

# Detekcija nebalansiranosti usisnih grana motocikala pomoću intenzitetske sonde

Miloš Bjelić, Miomir Mijić, Miodrag Stanojević, Branislav Juranović

**Apstrakt**— Pouzdana detekcija i otklanjanje kvarova na motociklima predstavlja put ka bezbednosti učesnika u saobraćaju. Motocikl je sačinjen od velikog broja delova koji potencijalno mogu imati kvar, i kao takav predstavlja složen i zahtevan sistem za analizu. U ovom radu prikazana je metoda za neinvazivnu detekciju kvarova na motociklu, nezavisno od tipa motocikla. Analizirana je mogućnost detekcije nebalansiranosti usisnih grana motora sa unutrašnjim sagorevanjem pomoću merenja intenziteta zvuka koji emituje motocikl. Kao merni alat u istraživanju korišćena je intenzitetska sonda sa dva mikrofona. U radu su prikazane prednosti merenja intenziteta u odnosu na druge akustičke metode u ovoj situaciji. Rezultat detekcije pomoću intenzitetske sonde upoređen je sa drugim tehnikama za određivanje ovog kvara.

**Cljučne reči**— intenzitet zvuka, intenzitetska sonda, motocikl, SUS motor.

## I. UVOD

Motocikl, nezavisno od tipa, predstavlja složen sistem koji se sastoji od nekoliko povezanih celina. Složenost sistema ogleda se u velikom broju mehaničkih i električnih delova koji treba da rade zajedno. Pošto se motocikl koristi za prevoz ljudi, ispravan rad takvog sistema je neophodan u svakom trenutku kako bi se ispunili bezbednosni uslovi. Za pravilan rad celog sistema potrebno je pravilno funkcionisanje svih sastavnih delova, što znači da je potrebno često održavanje i praćenje rada pojedinih delova. Zbog velikog broja delova, kao i potrebe za čestim servisima određena automatizacija u dijagnostici kvarova bila bi od velike koristi ljudima koji obavljaju servis motocikala. U ovom radu napravljen je mali doprinos u tom smislu. Analizirana je mogućnost detekcije nebalansiranosti u radu usisnih grana kod motocikala sa više cilindara.

Nebalansiranost u radu usisnih grana motora sa unutrašnjim sagorevanjem može imati nekoliko negativnih posledica. Prva posledica predstavlja neravnomeran rad motora, odnosno dovodi do manje ostvarene snage motora. Druga posledica predstavlja povećanje ekološkog zagađenja životne sredine. Usled nepravilnog rada motora povećava se izbacivanje štetnih produkata sagorevanja kao što su ugljen

monoksid i ugljen dioksid. Treća posledica je povećanje buke koju stvara motocikl.

Zbog svega navedenog važno je da se ovakav kvar na vreme detektuje i otkloni. U praksi su se ustalile tehnike detekcije ovog kvara kao što su merenje pritiska u samim vazдушnim granama motora. Takav način je pouzdan i zahteva merenje sa dva barometra. Pošto se za ovakav način detekcije zahtevamontiranje barometara na same usisne grane, postavljeno je pitanje da li se na neki neinvazivni način može detektovati nebalansiranost u radu usisnih grana motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Početna pretpostavka u ovom radu bila je da se analizom zvuka motora može utvrditi ovaj kvar. Analiza zvuka dobijenog pomoću mikrofona može imati nekoliko nedostataka. Merni mikrofoni sakuplja sve signale koji se javljaju pri radu motocikla, pa bi na osnovu tog snimka bilo teško utvrditi koji deo snimka potiče od ovog kvara, a koji od delova motocikla koji rade u ispravnom stanju. Pošto bi snimanje moralo biti vršeno u prostorijama u kojima se obavlja servis, u snimcima bi se pojavio i uticaj prostorije, što bi dodatno otežalo analizu. Zbog toga se kao ideja u ovom istraživanju pojavila mogućnost ideja merenja intenziteta zvuka umesto merenja zvučnog pritiska pomoću jednog mikrofona.

