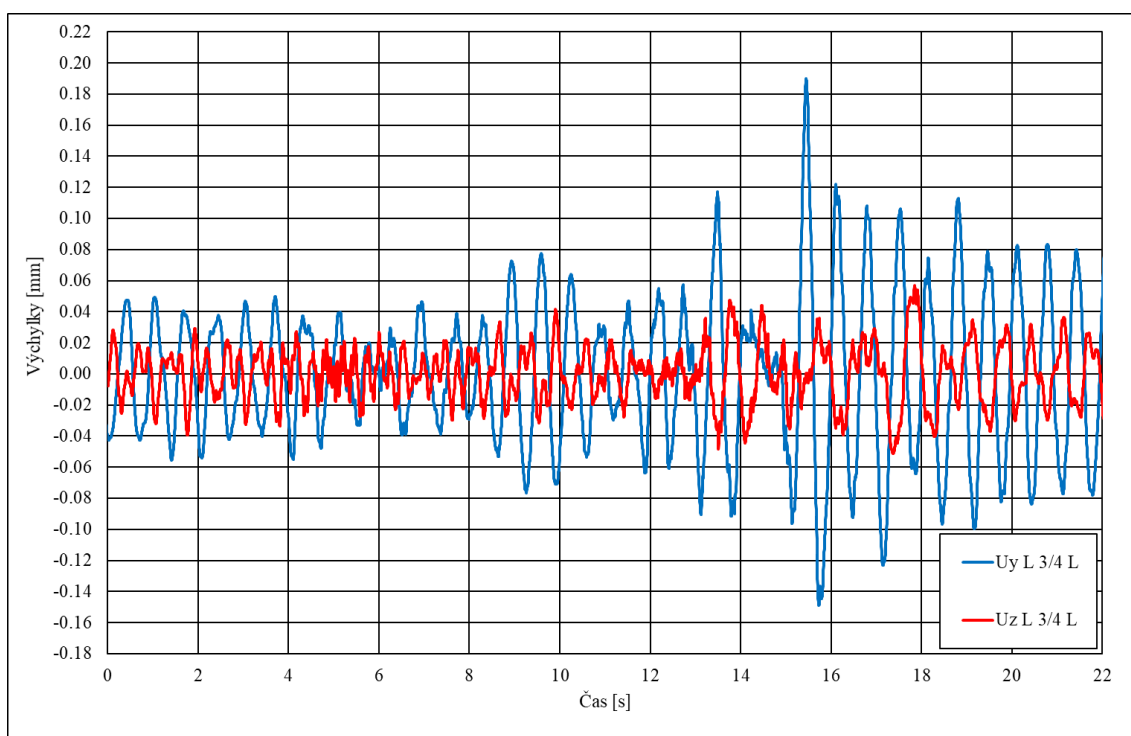
Obr. 20 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



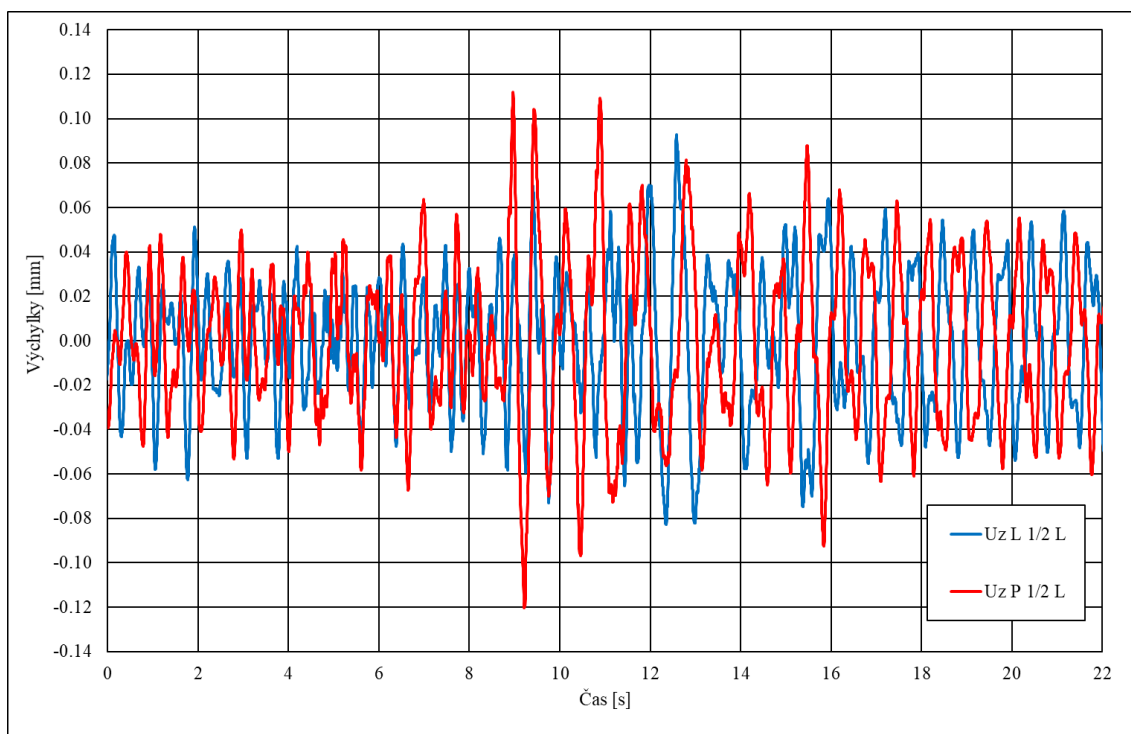
Obr. 21 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



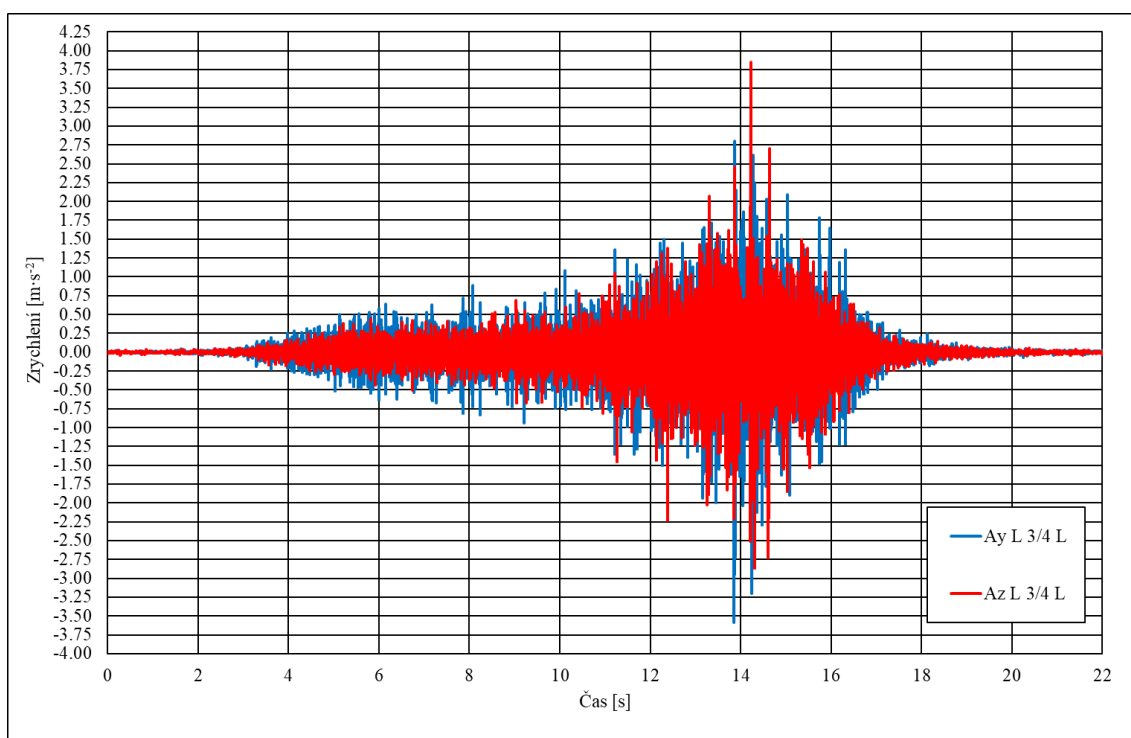
Obr. 22 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



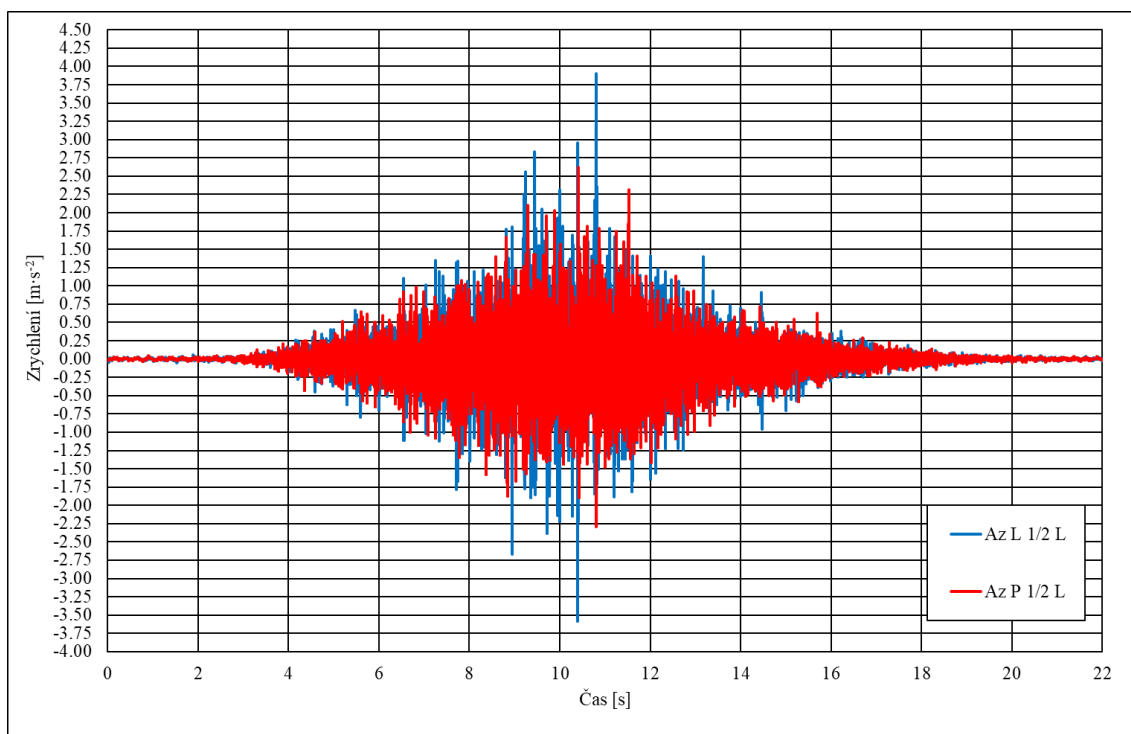
Obr. 23 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 24 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, svislé výchylky získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.

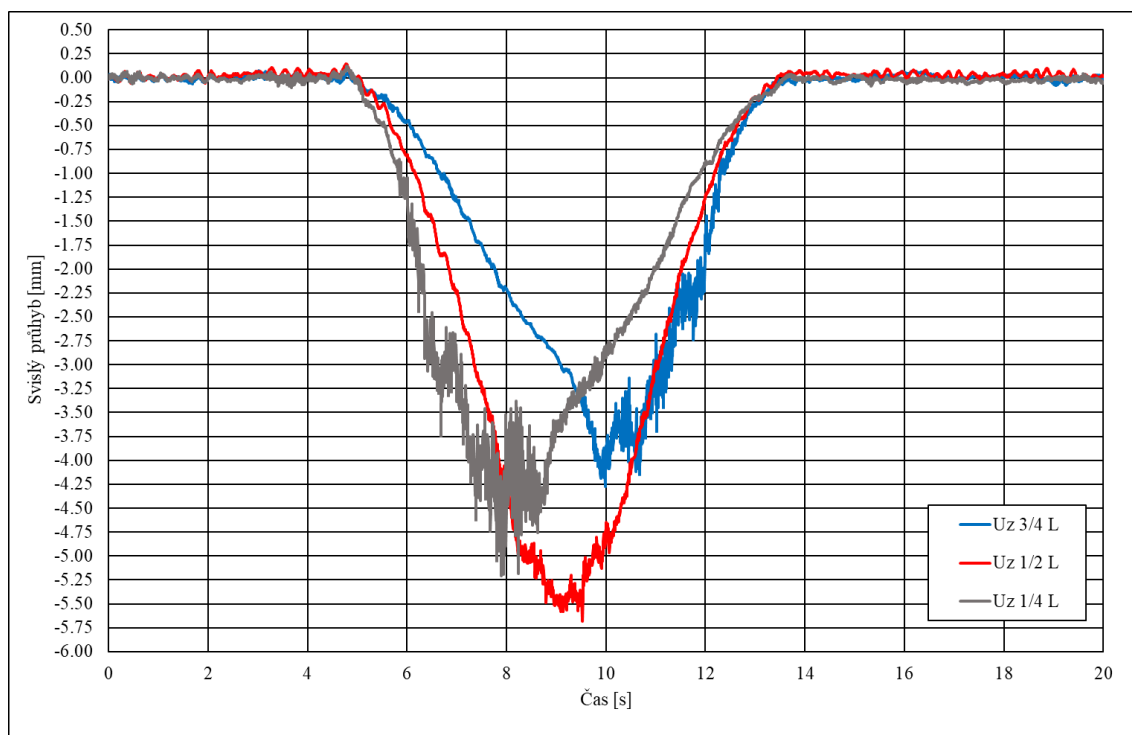


Obr. 25 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

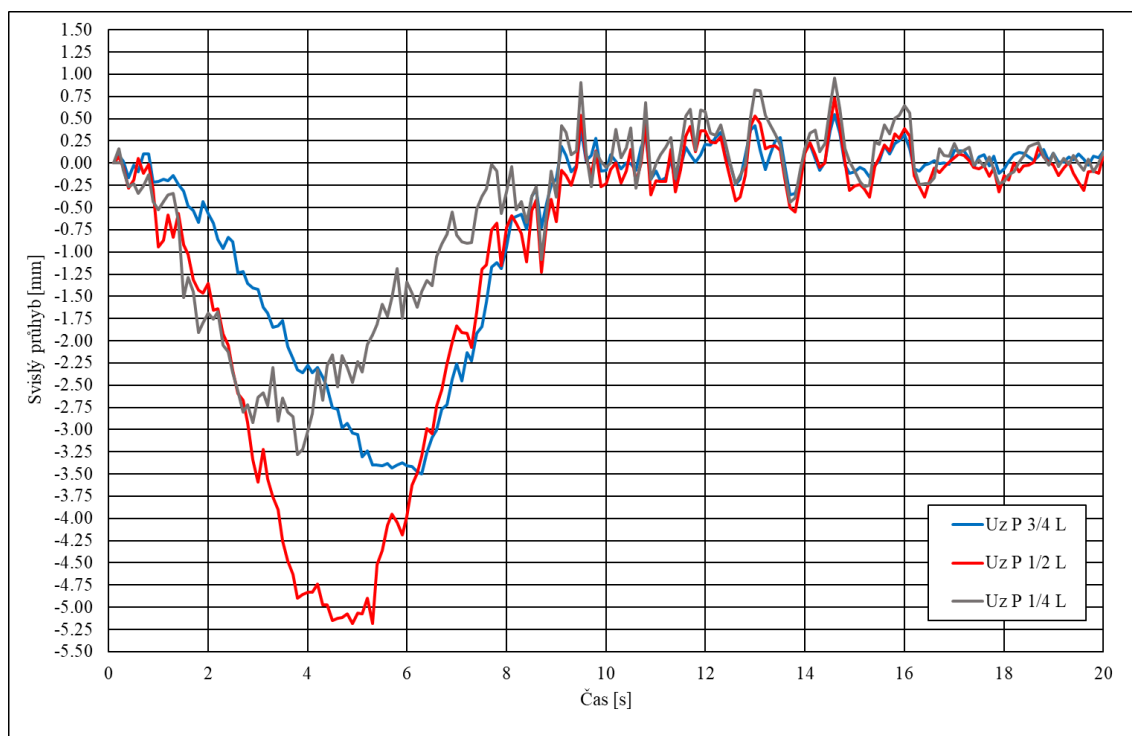


Obr. 26 – Přejezd železniční soupravy č. 02 ve směru staničení mostu, svislá zrychlení měřena absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

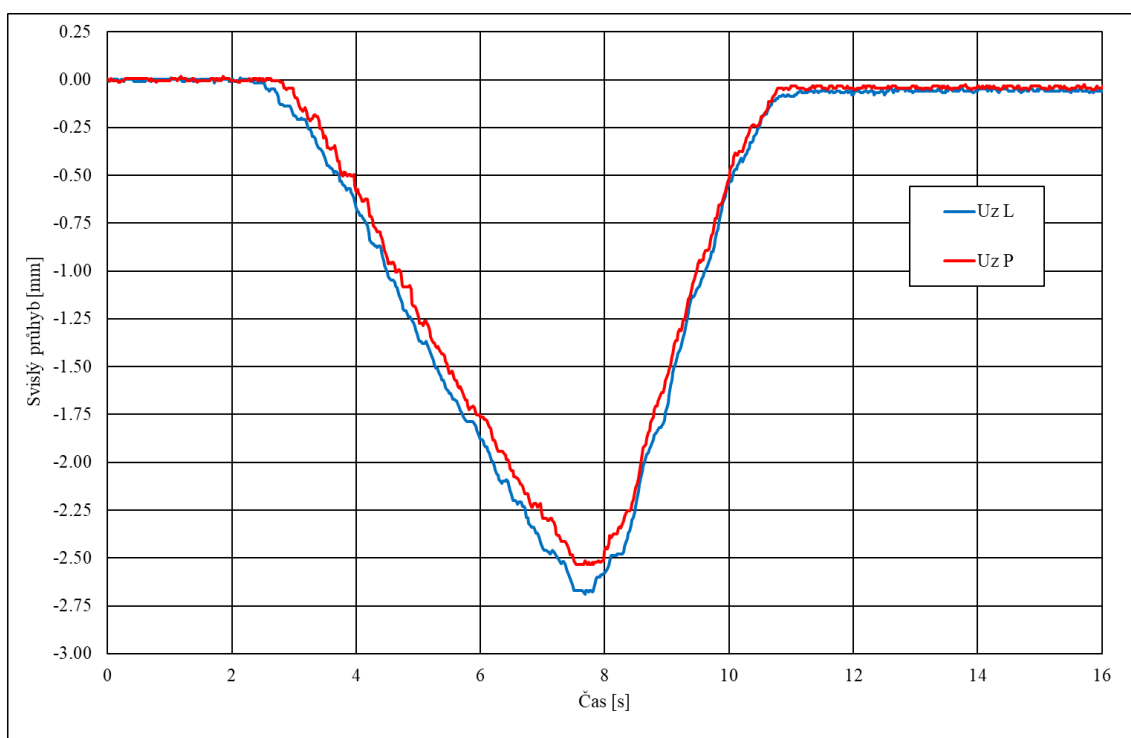
## Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu v cca 16:26 :



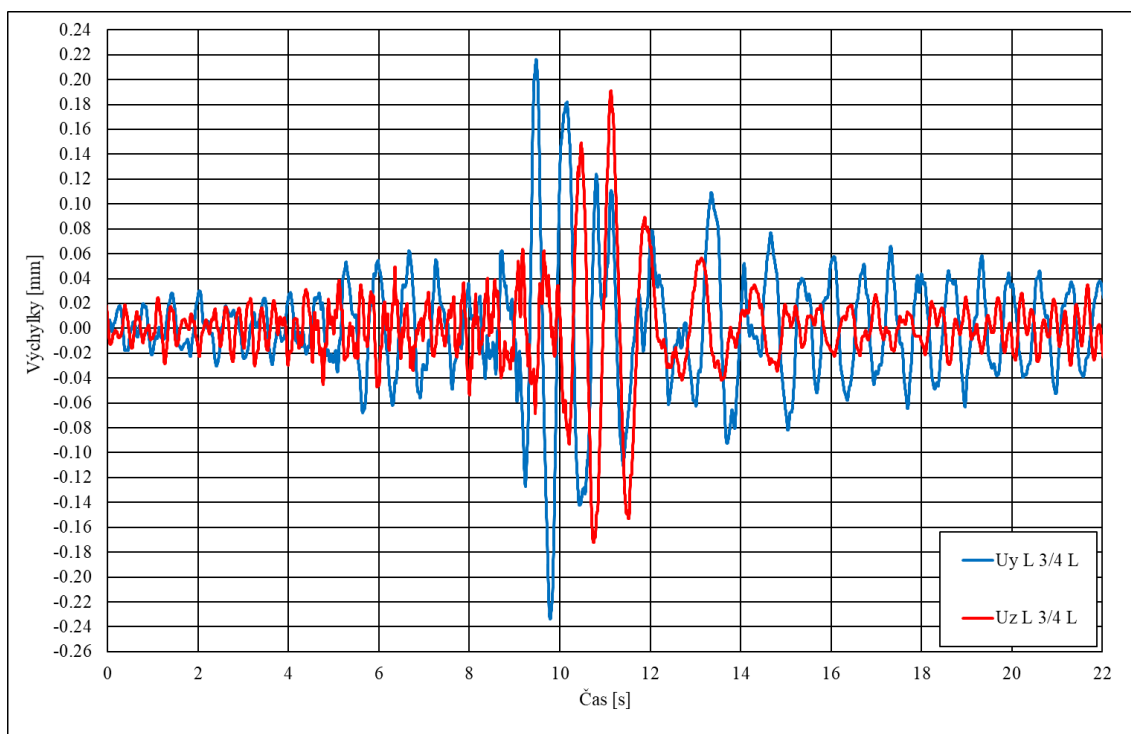
Obr. 27 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



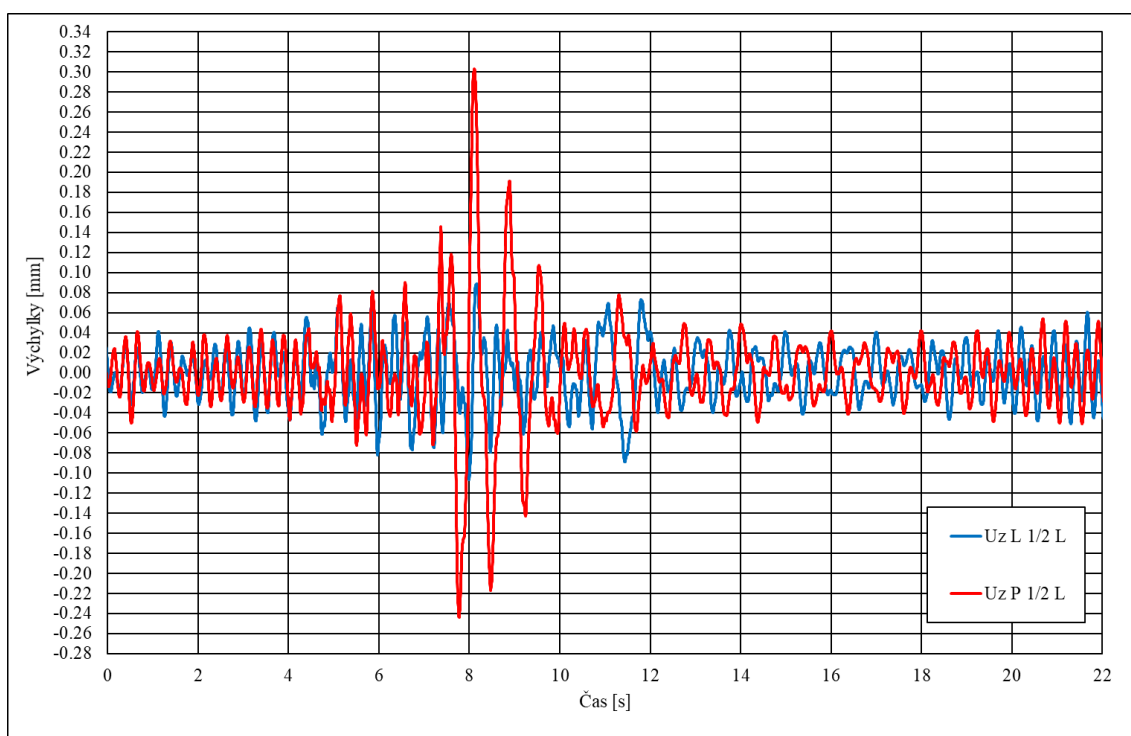
Obr. 28 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



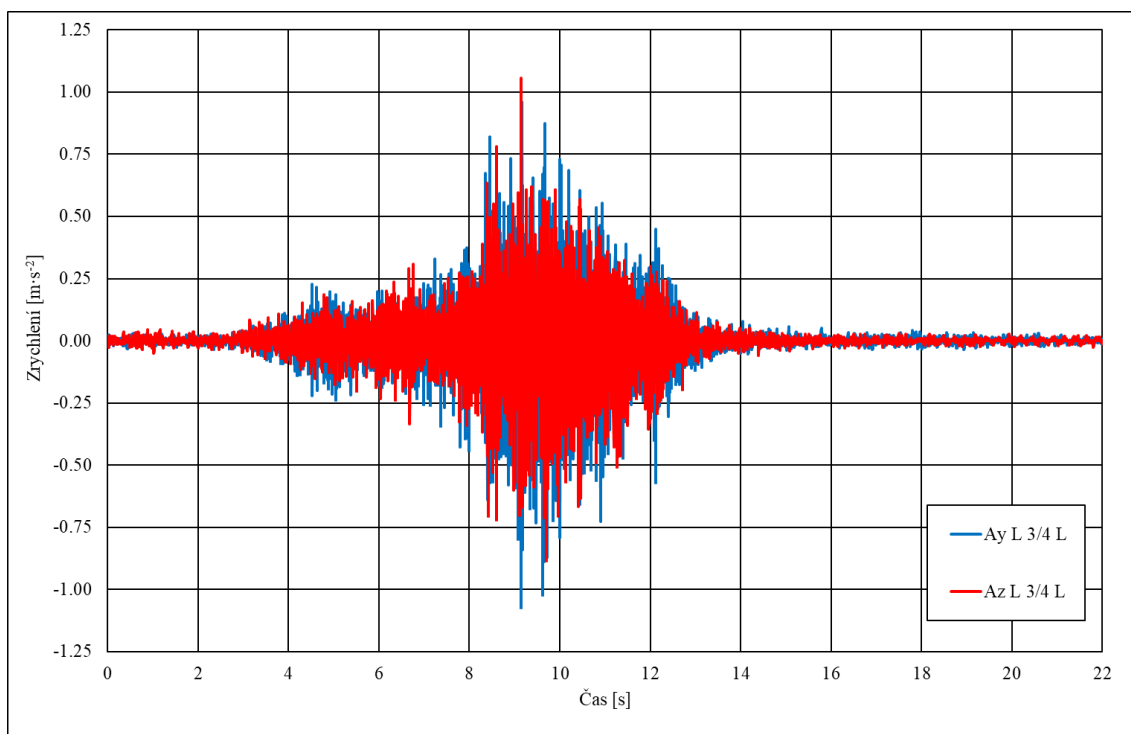
Obr. 29 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



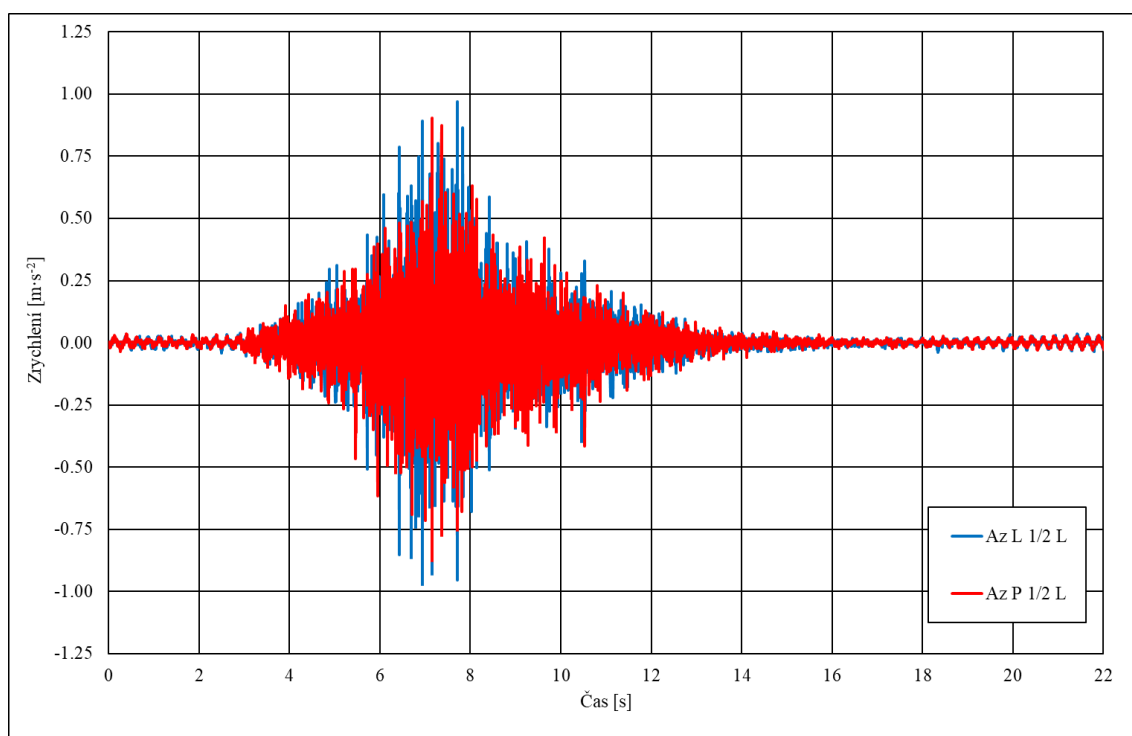
Obr. 30 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 31 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, svislé výchyly získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.



