

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Друмски саобраћај

Предмет: Испитивање МВМ 2

Број индекса: 383/2014

Кристина М. Мирковић
Испитивање утицаја неравнина пута на
осциловање возила
Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Данијела Милорадовић, доцент -ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада, кандидат треба да:

- истакне значај неравнина пута као извора осциловања возила
- прикаже преглед уређаја и метода за мерење неравнина пута,
- прикаже расположиве методе за обраду резултата мерења неравнина пута и
- прикаже и анализира резултате посредног мерења неравнина пута уз помоћ мерног возила

Препоручена литература:

1. Тодоровић, Ј.: „Испитивање моторних возила“; Машински факултет Београд, 1979.
2. Demić, M., Diligenski, Dj.: „The road surface profile investigation perspective“, Romania ministry of national defence, Military technical academy, Bucharest, November 06th-07th, 2003
3. Kumar, P.: “Road Roughness Measurement Techniques and Standardisation of RTRRMS Devices”, CSIR-Central Road Research Institute, New Delhi, 2013
4. Gillespie, T. D.: “Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask”, Road profile users group meeting, Lincoln, Nebraska, September 22nd-24th, 1992

Крагујевац, 2016.

Ментор:

Др Данијела Милорадовић, доцент

РЕЗИМЕ

Неравнине пута су од великог значаја за проучавање вибрација, поузданости система возила, безбедности вожње, итд. Посебну пажњу треба посветити приликом динамичке анализе, снаге и сигурности возила. Микро-неравнине пута који карактеришу микро профиле по дужини и у бочном смеру, стохастична су и могу се одредити са експерименталног истраживања путева, помоћу посебних уређаја. У овом раду биће описано разних уређаја за одређивање и испитивање микро неравнина пута. Статистички третман регистрованих вредности је веома важан за касније коришћење идентификованих параметара путних микро профила. У раду ће бити описана и критичка анализа постојећих поступака статистичке обраде података и предлог новог приступа проблему.

ABSTRACT

Road micro-roughness is of major importance for studying vibration motions, reliable calculation of vehicle system, ride safety, etc. Therefore, a special attention should be paid when analysing dynamics, strength and vehicle safety. Micro-roughness that characterises road micro-profile in longitudinal and lateral direction is stochastic and can be specified with the experimental road research, by use of special device. In this paper there is a description of a new profiler for road micro-roughness determination. The statistic treatment of registered values is very important for the subsequent utilization of the identified parameters of road micro-profile. In the paper there is a critical analysis of the existing procedures of statistical data processing and suggestion of a new approach to the issue.

КЉУЧНЕ РЕЧИ

Неравнине пута, обрада података, уређаји, осциловање возила

KEY WORDS

Roughness, data processing , devices, oscillation vehicles

САДРЖАЈ

УВОД	2
1. НЕРАВНИНЕ ПУТА КАО ИЗВОР ОСЦИЛОВАЊА ВОЗИЛА	4
1.1. Осцилаторни процеси на возилу	4
1.2. Пут као побуда осциловања возила	5
2. УРЕЂАЈИ И МЕТОДЕ ЗА МЕРЕЊЕ НЕРАВНИНА ПУТА	7
2.1. Мерење неравнина пута у прошлости	7
2.2. Међународни индекс храпавости –IRI	11
2.3. Методе за мерење неравнина пута	12
2.4. Класификација савремених уређаја за мерење неравнина пута	15
2.5. Профилографи	18
2.6. Системи за мерење неравнина пута на принципу одзива возила – RTRRMS системи	20
2.7. Профиломери	21
2.7.1. Инерцијални профиломери	21
2.7.2. Бесконтактни лаки профиломери	22
2.7.3. Преносни ласерски профиломери	25
2.8. Мерна приколица за мерење неравнина пута развијена на Факултету инжењерских наука	26
3. МЕТОДЕ ЗА ОБРАДУ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА НЕРАВНИНА ПУТА	28
3.1. Идентификација случајних сигнала у временском домену	28
3.1.1. Средња вредност (аритметичка средња вредност, математичко очекивање)	28
3.1.2. Средња квадратна вредност (квадрат ефективне вредности)	29
3.1.3. Дисперзија	29
3.1.4. Средње квадратно одступање (стандардна девијација)	29
3.1.5. Аутокорељациона функција	30
3.2. Идентификација случајних сигнала у амплитудном домену	31
3.2.1. Функција расподеле вероватноће	31
3.2.2. Функција густине вероватноће	32
3.3. Идентификација случајних сигнала у фреквентном домену	34
3.3.1. Спектар снаге случајних сигнала	35
4. ОБРАДА ПОДАТАКА О СНИМЉЕНИМ ВИСИНАМА НЕРАВНИНА ПУТА МЕРЕЊЕМ ВЕРТИКАЛНОГ УБРЗАЊА У ЦЕНТРУ ТОЧКА ВОЗИЛА	41
ЗАКЉУЧАК	46
Литература	49

УВОД

Неравност површине пута већ дуго је призната као важна мера перформанси пута. Неравнине пута директно утичу на комфор вожње, безбедност и хабање возила, при динамичкој побуди возила. Са друге стране, динамичко оптерећење точкова један је од фактора који утичу на пропадање путева.

Током раних дана конструисања путева, неравнине пута нису биле од примарног значаја при прављењу пута. Претпостављало се да ће извођач радова направити пут са прихватљивом глаткоћом. Од тих давних дана, истраживања су потврдила да корисници ауто-путева цене стање система путева превасходно према вожњи коју искусе путујући тим путевима. Стање пута је главни приоритет у односу на то шта корисници путева траже од путне инфраструктуре. Истраживања су показала да равни, глатки путеви коштају агенције за путеве мање у току века коловоза, што резултује смањењем оперативних трошкова корисника путева.

Прикупљање података о неравнинама пута данас има неколико примена, као што су:

- оцена квалитета новоизграђених или поправљених деоница,
- проучавање услова на одређеним деоницама у циљу истраживања,
- дијагностика стања одређених деоница и одређивање одговарајућих врста поправки и
- праћење стања мреже путева за потребе система управљања путевима (енгл. *PMS - Pavement Management System*) [1]

Америчко удружење AASHO је извршило прво истраживање неравнина пута још 1960. године. У истраживању је учествовало сто испитаника који су субјективно оценили различите деонице путева на скали од 0 до 5. Ове оцене су упоређене са физичким мерењима добијеним са профиломера Бироа за јавне путеве (енг. *"BPR" profilometer*), а развијена су и два модела – један за асфалтно-бетонске површине и други за цементно-бетонске површине - да би се подаци са профиломера претворили у субјективне оцене [2].

