

Merenje vibracija pružnih pragova i određivanje njihovog dinamičkog ugiba i brzine vozova

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Luka Lazarević,
Zdenka Popović
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
mmalovic@grf.rs, brajovic@grf.rs, llazarevic@grf.rs,
zdenka@grf.rs

Vojin Radić
Tamnava - Zapadno polje, PD RB Kolubara d.o.o.
Lazarevac, Srbija
Vojin.Radic@rbkolubara.rs

Sadržaj—Sistem za bežično merenje vibracija razvijen je na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Sastoji se od senzorskih uređaja opremljenih akcelerometrima za merenje ubrzanja i radio modemima kojima se rezultati prenose na centralnu stanicu, najčešće prenosivi laptop računar. Jedan od testova sistema izvršen je na pruzi blizu termoelektrane Obrenovac, kojom prilikom su snimane vibracije koje proizvode puni i prazni teretni vozovi za prevoz uglja. Iz ovih rezultata se primenom tzv. *time delay estimation* metode može doći do prilično pouzdane procene brzine vozova. Takođe, moguća je orijentaciona procena dinamičkog ugiba drvenih pragova, metodom dvostruke integracije. (Abstract)

Ključne reči—bežične senzorske mreže; železnica; vibracije praga; (key words)

I. UVOD

Bežične senzorske mreže su u zadnje vreme predmet brojnih naučnih istraživanja. One imaju sve veću primenu u merenjima u najrazličitijim oblastima, a posebno u građevinarstvu, jer pojeftinjuju i pojednostavljaju proceduru, čine je fleksibilnijom i omogućavaju izvođenje na teško dostupnim mestima. Troškovi razvlačenja kablova velikih dužina se izbegavaju, zajedno sa praktičnim teškoćama. Velika prednost bežičnih mrežnih sistema je i njihova pokretljivost, kao i mogućnost premeštanja pojedinačnih uređaja u okviru sistema [1].

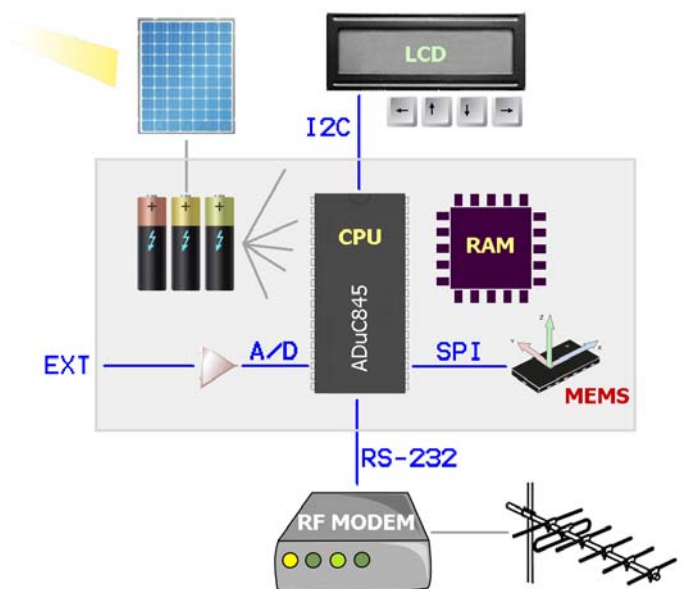
Najčešći cilj upotrebe bežičnih senzorskih uređaja u građevini je nadzor stanja objekata, ili *Structural Health Monitoring* (SHM). U ovu svrhu se najčešće snimaju i analiziraju modovi oscilacija tokom regularne eksploatacije građevinskih objekata ili u odgovoru na veštačku pobudu, ili se posmatra korelacija oscilacija u kritičnim tačkama za date elemente [2].

Sa ostarelim prugama koje se prostiru duž velikog prostora postoji rastuća potreba za upotrebom bežičnih tehnologija na železnicama. Procena stanja i monitoring su potrebni za šine, pragove, sisteme pričvršćavanja, šinske podloške, zastora, itd. Specifični problemi u železničkoj oblasti su ogroman broj elemenata koje bi trebalo opslužiti i distribucija u velikom prostoru [3].