Merenje intenziteta poznato je i koristi se nekoliko decenija [1]. Kao najčešće korišćena procedura u merenju intenziteta koristi je merenje pomoću intenzitetske sonde. Ovaj način merenja intenziteta podrazumeva merenje pomoću dva mikrofona postavljena na bliskom rastojanju. Mikrofon formiraju osu koja predstavlja pravac u kom se određuje vrednost intenziteta zvuka. Intenzitetska sonda koristi se u raznim inženjerskim oblastima: građevinskoj akustici [2], u određivanju buke mašina složenih geometrijskih oblika [3], [4] itd. Prednost korišćenja intenzitetske sonde u odnosu na merenje zvučnog pritiska je ta što se intenzitet određuje samo za pravac koji formiraju dva mikrofona u intenzitetskoj sondi. Na taj nači vrši se prostorna selekcija zvučnih izvora koji se analiziraju i eliminiše se uticaj izvora koji bi potencijalno mogli da ugroze analizu. Za merenje intenziteta pomoću intenzitetske sonde obično se definiše merna ravan, na nekoliko centimetara udaljena od izvora zvuka. Merenje se može vršiti u nekoliko tačaka ili kontinualno, tako da se sondom formira određena kriva linija u prostoru [5]. Ukoliko se merenje vrši u diskretnim koracima, zbog preciznosti i ponovljivosti, obično se formira mreža tačaka u kojima se vrši merenje, zbog preciznosti i ponovljivosti merenja. Intenzitet zvuka u prostoru obično se prikazuje dvodimenzionalno, kao slika, gde boje predstavljaju vrednosti intenziteta zvuka. Dodatno se pored rezultata može napraviti i fotografija prostora u kom je vršeno merenje, tako da se vrlo brzo može izvršiti analiza rezultata.

U ovom istraživanju ispituje se mogućnost korišćenja

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Miodrag Stanojević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: miodragstanojevic@bitprojekt.co.rs).

Branislav Juranović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: banebmw@gmail.com).

intenzitetske sonde u detekciji nebalansiranosti u radu usisnih grana motora kod motocikala. Merenja su izvršena u situaciji kada nije postojala sinhronizacija usisnih grana motocikla i u situaciji kada je sinhronizacija postignuta. Dobijeni su rezultati koji pokazuju da se ovakav način neinvazivnog merenja može koristiti u detekciji ovog kvara. Ovaj rad predstavlja početak istraživanja u primeni intenzitetske sonde u analizi rada motocikala i ranoj detekciji potencijalnih kvarova na motociklu.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazana je metoda za merenje intenziteta zvuka pomoću dva mikrofona. U trećem poglavlju prikazana je korišćena oprema u eksperimentima, kao i eksperimentalna postavka eksperimenata. U narednom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati merenja i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju dat je zaključak o mogućnosti korišćena intenzitetske sonde u detekciji i kvantifikaciji kvara nebalansiranosti usisnih grana motora sa unutrašnjim sagorevanje.

## II. METODE

U ovom poglavlju objašnjene su procedure i metodologije koje su korišćene u radu. Biće prikazana procedura određivanja, odnosno merenja, vrednosti intenziteta zvuka pomoću intenzitetske sonde, kao i prednosti i ograničenja koja ova merna metoda ima.

### A. Merenje intenziteta zvuka

Intenzitet zvuka predstavlja vektorsku veličinu i može se izračunati poznavanjem brzine i zvučnog pritiska, odnosno:

$$\vec{I} = p(\vec{r}, t) \mathbf{v}(\vec{r}, t) \quad (1)$$

Merenje brzine zvuka predstavlja težak zadatak u praksi. Brzina zvuka se obično određuje indirektno pomoću merenja nekih drugih fizičkih veličina, koje je jednostavnije izmeriti na neki drugi način. Zvučni pritisak je moguće odrediti jednostavno pomoću mikrofona i uz poznavanje veze pritiska i brzine moguće je odrediti brzinu zvuka, a zatim i intenzitet zvuka. Veza pritiska i brzine data je pomoću sledeće jednačine:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\text{grad}p \quad (2)$$

gde je  $\rho_0$  gustina u vazduha. Na osnovu ove jednakosti, brzina zvuka može se izračunati kao:

$$\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_0} \int \text{grad}p \, dt \quad (3)$$