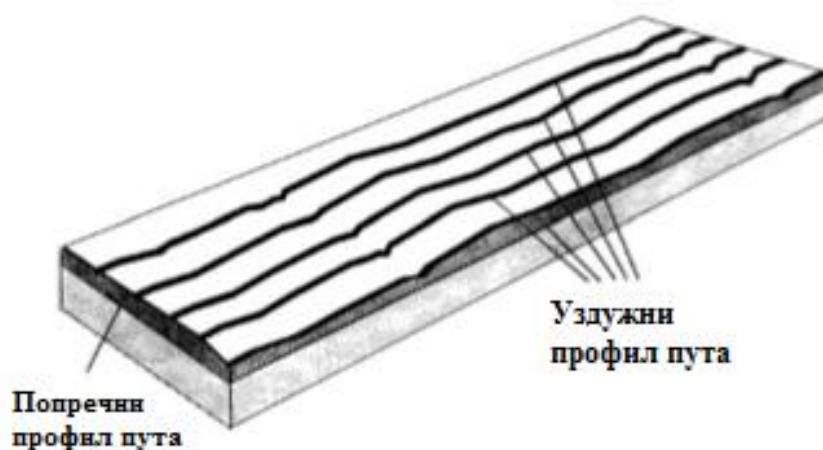
Различита мерења неравнина пута се користе широм света. Поређење ових мерења није могуће, јер нема мерења неравнина пута које даје једнаке резултате. Уместо тога, неопходно је да се осигура да постојикомпатибилност мерења иако није могуће да се обаве истим уређајима. Компатибилност између различитих мерних система може се обезбедити. Ова компатибилност обухвата два нивоа:

- ниво спољашње компатибилности и
- ниво унутрашње компатибилности.

Компатибилност се најбоље може постићи успостављањем општег индекса неравнина (енгл. *General Roughnees Index - GRI*) који се може користити као основа за поређења.

Термин „неравнине пута“ представља промене висине подужног профила пута које побуђују осцилације возила које се креће по њему. У литератури постоје разни термини који се односе на неравнине пута, али углавном се користе називи макро- и микро-профил пута. Макро-профил пута зависи од географског положаја и карактеристике пута (брдски, равничарски, да ли има већи радијус кривина и равномерније конфигурације стаза), док се код микро-профила више гледа храпавост пута. У овом раду пажња ће бити посвећена микро-профилу пута, начинима његовог мерења и обраде тако добијених експерименталних података.

Познато је да је возило при вожњи има сталну промену положаја маса у односу на координатни систем. Пре свега, одређује се облик и величина грубости, као спољашњи фактор, вибро-инерцијалне особине, обртни момент мотора и брзине возила, као и фактори везани за возило. Према томе, пажљиво испитивање и спецификација микро-неравнина пута, како са аспекта периодичних карактеристика и са аспекта енергетских нивоа, развој и аутоматизација процеса мерења неравнина и математичких прорачуна за обраду података ће донети поузданоствозила, оптимизацију и сигурност. [3]



Слика 1. Попречни и уздужни профил пута [1]

Слика 1 приказује да неравнине пута варирају у подужном и попречном правцу. У литератури постоје термини који се често користе као што су уздужни и попречни профил пута. Очигледно је да микро-профил пута спада у групу стохастичких процеса, и због тога је неопходно истражити статистичке параметре. Идентификује се на основу микро-неравнина и употребом посебног уређаја, познатог као профиломер.

Регистроване вредности које описују микро-неравнине пута нису погодне за употребу у оригиналном облику. У циљу стицања потребне информације о микро-профилу пута, регистроване вредности су изложене статистичкој обради. Имајући у виду да микро-профил пута спада у групу стохастичких процеса, у литератури постоје одређени различити облици статистичке обраде, који ће бити објашњени у даљем тексту.

1. НЕРАВНИНЕ ПУТА КАО ИЗВОР ОСЦИЛОВАЊА ВОЗИЛА

Свако возило представља сложен динамички систем. Јасно је да се ради о комплексним конструкцијама појединих делова возила (агрегати, системи, подсистеми) функционално повезаних у систем који поседује одређене еласто-пригушне карактеристике. Услед међусобне интеракције делова возила, као и услед интеракције са подлогом по којој се оно креће, возило врши одређене осцилације.

1.1. Осцилаторни процеси на возилу

При проучавању осцилација сложених система, увек је препоручљиво поћи од упрошћених и апстрактних осцилаторних модела. Једноставни модели треба да обухвате само најутицајније параметре, док мање утицајне треба занемарити. На тај начин се добија модел за који су како сам процес моделирања тако и решавање модела релативно једноставни, а материјални и временски утрошци минимални. Уколико резултати решења не одговарају стварно уоченим појавама или не дају потпуне одговоре за проблем који се проучава, потребно је учинити следећи корак у приближењу модела стварном проблему [4].

Динамичко понашање возила се може посматрати у облику:

- функционалних кретања (опруге, кочнице) и
- померања која настају као побуда од окружења.

У општем случају, истовремено су присутна и спрегнута оба вида кретања.

Цео систем возила може бити подељен на круте и еластичне подсистеме са различитим кретањима:

- каросерија као крут систем – ваљање, пливање, галопирање,
- каросерија као еластични систем – механичке вибрације, акустичке вибрације,
- пнеуматик – повођење,
- мотор – осцилаторно померање,
- мењач и трансмисија – торзионе осцилације,
- хладњак – мале осцилације услед преносног кретања каросерије,
- вентилатор – вибрације лопатица.

У укупном кретању учествују сви делови заједно. Поједини делови система су у тако слабој интеракцији да их можемо посматрати као посебне целине. Значајно је утврдити услове осциловања под којима се систем може распрегнути и то:

- веома слаба спрегнута интеракција подсистема,
- различити фреквентни опсези подсистема и

- линеарна спрегнутост подсистема.

Према фреквентном опсегу и постављеном проблему, у раду ће возило бити разматрано као распрегнут систем. Ово распрезање је могуће када су реакције делова система на цео систем занемарљиво мале.