II. RAZVIJENA BEŽIČNA SENZORSKA MREŽA

Senzorska mreža razvijena na Građevinskom fakultetu u

Beogradu [4] sastoji se od senzorskih uređaja i centralne stanice. Senzorski uređaji su napravljeni u SMD tehnologiji i koriste procesor ADuC845 firme Analog Devices [5]. Procesor sadrži višekanalni A/D konvertor, sat, termometar i RS232, I2C i SPI interfejse. Brzina procesora je promenljiva. Može da ulazi u tzv. *sleep* mod (sa programabilnim periodom buđenja) u kome je potrošnja zanemarljiva. Perifernim komponentama se tada ukida napajanje i jedino kola koja služe da održe procesor u regularnom radu se napajaju. Njihova potrošnja tada iznosi ispod 0,4 mA i uređaj može raditi više od mesec dana sa ugrađene tri NiMH baterije bez dodatnog izvora napajanja, u režimu buđenja na svakih nekoliko minuta i uz par punih merenja i transfera podataka dnevno. U slučaju korišćenja solarnih ćelija radi dopunjavanja baterija (tzv. *energy harvesting*), funkcionisanje može da bude neograničeno, a to zavisi od frekvencije buđenja uređaja, broja izvršenih merenja i prenosa podataka, broja upotrebljenih solarnih ćelija koje se spajaju paralelno da bi proizvele solarni panel, kao i od izloženosti panela svetlosti. Kao glavni senzor upotrebljen je digitalni troosni MEMS akcelerometar LIS3LV02DL [6]. Postoji mogućnost upotrebe dodatnih analognih senzora sa zajedničkim ili odvojenim napajanjem, kao i zamene akcelerometra drugim digitalnim sensorom. Na glavnu ploču

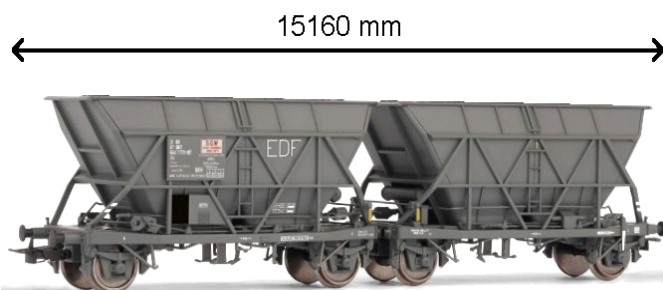


Slika 1. Blok šema senzorskog uređaja

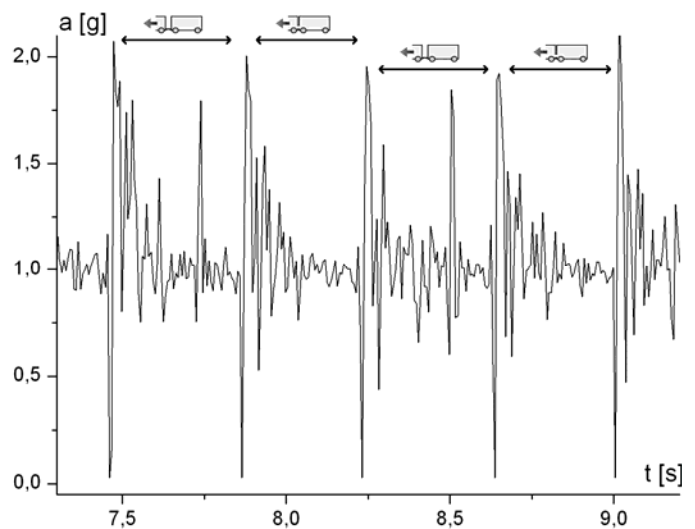
može se po potrebi vezati displej, koji je postavljen u odvojenom kućištu (sa tastaturom). Displej je nezamenljiv u fazi razvoja a i u regularnom radu može se koristiti za dijagnostikovanje stanja uređaja. Senzorski uređaj komunicira sa centralnom stanicom (*hub*) putem radio (RF) modema domaće proizvodnje Decode PRM-4 [7]. Modem radi na 863-867 MHz, što je relativno niska frekvencija, koja ne omogućava visoku brzinu protoka podataka, ali pomaže da se ostvari komunikacija u zatvorenim prostorima i u prisustvu prepreka, zbog bolje difrakcije koja je posledica veće talasne dužine. Ako je potreban veći domet, koriste se *Yagi-Uda* antene, a na centralnoj stanici omnidirekciona antena, dok se u slučaju manjih rastojanja mogu koristiti male *stick* antene. Domet uređaja sa velikim antenama je do 1500 m na otvorenom, a veoma je varijabilan u zavisnosti od toga da li se koristi u urbanoj sredini sa jakim smetnjama ili ne. Blok šema uređaja data je na Sl. 1.