Međutim, izračunavanje gradijenta pritiska zahteva određivanje gradijenta po sve tri ose Dekartovog koordinatnog sistema. Izračunavanje brzine na ovaj način zahtevalo bi barem tri merenja. Ukoliko se pretpostavi da zvuk postoji samo u nekom pravcu  $u$ , gradijent zvučnog pritiska može se izračunati kao:

$$\text{grad}p = \frac{\partial p}{\partial u}, \quad (4)$$

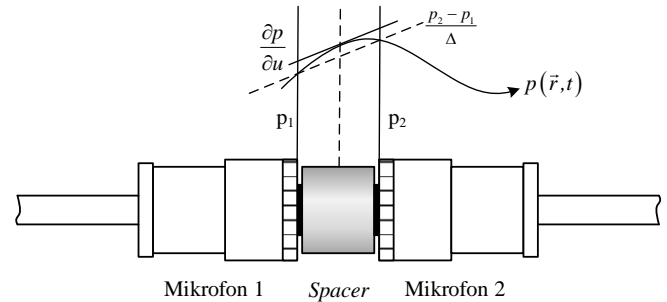
Na osnovu jednačine (1) i jednačine (4) intenzitet zvuka izračunava se na sledeći način:

$$\vec{I} = -\frac{1}{\rho_0} p(\vec{r}, t) \int_0^t \frac{\partial p(\vec{r}, t)}{\partial u} \, d\tau \quad (5)$$

U praksi se obično koristi usrednjena vrednost intenziteta zvuka u nekom vremenu  $t$ , koja se na osnovu jednačine (5) definiše kao:

$$\langle \vec{I} \rangle = -\frac{1}{\rho_0} \langle p(\vec{r}, t) \int_0^t \frac{\partial p(\vec{r}, t)}{\partial u} \, d\tau \rangle \quad (6)$$

Na Slici 1 prikazana su dva mikrofona koja se nalaze u osi i na bliskom rastojanju, koje je određeno distancerom (*spacer*) postavljenim između njih. Ovakav merni system u literaturi je poznat kao intenzitetska sonda [4]. Na ovaj način dva mikrofona formiraju pravac  $u$  po kom je moguće odrediti gradijent zvučnog pritiska, odnosno moguće izračunati brzinu zvuka. Na Slici 1 takođe je prikazano uprošćeno zvučno polje kao jedna sinusoida. Gradijent zvučnog pritiska prikazan je punom linijom na slici.



Sl. 1. Aproksimacija gradijenta zvučnog pritiska koristeći dva mikrofona na bliskom rastojanju

Uvođenjem određenih aproksimacija gradijent pritiska bi se mogao odrediti samo na osnovu izmerenih vrednosti pritiska pomoću dva mikrofona. Aproksimacija je definisana jednačinom (7) i predstavlja zamenu gradijenta razlikom pritiska na konačno malom rastojanju.

$$\frac{\partial p}{\partial u} = \frac{p_2(\vec{r}, t) - p_1(\vec{r}, t)}{|r_2 - r_1|} = \frac{p_2 - p_1}{\Delta} \quad (7)$$

Srednja vrednost zvučnog pritiska može se definisati na osnovu dva izmerena pritiska kao:

$$\langle p \rangle = \frac{P_1 + P_2}{2}, \quad (8)$$

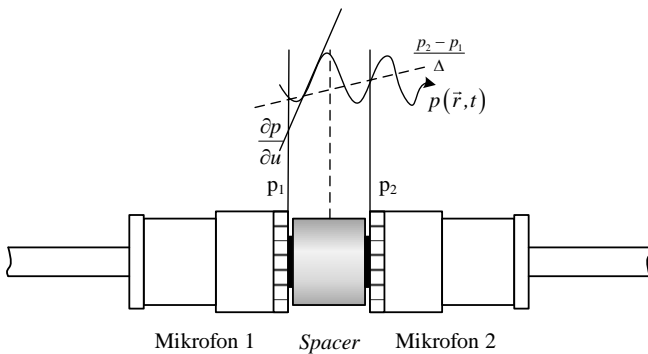
Konačno vrednost intenziteta, odnosno srednje vrednosti intenziteta zvuka u određenom vremenskom interval  $t$  dobija

se zamenom jednačina (7) i (8) u jednačinu (6).