Меродавни фреквентни опсези за неке облике кретања су:

- до 2,5 Hz – подужна динамика,
- 0,5-1,5 Hz – попречна динамика,
- 0,8-50 Hz –механичке вибрације и
- преко 50 Hz – акустичке вибрације [4].

Осцилације имају неколико облика понављања. Јасно је да детерминистичке осцилације нису резултат реалног извора побуде од стране окружења. Оне могу бити, на пример, програмирана побуда коју узрокује неки други агрегат.

За проучавање динамике возила и њене интеракције са неравнинама пута је од значаја познавање стохастичких осцилација, које могу бити стационарне или нестационарне. Стохастичким осцилацијама се описују неравнине пута. Овај извор осцилација потиче од окружења, па су зато од посебног значаја, како његова природа, тако и математички апарат којим се описује.

1.2.Пут као побуда осциловања возила

Неравнине пута обухватају све од великих ударних рупа на путу, насталих као резултат локализованог пропадања саобраћајнице, до увек присутних случајних неравнина које настају услед практичних ограничења тачности израде и одржавања пута. Иако су ударне рупе увек под лупом јавности, случајне неравнине пута су већи проблем за инжењере путева, чији је циљ да одржавају мрежу путева на најбољи могући начин са ограниченим средствима. [5]

Главни извор осцилација возила су неравнине пута. Оне изазивају динамичко оптерећење делова возила, путника у возилу и пута. Проблем осциловања возила се рефлектује како на век возила тако и на безбедност-стабилност возила и замор путника у њему. Проблем динамичких сила на возилу је проблем стабилности и века возила. Свако значајније смањење нормалне реакције тла, настало као последица динамичке амплитуде, доводи до смањења тангенцијалне реакције тла, а то значи да возило може да пренесе мање поремећајне силе у тангенцијалним правцима, чиме се смањује и његова стабилност. Позитивне динамичке амплитуде проузрокују повећане и променљиве напоне у конструктивним елементима и склоповима, па је век возила краћи [4].

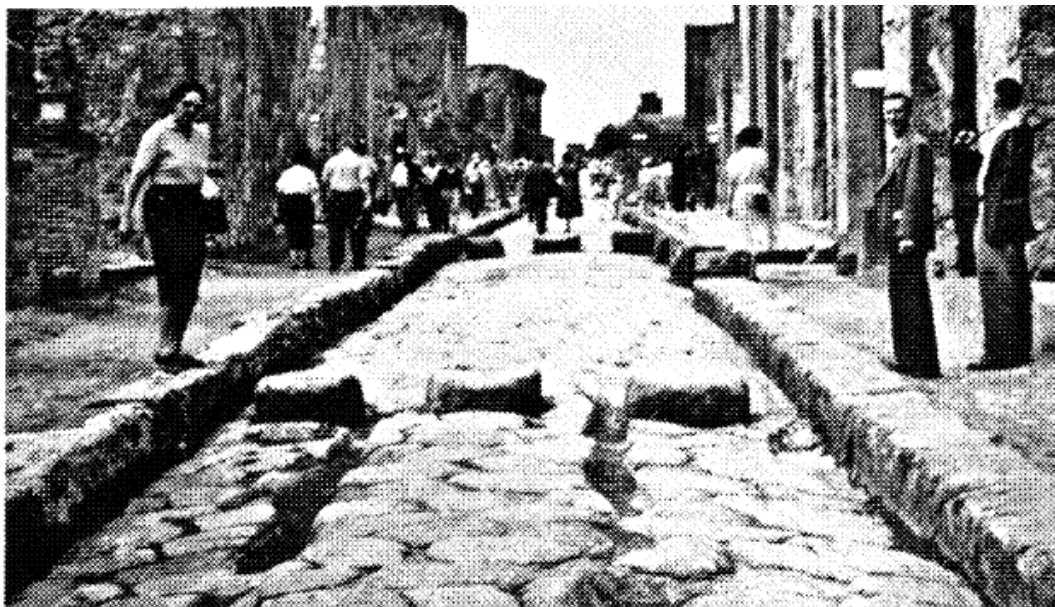
Осим неравнина, постоји низ других извора осцилација на возилу. Сама каросерија је један од значајних извора вибрација возила. На каросерију се преноси

утицај рада мотора, утицај његовог еластичног ослањања на елементе моторског простора каросерије, утицај осцилација трансмисије, издувног система, система ослањања и управљања, кочног система, као и свих елемената који се везују за каросерију.

Неравнине пута се могу описати као профил пута дуж трагова по којима пролазе пнеуматици возила. Такви профили припадају општој категорији широко-појасних случајних сигнала, па су погодни за статистичко описивање.

2. УРЕЂАЈИ И МЕТОДЕ ЗА МЕРЕЊЕ НЕРАВНИНА ПУТА

Још од времена када су конструисани први путеви, корисници путева су били свесни комфора (или некомфора) који су искусили путујући путевима. Остаци поплочаних путева из Римског царства, слика 2, указују да се о неравнинама пута бринуло при путовању кочијама. Чак и у IX веку, брза путовања поштанским кочијама била су неудобна због неравнина пута.

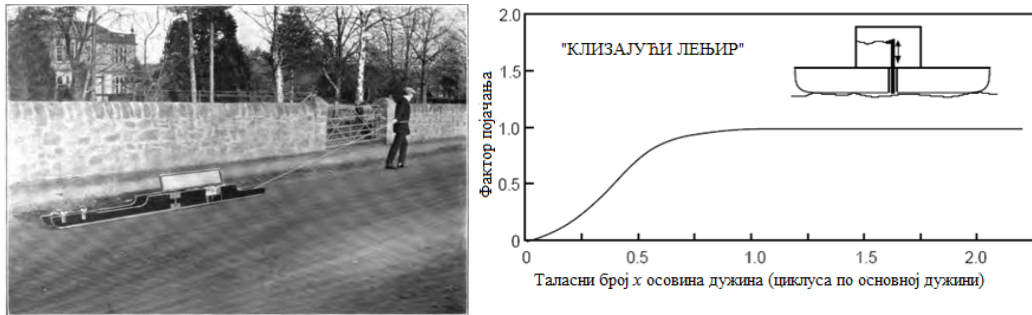


Слика 2. Фотографија старог римског пута [6]

2.1. Мерење неравнина пута у прошлости

Са појавом возила са моторним погоном на почетку XX века, све више људи је могло да приступи средствима брзе личне возње, а брзине кретања су убрзо превазишле границе практичне за коње. Повећање брзине повећало је цену прављења и одржавања путева са глатким површинама.