PC računar, najčešće prenosivi laptop, se koristi kao centralna stanica sistema. U ovu svrhu je razvijen poseban program za operativni sistem MS Windows. Energetske rezerve centralne stanice su praktično neograničene, kao i memorija i moć procesiranja. Da bi se izvršila modalna analiza vibracija građevinskih struktura, što je glavna namena ovog bežičnog sistema, potrebno je sakupiti neobrađene signale sa više bežičnih uređaja i uporediti ih.

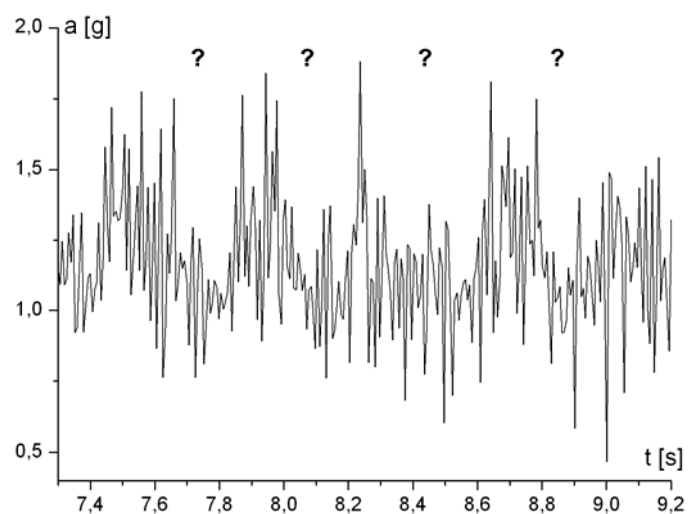
Algoritam rada sistema je takav da senzorski uređaji većinu vremena provode u režimu smanjene potrošnje. Prilikom buđenja oni oslušuju nekoliko sekundi da li postoji signal prozivanja od strane centralne stanice. Ako je isti detektovan, ostaju u tzv. *stand-by* režimu neko vreme, očekujući komandu za početak merenja, transfer podataka, ili setovanje nekih parametara. Prilikom merenja skuplja se 3200 podataka promenljivom frekvencijom odabiranja, koja ide od 40 do 2560 Hz, dakle merni prozori iznose od par sekundi do preko minut. Podaci se zatim lokalno kompresuju bez gubitaka Hafmanovim algoritmom, pošto slanje podataka radiom zahteva najveću potrošnju energije (modem troši oko 30 mA pri slanju dok je potrošnja ostale elektronike 5-10 mA u radnom režimu), pa je cilj minimizirati je i prenositi što je moguće manji broj bitova. Na centralnoj stanici se vrši skupljanje podataka i rekonstrukcija signala. Više metoda uključujući *Reference Broadcast Synchronization* ili *Reference Broadcast Signal* (RBS) sinhronizaciju [8], *back* sinhronizaciju [9], i povremena ispitivanja frekvencija kristala kao i odnosa frekvencija (koji je bitniji nego apsolutne vrednosti), su primenjene da bi se obezbedila dobra sinhronost podataka, koja je reda veličine 0.01 ms do 0.1 ms i premašuje mogućnosti mehaničkih senzora



Slika 2. Par koševa koji čine teretni dvodelni EDF vagon za prevoz uglja



Slika 3. Vertikalno ubrzanje praga u vremenu (primer 1)



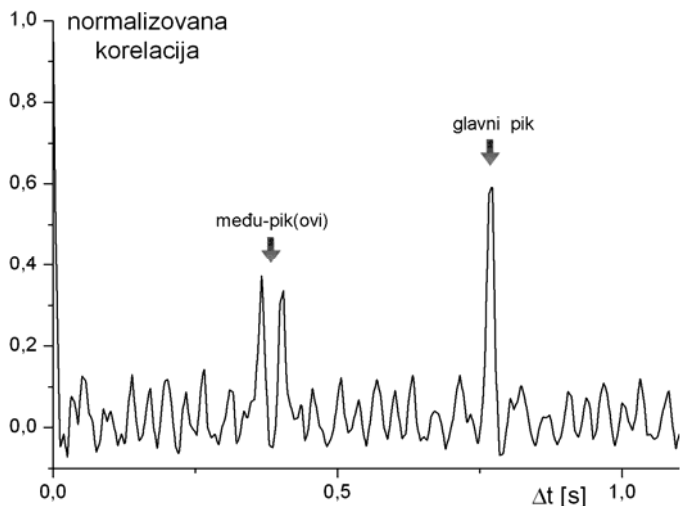
Slika 4. Vertikalno ubrzanje praga u vremenu (primer 2)

sa periodama odabiranja reda veličine milisekunde.