Obr. 32 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

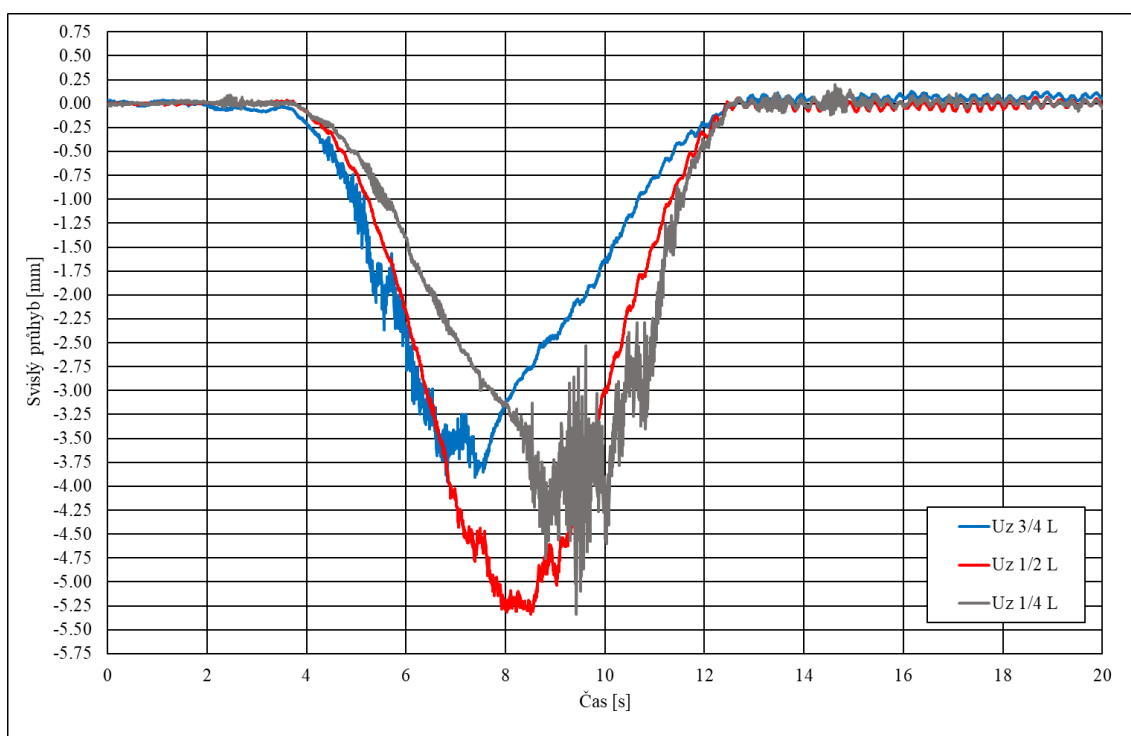


Obr. 33 – Přejezd železniční soupravy č. 03 ve směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

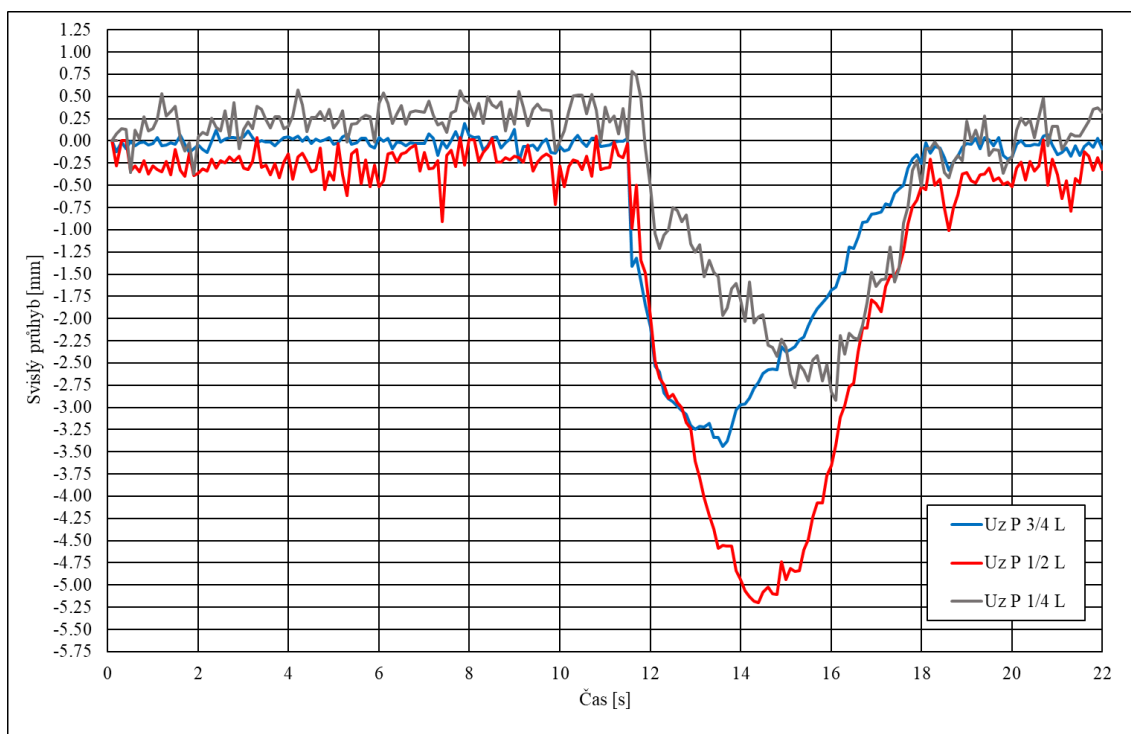
Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu v cca 17:55 :



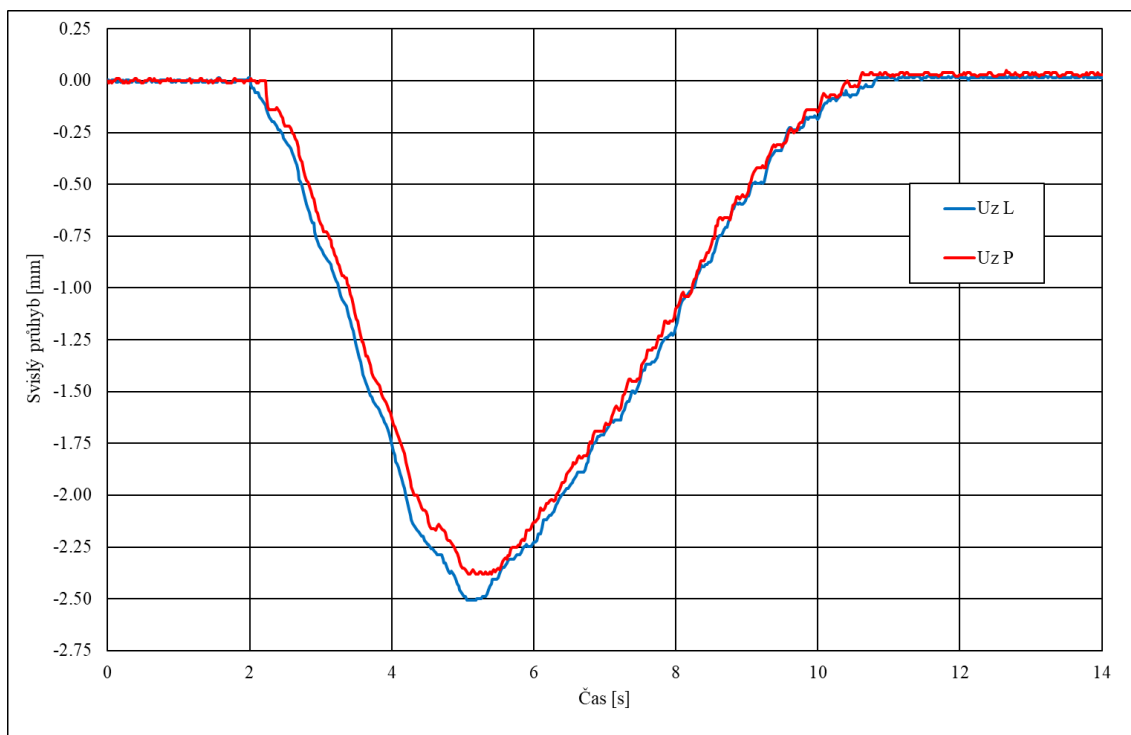
*Obr. 34 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, pohled na čelo soupravy před vjezdem na most a pohled na zadní část soupravy na mostu.*



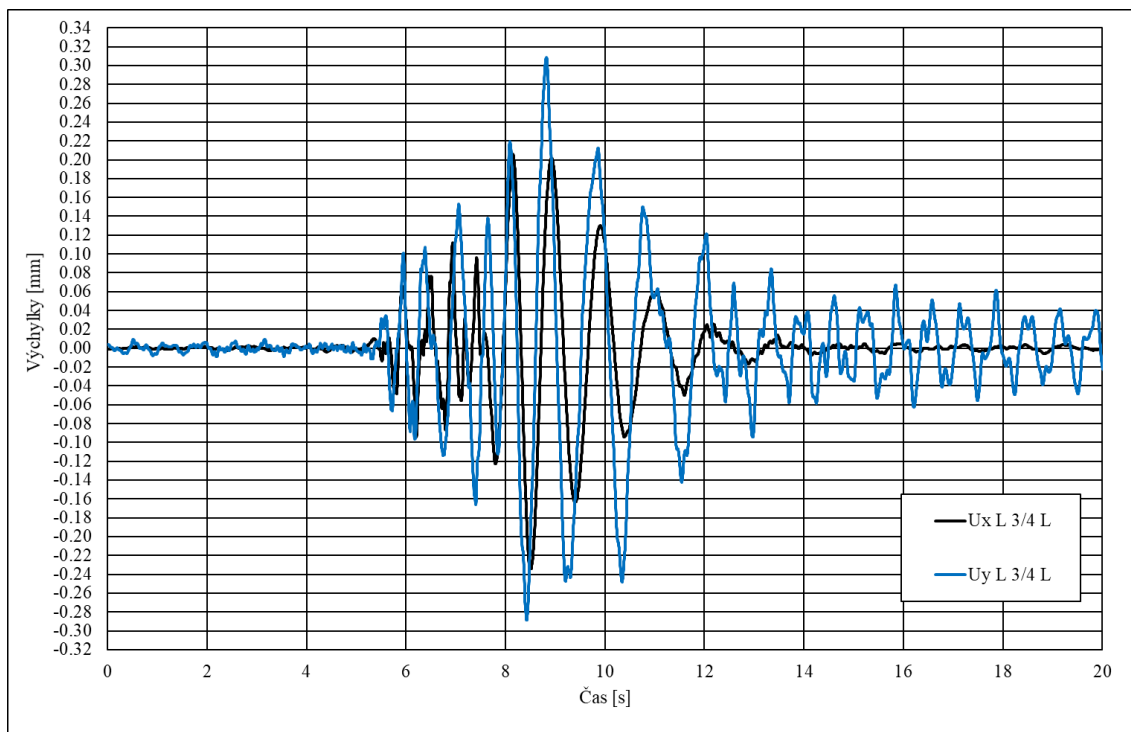
Obr. 35 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



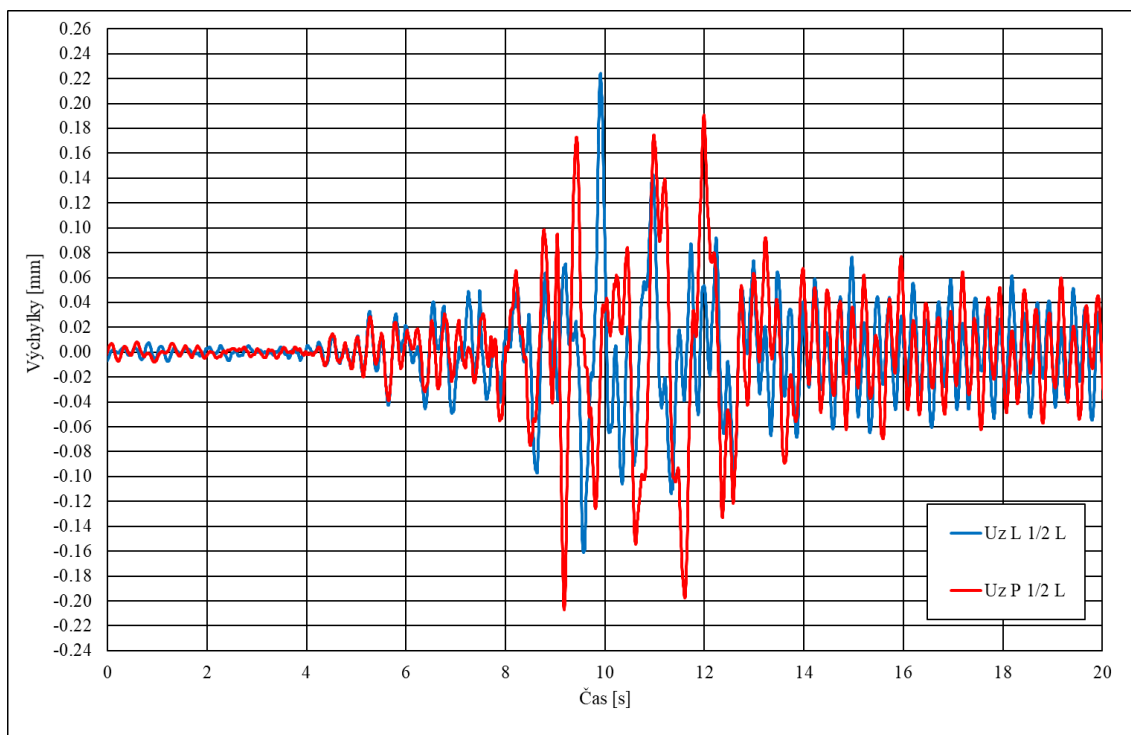
Obr. 36 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



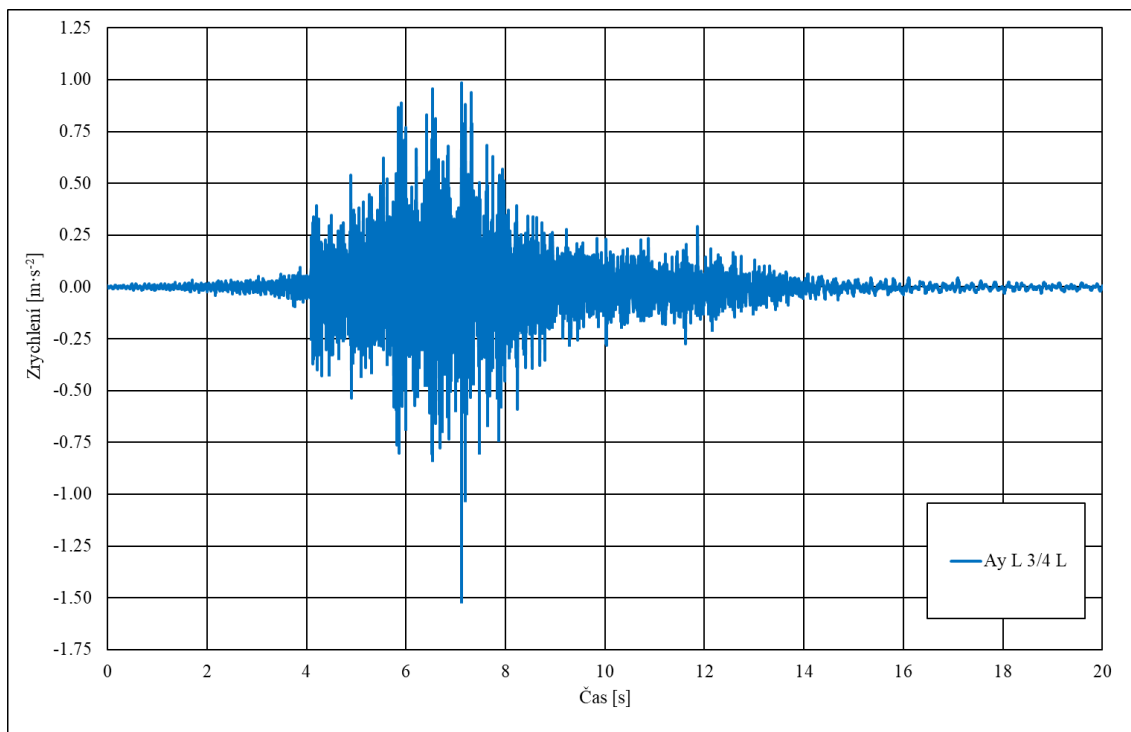
Obr. 37 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



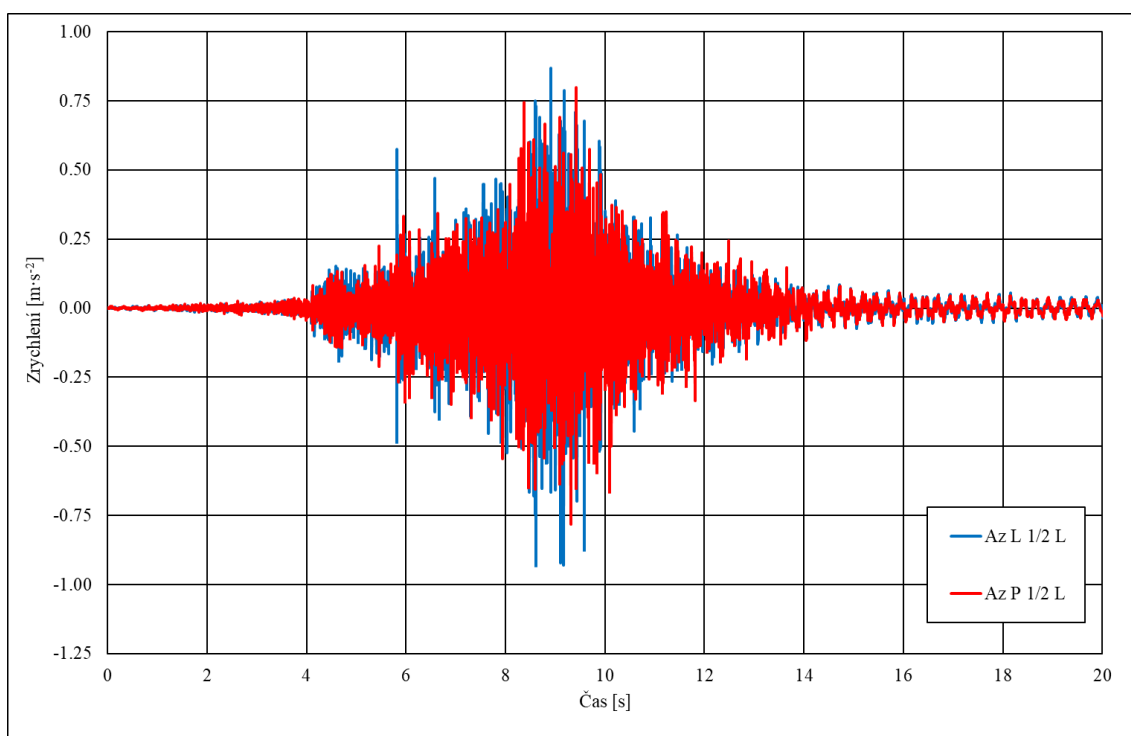
Obr. 38 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, vodorovné výchytky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 39 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, svislé výchyly získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.



Obr. 40 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

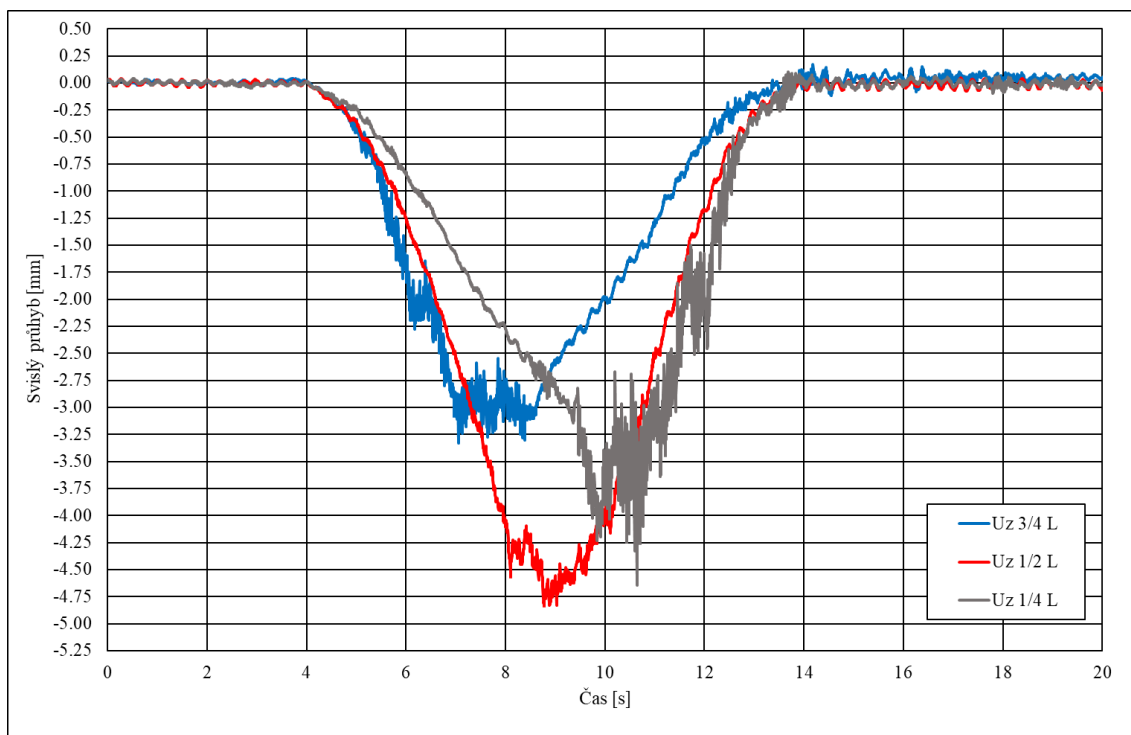


Obr. 41 – Přejezd železniční soupravy č. 04 proti směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

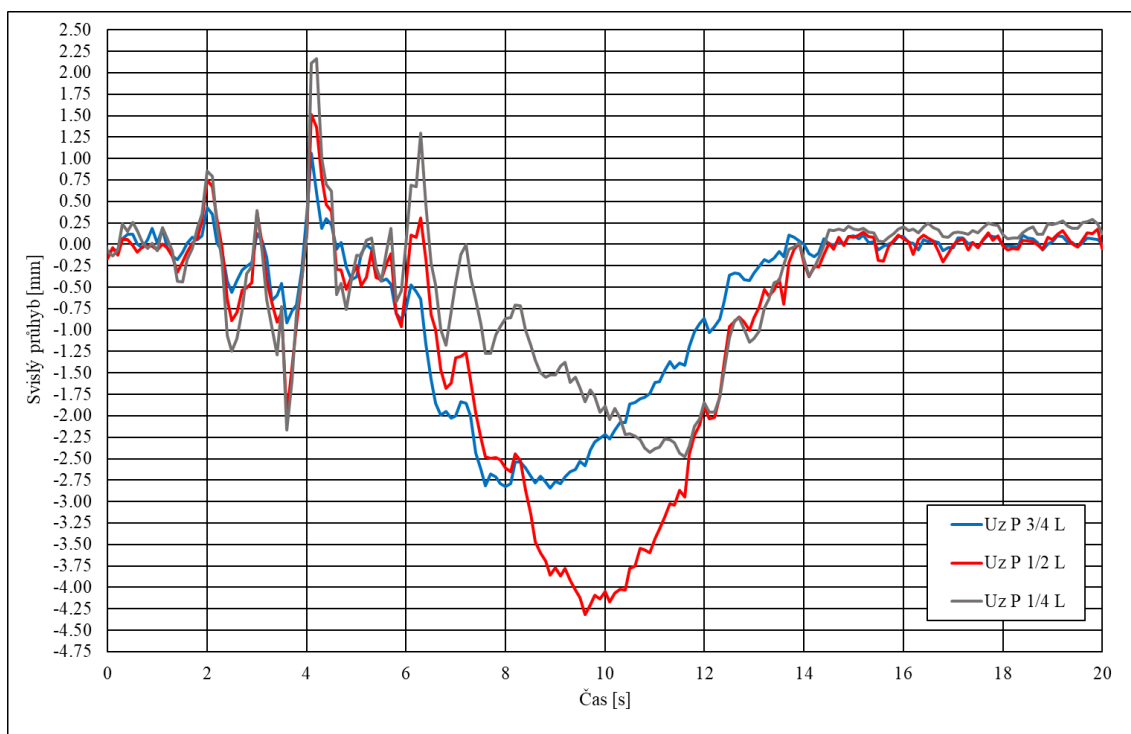
Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu v cca 18:02 :



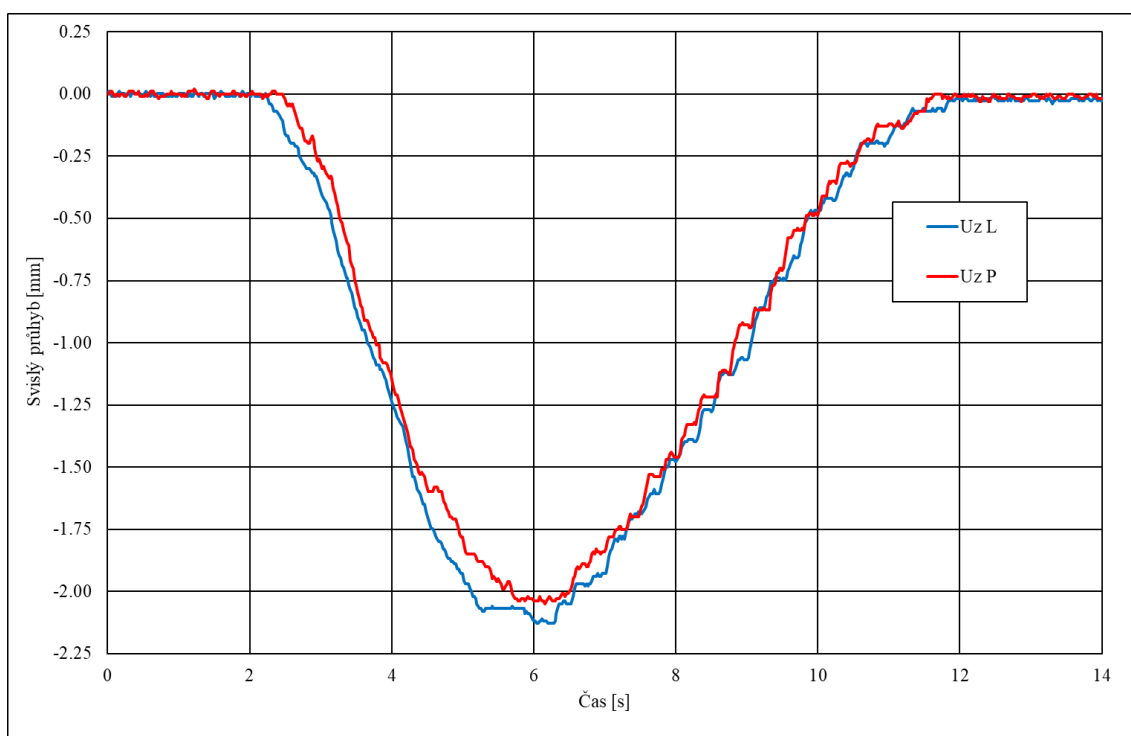
*Obr. 42 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, pohled na čelo soupravy před vjezdem na most a pohled na zadní část soupravy na mostu.*