Тих година, појавили су се и први покушаји мерења неравнина путева. Једна од првих метода мерења неравнина пута, била је метода „клизајућег лењира“, познатог као “VIAGRAPH”, слика 3. Мерни одзив овог уређаја приказан је фактором појачања приказаном на слици 3. Веће таласне дужине (мали таласни бројеви) нису изазивали одзив, док је фактор појачања био близак јединици при таласним дужинама једнаким или мањим од основне дужине уређаја. Интересантно је да су неравнине мерене овим уређајем приказиване у стопама по миљи, са препоруком за стандардне конструкције путева од 15 стопа по миљи (180 inch/mile).



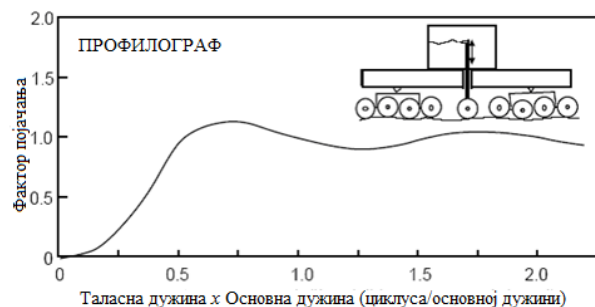
Слика 3. Уређај за мерење неравнине пута „VIAGRAPH” и његов одзив [6]

Уз очигледне недостатке у облику напора за покретање уређаја и резултујућих хабања и цепања, није изненађење што је развијен „котрљајући лењир“, слика 4. Овај уређај имао је свој јединствени одзив на неравнине пута, различит од „клизајућег лењира“ и окарактерисан чињеницом је снимао сваку неравнину три пута – једном када је пређе предњи точак, други пут када је пређе мерни точак и трећи пут када је пређе задњи точак. Пошто је котрљајући лењир био у контакту са површином пута у три тачке, неравнине неких таласних дужина снимао је са двоструком амплитудом, док друге није ни снимао. Зато, котрљајући лењир је „осећао“ одређене таласне дужине неравнина пута, док је друге игнорисао.



Слика 4. Одзив мерног уређаја за мерење неравнина типа „котрљајућег лењира“ [6]

Да би се превазишао овај проблем, концепт котрљања је постепено побољшан додавањем сетова точкова, да би се установила референтна раван од које се мере девијације, слика 5. Направљен је уређај који се до данас памти као „профилограф“. Додаци са сетовима точкова осредњавали су висину свих тачака испод точкова, а неравнине су мерене као одступања средњег точка од референтне линије. Са великим бројем точкова, одзив оваквог уређаја приближава се теоријској граници приказаној на слици 5.

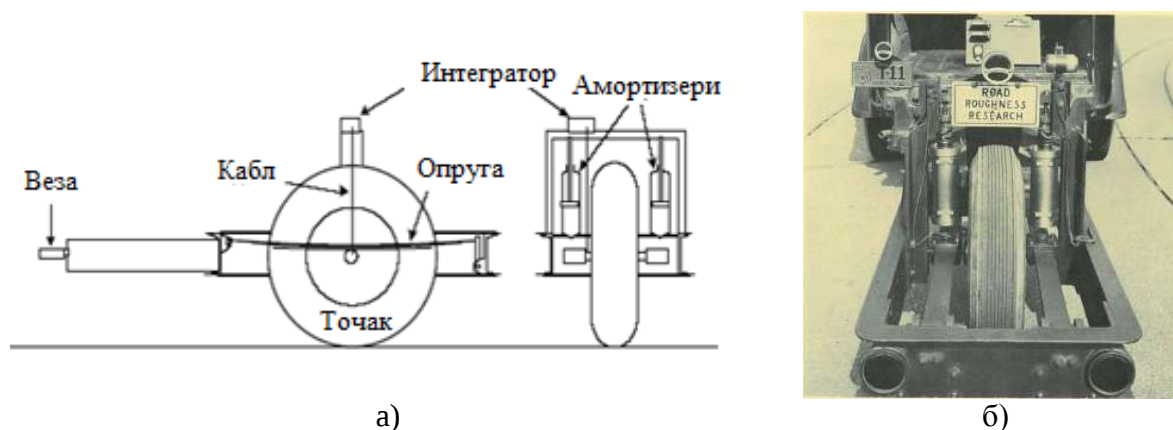


Слика 5. Одзив профилографа [6]

Узимајући у обзир варијацију особина одзива код сваког од претходно описаних уређаја, јасно је да није био направљен напредак у правцу консензуса о универзалној и стандардизованој мери висина неравнина пута.

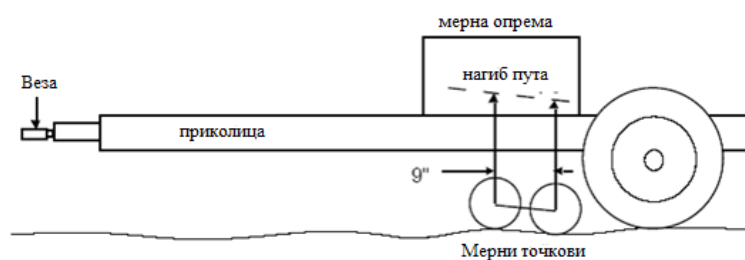
До 1920-их година, грађевински инжењери су уочили да су особине храпавости путева одговорне за изазивање осцилација моторних возила. “VIA- LOG” уређај развијен у држави Њујорк, САД, мерио је ход система еластичног ослањања (СЕО) путничког возила као индикацију нивоа висине неравнина пута. Први уређаји су записивали кретања СЕО, али су убрзо модификовани да сумирају кретање на механичком бројачу и мере статистику типа “inch/mile”.

Током следећих декада, тешкоће у добијању доследних мерења овом методом, услед варијација динамике моторних возила, довеле су до покушаја „стандардизације возила“. Биро за јавне путеве САД (енгл. *Bureau of Public Roads – BPR*) направио је уређај за мерење неравнина пута – “*BPR Profilometer*”, 1941. године. Касније је адаптиран у сличном облику као уређај назван “*Bump Integrator*” - интегратор неравнина, направљен од стране Истраживачке лабораторије за транспорт и путеве из Енглеске. “*BPR*” профиломер био је приколица са једним точком, слика 6, чије су све димензије и особине маса, пнеуматика и СЕО биле стандардизоване у циљу постизања упоредних перформанси код свих уређаја.