$$\langle \bar{I} \rangle = I = -\frac{P_1 + P_2}{2\Delta\rho_0} \int_0^t (p_2 - p_1) dt \quad (9)$$

### B. Ograničenja merenja intenziteta pomoću intenzitetske sonde na visokim frekvencijama

Aproksimacija uvedena u jednačini (7) važi u slučajevima kada je talasna dužina zvuka čiji se intenzitet određuje veća od rastojanja između mikrofona. U slučajevima kada ova distanca nije zanemarljiva aproksimacija nije opravdana, odnosno dobijena vrednost intenziteta zvuka nije tačna. Na Slici 2 prikazan je mikrofonski par sa Slike 1, ali je u ovom slučaju frekvencija analiziranog zvuka nekoliko puta veća. Sa slike se može uočiti da vrednost gradijenta zvučnog pritiska u značajnoj meri odstupa od vrednosti razlike zvučnih pritisaka dobijenih pomoću dva mikrofona. Zbog toga se za usvojenu vrednost distancera između mikrofona definiše radni frekvencijski opseg u kom je moguće koristiti intenzitetsku sondu za određivanje tačne vrednosti intenziteta zvuka. Drugo ograničenje na visokim frekvencijama, pored narušavanja uvedene aproksimacije, predstavlja i pojava difrakcije i sketeringa na samom distanceru i kontaktu sa mikrofonom.



Sl. 2. Ograničenje aproksimacije gradijenta zvučnog pritiska na visokim frekvencijama

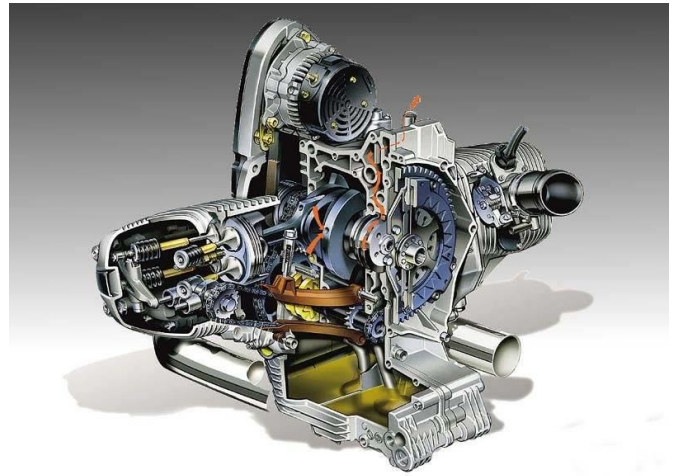
U literaturi i praktičnim aplikacijama ustalile su se tri vrednosti dužine distancera koji se koriste. Dužine su 8 mm, 12 mm i 50 mm. Najviša frekvencija u random opsegu obrnuto je srazmerna dužini distancera.

### III. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

U ovom eksperimentu korišćen je motocikl BMW R1100S sa dva cilindra, zapremine 1085 cm<sup>3</sup> i snage 70.5 kW, odnosno 95 konjskih snaga [7]. Merenja su izvršena pri 1100 obrtaja motora u minutu. Presek motora ovog motocikla je prikazan na Slici 3.

Za merenje intenziteta zvuka korišćena je intenzitetska sonda tip 3599, proizvođača Brüel & Kjær [8]. Sonda se sastoji od dva kalibrisana merna mikrofona koja su fazno uparena [8]. Mikrofonu su postavljeni na međusobnom rastojanju od 12 mm, koje je određeno distancerom koji se postavlja između njih. Dužina korišćenog distancera u merenju određuje radni frekvencijski opseg mernog sistema. Za ovaj slučaj merenje intenziteta zvuka biće precizno u opsegu od 250 Hz do 5000 Hz. Uvidom u spektar buke koji stvara korišćeni motocikl zaključeno je da se najveći deo

energije nalazi u odabranom radnom opsegu intenzitetske sonde.