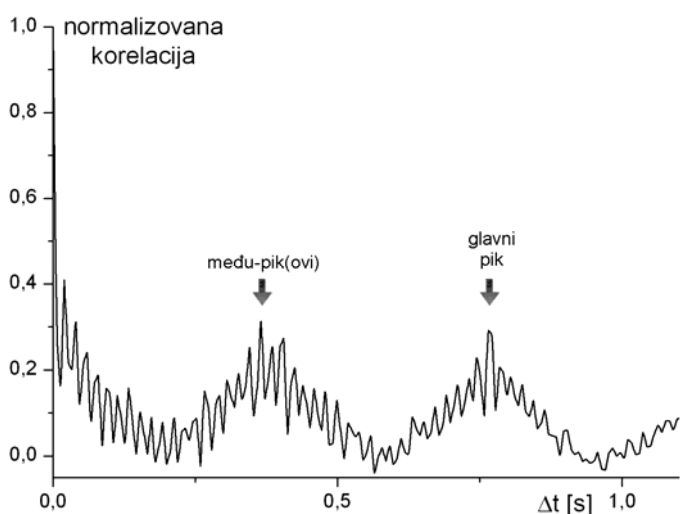
III. MERENJE UBRZANJA PRAGOVA I BRZINE VOZA

Merenje je izvršeno na pruzi nedaleko od termoelektrane *Nikola Tesla* u Obrenovcu. Ovom prugom se termoelektrana snabdeva ugljem iz površinskog kopa Kolubara. Snimljeno je po nekoliko punih i praznih vozova (prazni se vraćaju istim putem iz termoelektrane). Za prevoz se koriste teretni dvodelni EDF vagoni, prikazani na Sl. 2. Svaki vagon se sastoji od dva koša. Dužina vagona (para koševa) iznosi nešto preko 15 m. Masa iznosi 25 t. Uobičajeno se tovari oko 60 tona uglja.

Frekvencija samplovanja akcelerometara bila je 160 Hz a merni prozor 20 sekundi. Tri senzorska uređaja u svojim kućištima bili su zalepljeni lepljivom trakom za pragove pruge, sa spoljne strane u odnosu na šine, na međusobnom odstojanju od po 3 m. Oblici signala variraju od praga do praga, i od toga da li prolazi pun ili prazan voz. Za pune vozove oscilacije su manje amplitude, iako su statički ugibi u tom slučaju veći. Vertikalne oscilacije imaju amplitudu oko 0,5g u slučaju punih vozova odnosno oko 1g u slučaju praznih. Tačne vršne



Slika 5. Primena TDE metode na signal iz primera 1



Slika 6. Primena TDE metode na signal iz primera 2

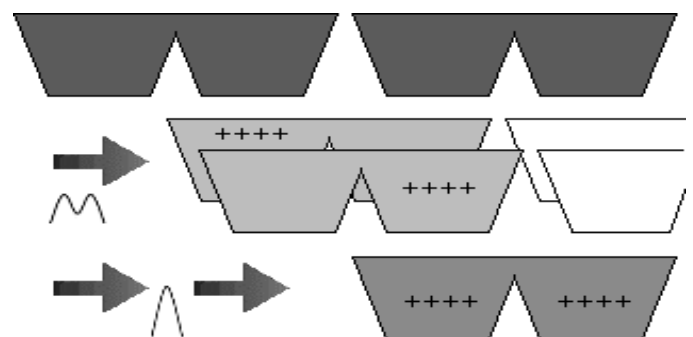
vrednosti ubrzanja je teško precizno izmeriti iz razloga što propusna moć akcelometara nije bila dovoljna da obezbedi pouzdano beleženje kratkotrajnih impulsa velike sile. Ubrzanja u ostalim pravcima su tipično za red veličine manja nego vertikalna, i idu do 0,25g za slučaj praznih vozova. Dva parcijalna dijagrama vertikalnog ubrzanja u funkciji vremena, za prazne vozove (jače vibracije), data su na Sl. 3 (pravilan dijagram dobijen na pragu za koga se pretpostavlja da je boljeg kvaliteta) i Sl. 4 (nepravilan dijagram dobijen na pragu za koga se pretpostavlja da je lošijeg kvaliteta).