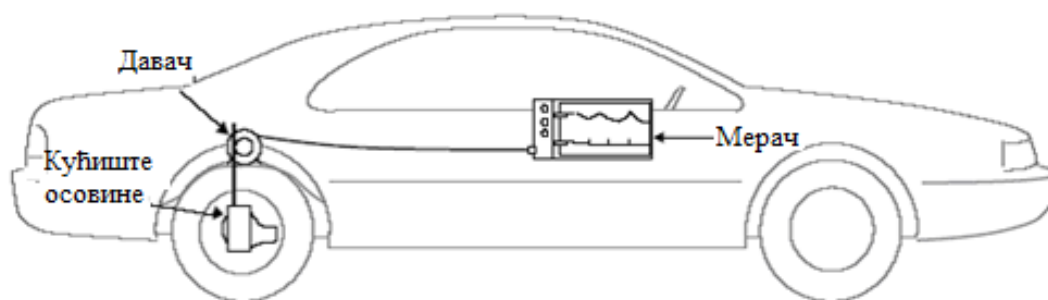
Слика 6. а) “*BPR*” профиломер, б) “*Bump Integrator*” [6]

Још један важан уређај за мерење висина неравнина, развијен у време спровођења *AASHO* путног теста, је “*CHLOE*” (акроним направљен од првих слова имена проналазача). Уређај “*CHLOE*”, слика 7, састојао се од приколице вучене малом брзином на којој су монтирана два мала точка на растојању од 9 инча (22 cm) са мерним уређајима за снимање локалног нагиба пута. Сниман је сигнал промене нагиба неравнина пута (или варијација нагиба неравнина пута). Варијација нагиба неравнина пута мерена од стране уређаја “*CHLOE*” је од посебног значаја за путне инжењере данас, јер је то референца о мерењу неравнина пута коришћена при развоју концепта „погодности“ коловоза. Упркос овом специјалном статусу, уређај “*CHLOE*” се данас више не користи.



Слика 7. Профиломер "CHLOE"[6]

До 1960-их година, могућност мерења неравнина пута користећи возило у покрету, мотивисало је развој тзв. „путних мерача“ (енгл. “roadmeters”, “ridemeters”) у облику уређаја “MAYS METER”, “PCA METER” и других компатибилних уређаја. Релативно јефтини уређаји могли су да се поставе у било који расположиви аутомобил, као што је приказано на слици 8, а мерили су померање осовине при кретању возила по опитној деоници. Већина „путних мерача“ су акумулирали померања осовине, што представља девијацију (у инчима по миљи) површине пута обојену динамиком возила. Ова класа уређаја постала је позната под именом *RTRRMS* системи (скраћено од енгл. “Response-Type Road Roughness Measurement Systems”) - мерни системи за мерење неравнина пута који раде на принципу одзива.

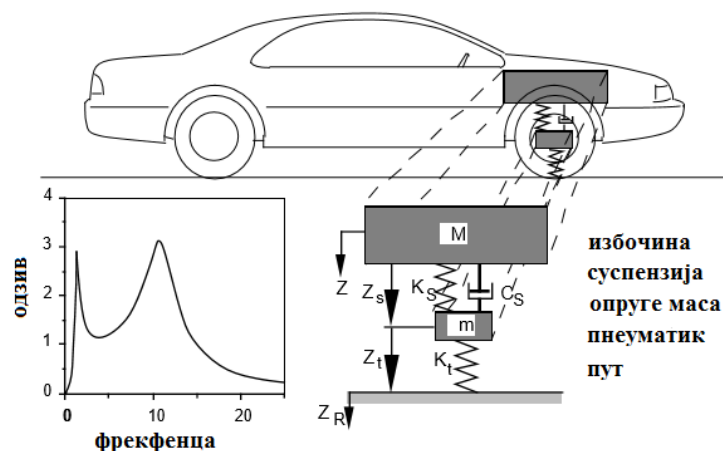


Слика 8. Илустрација *RTRRMS* уређаја [6]

Због своје једноставности и мале цене, *RTRRMS* уређаји били су популарни крајем 1970-их година. Иако поуздано мере и на храпавим и на глатким путевима, нису били довољно тачни за већину инжењерских апликација. Као што се могло очекивати, профиломери нису давали идентичне резултате мерења због разлике у динамици возила, а било је тешко остварити доследне перформансе из дана у дан код једног истог профиломера. Рутински поступци као, што су: додавање горива или путника, подешавање притиска у пнеуматичима, балансирање точкова, итд., мењали су калибрацију уређаја. Као резултат, било је тешко развити и одржавати базу података о условима неравнина пута без изузетног напора при контроли или компензацији промена на возилу путем честе калибрације уређаја. Овај проблем је довео до развоја међународног индекса храпавости (енгл. *IRI*).

2.2. Међународни индекс храпавости - IRI

Први приступ оцењивању неравнина пута био је систем оцене квалитета „тренутна оцена сервисирања“ (енгл. *Present Serviceability Rating – PSR*), који је касније довео до објективног квантитативног индекса „тренутног индекса сервисирања“ (енгл. *Present Serviceability Index - PSI*). Данас је најчешће коришћен индекс – „међународни индекс храпавости“ (енгл. *International Roughness Index - IRI*), као стандардизовано мерење неравнина пута израчунато коришћењем математичке симулације динамике возила 1/4 моделом који се креће дуж профила пута брзином од 50 km/h, слика 9.



Слика 9 . Рачунање индекса IRI помоћу 1/4 модела возила [6]

На располагању су и 1/2 и пуни симулациони модели, као и модели за симулацију теретних возила. Сви они користе исти приступ – моделирање како идеализирано возило реагује на профил пута, мада се излази тих модела не могу директно поредити. [7]

Међународни индекс храпавости је стандардни индикатор неравнина пута у САД и широм света. Развијен је у оквиру пројекта истраживања Националног програма уза истраживање путева (енгл. *National Cooperative Highway Research Program – NCHRP*) у САД, крајем 1970-их. година [8]. Главни циљ истраживања био је развој временски стабилног поступка за калибрацију система који раде на принципу одзива возила на побуду од неравнина пута. Као референтна вредност за калибрацију, предложена је математичка трансформација измереног подужног профила неравнина пута. Метода анализе је развијена, поједностављена и стандардизована користећи финансирање од стране Светске банке. Индекс добијен стандардизованом методом назван је *IRI*, а припремљене су и препоруке за његово мерење различитом опремом, укључујући и профилометре.