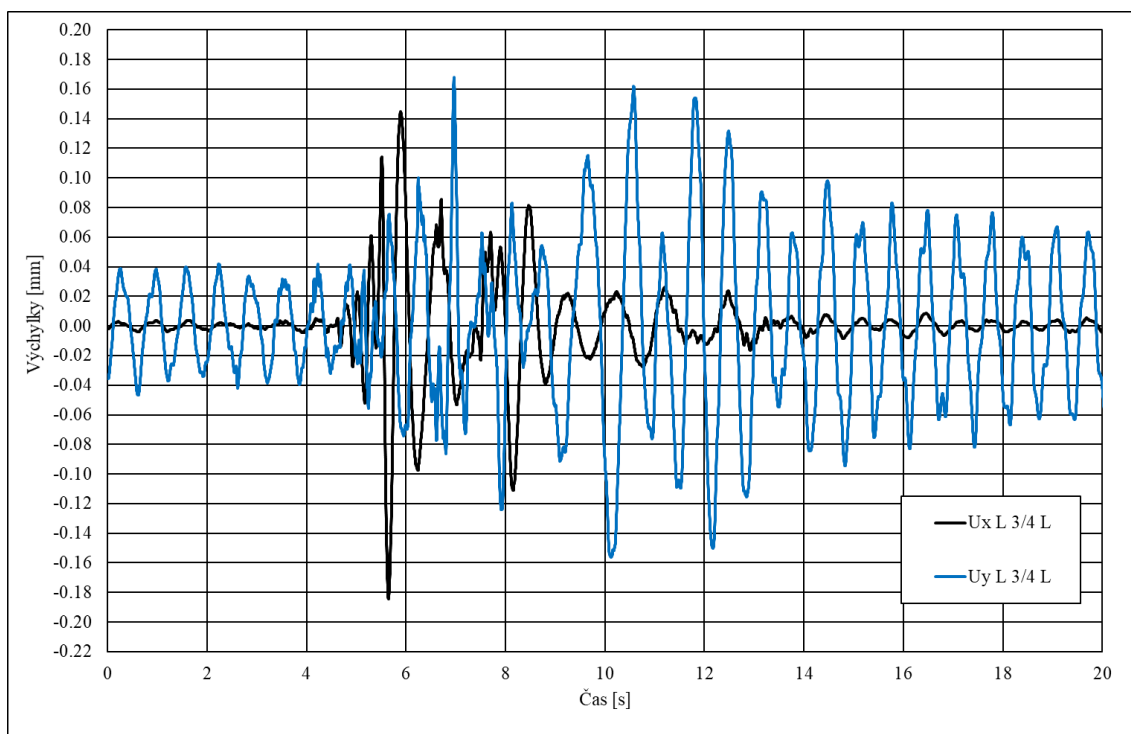
Obr. 43 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



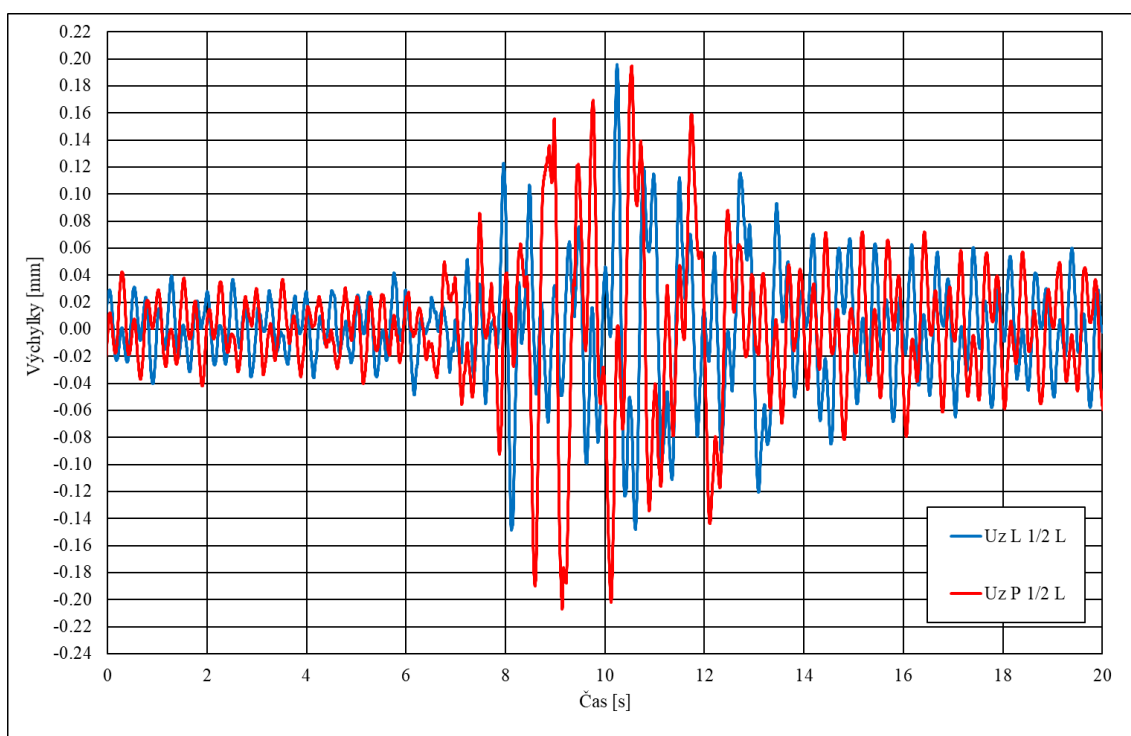
Obr. 44 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



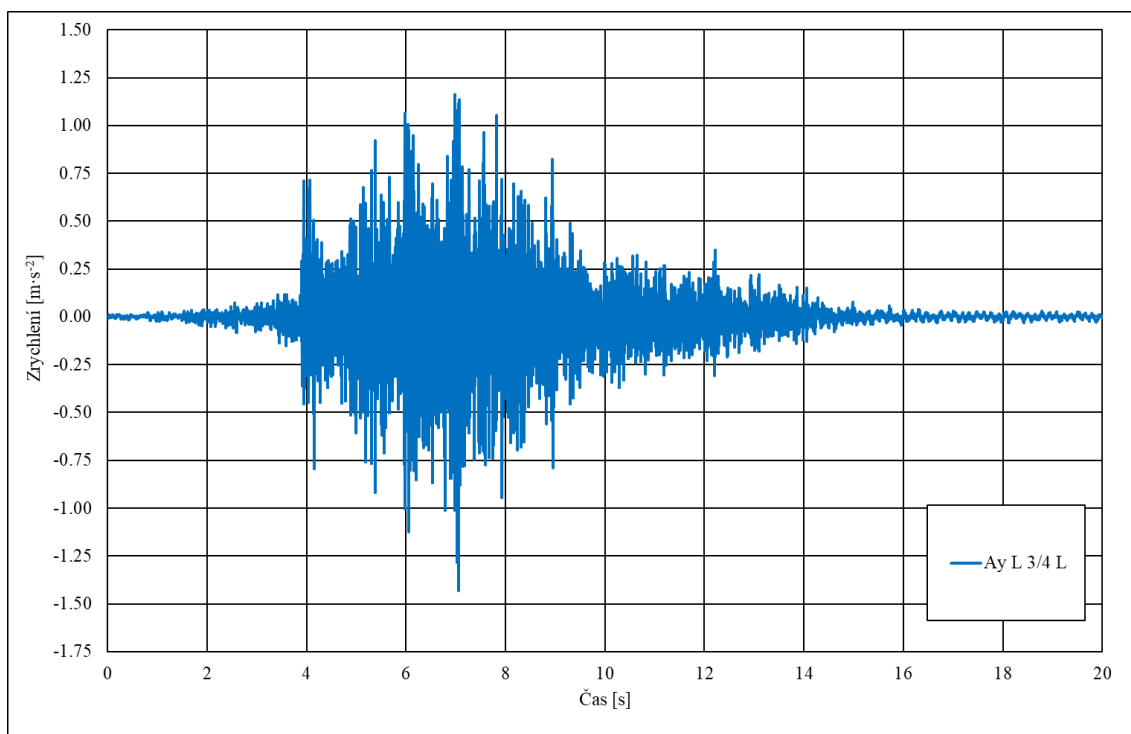
Obr. 45 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



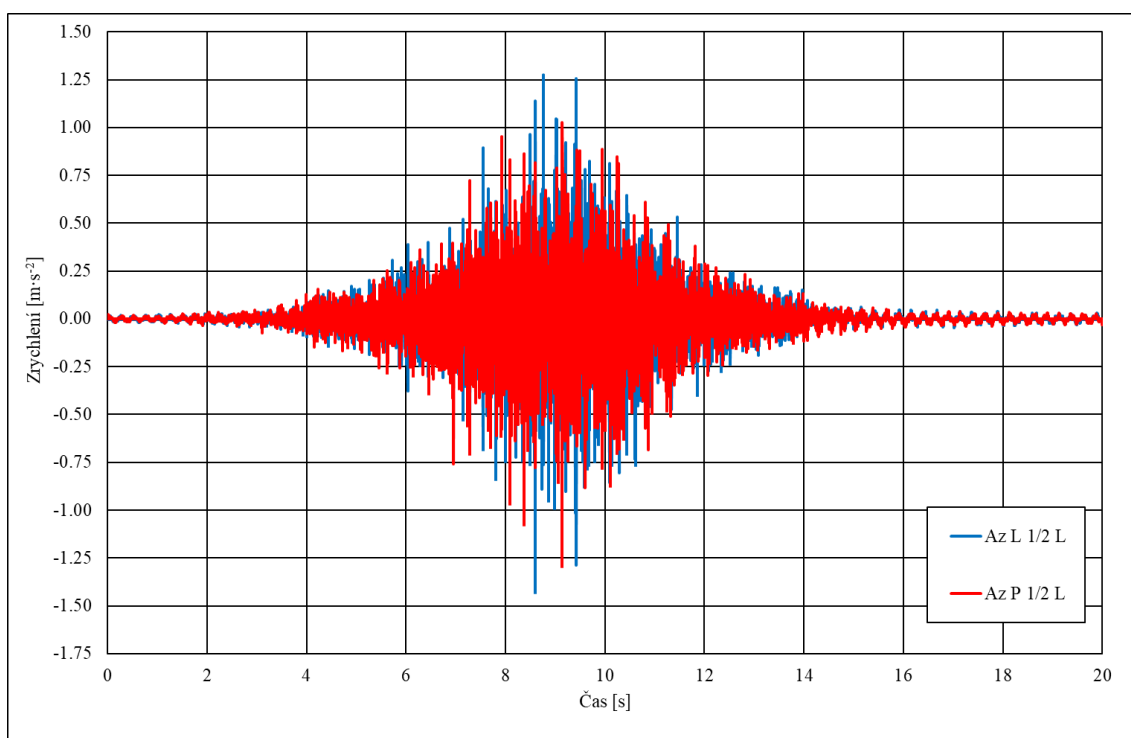
Obr. 46 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, vodorovné výchytky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 47 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, svislé výchylky získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.



Obr. 48 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

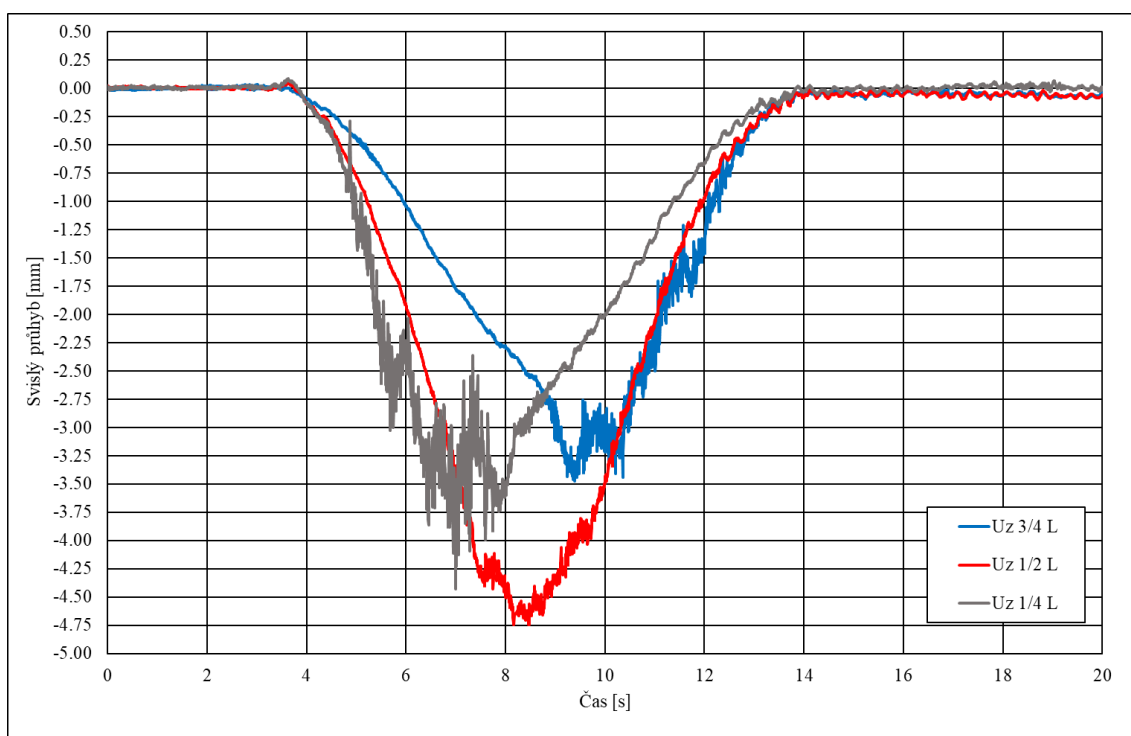


Obr. 49 – Přejezd železniční soupravy č. 05 proti směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

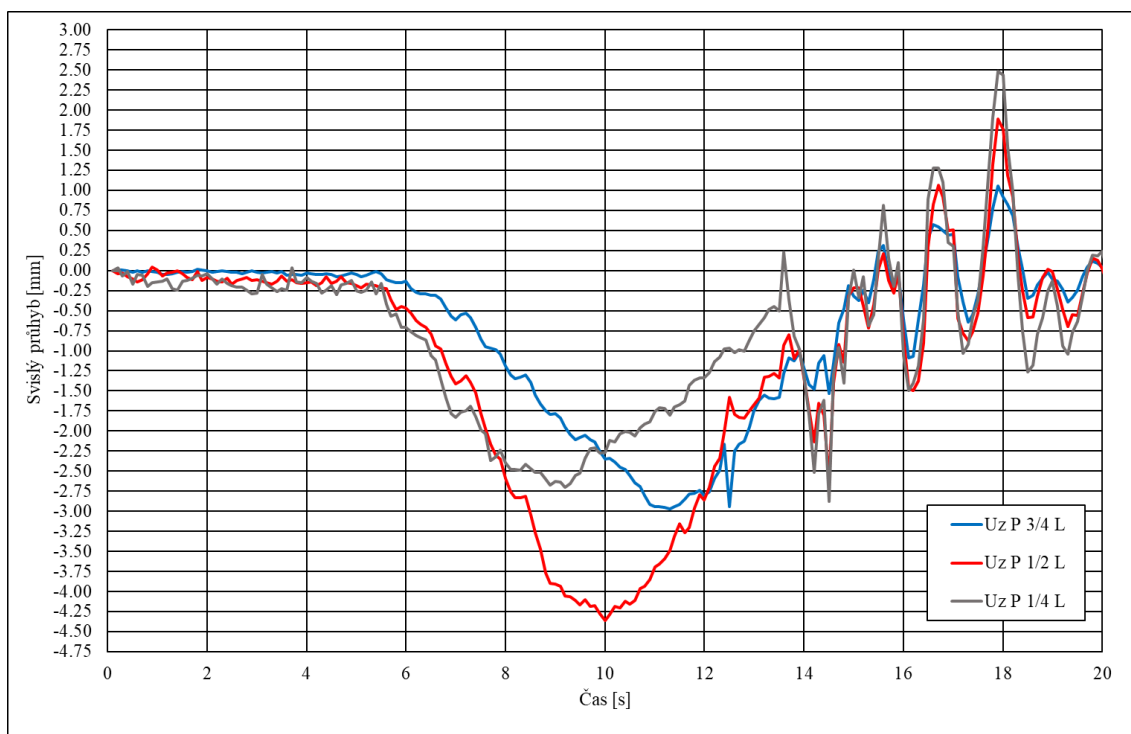
Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu v cca 18:08 :



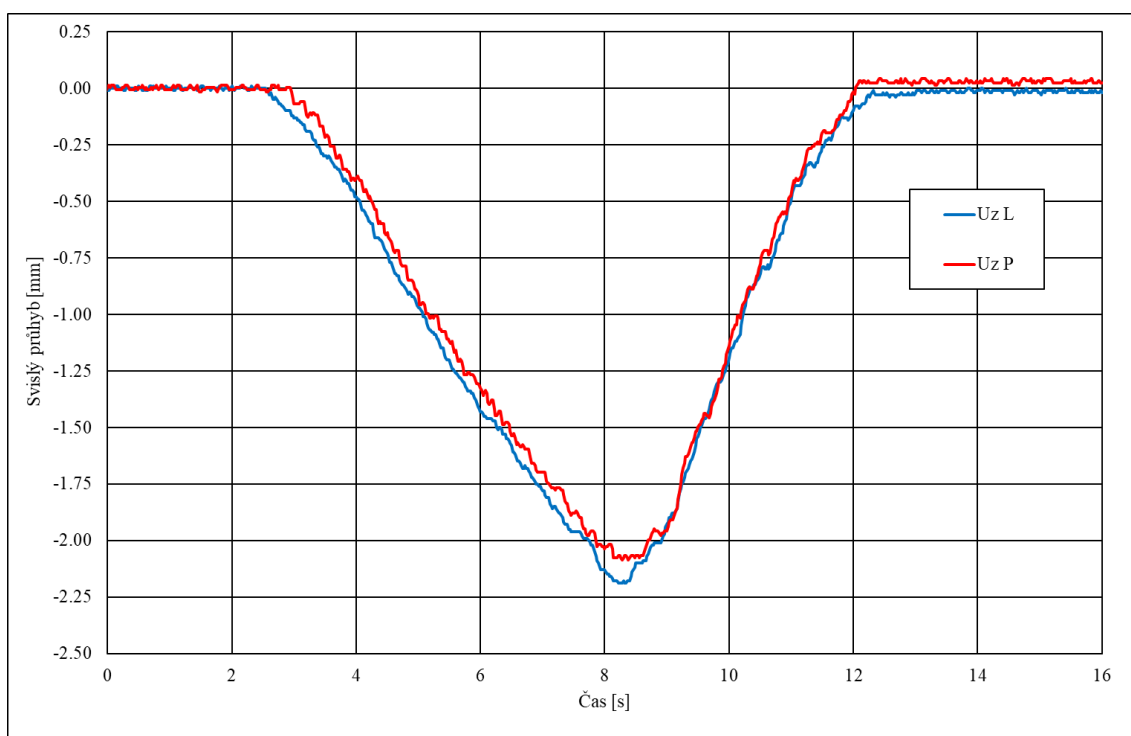
Obr. 50 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, pohled na čelo soupravy na mostu a pohled na zadní část soupravy za mostem.



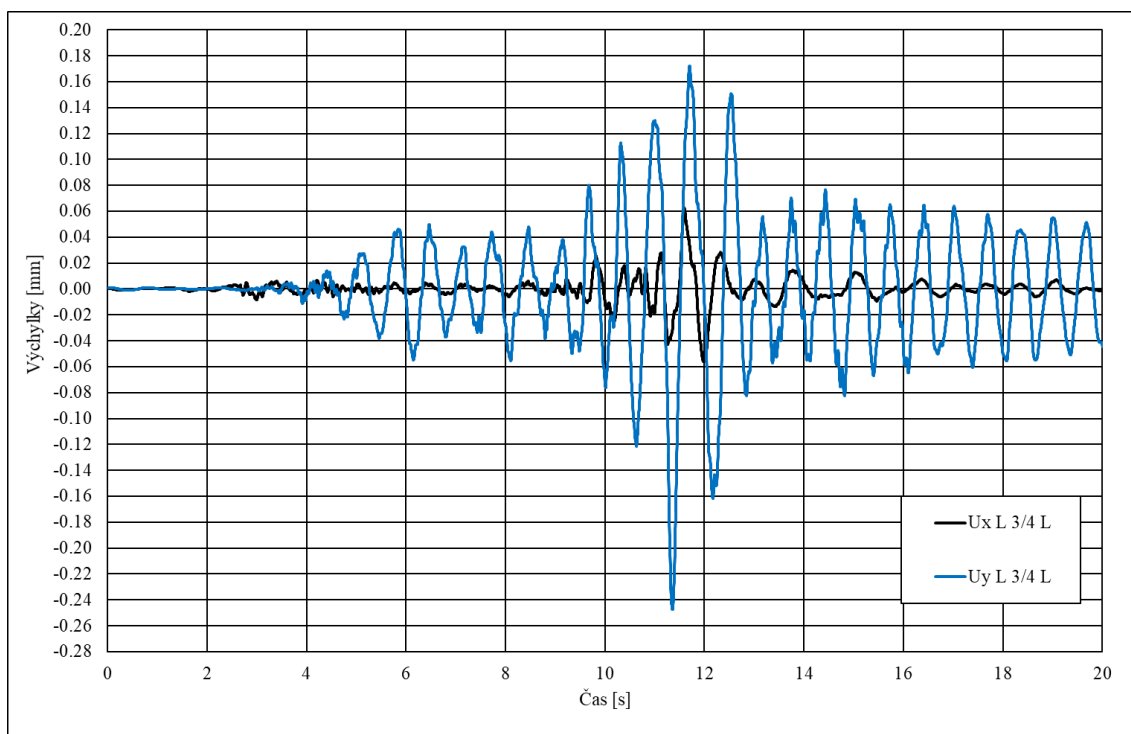
Obr. 51 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



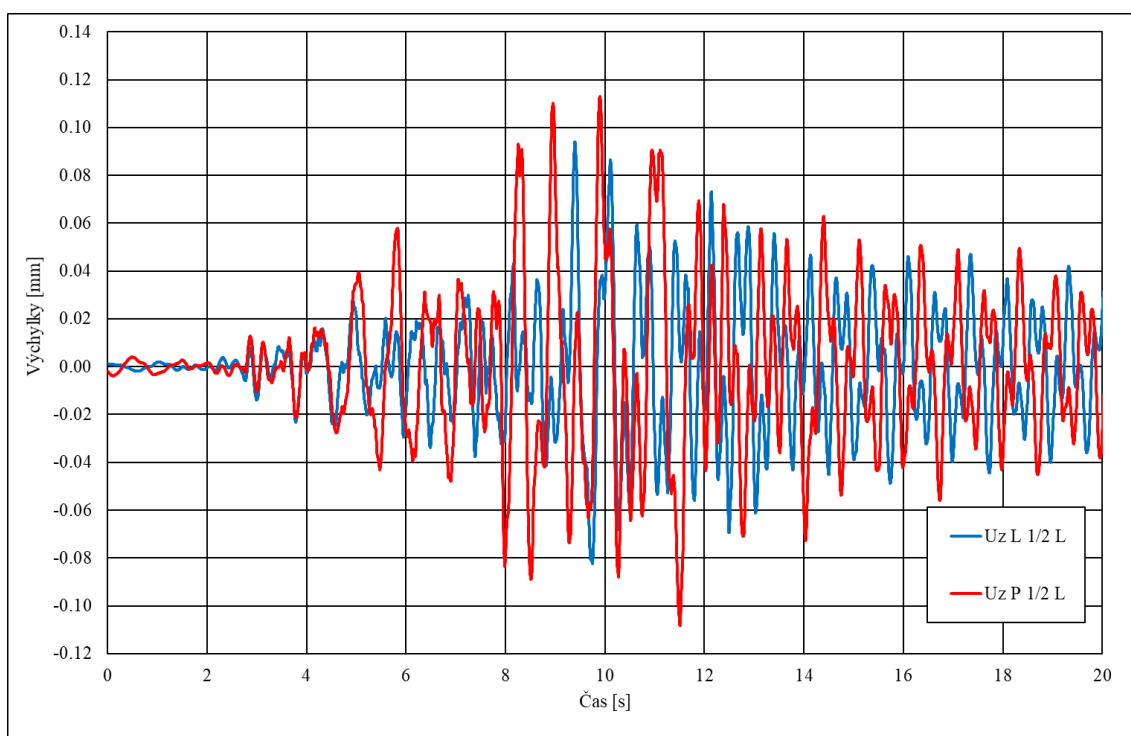
Obr. 52 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



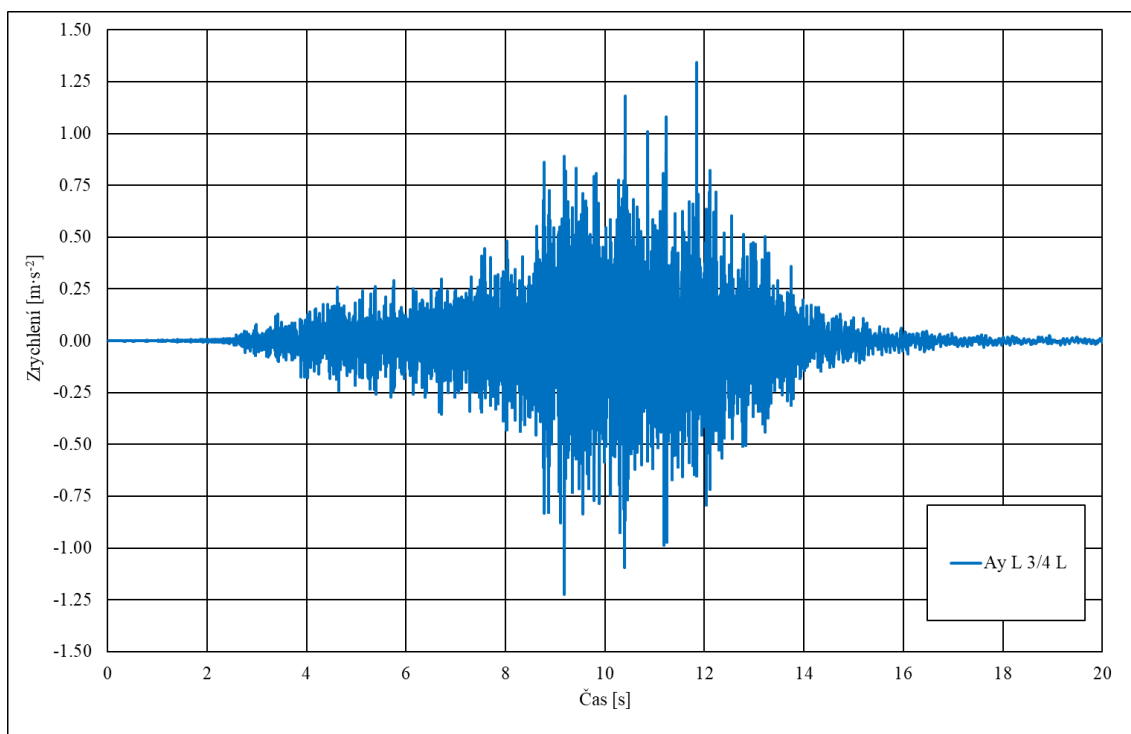
Obr. 53 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



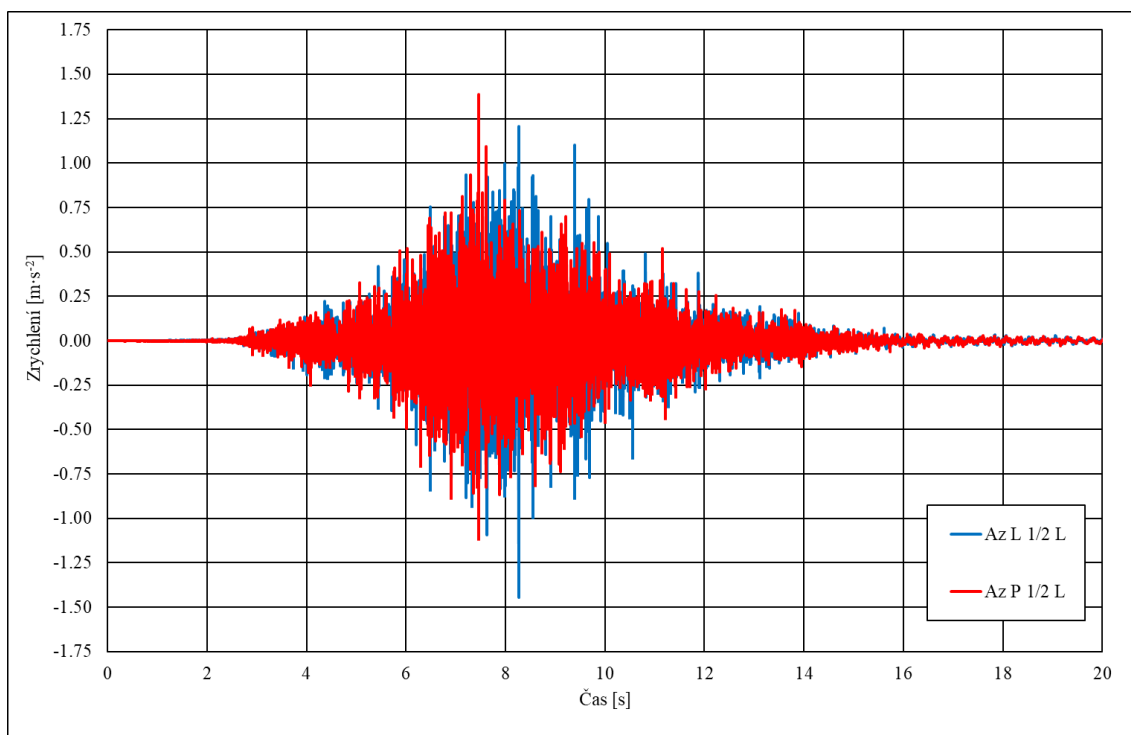
Obr. 54 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 55 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, svislé výchytky získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.