Vidimo da se na prvom primeru jasno uočava obrazac po kome se koševi i vagoni mogu prepoznati. Tako je moguće izračunati brzinu vozila deljenjem dužine vagona sa vremenom prolaska. Tačna dužina vagona sa kvačilom može malo varirati (u cm, ne dm) jer veza nije kruta tako da se procena brzine voza na osnovu poznavanja geometrije vagona može dati sa preciznošću reda veličine nekoliko promila. Pretpostavljeno je da ostale neodređenosti imaju za barem red veličine manji uticaj na ovaj proračun. Relativna neodređenost frekvencije sata senzorskog uređaja je u najgorem slučaju 10^{-4} , a uz kalibraciju i temperatursku softversku korekciju pada i do 10^{-6} .

Neodređenost dimenzija usled sezonskih varijacija temperature i starenja je reda veličine 10^{-4} relativno. Neodređenost izlaza digitalnog akcelometra u zavisnosti od temperature ne utiče na proračun jer amplituda signala nije povezana sa određivanjem brzine (inače osetljivost može da varira do $2,5 \cdot 10^{-4}$ pune skale, koja u ovom slučaju iznosi $\pm 2g$, po $^{\circ}C$, prema proizvođačkoj specifikaciji). Iz prvog primera dobija se brzina punog voza od 70,69 km/h.

I u slučajevima kada signal nije vizuelno prepoznatljiv, kao na Sl. 4 (drugi primer, prikazan isti vremenski prozor kao na Sl. 3, snimljen na drugom senzoru koji se nalazio na uslovno rečeno lošijem pragu), može se upotrebiti *time delay estimation* (TDE) tehnika [10] za određivanje brzine voza. Ovo se izvodi tako što se računa korelacija signala sa samim sobom pomerenim u vremenu. Ova funkcija ima maksimum u nuli, ali treba da dostigne uočljivu vrednost i kada se signal pomeri u vremenu za jednu ili više perioda (u ovom slučaju vreme potrebno da ceo vagon pređe preko pražga). Na Sl. 5 i Sl. 6 vidimo korelaciju dobijenu TDE metodom za ova dva primera. U prvom slučaju, kada je signal pravilniji, pikovi koji odgovaraju dvodelnim vagonima su jasni, i naravno javljaju se za razmake koji se mogu lako uočiti na originalnom vremenskom dijagramu. Među-pikovi su očekivano dupli i nižeg intenziteta, što savršeno odgovara geometriji sistema. Naime, usled različitih razmaka između osovinu na spoju koševa nego na spoju vagona, situacija je slična kao da prolaze jedan nešto duži i jedan nešto kraći vagon. Delimično poklapanje signala se javlja kada se prednja ivica dužeg šiftuje tako da se poklopi sa prednjom ivicom kraćeg, a zatim i kada se zadnja ivica prednjeg poklopi sa zadnjom ivicom kraćeg, što u slučaju male razlike u dužini rezultuje u dva bliska pika (ovo je skicirano na Sl. 7, gde su poklapajući koševi obeleženi plusevima). U drugom slučaju, kada je signal slabijeg kvaliteta, glavni i među-pikovi se ne mogu razlučiti po intenzitetu, ali saznanje da očekujemo među-pikove nam omogućuje da identifikujemo stvarne glavne pikove i dobijemo približno isti rezultat za brzinu kao i u prvom slučaju, a to je 70,97 km/h. Razlika u odnosu na prvu vrednost odgovara vremenskoj greški od jedne trećine perioda odabiranja akcelometra (6 ms), odnosno 2 ms. Šiftovanje signala u vremenu je rađeno sa korakom od 1 ms.