Технички гледано, *IRI* је математичка репрезентација акумулираног хода система еластичног ослањања возила, подељеног са величином пута које возило пређе

током теста, па има јединицу нагиба. Мерења неравнина пута се обично изражавају у m/km IRI. Уместо акумулирања хода система еластичног ослањања помоћу тест возила, IRI се рачуна из измереног подужног профила пута, користећи симулацију динамике возила уз помоћ четвртинског модела возила. Истраживањима су одређени коефицијенти једначина да би се остварила максимална корелација са излазом система за мерење неравнина пута на бази одзива.

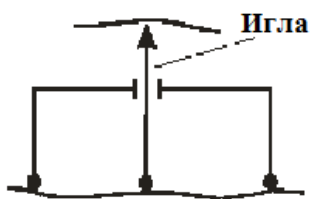
Од издавања препорука за израчунавање међународног индекса храпавости 1986. године, IRI је постао најшире коришћен индикатор неравнина пута. Истраживања су показала да је алгоритам за израчунавање овог индекса у већем делу независан од карактеристика профила, више од било ког другог предложеног индекса храпавости.

2.3. Методе за мерење неравнина пута

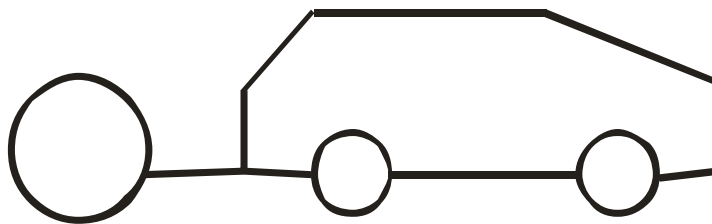
Методе за снимање неравнина пута разликују се по томе у коју сврху ће се користити резултати. За грађевинаре је најбитније да се опише реално стање коловоза. У фази експлоатације, за њих је корисно да прате хабање и оштећење коловоза. За инжењере који се баве одржавањем возила, битна је интеракција возила са коловозом.

Уређаји које користе грађевинари за мерење неравнина пута су профилографи који тачно снимају подужни или попречни профил пута, слика 10. Развијен је читав низ уређаја на бази профилографа.

Инжењери полазе од тога да ослонци возила нису игле, већ точкови и да се утицај режима кретања сагледава при некој брзини, v . Зато инжењери користе динамичке уређаје, слика 11.



Слика 10. Принципи рада профилографа [9]

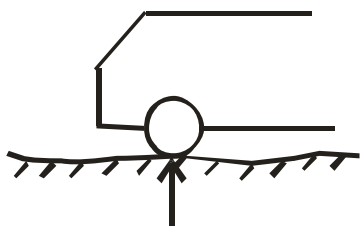


Слика 11. Принципи динамичког уређаја за снимање неравнина пута [9]

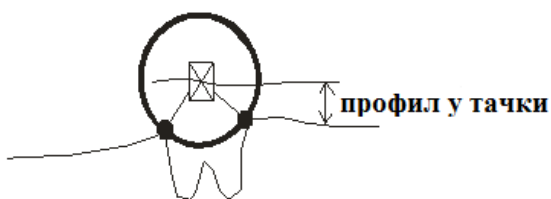
Ова проблематика је битна код друмских, шинских и посебно код теренских возила (трактора). Код методе снимања уз помоћ уређаја кога вуче возило, слика 11, укључен је утицај брзине и конструкције уређаја.

Другу групу метода чине методе снимања пута конкретним возилом, слика 12. Када се користи посебан уређај, користи се пнеуматик који се не деформише, слика 13. Пнеуматик не може да измери све неравнине пута као профилограф, али има филтрирајуће дејство. Ако у центар пнеуматика поставимо давач убрзања, па снимљена убрзања двоструко интегралимо, добија се профил у центру точка. Тако се

добија преносна функција, која узима у обзир димензије пнеуматика и брзину кретања. Коришћењем *ITFC* методе може се одредити стварни профил коловоза.

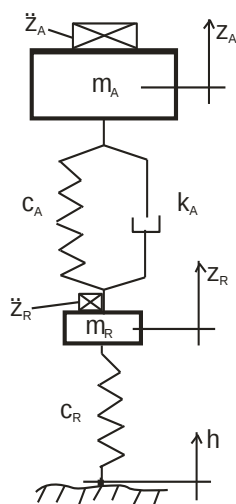


Слика 12. Снимање неравнина пута конкретним возилом [9]



Слика 13. Снимање неравнина пута помоћу пнеуматика [9]

Неравнине пута могу се снимати и мерење вертикалних убрзања у центру точка и у тачки везе точка са каросеријом, Све се своди на разматрање осцилаторног модела возила, слика 14. На слици су: $\ddot{z}_A, \ddot{z}_B$ - мерне величине - убрзања (мере се давачима убрзања), m_A - ослоњена маса возила, m_R - неослоњена маса возила, c_A, k_A - крутост и пригушење СЕО и c_R - крутост пнеуматика, као познате величине.



Слика 14. Осцилаторни модел за возила [9]

Једначине кретања овог модела су:

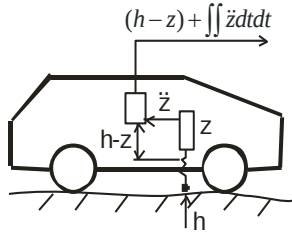
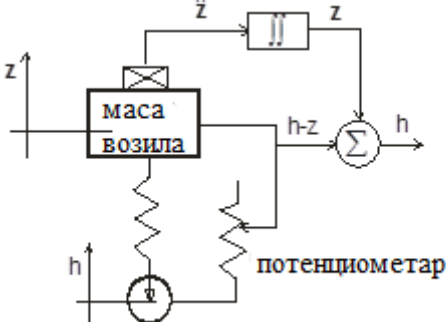
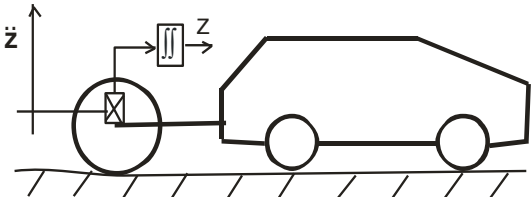
$$\begin{aligned} m_A \ddot{z}_A + k_A (\dot{z}_A - \dot{z}_R) + c_A (z_A - z_R) &= 0 \\ m_R \ddot{z}_R - k_R (\dot{z}_R - \dot{z}_A) - c_A (z_R - z_A) + c_R z_R &= c_R h \end{aligned} \quad (1)$$

Одавде се, једноставним сабирањем једначина, може изразити висина неравнина, h , као:

$$h = z_R + \frac{m_A \ddot{z}_A + m_R \ddot{z}_R}{c_R} \quad (2)$$

Још неки примери снимања неравнина пута приказани су на сликама у Табели 1.