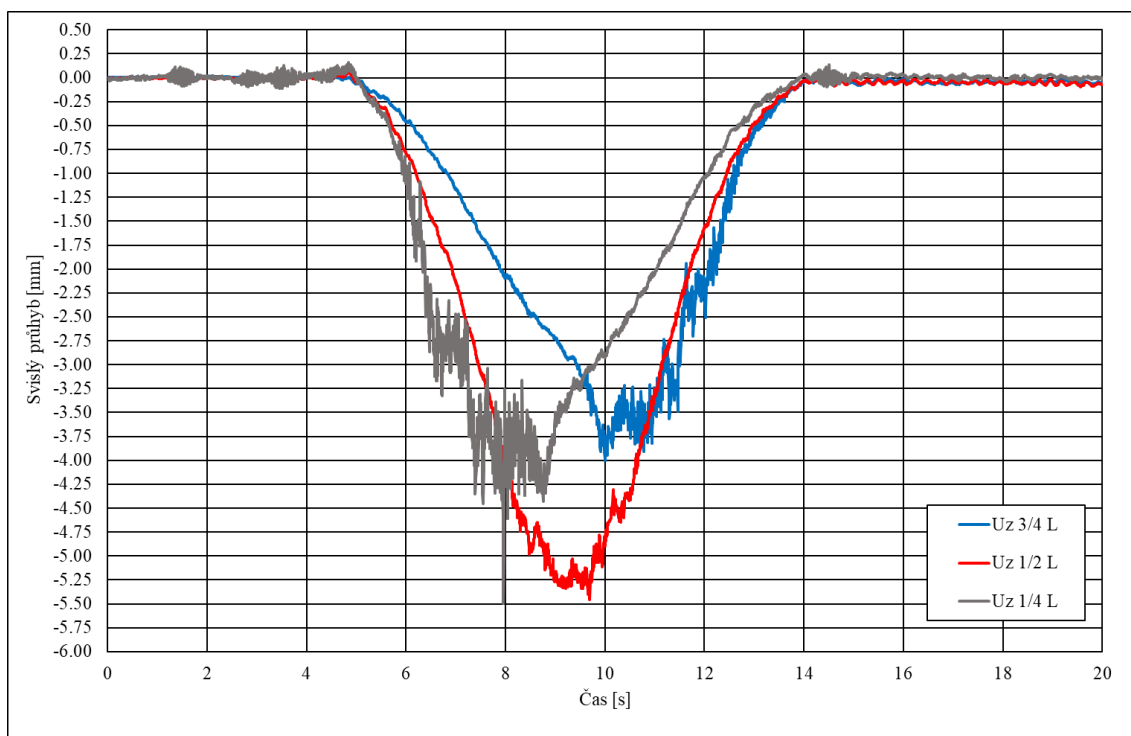


Obr. 56 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

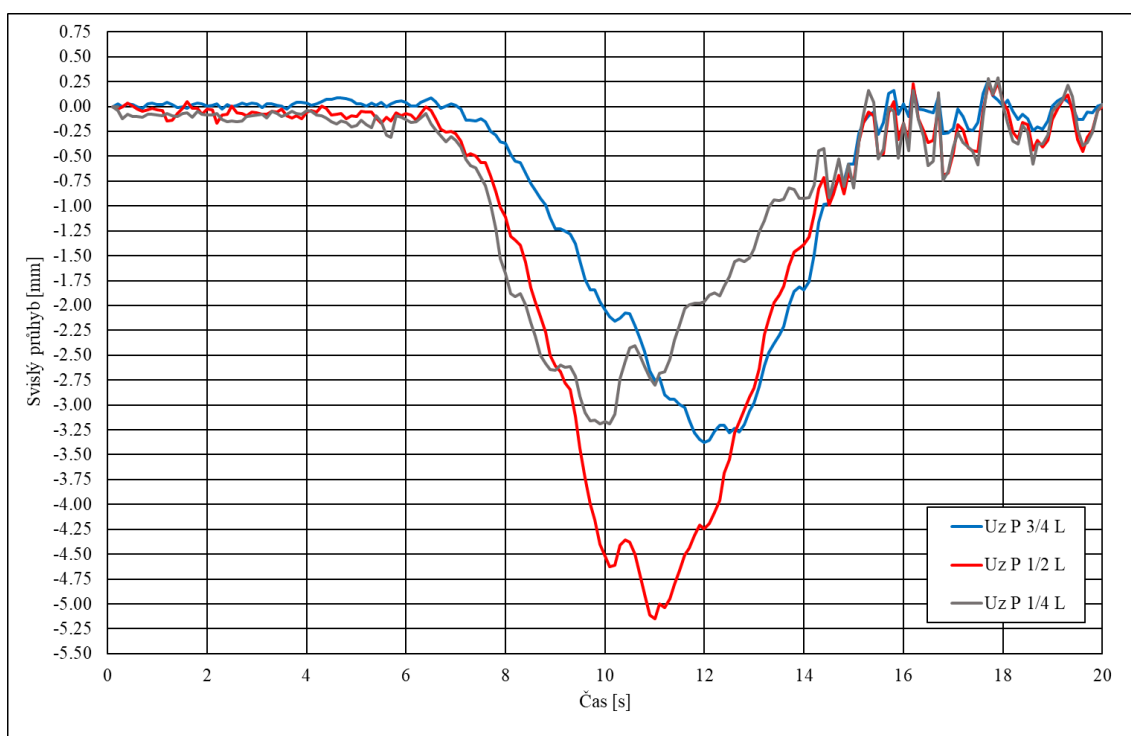


Obr. 57 – Přejezd železniční soupravy č. 06 ve směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

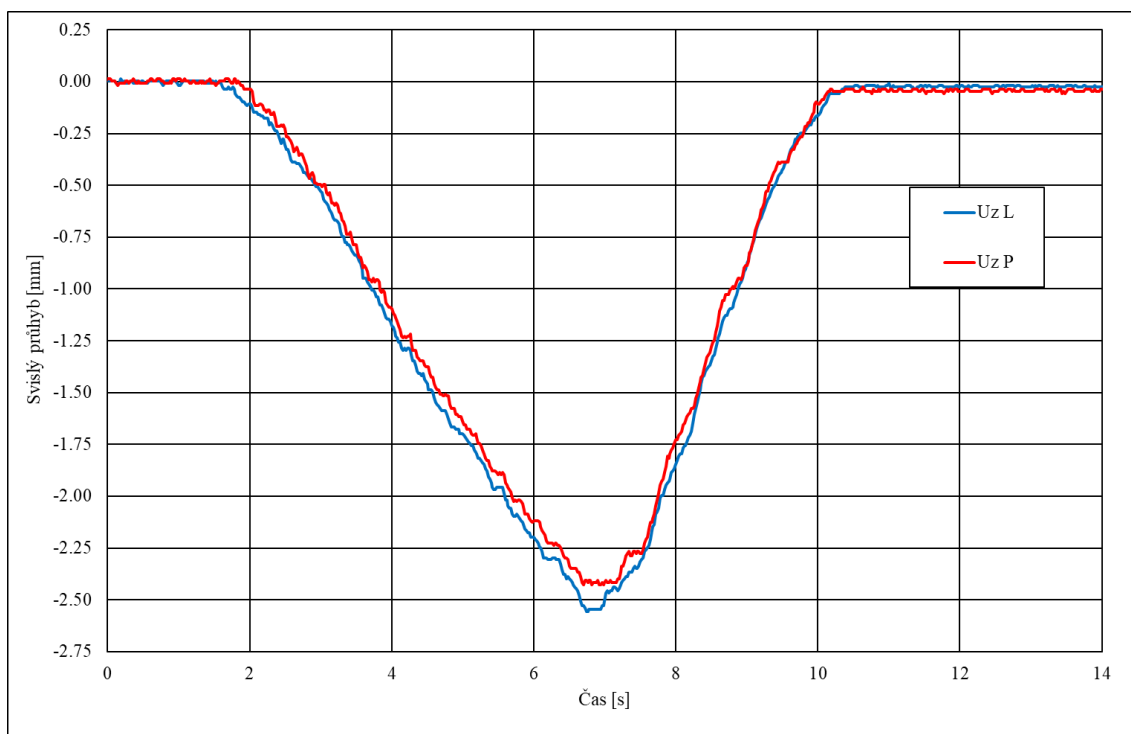
**Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu v cca 18:12 :**



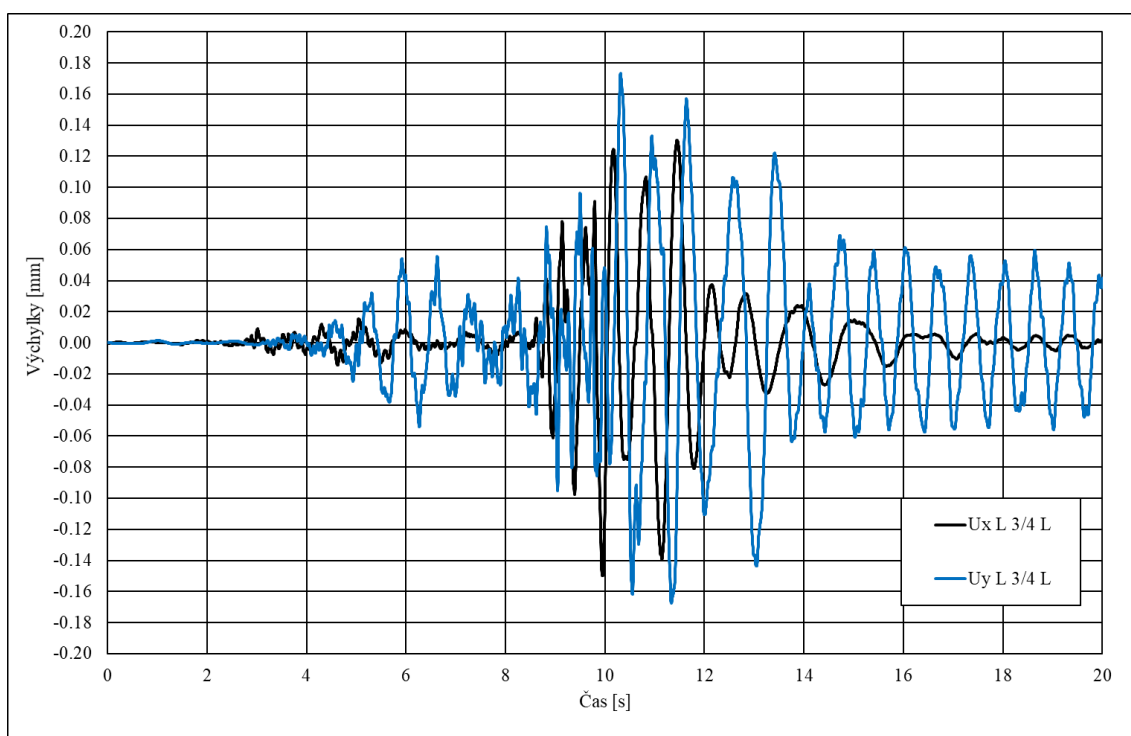
Obr. 58 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



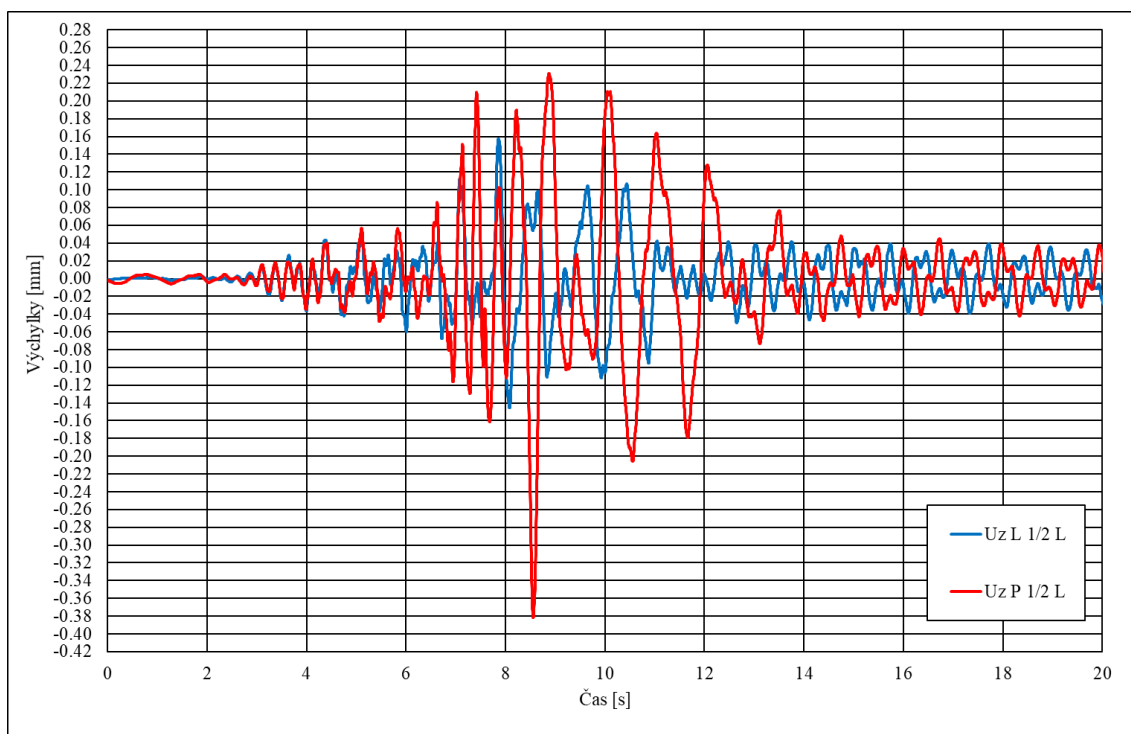
Obr. 59 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



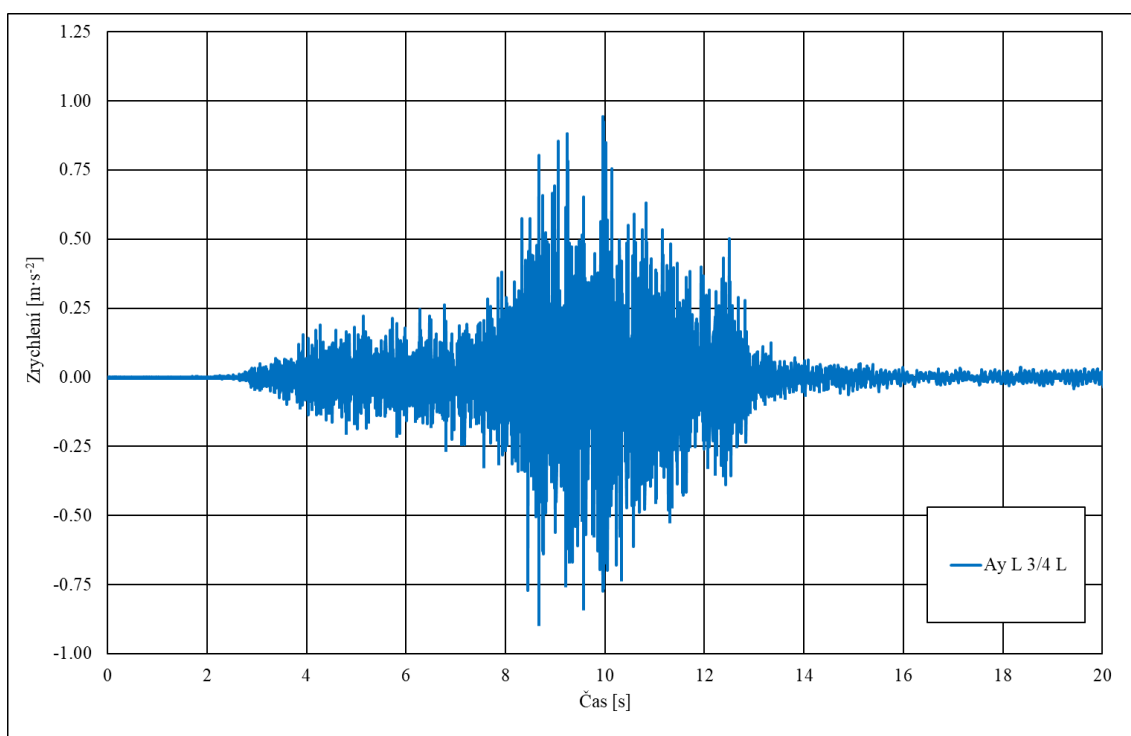
Obr. 60 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



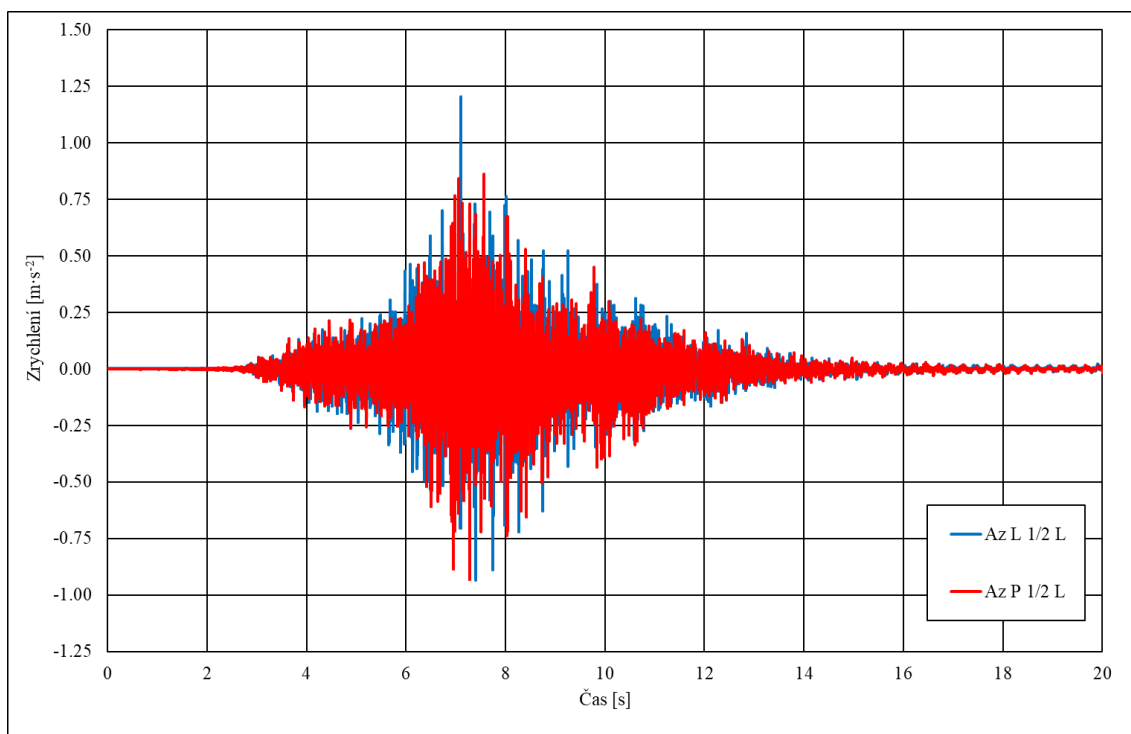
Obr. 61 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 62 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, svislé výchylky získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.

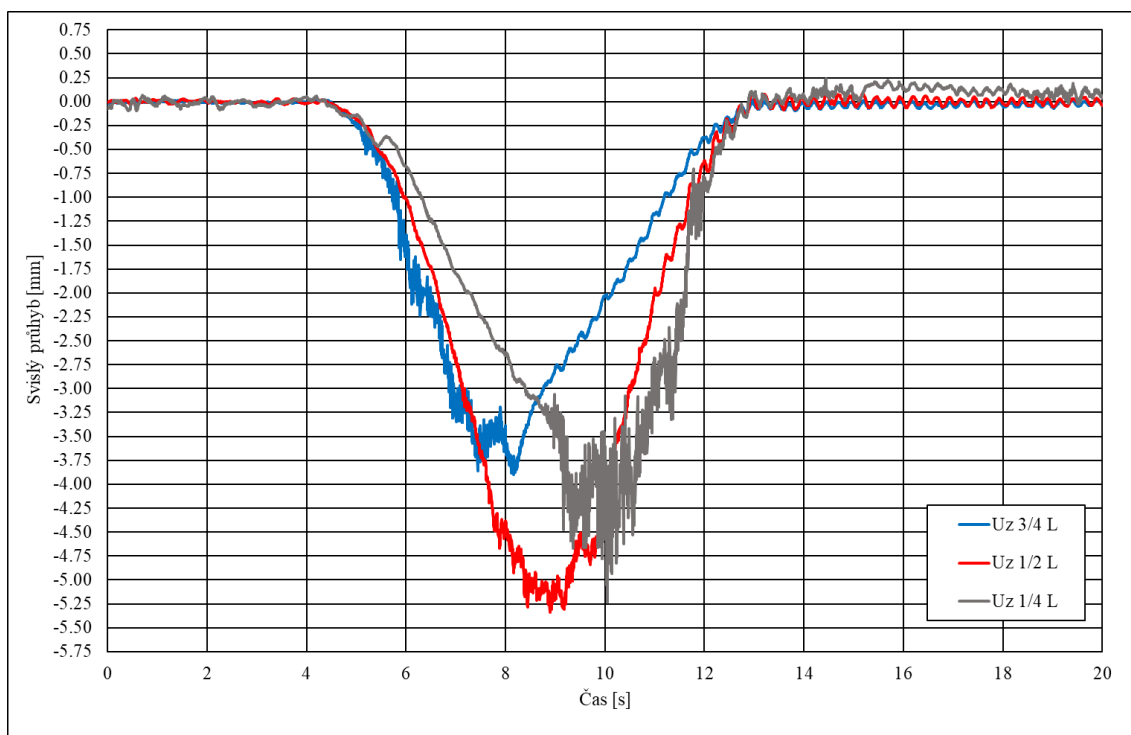


Obr. 63 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

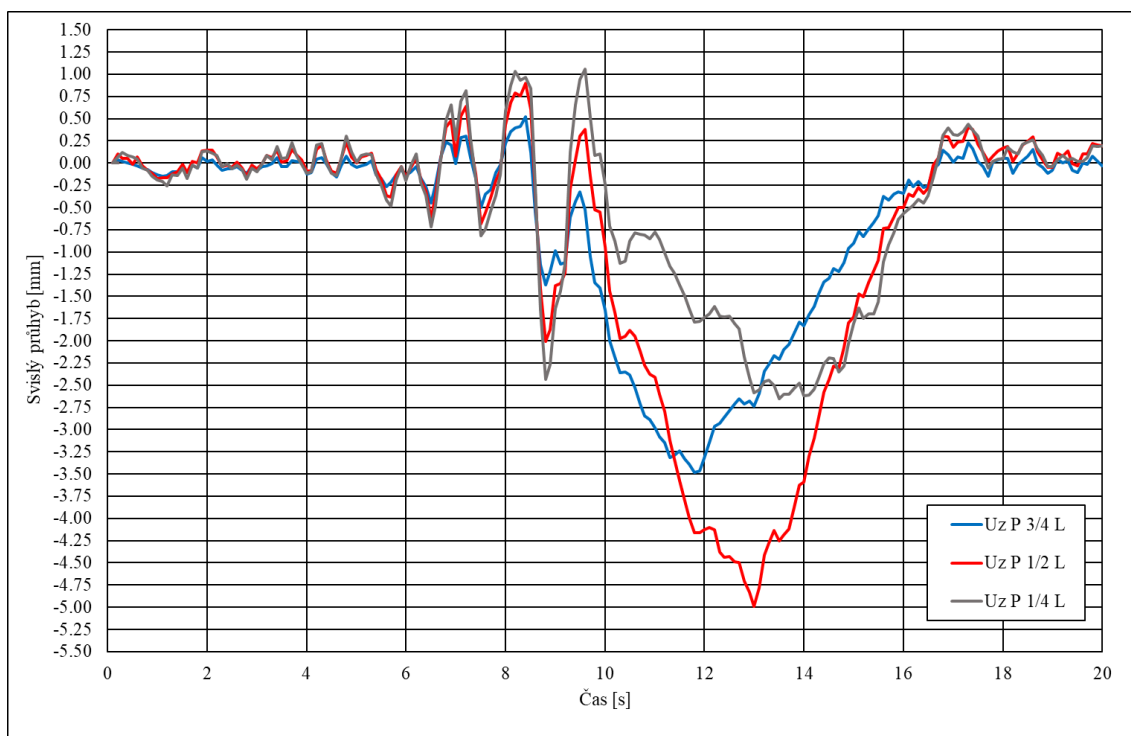


Obr. 64 – Přejezd železniční soupravy č. 07 ve směru staničení mostu, svislá zrychlení měřena absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

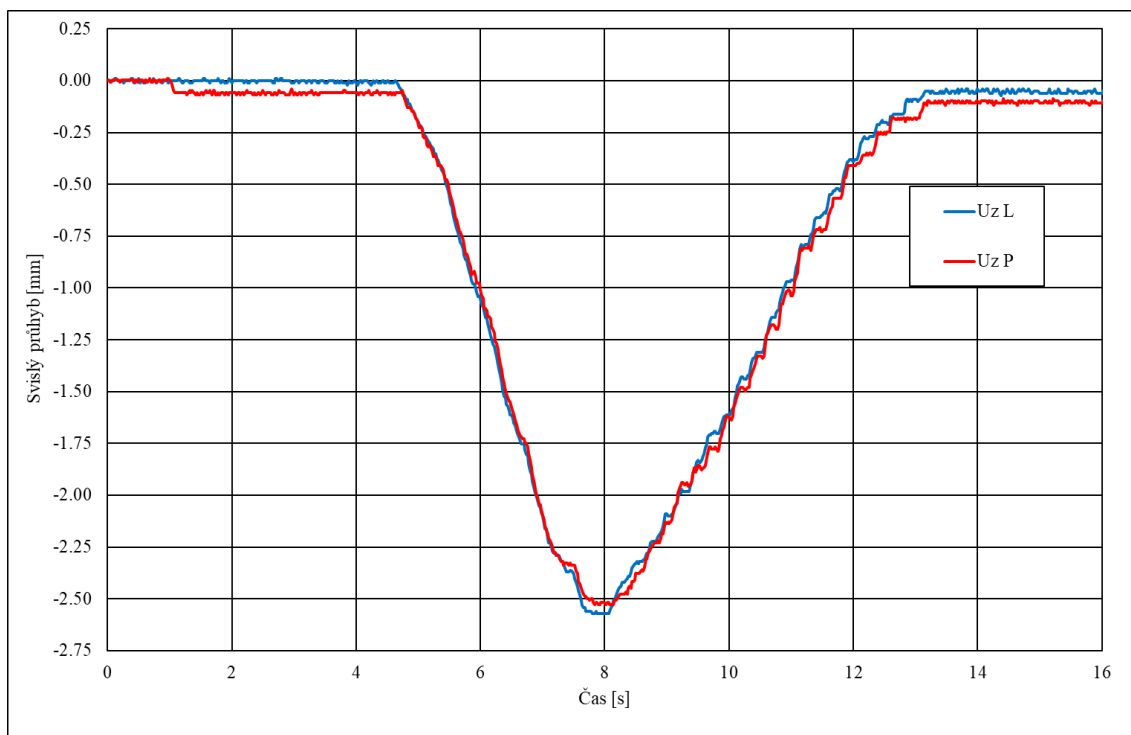
Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu v cca 19:58 :



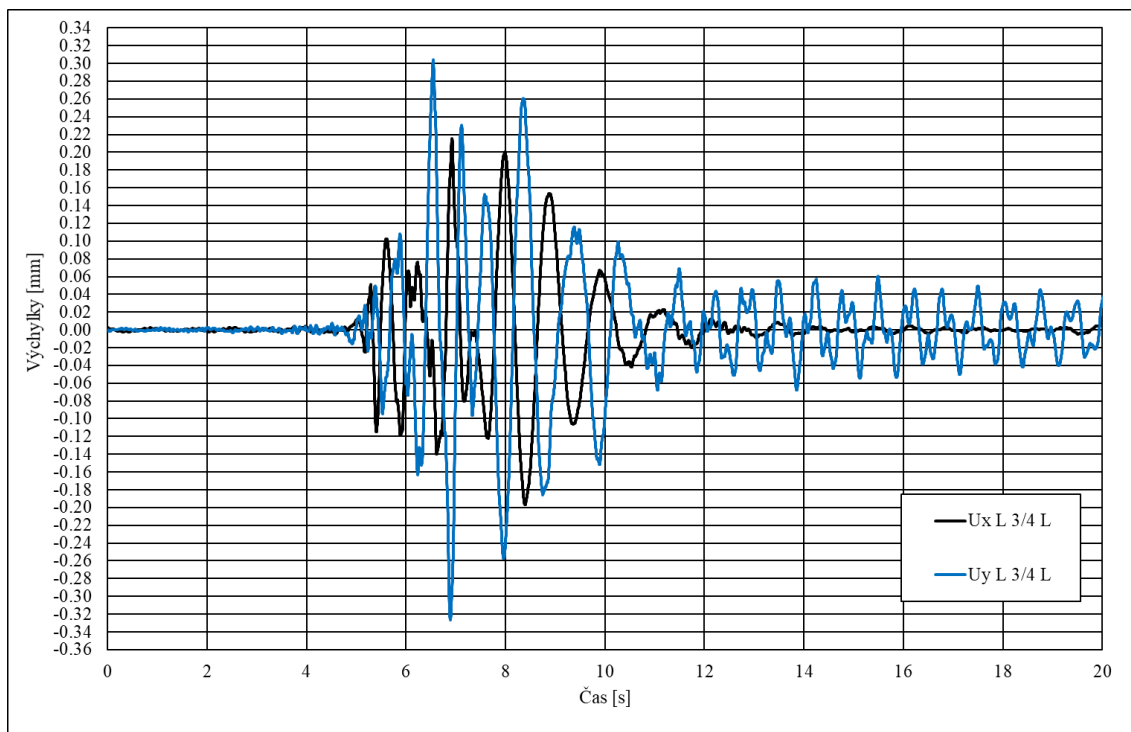
Obr. 65 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