Sl. 3. Presek motora analiziranog motocikla

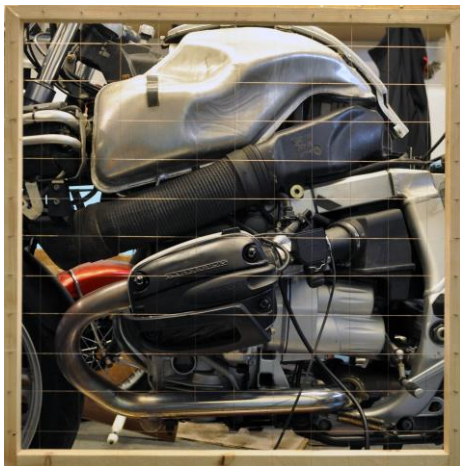
Na Slici 4 prikazana je korišćena intenzitetska sonda. Za akviziciju signala korišćen je akvizicioni sistem proizvođača Brüel & Kjær [6], dok je za obradu i prikaz rezultata korišćen softverski paket "Pulse" istog proizvođača.



Sl. 4. Intenzitetska sonda korišćena u eksperimentima

Merenje intenziteta buke motocikla izvršeno je u vertikalnoj ravni, u odnosu na motor, na rastojanju 20 cm od glave motora. Da bi se obezbedilo precizno postavljanje intenzitetske sonde u horizontalnoj ravni namenski je izrađen ram površine oko 1 m<sup>2</sup>, na kome su zategnute strune od najlona. Postoji 10 horizontalnih i 10 vertikalnih struna koje dele mernu ravan na pravougaone segmente. U preseccima horizontalnih i vertikalnih struna vršena su merenja intenziteta, tako što se osa intenzitetske sonde postavlja upravno na ravan koju formiraju strune. Ukupan broj mernih tačaka je 100. Na Slici 5 prikazan je položaj rama sa mernim tačkama u odnosu na motocikl.

U eksperimentu su pored intenzitetske sonde korišćena dva barometra pomoću kojih je meren pritisak u dve usisne grane motocikla. Rezultati dobijeni pomoću barometara su korišćeni kao referentni za dalju analizu.



Sl. 5. Motocikl sa ramom i mernim tačkama

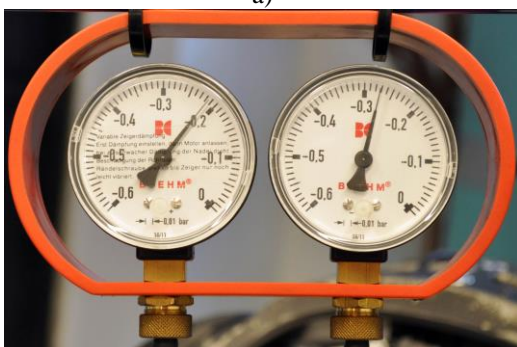
#### IV. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U ovom poglavlju biće prikazani rezultati merenja intenziteta pomoću intenzitetske sonde za dva eksperimenta. U jednom eksperimentu postojala je nebalansiranost u radu usisnih grana motocikala, dok je u drugom eksperimentu rad usisnih grana bio sinhronizovan, odnosno motor je radio ispravno. Rezultati merenja prikazani su kao dvodimenzionalna raspodela nivoa intenziteta zvuka u ravni merenja. Nakon toga data je diskusija dobijenih rezultata za dva izvedena eksperimenta.