Табела 1. Примери метода за мерење неравнина пута

	Релативно кретање мери се помоћу потенциометра.
	Релативно кретање возила, $h-z$, се региструје преко потенциометра. Сигнал са давача убрзања, $\ddot{z}$, после двоструке интеграције, даје вредност хода, z. Сигнали $h-z$ и z улазе у сабирач, на чијем се излазу добија вредност h.
	Давач убрзања може се поставити и на жирокопску платформу. На резултате мерења утичу бројни фактори: еластичност точка, поскакивање точка, угао заокретања руде (зато руда треба да буде што дужа).

Постављањем давача у систем возила, могу се посредно одредити неравнине пута, с тим што треба дефинисати осцилаторни систем у равни (равански систем). Равански систем може да се упрости, па се тако упрошћени модели даље разматрају.

Када је референтна линија фиксна и физичка, онда се у одговарајућим постољима поставе мерне летве, па се у односу на два пресека постави линија. Уређај региструје неравнине у односу на референтну линију и назива се профилограф.

Математичка референтна линија се добија када се стохастичка функција осредњи, центрира и одбаци "offset" – то је тзв. математичко центрирање када је линија фиксна. Референтна линија је зависна од неравнина, рецимо код деоница које нису хоризонталне.

У Табели 2. упоредно су приказани принципи коришћених метода за мерење неравнина пута.

Табела 2. Поређење мерних принципа за мерење неравнина пута

Мерна величина	Референтна линија		Мерни уређај	
			функција пута	функција времена
Неравнине-вертикале амплитуде	фиксна	физичка	профилограф	/
		математичка	HRM (High Speed Road Monitor)	LRST (Laser Road Surface Tester)
	зависна од неравнина	математичка		
		електрична	/	
		механичка	- мерне летве - планограф - виаграф	APL (анализатор подужног профила)
Извор неравнина	/	нагиб	мерач подужног нагиба пута	/
		кривина	- мерач угла - гониограф	/
Дејство неравнина	/	/	/	Bi – Bazer LRST, APL

2.4. Класификација савремених уређаја за мерење неравнина пута

Опрема за прикупљање података о неравнинама пута треба да обезбеди поуздану, ефикасну и безбедну оцену неравнина пута. Може се поделити у пет класа, према типу карактеристика подлоге који се одређује, као опрема за мерење: локације, геометрије, сервисирања, безбедности и структурног капацитета. Свака класа опреме се даље дели у типове према тачности сакупљених података, типу прикупљених података и методологији која је коришћена за одређивање карактеристика неравнина пута.

Према основном принципу рада, сви до данас развијени уређаји за мерење неравнина пута могу се сврстати у две групе:

1. Прву групу чине уређаји који немају својства осцилаторног система. Код ових уређаја се врши мерење амплитуда неравнина пута у односу на усвојену основну или референтну линију, директним читавањем висина неравнина или се мерење врши преко угаоних одступања од неког референтног угла, односно правца. Овде је реч о различитим типовима профиломера и профилографа.
2. Другу групу чине уређаји који представљају осцилаторни систем познатих параметара. Мере се динамичке величине осцилаторног уређаја, а затим се одређивање висина неравнина врши преко израчунате преносне функције.

Према сложености начина извођења мерења, опрема за мерење неравнина пута може се сврстати у четири широке категорије приказане у Табели 3.

Табела 3. Класификација опреме за снимање неравнина пута према сложености начина извођења мерења

Сложеност мерења	Опрема/начин мерења
Најједноставнија	Мерење помоћу „шипке и либеле“
	Профиломер са шипком за мерење нивоа
Једноставна	Профилографи
Сложена	RTRRM системи
Сложенија	Уређаји за профилисање -профиломери

Према тачности и методологији одређивања *IRI* Индекса, амерички стандард ASTM E 950-94 класификује уређаје за мерење неравнина пута у четири групе приказане у табели 4[7]:

Табела 4. Класификација опреме за снимање неравнина пута према тачности и методологији (ASTME 950-94)

КЛАСА	ОПРЕМА
Класа I Прецизно снимање профила	Ласерски профиломери: бесконтактни лаки профиломери и преносни ласерски профиломери Ручни уређаји: “TRL” шипка, “Face” шипка/ “ROMDAS Z-250”, “ARRB” профиломер
Класа II Друге профиломерске методе	“APL” профиломер, профилографи (нпр. “California”, “Rainhart”), оптички профиломери и инерциони профиломери (“GMR”)
Класа III Процењивање <i>IRI</i> из корелација	“Roadmaster”, “ROMDAS”, “Roughmeter”, “TRL” интегратор неравнина, уређај са „котрљајућим лењиром“
Класа IV Субјективно оцењивање /некалибрисана мерења	Систем оцене преко главног кода, визуелна инспекција, возња по секцији пута

Међународна организација за стандардизацију (ISO), бави се класификацијом профиломера у стандарду ISO 13473-3:2002 [6], који је последњи пут потврђен 2013. године. Према овом стандарду, уређаји за мерење неравнина пута могу се класификовати према:

- мобилности,
- опсегу таласних дужина профила пута које мере,

- контакту са тлом и
- принципу рада

Према мобилности, постоје следеће класе профиломера:

- мобилни за велике брзине кретања (могу да се поставе на возило и користе се при брзинама кретања не мањим од 60 km/h, већином не утичу на саобраћај),
- мобилни за мале брзине кретања (могу да се поставе на возило и користе се при брзинама кретања мањим од 60 km/h, могу да ометају саобраћај на путевима вишег ранга),
- непокретни, у саобраћају (постављају се на тло при мерењу, али се крећу довољно брзо, да не захтевају затварање саобраћајнице, примери: профиломери на приколицама или профиломери који раде брзином хода човека) и
- непокретни, ван саобраћаја (постављају се на тло при мерењу, али се крећу тако споро, да мора да се саобраћајница затвори за саобраћај).