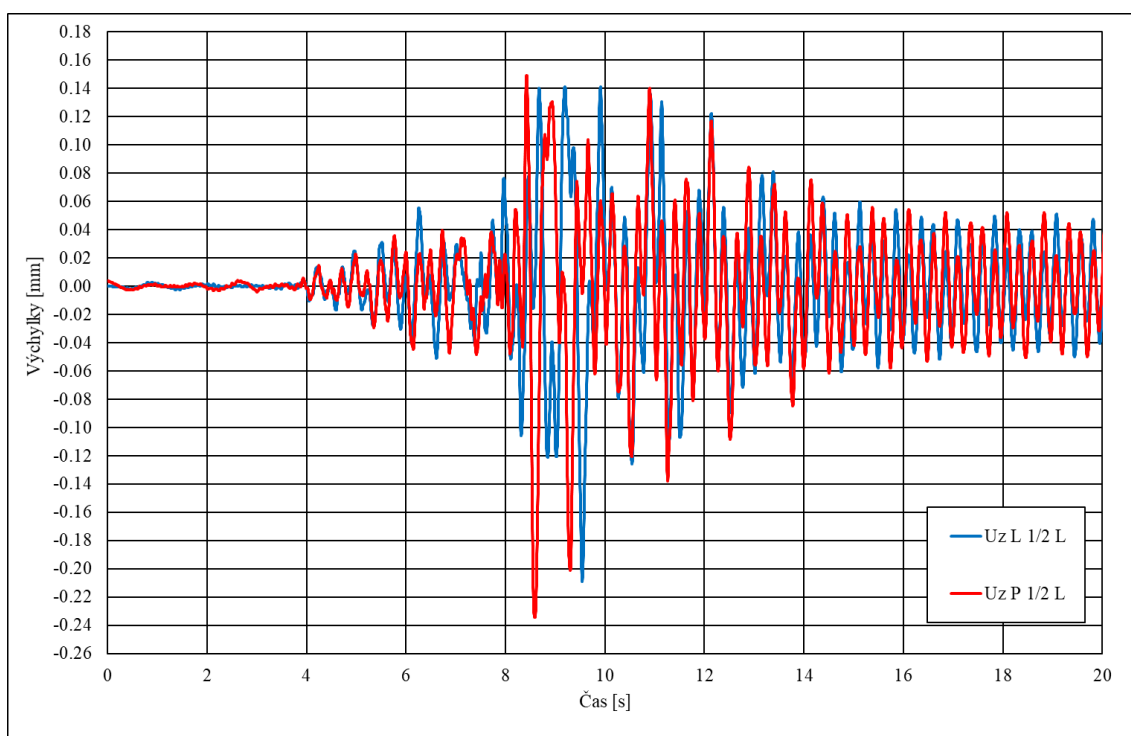
Obr. 66 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



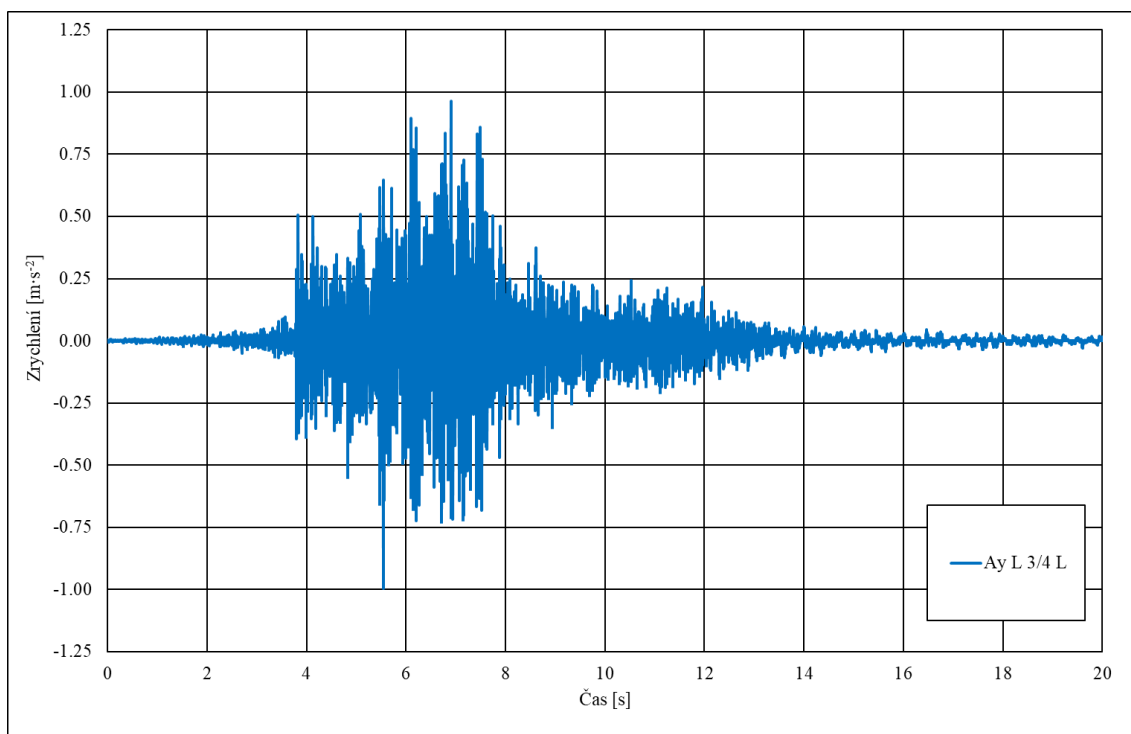
Obr. 67 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



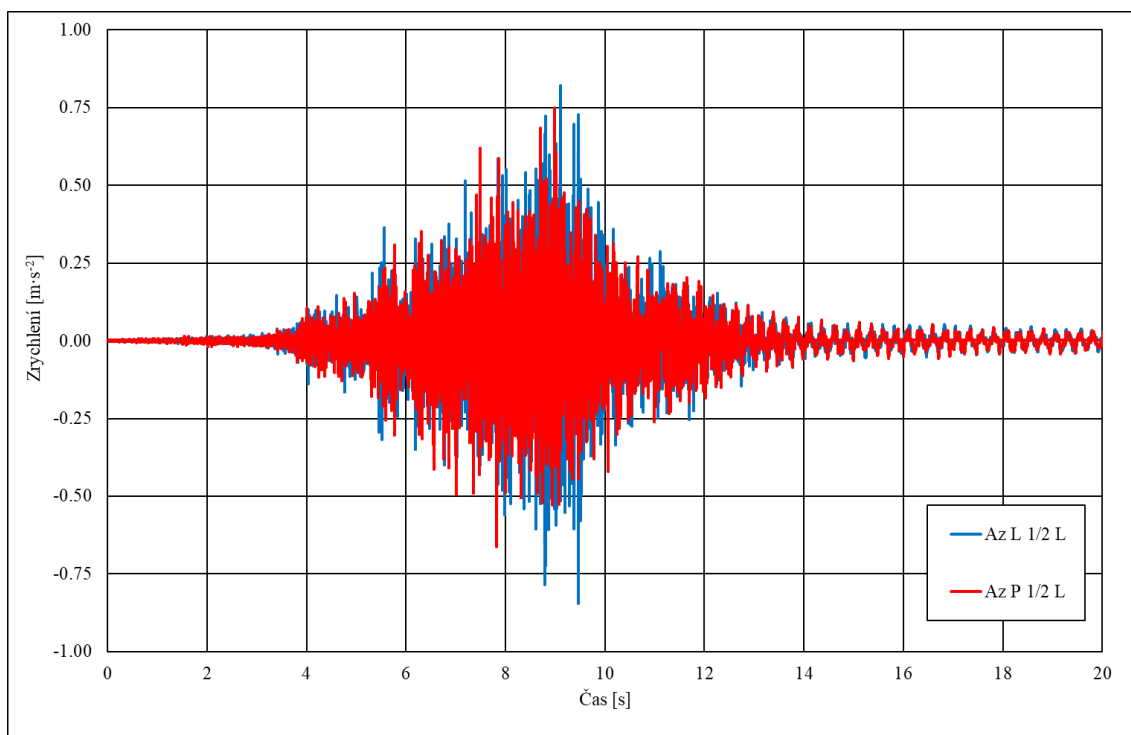
Obr. 68 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchytky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 69 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, svislé výchyly získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.

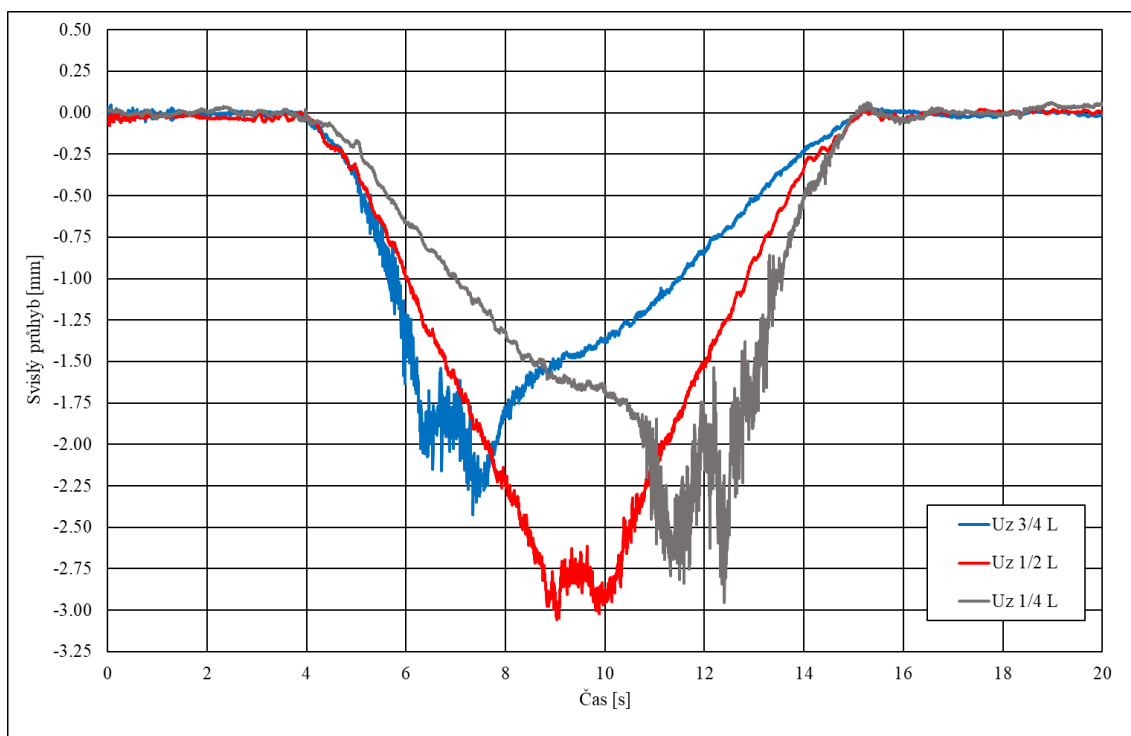


Obr. 70 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

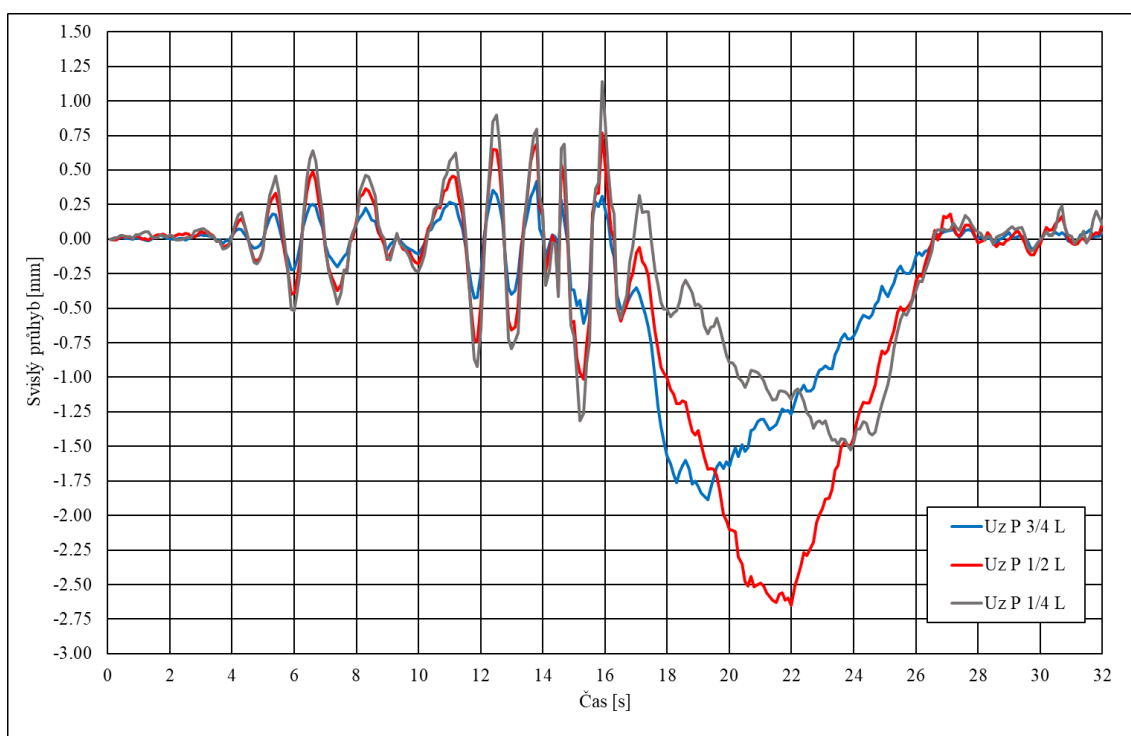


Obr. 71 – Přejezd železniční soupravy č. 08 proti směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

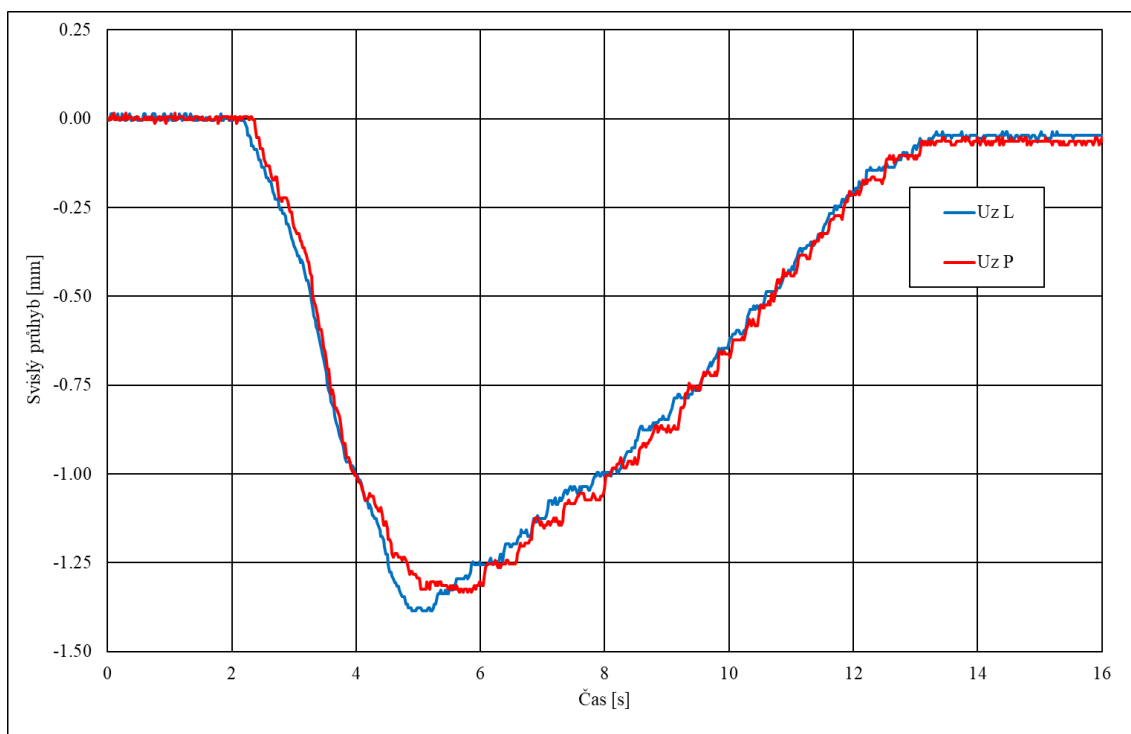
**Přejezd železniční soupravy č. 09 proti směru staničení mostu v cca 20:03 :**



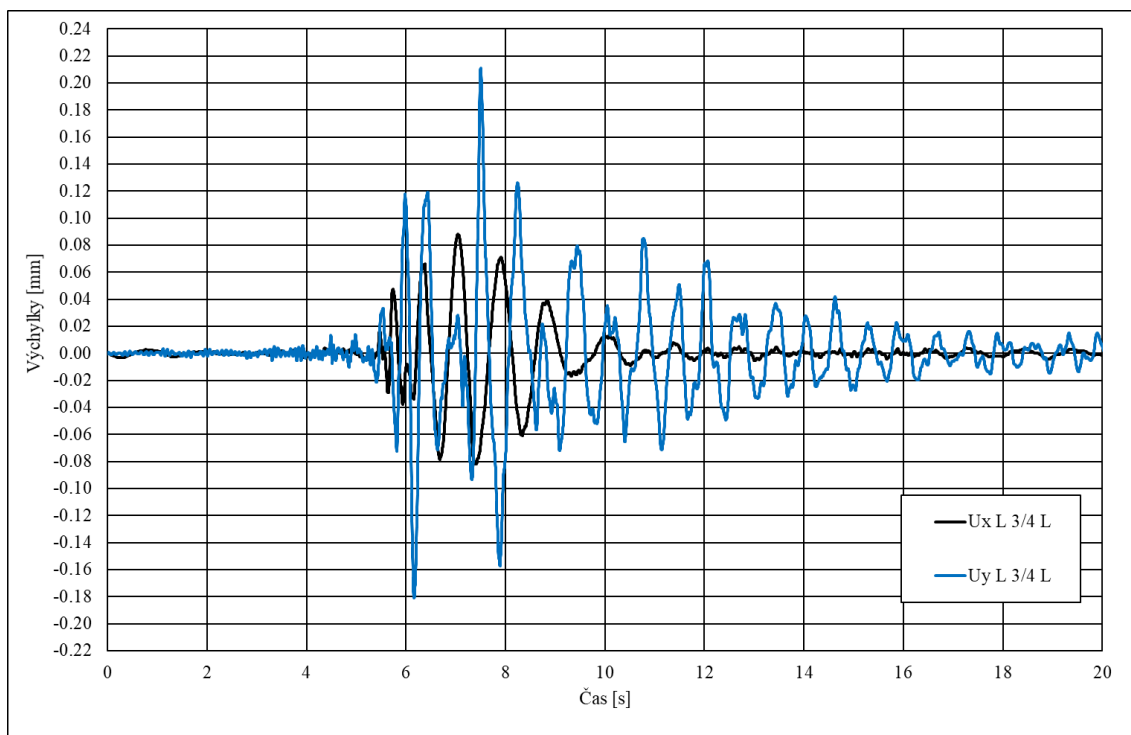
Obr. 72 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



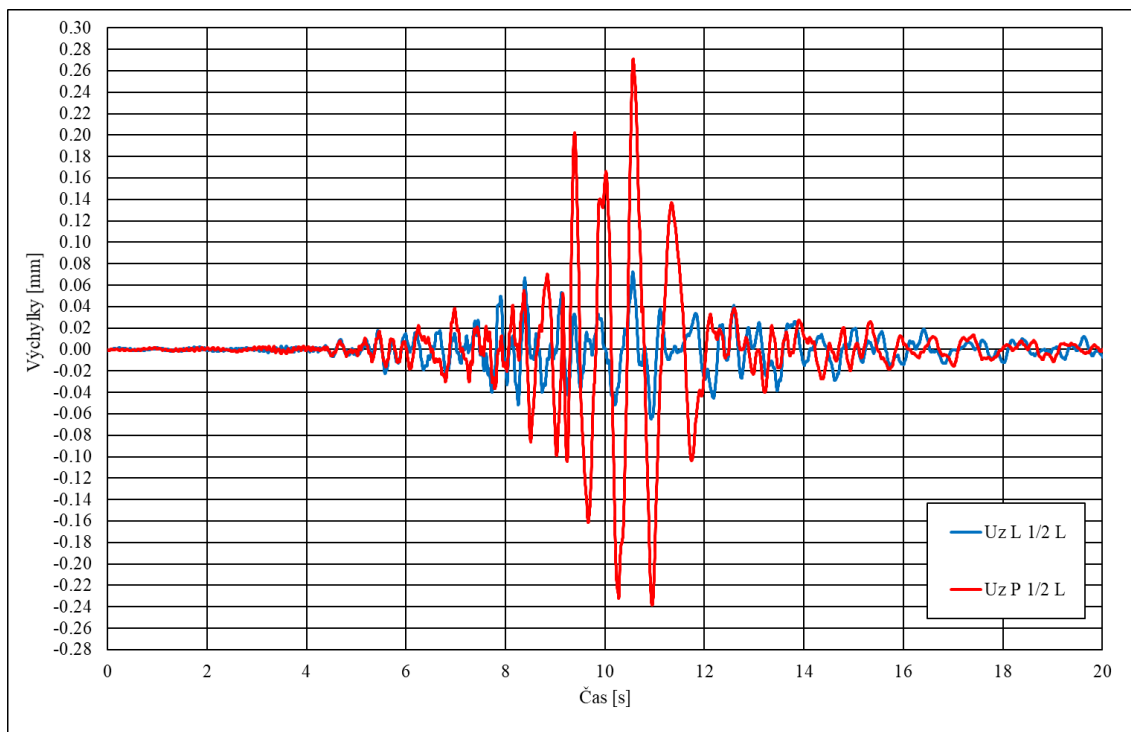
Obr. 73 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.



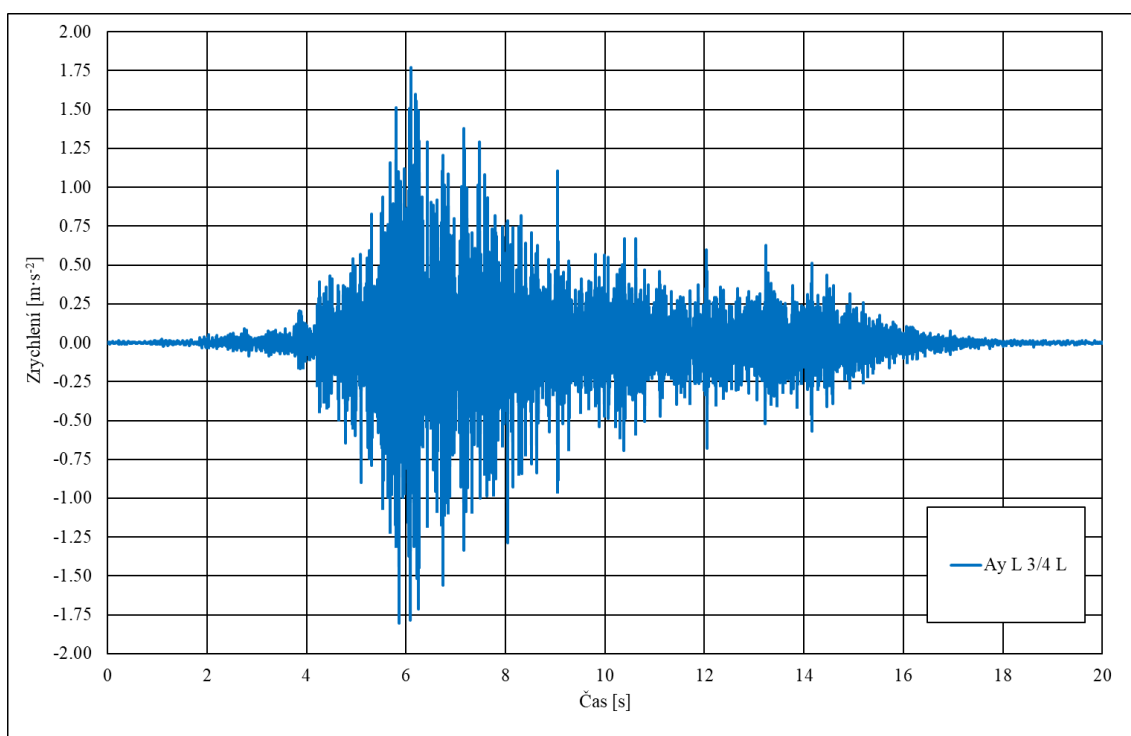
Obr. 74 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



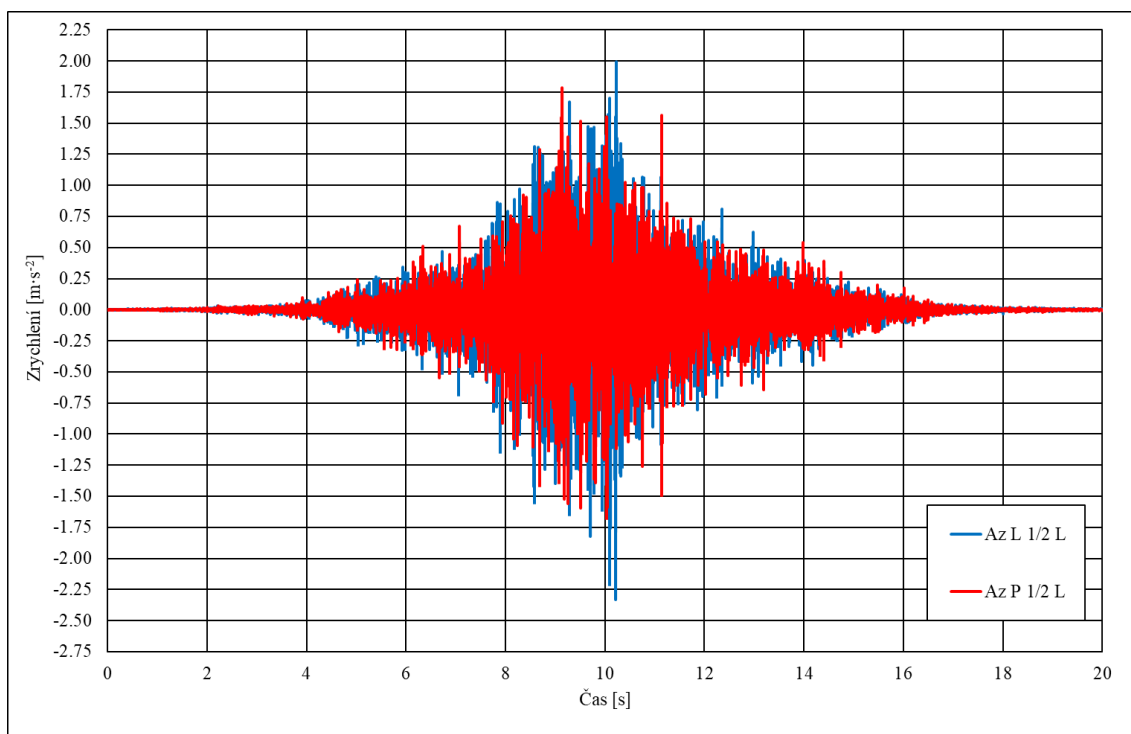
Obr. 75 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 76 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti ve směru staničení mostu, svislé výchylky získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.