Nešto uočljivija razlika između pravog i „među“ korelacionog maksimuma u slučaju signala slabijeg kvaliteta dobija se pri proučavanju slabijih komponenti ubrzanja koje su snimljene na x i y osama, ali mali intenzitet uz prisustvo viših harmonika može učiniti softversku detekciju značajnim



Slika 7. Vizuelni prikaz nastanka među- i glavnih pikova korelacije



Slika 8. Laserski sistem za merenje statičkog ugiba šina

problemom. Takođe, podaci se mogu digitalno filtrirati filtrom propusnikom niskih frekvencija, pri čemu dijagram sa Sl. 6 neće imati značajno različito nivo među-pikova i glavnih pikova, ali će pikovi postati prepoznatljivi (u zavisnosti od primenjenog filtra, među-pikovi postaju tuplji i/ili dvostruki, dok glavni pikovi zadržavaju oštrinu).

Međusobna korelacija signala sa različitih pragova ne može da se upotrebi za određivanje brzine voza, kao ni za bilo kakvu drugu analizu, usled prevelikih razlika između snimljenih signala.

IV. ZNAČAJ I TEHNIKE MERENJA POMERAJA PRAGOVA

Trajna oštećenja pragova i drugih elemenata nastaju kao posledica niza uzroka. Prirodne pojave kao što su klizanje zemljišta ili elementarne nepogode mogu doprineti ubrzanom starenju pruga. U toku regularne eksploatacije, oštećenja su uglavnom posledica prevelikih opterećenja, češće dinamičkih nego statičkih. Statička opterećenja podrazumevaju vozila prevelike težine. Dinamička podrazumevaju kratka udarna opterećenja. Ova najčešće nastaju kao posledica defektnih točkova [11]. Točkovi nepravilnih dimenzija uzrokuju permanentna i potencijalno ozbiljna oštećenja, posebno na šinama. Ponovljena kratka udarna opterećenja, koja neravnine proizvode, pospešuju nastajanje i ubrzavaju rast pukotina u metalu [12], što skraćuje rok upotreba pruga i povećava šanse za katastrofalne nesreće.

Drugi značajni uzroci oštećenja pruga prilikom eksploatacije su loš kvalitet osovina i kočnica vozila i prevelike bočne oscilacije kompozicija [13].

Merenje pomeranja pružnih pragova pod opterećenjem može pružiti relevantne informacije inženjerima u oblasti železnice pri proračunima krutosti zastora i modula elastičnosti šinske podloge, kao i za proveru efikasnosti procedura održavanja pruga (kao što su čišćenje i podbijanje zastora). Krutost zastora ima značajan uticaj na njegovu brzinu sleganja, raspodelu opterećenja, dinamička opterećenja, i naprezanja određenih komponenti. Takođe, pragovi utiču i na stvaranje komunalne buke čijem se smanjenju teži [14].

Praktična merenja pomeranja pragova su u stvarnosti

povezana sa brojnim teškoćama. Najveća teškoća je obezbediti dobar referentni sistem, jer su svi delovi pružne konstrukcije podložni vibracijama. Vibracije se prenose i na okolno tlo na koje se eventualno postavljaju delovi mernog sistema. Neki često korišćeni senzori za merenje pomeraja nisu toliko efikasni u slučaju merenja pomeraja (ugiba) praga ili drugih elemenata. U ovu klasu spadaju induktivni i kapacitivni pretvarači, sistemi sa oprugama, i dr [15]. Da bi bili efikasni, ovi sistemi se najčešće moraju ugraditi duboko u tlo ispod pruge što predstavlja poteškoću. Ako se mere pomeranja pri visokofrekventnoj pobudi, situacija postaje još složenija usled ograničenja dinamičkih karakteristika ekonomskih senzora što uslovljava potrebu za skupljim mernim sistemima. Takođe, optoelektronski sistemi na bazi lasera često se koriste za merenje pomeraja [16]. I u njihovom slučaju javlja se problem referentne tačke. Ako je laser bliže mernoj tački, vibracije su jače, a ako je dalje, preciznost merenja opada. Primer ovakvog sistema je prikazan na Sl. 8.