Na Slici 6 a) prikazan je rezultat merenja pritiska u dve usisne grane pomoću barometara u slučaju kada je rad usisnih grana motocikla sinhronizovan. Sa slike se uočava da je vrednost pritiska u obe grane približno ista. Na Slici 6 b) prikazan je rezultat merenja pritiska u eksperimentu u kome je rad usisnih grana motocikla nesinhronizovan, odnosno postoji kvar na motociklu. U takvoj situaciji javlja se razlika pritiska u usisnim granama, što se i uočava na slici.



a)

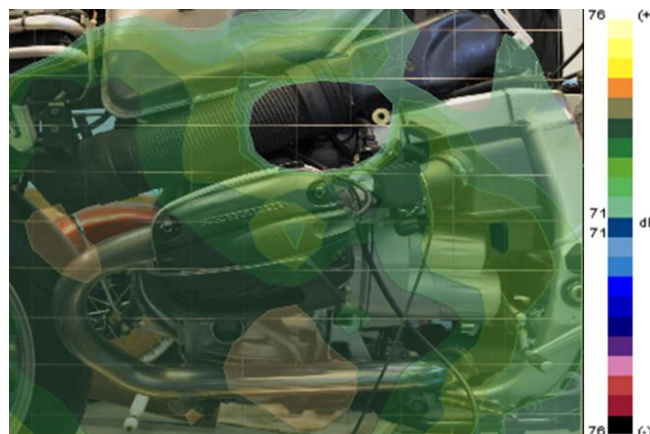


b)

Sl. 6. Pritisak pri a) nebalansiranim i b) balansiranim usisnim granama

Na Slici 7 prikazan je rezultat merenja intenziteta zvuka u slučaju sinhronizovanog rada usisnih grana motocikla. Pored dobijenog rezultata nivoa intenziteta zvuka, koji je prikazan odgovarajućim bojama, prikazana je i fotografija motocikla sa mrežom tačaka u kojima je vršeno merenje. Ova fotografija je važna da bi se moglo direktno videti koji od delova motocikala pravi najveće promene intenziteta zvuka pri balansiranom odnosno nebalansiranom radu usisnih grana. Vrednost nivoa intenziteta zvuka za određenu boju data je na *bar* dijagramu na Slici 7. Na ovom dijagramu mogu se uočiti dva puta iste vrednosti intenziteta zvuka. Hladnije boje na *bar* dijagramu predstavljaju negativne vrednosti intenziteta zvuka koje nastaju kao posledica delovanja zvučnih izvora u istom pravcu ali suprotno smeru od usvojenog pozitivnog smeru. Za pozitivan smer izabran je smer od površine motocikla. Na osnovu dobijenog rezultata uočava se da su sve vrednosti intenziteta zvuka pozitivne, odnosno da intenzitet zvuka potiče samo od izvora zvuka koji se nalaze na motoru.

Sa Slike 7 uočava se da postoji ravnomerna raspodela intenziteta zvuka u gotovo celom analiziranom prostoru i vrednosti nivoa intenziteta su oko 73 dB. Ovakav rezultat je indicacija da svi delovi motora motocikla zrače približno isti nivo buke. Pošto ne postoje velika odstupanja u vrednostima intenziteta zvuka koje stvaraju pojedini delovi motocikla možese zaključiti da je postignuta balansiranaost u radu usisnih grana analiziranog motocikla.



Sl. 7. Intenzitet zvuka u eksperimentu sa sinhronizovanim radom usisnih grana

Na Slici 8 prikazan je rezultat merenja intenziteta zvuka kada postoji nebalansiranost u radu usisnih grana motocikla. Sa slike se uočava da postoje zone u kojima se javlja povećana vrednost nivoa intenziteta zvuka. U tim zonama vrednost nivoa intenziteta zvuka je veća za oko 3 dB u odnosu na slučaj kada je balansiranaost rada usisnih grana bila postignuta. Posmatrajući presek motora motocikla sa Slike 3 i rezultate dobijene u ovom eksperimentu može se uočiti koji delovi motora prave najveću buku. Zona sa najvećim vrednostima intenziteta odgovara delu motora u kom se nalaze lančani prenosnik. Usled nebalansiranosti usisnih grana motocikla rad motora je nepravilan i pojavljuje se neravnomerno prenošenje snage ka pogonskom delu motocikla. Posledica toga je da prenosni lančani system ima periode zatezanja i opuštanja, zbog čega povremeno dolazi u kontakt sa ostalim delovima motora, što nije slučaj kod ispravnog rada motora. Druga zona sa povećanim

nivoom intenziteta zvuka odgovara mestu početka usisne grane na kom se nalazi klapna koja reguliše dotok vazduha u motor. U slučaju nebalansiranosti dve usisne grane klapna se otvara i zatvara neravnomerno i proizvodi veću buku u odnosu na ispravan radni režim.