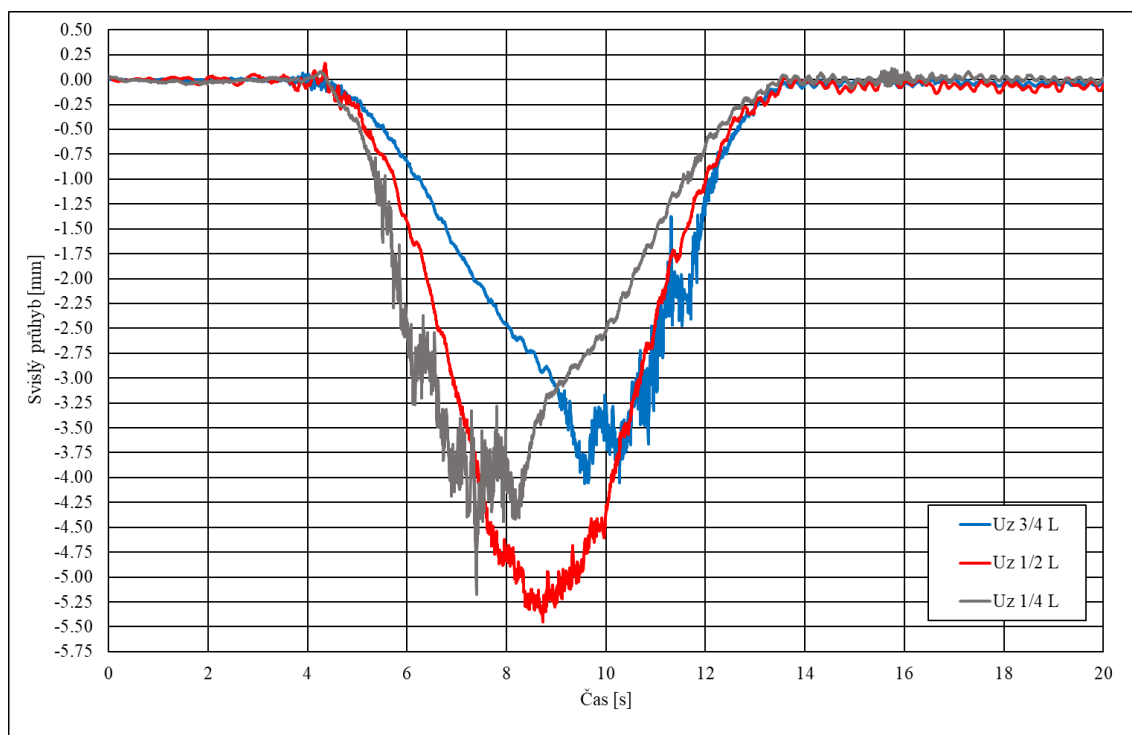


Obr. 77 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.

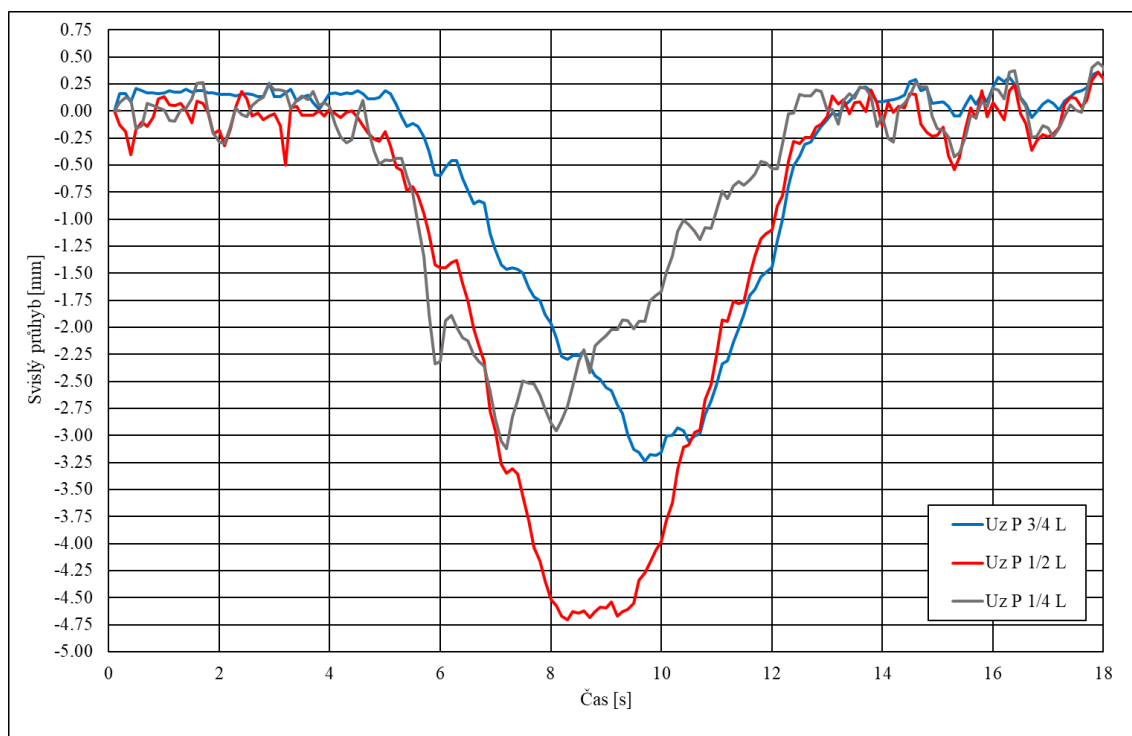


Obr. 78 – Přejezd železniční soupravy č. 09 proti ve směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

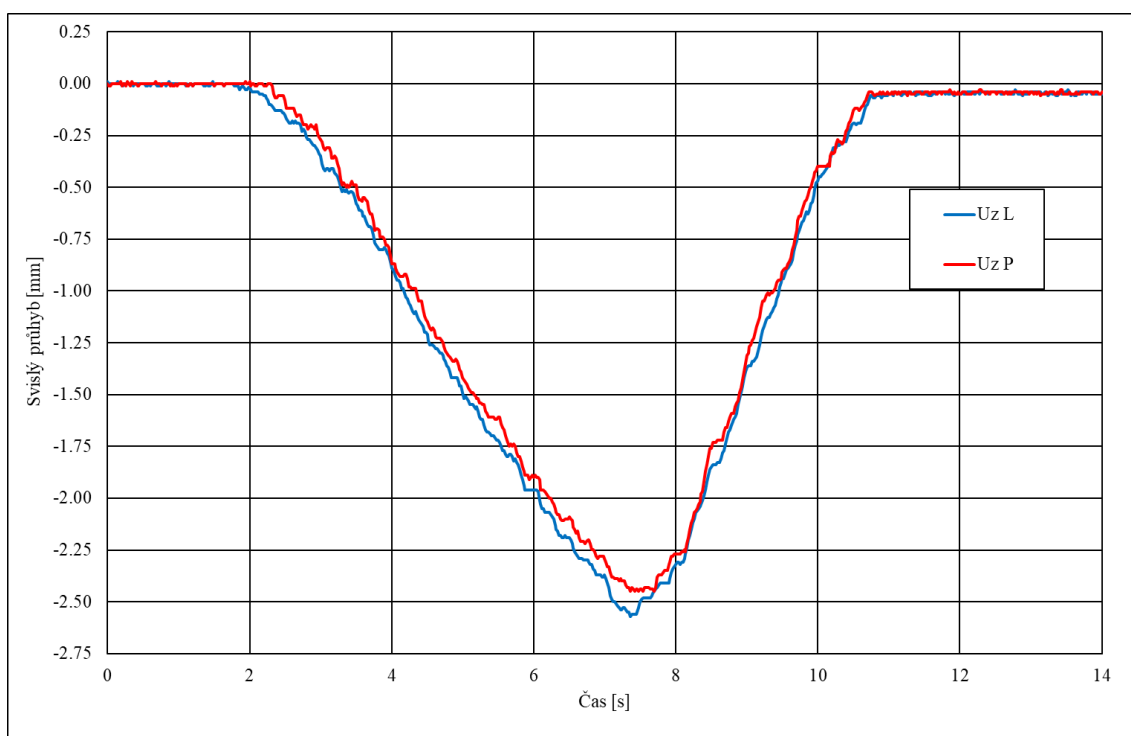
**Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu v cca 20:11 :**



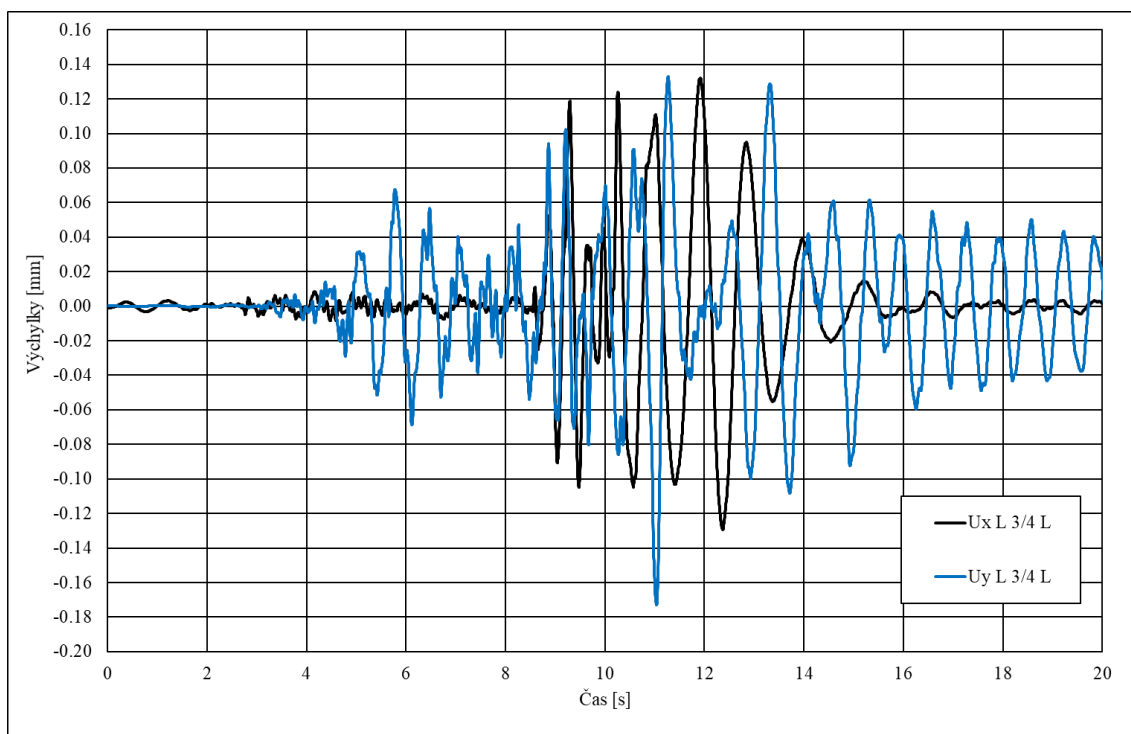
*Obr. 79 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené radarovou interferometrií (RI) v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.*



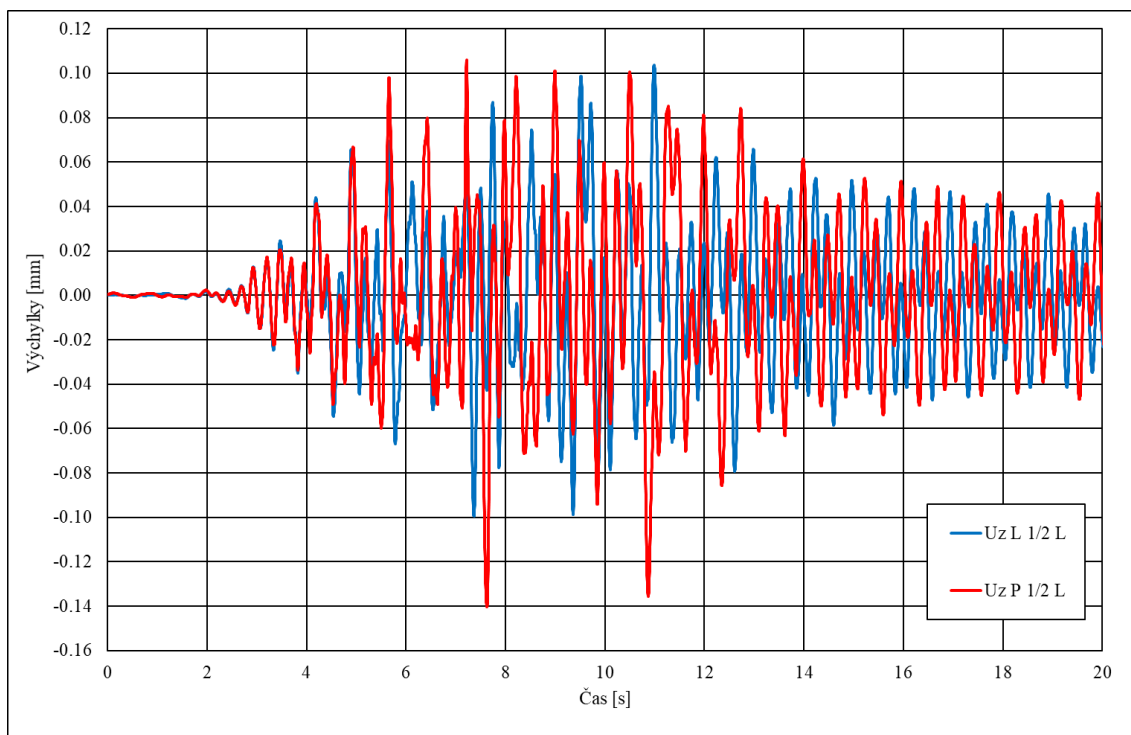
*Obr. 80 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, svislé průhyby měřené DIC v 1. čtvrtině, polovině a 3. čtvrtině rozpětí mostu.*



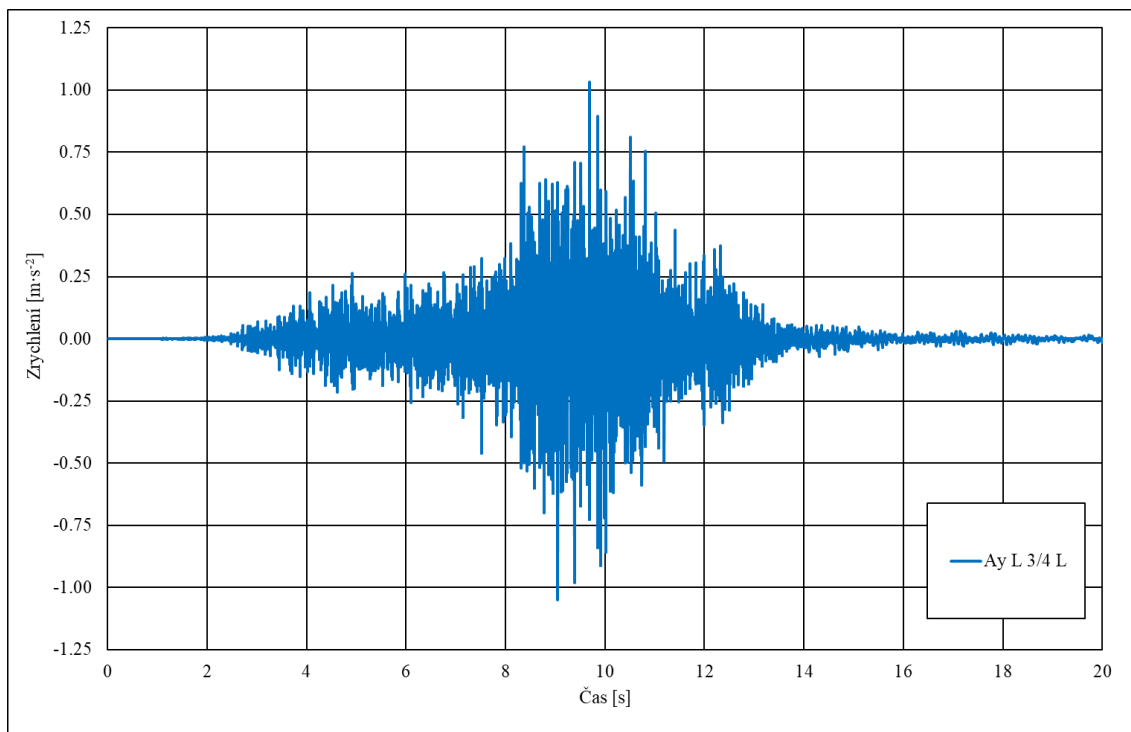
Obr. 81 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, svislý průhyb měřený relativními snímači dráhy ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



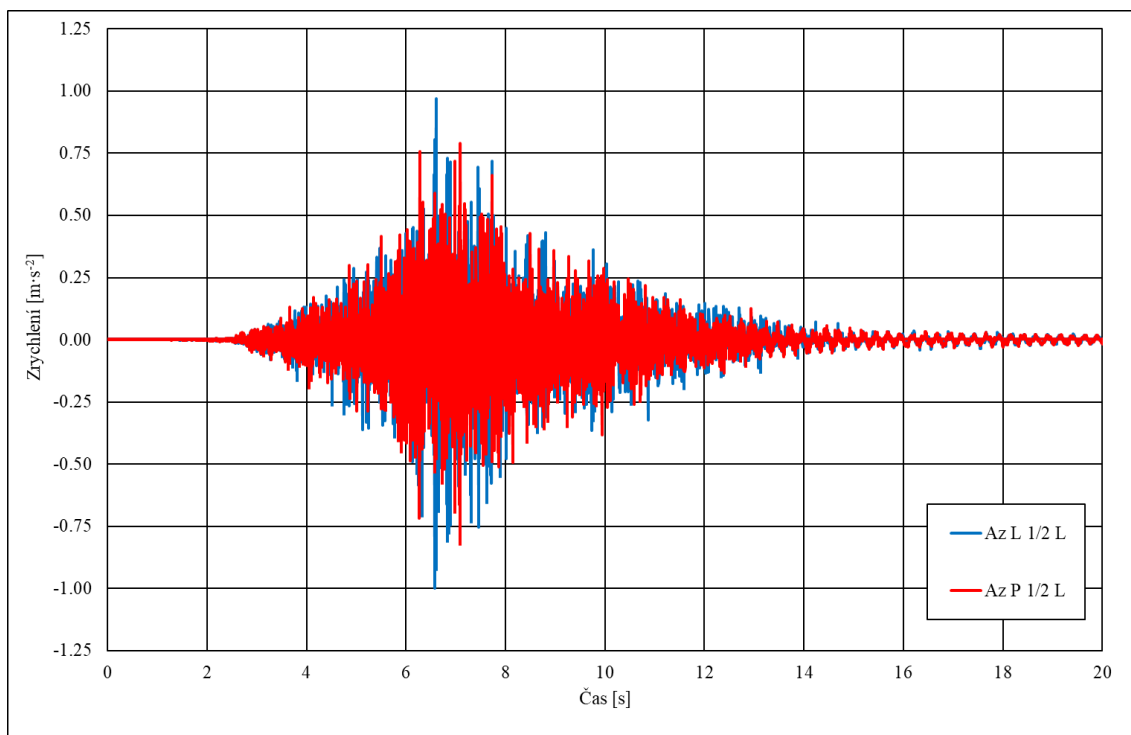
Obr. 82 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé výchylky získané integrací zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 83 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, svislé výchyšky získané integrací zrychlení v polovině rozpětí mostu.



Obr. 84 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, vodorovné a svislé zrychlení měřené absolutními snímači zrychlení ve 3. čtvrtině rozpětí mostu.



Obr. 85 – Přejezd železniční soupravy č. 10 ve směru staničení mostu, svislá zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení v polovině rozpětí mostu.

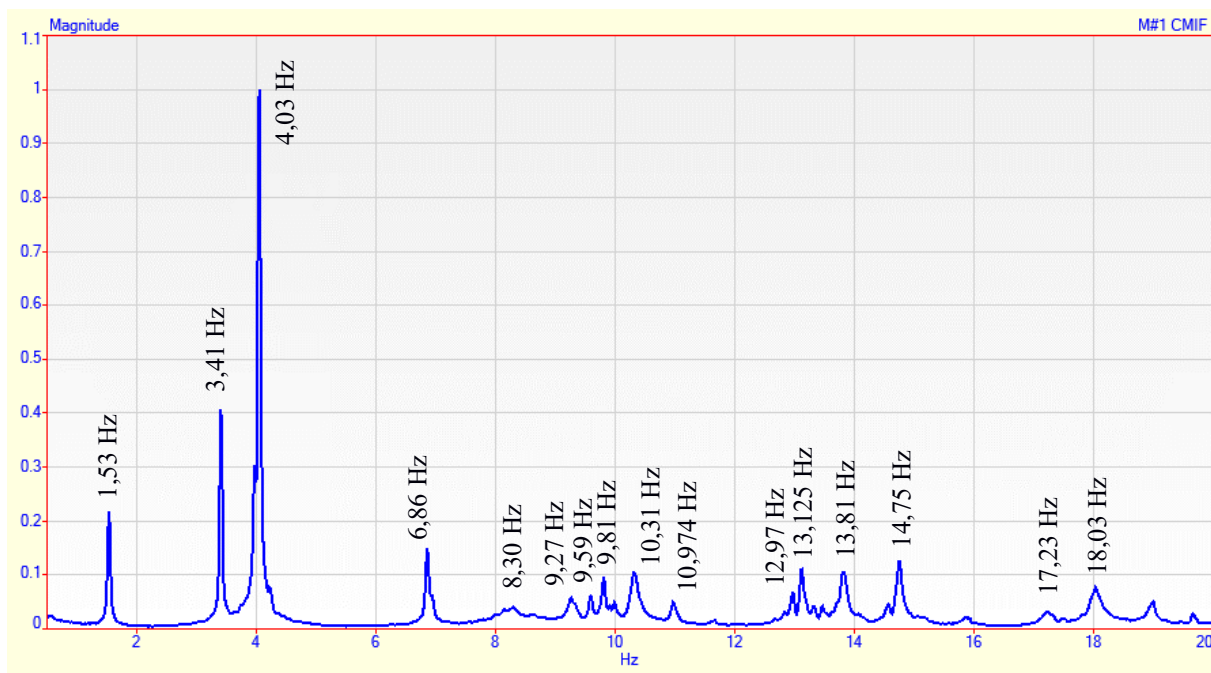
## 6. Vyhodnocené výsledky experimentu – frekvence a tvary vlastního kmitání

Během experimentu byla realizována experimentální modální analýzy. Byl využit systém měření „Ambient Vibration Testing“, kdy naměřené kmitání v jednotlivých bodech konstrukce je normováno ke kmitání, které bylo zachyceno referenčním snímačem.

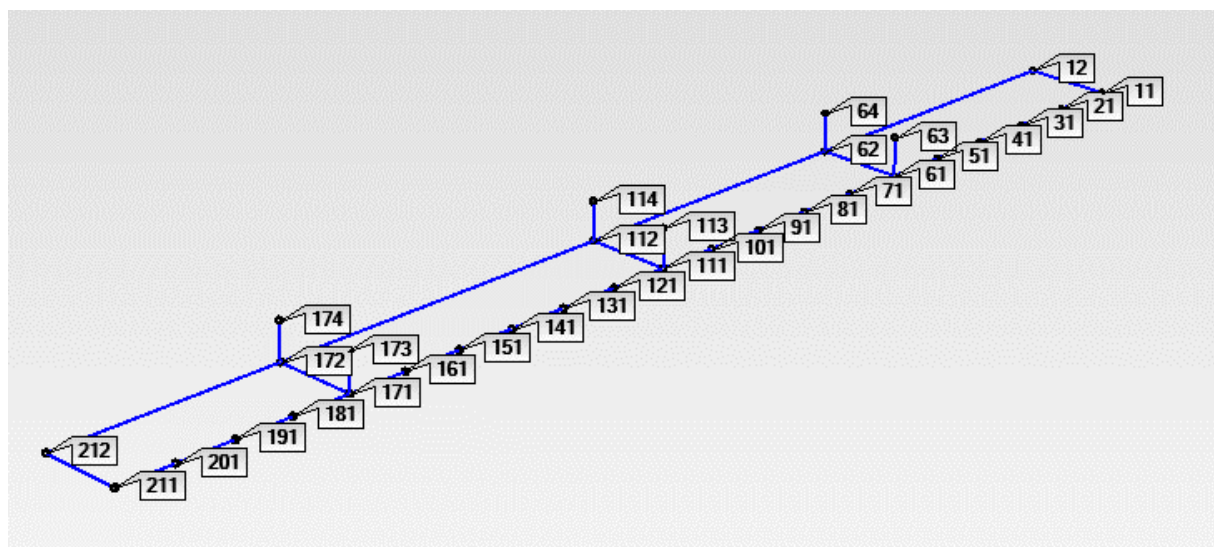
Funkce „Complex Mode Indicator Function“, která byla využita ke stanovení vlastních frekvencí vodorovné nosné konstrukce mostu, s vyznačenými vyhodnocenými vlastními frekvencemi je vykreslena na Obr. 86.

Na Obr. 87 je vykresleno schéma bodů, ve kterých bylo provedeno měření během experimentální modální analýzy. Měřeno bylo na dolním pasu levého hlavního nosníku ve 21 řezech, ve kterých se nachází příčníky, ve třech na sebe kolmých směrech. Ve čtvrtinách rozpětí bylo měřeno i na dolním pasu pravého hlavního nosníku a na svislicích ve výšce cca 2,5 metru (viz Obr. 87).

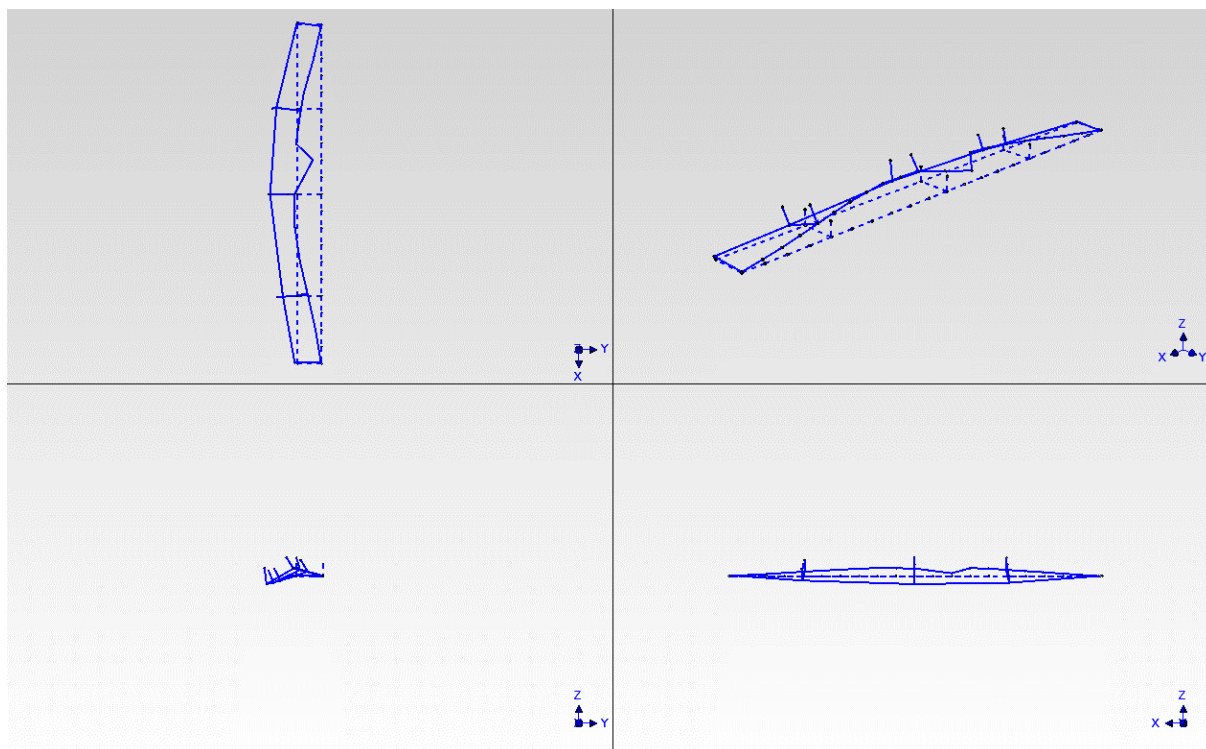
Na Obr. 88 až Obr. 103 je vykresleno šestnáct vlastních tvarů, které jsou svázány s šestnácti vyhodnocenými vlastními frekvencemi vodorovné nosné konstrukce mostu. Charakter vlastních tvarů je popsán u prvních pěti. Aby bylo možné přesněji a jednoznačněji popsat i charakter zbývajících vyhodnocených vlastních tvarů, bylo by potřebné, aby měření proběhlo ve více bodech mostovky. Přesnější identifikaci charakteru by bylo možné provést i na základě výsledků dynamického výpočtu provedeném na teoretickém modelu mostu validovaném na základě nejnižších vlastních frekvencí.