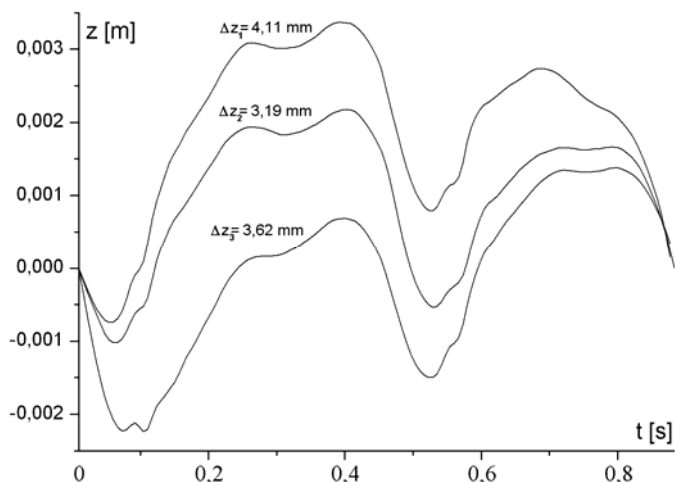
Ako se upotrebljavaju akcelometri, prestaje potreba za spoljnom referencom jer oni mere inercijalno ubrzanje kome su izloženi. Brzina i položaj praga se mogu odrediti metodom jednostruke odnosno dvostruke integracije ubrzanja po vremenu. Mana ovog pristupa je što se šum akumulira i dolazi do slučajnog odstupanja koje raste sa vremenom, te su potrebne softverske metode korekcije [17]. Softverske korekcije nivoa se vrše po periodama, tj. iskorišćavaju informaciju da se pragovi (ili bilo koje druge oscilujuće strukture) vraćaju u početni položaj nakon isteka periode, odnosno prolaska vagona ili kompozicije u ovom slučaju.

V. MOGUĆNOSTI MERENJA DINAMIČKOG UGIBA PRAGOVA POSTOJEĆIM SISTEMOM

Dvostruka integracija signala da bi se dobilo pomeranje pragova u slučaju upotrebe opisanog bežičnog sistema ne daje sasvim zadovoljavajuće rezultate. Ispostavilo se da je potrebna veća frekvencija odabiranja da bi se nagli udarci snimili dovoljnom rezolucijom za digitalno integraljenje. Takođe, postoji sumnja da je potrebno bolje pričvršćivanje akcelometara za podlogu, jer se pri nekim udarcima javljaju kratka ubrzanja preko g , što znači da pri ubrzanjima praga na dole može da dođe do zaostajanja akcelometra.

Ipak, orijentaciona procena amplitude pomeranja dela praga na kome je postavljen senzor (ubrzanja i pomeranja ne mogu biti identična duž cele površine praga) može se dati i analizom postojećih snimaka. Nije bitno koje tačke ćemo izabrati za početak i kraj periode ako je njena vrednost poznata. Usled nesavršenosti merenja, koje uključuje histerezis, nelinearnost, i razne druge greške, jednostrukim i dvostrukim integraljenjem u vremenu preko jedne periode se ne dobija tačno nula, iako bi brzina i pomeraj praga trebalo da se vrate na inicijalne vrednosti. Naravno da postoje i fizički razlozi za odstupanja, kao spori harmonici oscilacije kompozicije i strukture, i razlike između vagona. Iz ovih razloga uvode se pomenute korekcije, koje treba da pomeraju srednji nivo signala tako da se integraljenjem dobije isti položaj na početku i kraju periode.

Na Sl. 9 prikazani su primeri određivanja dinamičkog vertikalnog ugiba praga z metodom duple integracije sa korekcijom za tri različita perioda (vagona) na istom snimku



Slika 9. Primeri određivanja vertikalnog pomeraja (dinamičkog ugiba) dvostrukom integracijom za slučaj relativno pravilnog signala

punog voza (za koji je određena brzina od 62,52 km/h). Vrednosti na osama su relativne (referentna vrednost z nije određena a vreme je brojano u odnosu na početak periode). Iako su razlike značajne, obrazac se jasno uočava, i devijacije amplituda pomeraja za slučaj punog voza su reda veličine 10%. Možemo da zaključimo da je amplituda pomeraja oko 2 mm.

Najveće devijacije se dobijaju u slučaju praznog voza na pragu lošijeg kvaliteta (signal koji je prikazan na Sl. 4). Ovde obrazac nije uočljiv a amplitude variraju i do 1:2,5 (što bi, obzirom na nepravilan vremenski dijagram, moglo biti i dobrim delom istinito). Možemo da zaključimo da je amplituda pomeraja u ovom slučaju maksimalna i iznosi oko 1 cm.