Sl. 8. Intenzitet zvuka u eksperimentu sa nesinhronizovanim radom usisnih grana

Na osnovu Slike 8 može se zaključiti da je povećanje intenziteta zvuka u određenim zonama indikacija da motocikl ne radi pravilno, odnosno postoji određena vrsta kvara na motoru motocikla. Povećanje intenziteta u pojedinim zonama motora nije direktna indikacija da je kvar povezan sa nebalansiranošću usisnih grana motocikla. Međutim, pošto je na analiziranom motociklu prethodno izvršen servis i provera svih delovomotora, sem usisnih grana, zaključuje se da je razlog povećanja intenziteta zvuka posledica odsustva sinhronizacije u radu dve usisne grane motocikla.

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je metodologija za detekciju nebalansiranosti rada usisnih grana pomoću intenzitetske sonde, na primeru motocikla sa dva cilindra. Merenje intenziteta izvršeno je pomoću intenzitetske sonde koja se sastoji od dva mikrofona. Verifikacija rezultata merenja izvršena je merenjem pritiska pomoću barometra u samim usisnim granama motora. Pokazano je da se intenzitetska sonda može koristiti za detekciju nebalansiranog rada usisnih grana motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Ovaj rad prikazuje početne rezultate istraživanja koje će biti nastavljeno u budućnosti. Dalja istraživanja biće usmerena ka ispitivanju i drugih kvarova na motociklima, kao imogućnost njihovog razlikovanja. Da bi ovaj postupak našao primenu u praksi potrebno je izvršiti uprošćavanje načina definisanja mernih mesta ili smanjenja njihovog broja, uz zadržavanje pouzdanosti i preciznosti dijagnostike kvara.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] G. Pavić, „Measurement of sound intensity“, Journal of Sound and Vibration 51(4):533-545 · April 1977.
- [2] R. E. Halliwell, A. C. C. Warnock, „Sound Transmission Loss: Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques“, J. Acoust. Soc. Am. 77, 2094-2103 (1985).
- [3] S. Gade, „Sound Intensity (Part 2 Instrumentation and Applications)“, Brüel & Kjær Technical Review 4, 3-32 (1982).
- [4] S. Gade, „Sound Intensity (Part 1 Theory)“, Brüel & Kjær Technical Review 3, 3-39 (1982).
- [5] Brüel & Kjær Technical Review, „Sound Intensity“.
- [6] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na: <http://www.bksv.com/products/transducers/acoustic/acoustical-arrays>, pristupano 5.5.2017.
- [7] [http://www.bikez.com/motorcycles/bmw\\_r\\_1100\\_s\\_2004.php](http://www.bikez.com/motorcycles/bmw_r_1100_s_2004.php), pristupano 5.5.2017.
- [8] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na sajtu proizvođača: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-intensity-probes/3599>, pristupano 5.5.2017.

## ABSTRACT

Reliable detection and troubleshooting on motorcycles is the path to the safety of road users. Motorcycle is made up of a large number of parts, which can potentially have a defect, and as such represents a complex and demanding a system for analyzing. In this paper, a method for non-invasive detection of faults on a motorcycle, independently of the type of the motorcycle. We analyzed the possibility of detection of unbalance intake manifold by means of measuring the intensity of the sound emitted by a motorcycle. As a measuring tool used in the study is intensity probe with two microphones. The paper presents the advantages of measuring the intensity compared to other acoustic methods in this situation. The result of detection using intensity probe was compared with other techniques for the determination of the fault.

### Detection of unbalance intake manifold motorcycles using intensity probe

Miloš Bjelić, Miomir Mijić, Miodrag Stanojević, Branislav Juranović