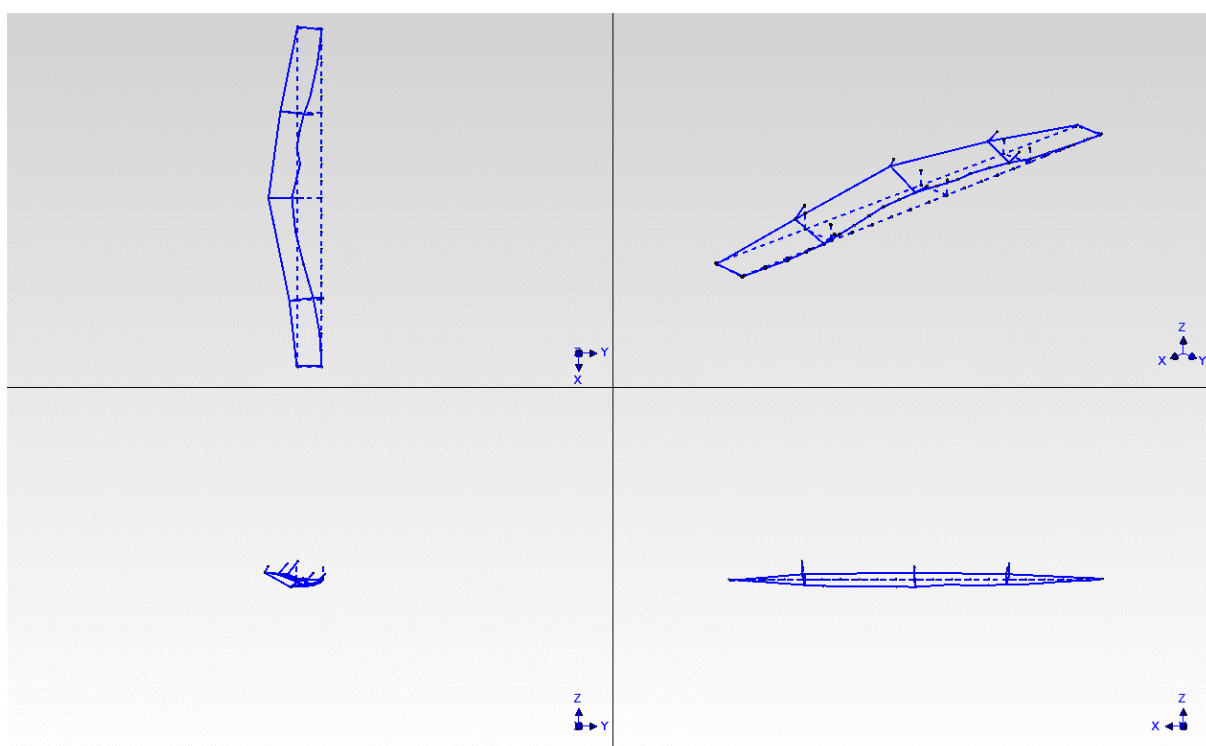
Obr. 86 – „Complex Mode Indicator Function“ s vyznačenými vyhodnocenými vlastními frekvencemi vodorovné nosné konstrukce mostu.



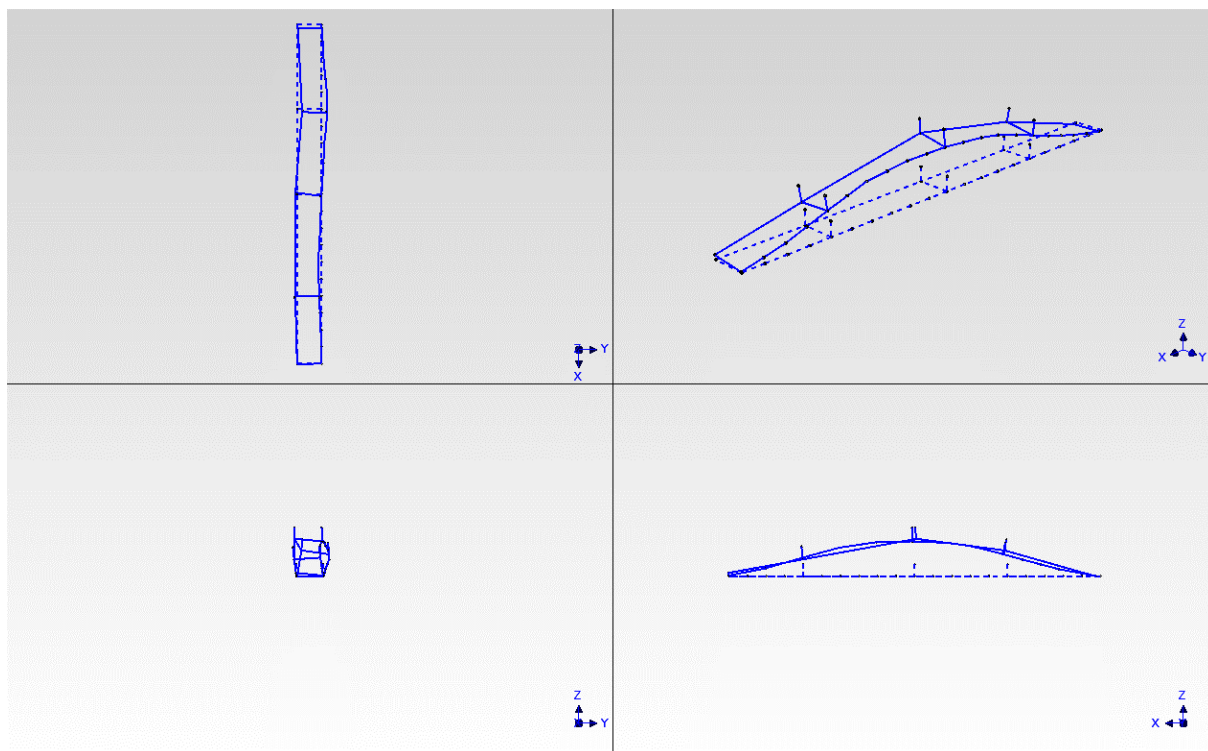
Obr. 87 – Schéma bodů konstrukce, ve kterých bylo provedeno měření charakteristik vlastního kmitání mostu.



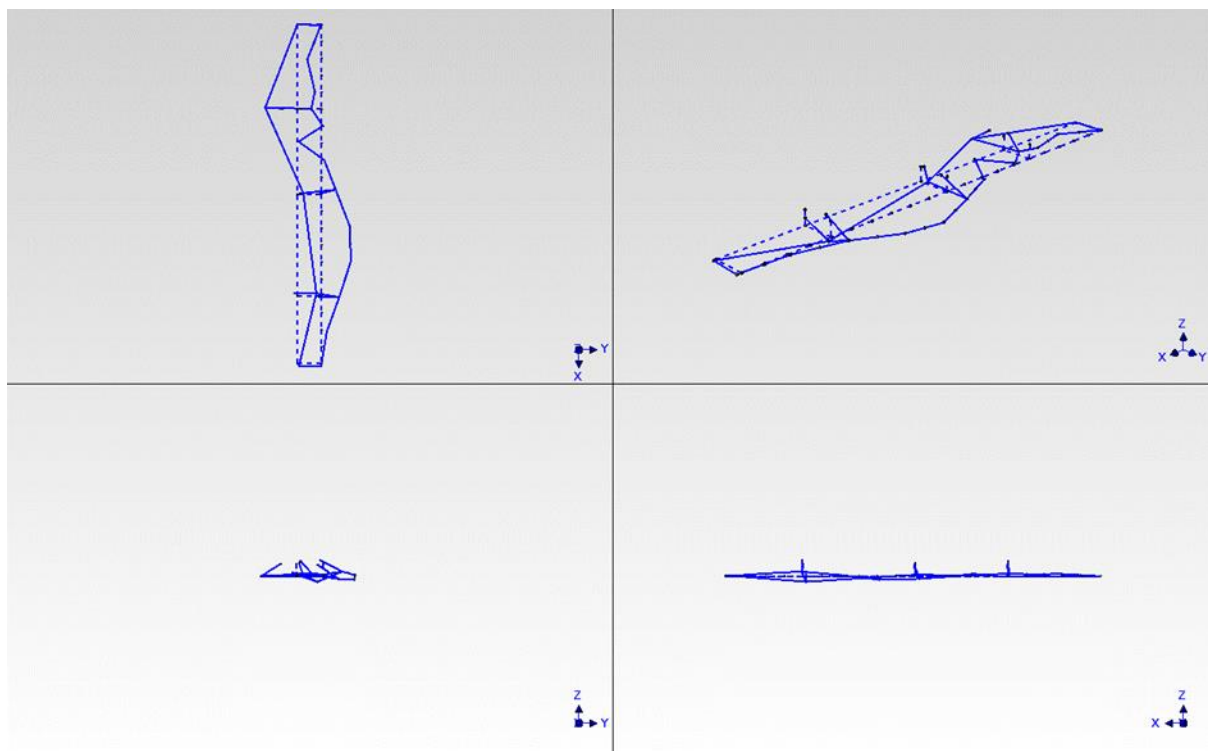
Obr. 88 –  $f_{(1)} = 1,53 \text{ Hz}$  - 1. tvar vodorovného kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu – horní pasy hlavních nosníků kmitají ve fázi s mostovkou.



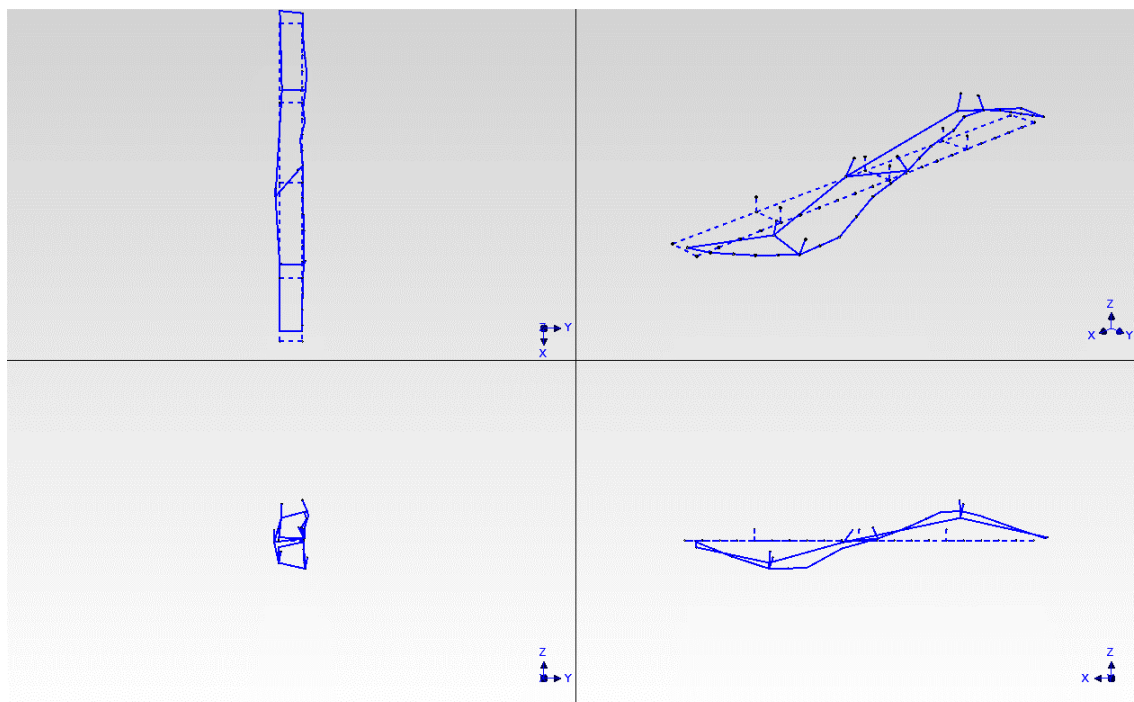
Obr. 89 –  $f_{(2)} = 3,41 \text{ Hz}$  - 2. tvar vodorovného kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu – horní pásy hl. nosníků kmitají v opačné fázi než mostovka.



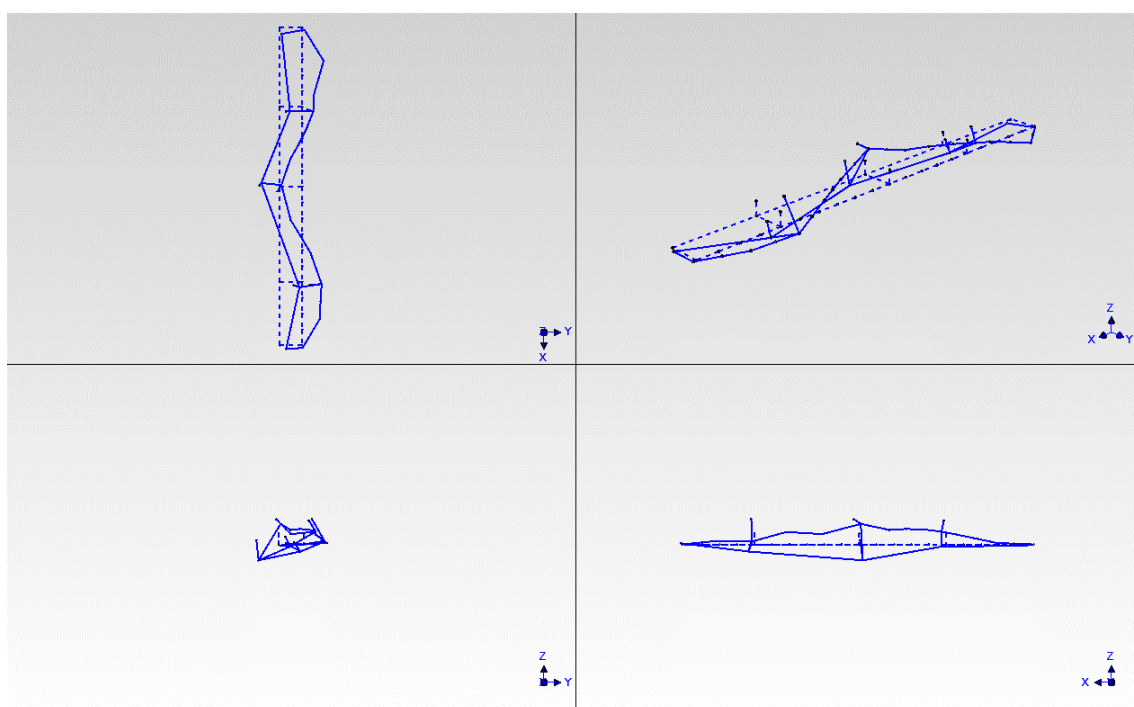
Obr. 90 –  $f_{(3)} = 4,03 \text{ Hz}$  - 1. tvar svislého ohybového kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



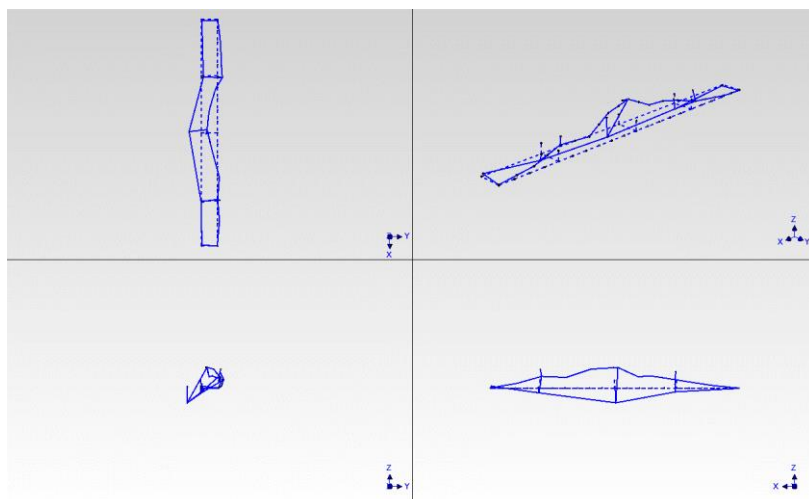
Obr. 91 –  $f_{(4)} = 6,86 \text{ Hz}$  – 3. tvar vodorovného kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



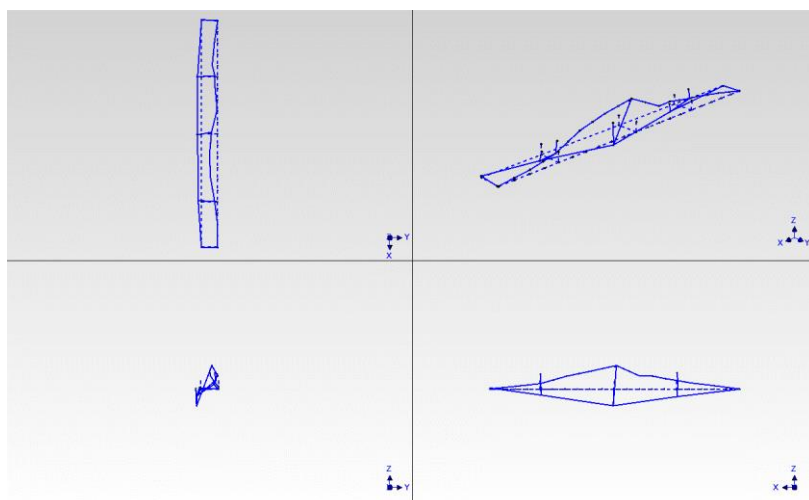
Obr. 92 –  $f_{(5)} = 8,30$  Hz – 2. tvar svislého ohybového kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



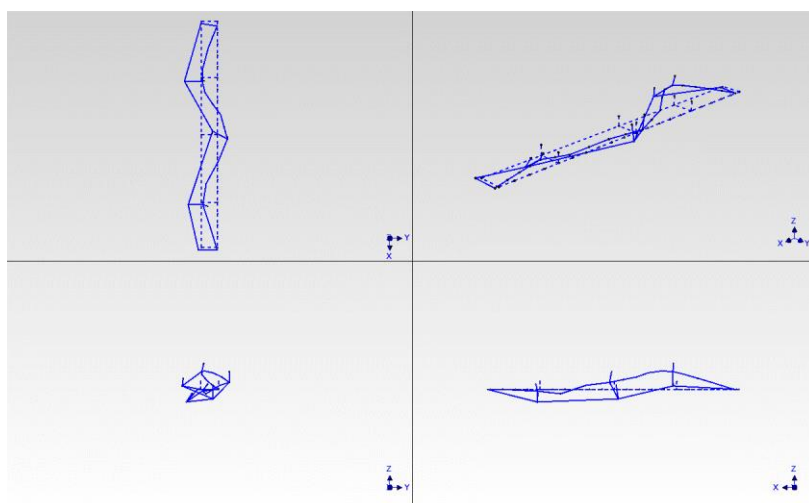
Obr. 93 –  $f_{(6)} = 9,27$  Hz. – pravděpodobně 3. tvar vodorovného kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



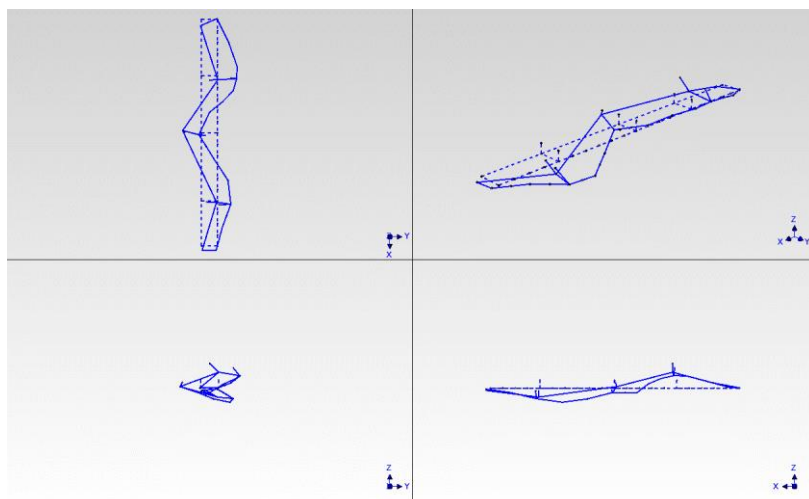
Obr. 94 –  $f_{(7)} = 9,59$  Hz.



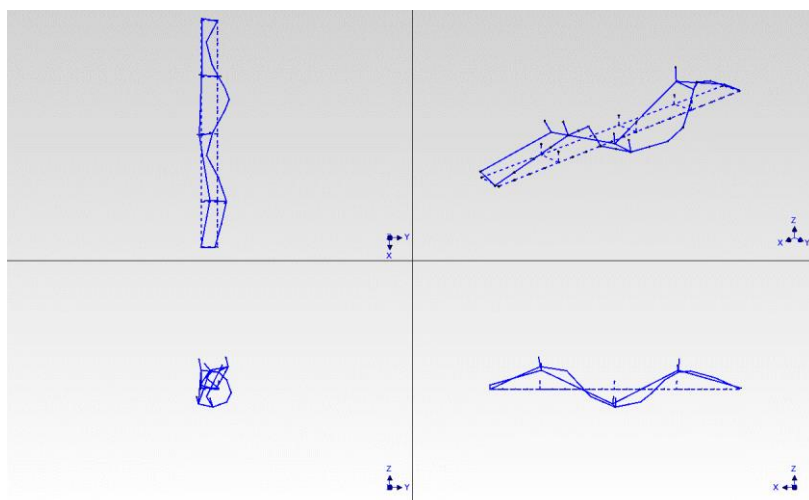
Obr. 95 –  $f_{(8)} = 9,81$  Hz – pravděpodobně 1. tvar krouživého kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



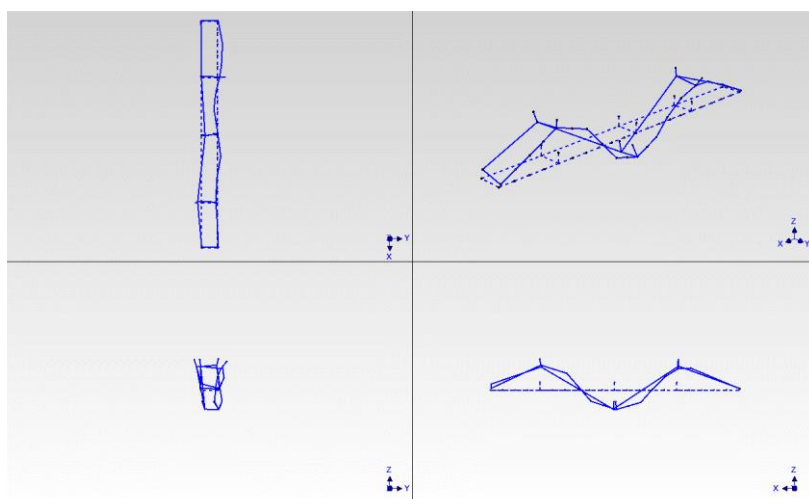
Obr. 96 –  $f_{(9)} = 10,31$  Hz.



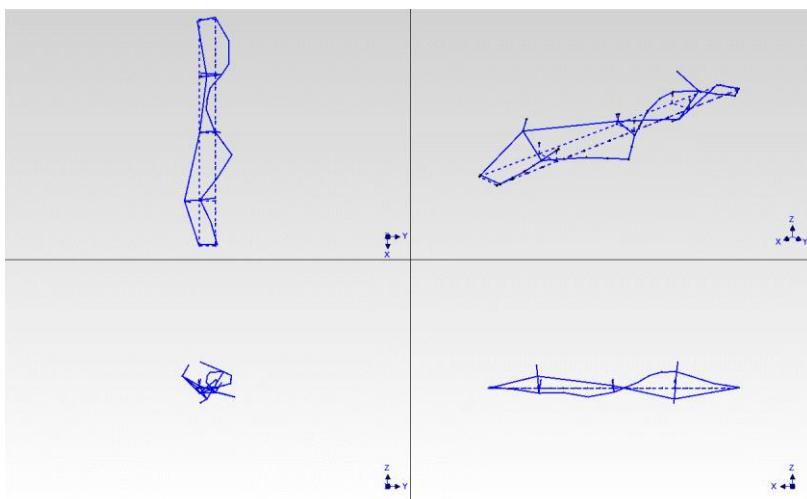
Obr. 97 –  $f_{(10)} = 10,97$  Hz.



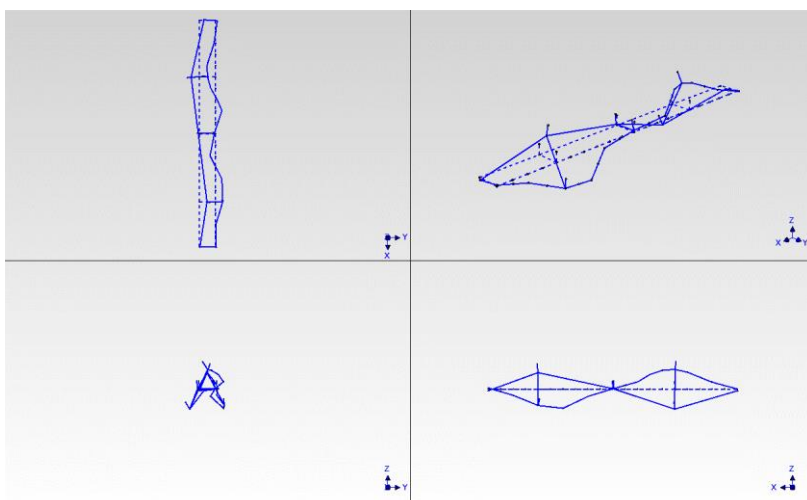
Obr. 98 –  $f_{(11)} = 12,97$  Hz.



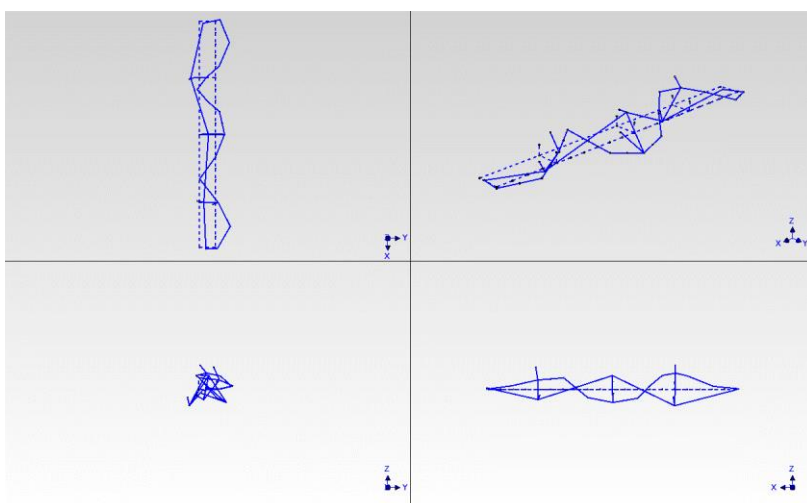
Obr. 99 –  $f_{(12)} = 13,13$  Hz – pravděpodobně 3. tvar svislého ohybového kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



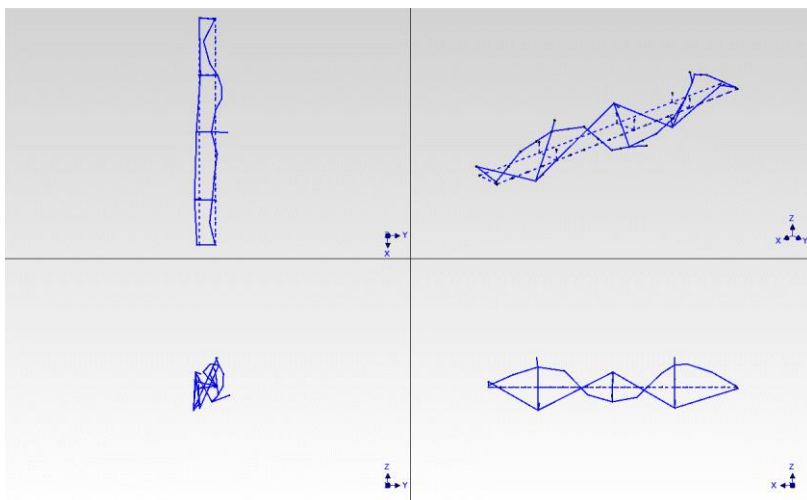
Obr. 100 –  $f_{(13)} = 13,81$  Hz.



Obr. 101 –  $f_{(14)} = 14,75$  Hz – pravděpodobně 2. tvar krouživého kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.



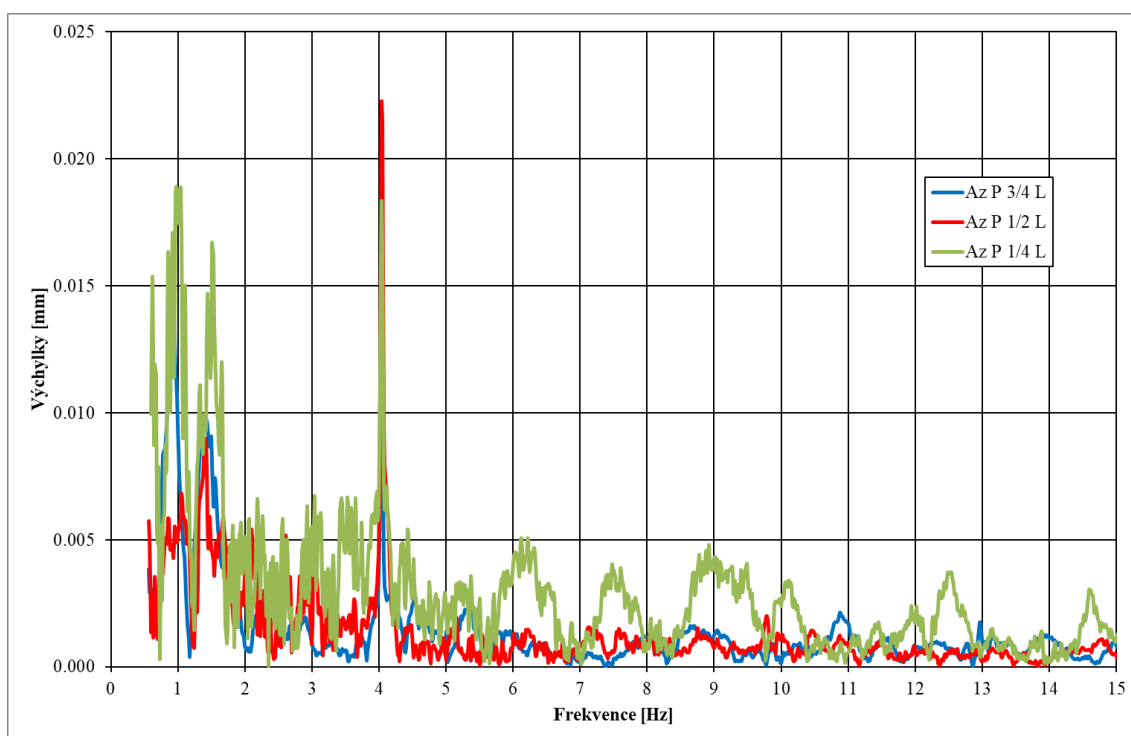
Obr. 102 –  $f_{(15)} = 17,23$  Hz.