VI. ZAKLJUČAK

Bežični sistem za merenje vibracija, razvijen na Građevinskom fakultetu u Beogradu, testiran je na pruži pored termoelektrane Obrenovac. Merene su vibracije pružnih pragova prilikom prolazaka praznih i punih teretnih vozova koji nose ugaj. Iz dobijenih podataka se može odrediti brzina voza sa relativno dobrom pouzdanošću, i dati okvirna procena dinamičkog ugiba pružnih pragova.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je sproveden uz podršku Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, u okviru projekata III44002 "Astroinformatika: primena IT u astronomiji i srodnim oblastima" i TR-36048 "Istraživanje stanja i metoda unapređenja građevinskih konstrukcija sa aspekta upotrebljivosti, nosivosti, ekonomičnosti i održavanja".

LITERATURA

- [1] L. Gavrilovska, S. Krco, V. Milutinovic, I. Stojmenovic and R. Trobec (eds), Application and multidisciplinary aspects of wireless sensor networks. Springer, London, 2011.
- [2] B. A. Sundaram, K. Ravisankar, R. Senthil and S. Parivallal, "Wireless sensors for structural health monitoring and damage detection techniques," Current Science, 104(11), June 2013, pp 1496-1505.

- [3] S. Kaewunruen and A. M. Remennikov, "Trends in vibration-based structural health monitoring of railway sleepers," in R. C. Sapri (ed), Mechanical Vibration: Measurement, Effect, and Control, 2009, pp 3-4.
- [4] M. Malović, Lj. Brajović, Z. Mišković and G. Todorović, "Merenje vibracija mrežom bežičnih senzora," Tehnika - Naše Građevinarstvo, 66(6), 2012, pp 883-889.
- [5] Analog Devices, ADUC845 microconverter datasheet, from http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUC845_847_848.pdf
- [6] ST Microelectronics, LIS3LV02DL accelerometer datasheet, from <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00091417.pdf>
- [7] Decode, PRM-4 radio modem datasheet, from http://www.decode.rs/documentation/PRM_4-datasheet.pdf
- [8] J. Elson, L. Girod and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," ACM SIGOPS Operating Systems Review - OSDI '02: Proc. of the 5th symposium on Operating systems design and implementation, 36(SI), winter 2002, pp 147-163.
- [9] S. Rahamatkar, A. Agarwal and N. Kumar, "Analysis and comparative study of clock synchronization schemes in wireless sensor networks," International Journal on Computer Science and Engineering, 2(3), 2010, pp 536-541.
- [10] S. Bjorklund and L. Ljung, "A review of time-delay estimation techniques," in *Proceedings of 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, January 2004, pp 2502-2507.
- [11] J. C. O. Nielsen and A. Igeland, "Vertical dynamic interaction between train and track - influence of wheel and track imperfections," Journal of Sound and Vibration, 187(5), November 1995, pp 825-839.
- [12] Z. Cheng, D. Chen and F. Nogata, "Fatigue behaviour of a rail steel under low and high loading rates," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 17(1), 1994, pp 113-118.
- [13] D. Barke and W. K. Chiu, "Structural health monitoring in the railway industry: a review," Structural Health Monitoring, 4(1), 2005, pp 81-93.
- [14] D. Thompson, Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control. Elsevier, Oxford | Amsterdam, 2009.
- [15] D. Stanković, Fizičko tehnička merenja. Naučna Knjiga, Beograd, 1991.
- [16] B. Pan, K. Qian, H. Xie and A. Asundi, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review," Measurement Science and Technology, 20(6), June 2009, article ID 062001 (17 pages).
- [17] S. J. Cox, "Deflection of sleeper in ballast," Vehicle system dynamics supplement, vol. 24, 1995, pp. 146-153.

ABSTRACT

A wireless system for vibration measurements has been developed at the Faculty of Civil engineering, University of Belgrade. It's comprised of sensor nodes equipped with accelerometers to measure vibrations and radio modems which transfer data to the hub (base station), usually a laptop personal computer. One of the tests of this system was performed near the thermal power plant of Obrenovac. Vibrations produced by full and empty coal trains were recorded. Results were used for train velocity calculation (using the time delay estimation technique) with solid precision, and approximate estimation of dynamic deflection of wood sleepers (by double integration).

MEASUREMENT OF SLEEPERS VIBRATIONS AND DETERMINATION OF THEIR DYNAMIC DEFLECTION AND TRAIN VELOCITY

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Vojin Radić,
Luka Lazarević, Zdenka Popović