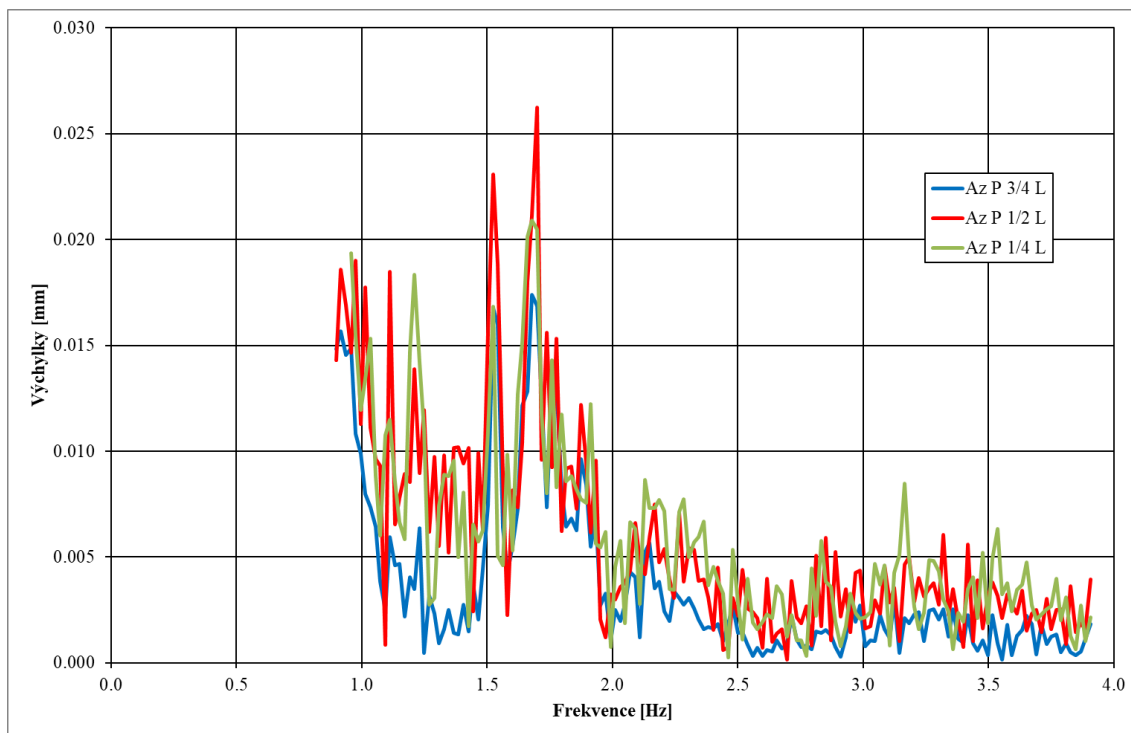
Obr. 103 –  $f_{(16)} = 18,03$  Hz – pravděpodobně 3. tvar krouživého kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu.

### Frekvenční analýza kmitání zachyceného jednotlivými metodami

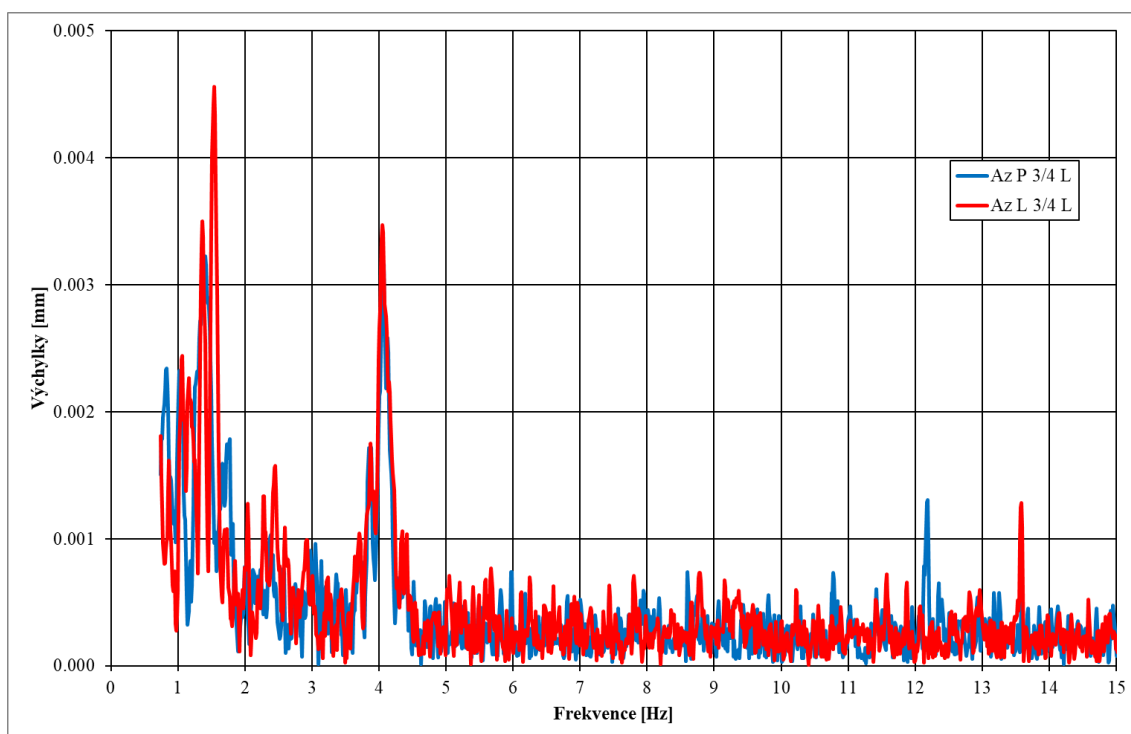
V této části zprávy jsou vykreslena frekvenční spektra vyhodnocená z kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu vyvolaného přejezdem železniční soupravy č. 08.



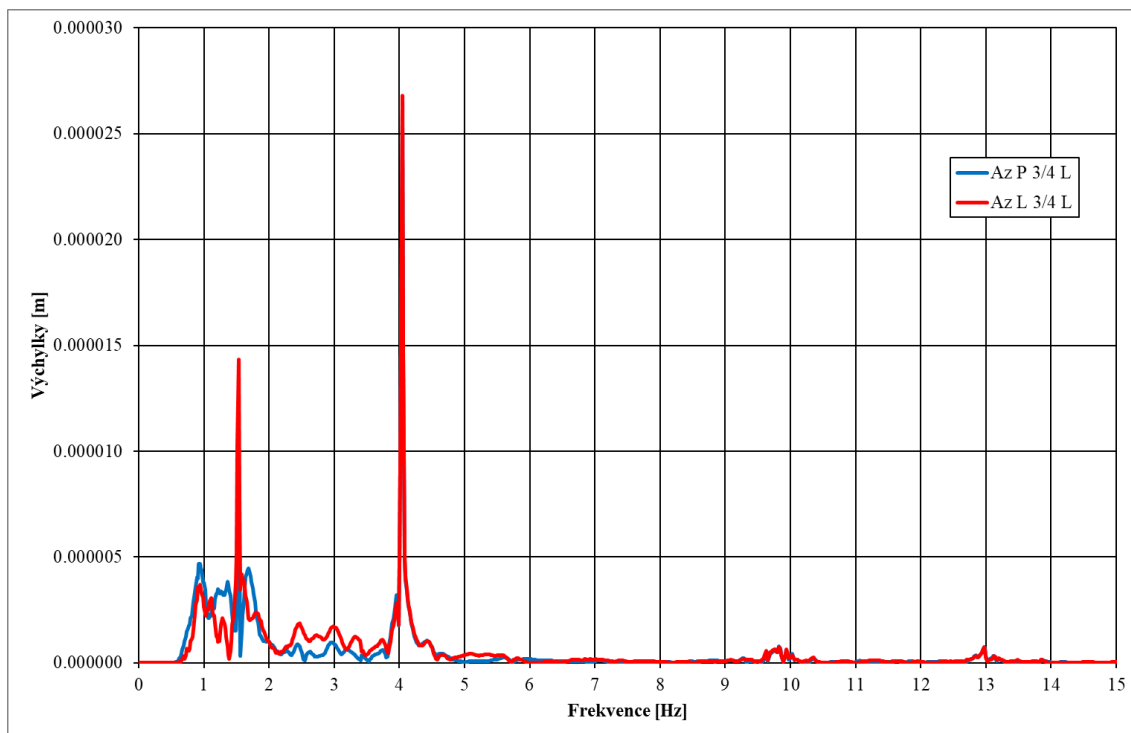
Obr. 104 Frekvenční spektrum vyhodnocené z kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného metodou radarovou interferometrií (RI), kvazistatické složky byly z vykreslení vynechány.



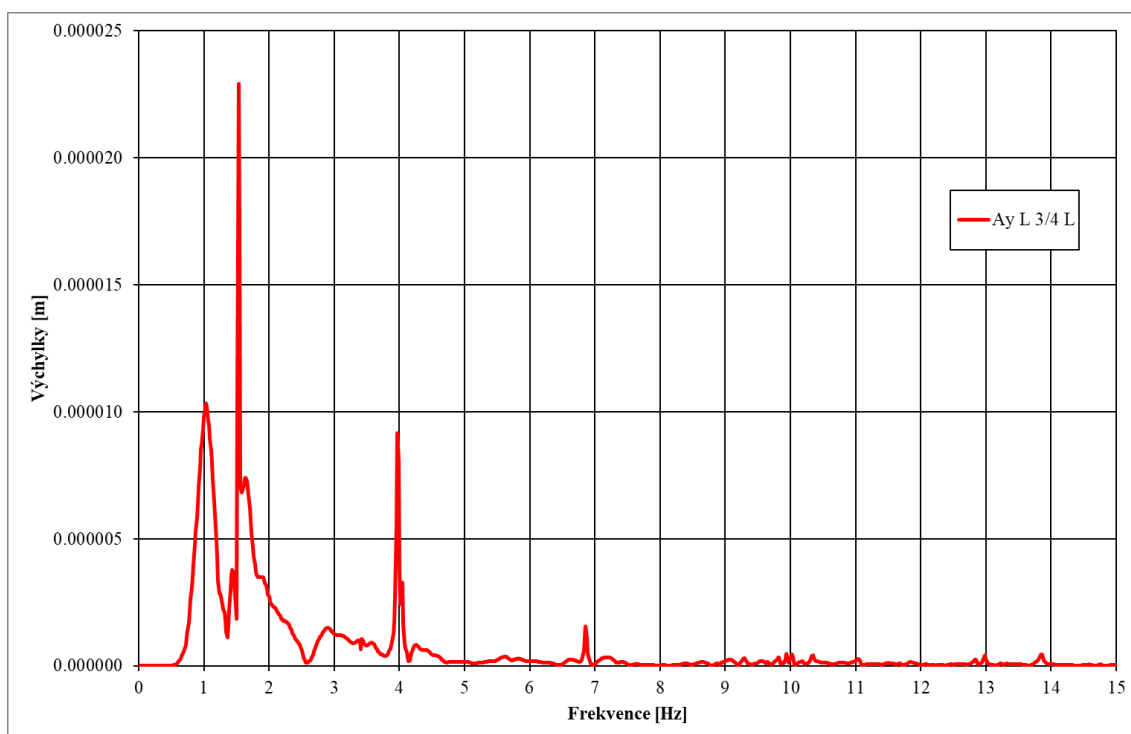
Obr. 105 Frekvenční spektrum vyhodnocené z kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného metodou korelace digitálního obrazu (DIC), kvazistatické složky byly z vykreslení vynechány.



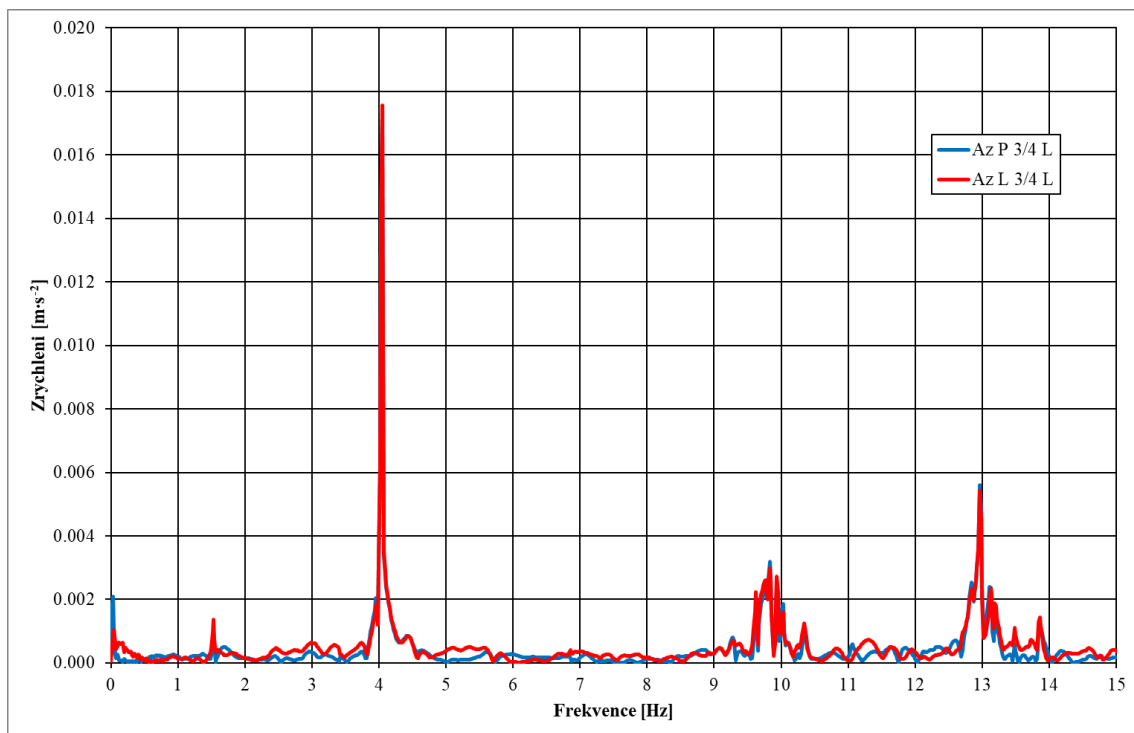
Obr. 106 Frekvenční spektrum vyhodnocené z kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného relativními snímači dráhy, kvazistatické složky byly z vykreslení vynechány.



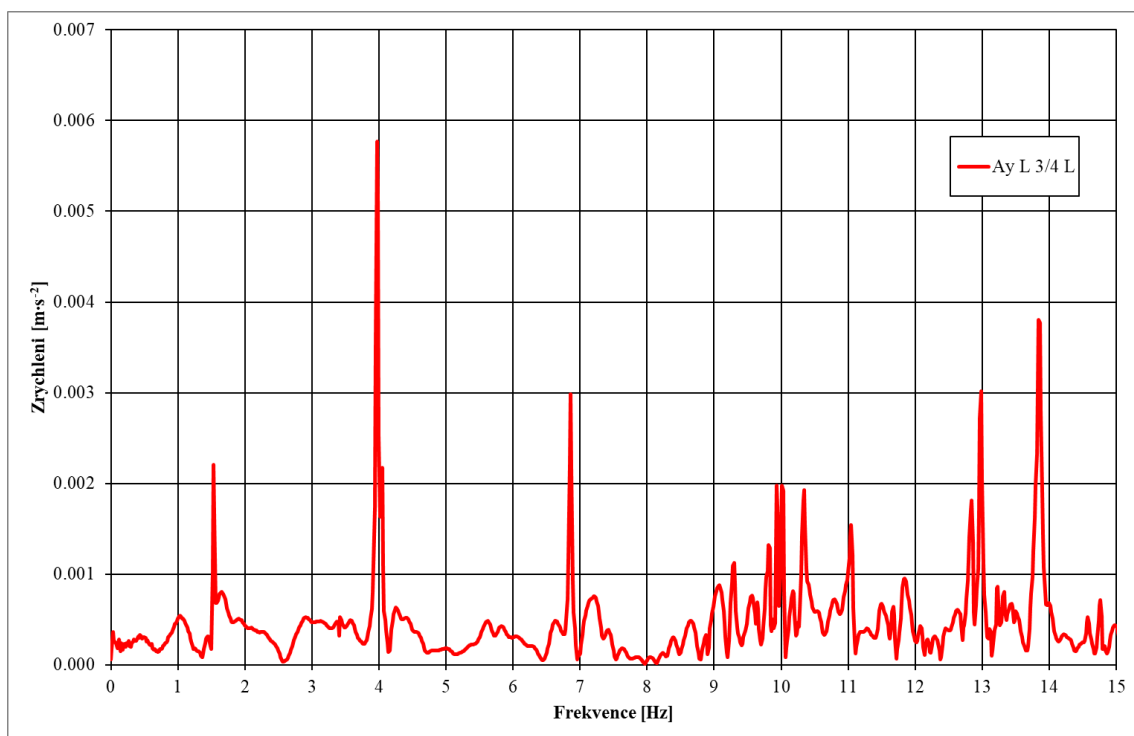
Obr. 107 Frekvenční spektrum vyhodnocené ze svislého kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného snímači zrychlení 8344 upraveného integrací na výchylky, kvazistatické složky byly ze záznamu vyloučeny filtrací.



Obr. 108 Frekvenční spektrum vyhodnocené z vodorovného kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného snímači zrychlení 8344 upraveného integrací na výchylky, kvazistatické složky byly ze záznamu vyloučeny filtrací.



Obr. 109 Frekvenční spektrum vyhodnocené z kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného snímači zrychlení 8344.



Obr. 110 Frekvenční spektrum vyhodnocené z vodorovného kmitání vodorovné nosné konstrukce mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 zaznamenaného snímači zrychlení 8344.

Na *Obr. 104* je vykresleno frekvenční spektrum ze svislých výchylek zaznamenaných radarovou interferometrií (RI), ve kterém nejsou vykresleny kvazistatické složky.

Na *Obr. 105* je vykresleno frekvenční spektrum ze svislých výchylek zaznamenaných metodou korelace digitálního obrazu (DIC), ve kterém nejsou vykresleny kvazistatické složky. Toto spektrum bylo možné vyhodnotit pouze do cca 3,8 Hz kvůli nevhodně zvolené vzorkovací frekvenci.

Na *Obr. 106* je vykresleno frekvenční spektrum z výchylek zachycených relativním snímačem dráhy, i v tomto spektru nejsou vykresleny kvazistatické složky.

Zrychlení měřená absolutními snímači zrychlení 8344 byla převedena pomocí dvojnásobné integrace v časové oblasti převedena na výchylky, při úpravě signálu byly filtrací odstraněny kvazistatické složky. Frekvenční spektrum vyhodnocené z takto získaných vertikálních výchylek je vykresleno na *Obr. 107*, na *Obr. 108* je pak vyneseno spektrum z vodorovných výchylek.

Pro porovnání s předchozími spektry je na *Obr. 109* vyneseno spektrum určené z vertikálních zrychlení mostovky, která byla změřena absolutními snímači zrychlení 8344, na *Obr. 110* je pak vykresleno spektrum určené z vodorovných zrychlení.

## 7. Shrnutí poznatků z experimentu na železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích

Tato příloha shrnuje výsledky získané při experimentu na železničním mostu přes řeku Sázavu v Ratajích nad Sázavou, kterými jsou dokumentovány možnosti jednotlivých porovnávaných měřicích systémů, jejich výhody a nevýhody, které jsou podrobněji popsány v základním textu, ke kterému tato zpráva přísluší jako příloha č. 1.

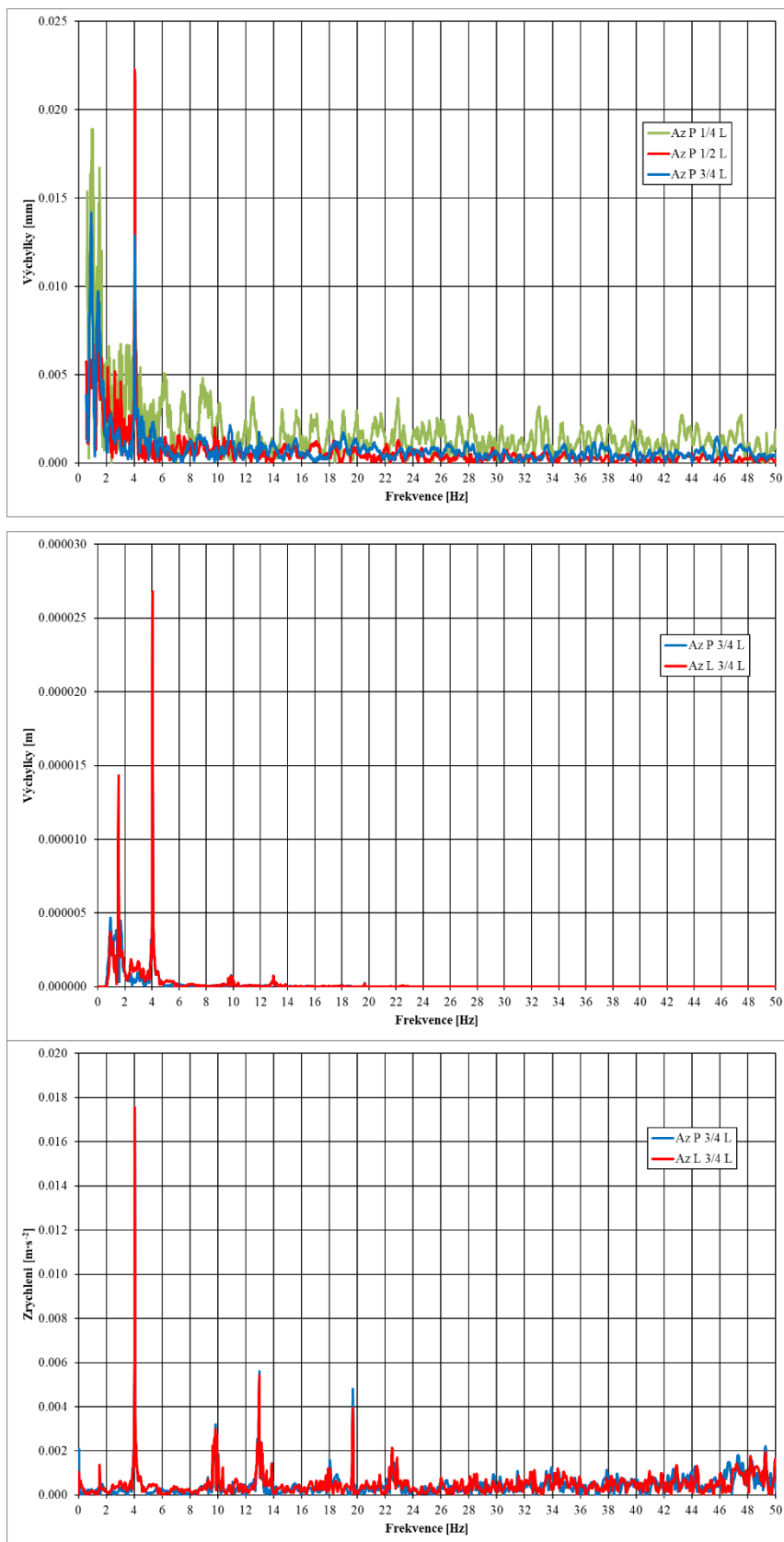
První dvě nejnižší vlastní frekvence zkoumaného mostu jsou svázány s vlastními tvary, ve kterých konstrukce mostu kmitá dominantně ve vodorovném směru (viz *Obr. 88* a *Obr. 89*). Tyto vlastní frekvence bylo tedy svislými budícími silami obtížnější vybudit než vlastní frekvence příslušné k vlastním tvarům, ve kterých konstrukce kmitá převážně ve svislém směru. A proto je 3. vlastní frekvence 4,03 Hz, která je svázána s 1. tvarem svislého ohybového kmitání (viz *Obr. 90*), ve svislém kmitání výrazná až dominantní (viz *Obr. 104*, *Obr. 106*, *Obr. 107* a *Obr. 109*).

Kmitání mostu měřené metodou DIC je v oblasti, kdy železniční souprava přejíždí přes 2. opěru, systematicky ovlivněno vyšší úrovní měřených výchylek (viz *Obr. 14*, *Obr. 21*, *Obr. 28*, *Obr. 44*, *Obr. 52*, *Obr. 59*, *Obr. 66* a *Obr. 73*), která se u zbývajících metod nevyskytuje. Metoda DIC sledovala terče s kontrastními vzory přichycené na svislicích (viz *Obr. 7* vpravo), zatímco ostatní měřicí systémy byly zaměřeny na kmitání mostovky. Velmi pravděpodobně se jedná o důsledek skutečnosti, že metodou DIC byly sledovány jiné konstrukční prvky než ostatními systémy, i když ležely ve shodných řezech.

Svislé výchylky měřené metodami RI a DIC jsou zatížené vyšší úrovní šumu, než výchylky měřené relativním snímačem dráhy, je to patrné například z porovnání kmitání na *Obr. 51* a *Obr. 52* s *Obr. 53*, nebo kmitání na *Obr. 65* a *Obr. 66* s *Obr. 67*, nebo frekvenčních spekter na *Obr. 104* a *Obr. 105* s *Obr. 106*.

Na základě frekvenčních spekter vyhodnocených z dat, která byla naměřena jednotlivými metodami (viz *Obr. 104* až *Obr. 110*), je možné uvést několik postřehů.

1. vlastní frekvence 1,53 Hz, která přísluší k vlastnímu tvaru vodorovného kmitání mostovky, je patrná ve všech vyhodnocených spektrech, ale kvalita jednoznačnosti její identifikace je různá.



Obr. 111 Porovnání frekvenčních spekter vertikálního kmitání mostu při přejezdu železniční soupravy č. 08 ve frekvenčním intervalu do 50 Hz – výchylky z RI, výchylky z 8344 a zrychlení z 8344.

3. vlastní frekvence 4,03 Hz, která je příslušná k 1. vlastnímu tvaru svislého ohybového kmitání, je zachycena ve všech frekvenčních spektrech s výjimkou spektra z dat naměřených DIC, kde to je ovlivněno především nevhodně zvolenou vzorkovací frekvencí.

Některé z vlastních frekvencí, které byly vyhodnoceny při experimentální modální analýze (viz *Obr. 86*), je možné identifikovat i ve frekvenčních spektrech vyhodnocených ze zrychlení zaznamenaného při přejezdu soupravy č. 08 (např. 6,86 Hz, 10,31 Hz nebo 12,97 Hz, viz *Obr. 109* a *Obr. 110*). Ve spektrech výchylek změřených zbývajícími měřícími systémy tyto vlastní frekvence nejsou zřetelné.

Jak již bylo řečeno výše, dynamické výchylky měřené RI a DIC jsou zatíženy vyšší úrovní šumu, než dynamické výchylky měřené relativním snímačem dráhy. Kmitání zachycené absolutními snímači zrychlení obsahuje menší úroveň šumu ve srovnání s metodami měřícími přímo výchylky (viz *Obr. 110* a *Obr. 109* ve srovnání s *Obr. 104*, *Obr. 105* a *Obr. 106*), toto je patrné i v *Obr. 111*. Z *Obr. 111* také vyplývá, že úroveň šumu v datech získaných pomocí radarovou interferometrií je ve frekvenční oblasti do 50 Hz pro jednotlivé frekvenční složky podobná.



**Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s.**

Veletržní 1623/24, 170 00 Praha 7  
IČ: 03447286

# PROTOKOL

## o ověření technologie

**Název technologie:** Technologie využití kombinace různých měřících systémů k určování pohybů mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru

**Řešitel:** Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, veřejná výzkumná instituce  
(ÚTIA AV ČR, v. v. i.)  
Pod Vodárenskou věží 4,  
182 08 Praha 8  
IČ: 67985556

Výše uvedená technologie je hlavním aplikačním výsledkem č. V3 projektu: „*Pokročilá technologie rychlého určování deformací mostů radarovou interferometrií a její využití v diagnostice*“, ev. č. VI20192022167, jehož je Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. reprezentativním uživatelem výsledků (aplikačním garantem). Technologie byla ověřena a byla prokázána její realizovatelnost a uplatnitelnost v oblasti působnosti Technické správy komunikací hl. m. Prahy, a.s. .

Osoba odpovědná za správnost protokolu:

Dne: 20. prosince 2022

Ing. Jan Šesták

TECH. SPRÁVA KOMUNIKACÍ  
hl. m. PRAHY, a.s.  
170 00 Praha 7, Veletržní 1623/24  
úsek správy mostních  
a speciálních objektů

Ředitel správy mostních a  
speciálních objektů