У табели 5, приказана је класификација профиломера према величини таласне дужине коју могу да мере:

Табела 5. Класе профиломера према таласној дужини неравнина пута коју мере

Класа профиломера	A	B	C	D	E	F
Опсег таласних дужина, mm	0,05 – 0,16	0,2 – 0,5	0,63 – 2,0	2,5 – 50	63 – 200	250 – 500

Профиломери се деле на два типа у зависности да ли или не сензор додирује подлогу. У том смислу, постоје:

- контактни уређаји (сензор је у контакту са мерном површином) и
- бесконтактни уређаји (сензор нема контакт са мерном површином).

Профиломери могу да користе различите принципе рада, углавном зависно од типа употребљеног сензора. Најчешће коришћени типови профиломера у овом смислу су:

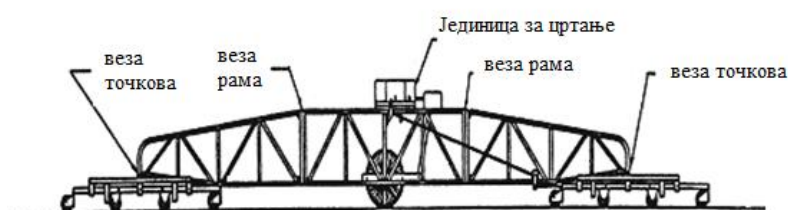
- **ласерски профиломери** (користе електрично-оптички сензор код кога се ласерски сноп одбија од површине пута и пројектује се слика преко оптичких сочива на полупроводнички претварач осетљив на позицију; сензор се креће дуж мерне површине, што даје електрични излазни сигнал пропорционалан висини ласерске тачке на површини у функцији подужног растојања),
- **светлосни профиломер** (користи или узак или проширен сноп светлости, стварајући на подлози танке линије или интензивно осветљене траке са оштрим ивицама; линију или ивицу траке светлости прати видео камера под одговарајућим углом; уређај не сме да се помера у току мерења када се узоркује профил, јер ће траг профила бити замагљен),

- **профиломери са иглом** (користе иглу која додирује подлогу и која је механички повезана са претварачем померања; претварач је најчешће у облику линеарног потенциометра или линеарног променљивог диференцијалног претварача; сензор се помера дуж мерне површине дајући електрични излазни сигнал пропорционалан висини тачке контакта на површини у функцији подужног растојања) и
- **ултразвучни профиломери** (користе електро-акустички сензор код кога се сноп ултразвучног таласа преноси на површину пута и одбија од ње; микрофон снима одбијени звук, а време између послатог и примљеног ултразвучног таласа се рачуна и претвара у одговарајуће растојање; сензор се креће дуж мерне површине дајући електрични излазни сигнал пропорционалан висини тачке изложене ултразвучном таласу у функцији од подужног растојања).

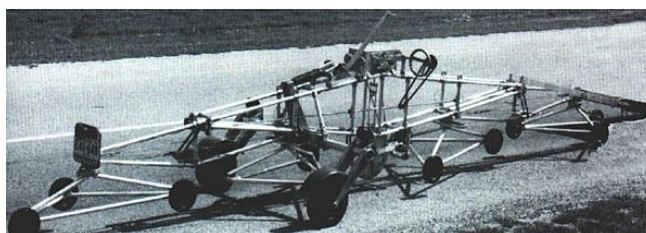
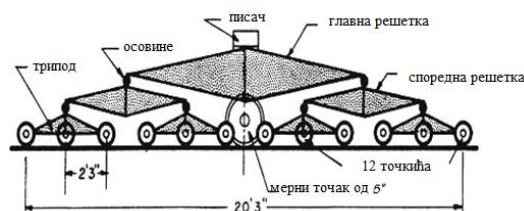
2.5.Профилографи

Профилографи се користе за мерење подужног профила бетонског коловоза. Њихова основна употреба протеклих неколико деценија је била при контролисању квалитета израде коловоза.

Развила су се два основна типа профилографа са различитом конфигурацијом носећих точкова: профилограф типа “California”, слика 15, и профилограф типа “Rainhart” типа, слика 16.



Слика 15. “California” профилограф[6]



Слика 16. “Rainhart” профилограф[6]

Ови профилографи су релативно јефтини, лаки за потребу и одржавање и дају податке лако разумљиве корисницима. Оба се ручно покрећу од стране једне особе, брзином хода. Међутим, због везе између точкова, не могу се користити за прикупљање података о неравнинама пута на путевима за велике брзине.

Број носећих точкова на профилографима типа “*California*” варирао је од четири до дванаест. Ови точкови су повезани за крајеве 7,6 m дуге решетке и монтирани на носач више осовина који укључује четири точка на растојању од 432 mm од осе симетрије решетке и два точка на растојању од 432 mm са супротне стране осе симетрије решетке. Носећи точкови су обично постављени на растојањима од 0,82 m и постављени близу крајева решетке, што резултује укупним распоном профилографа од 10 m.

Профилограф типа “*Rainhart*” ради слично као профилограф типа “*California*”. Главна разлика је у томе он користи 12 точкова постављених у четири групе по три точка. Овакав распоред точкова обезбеђује да сваки точак прелази различиту путању. То омогућава мерење на 12 путања точкова уместо на 3 као код профилографа типа “*California*”.

Са појавом бесконтактних лаких профиломера, профилографи су највише употребљиви за поновно тестирање кратких оштећених деоница коловоза ради верификације поправки оштећења. Профилографи су такође врло примењиви за испитивање површине моста, пошто ти послови захтевају мерење на кратким деоницама.

Савремене профилографе производе следеће фирме: “*James Cox & Sons Inc.*”, слика 17, “*Surface Systems Instruments*”, “*ELE International-Soiltest*” и “*AMES Engineering*”, слика 18. Коштају око 25000\$, зависно од произвођача.



Слика 17. Профилограф фирме “*James Cox & Sons Inc.*” [6]

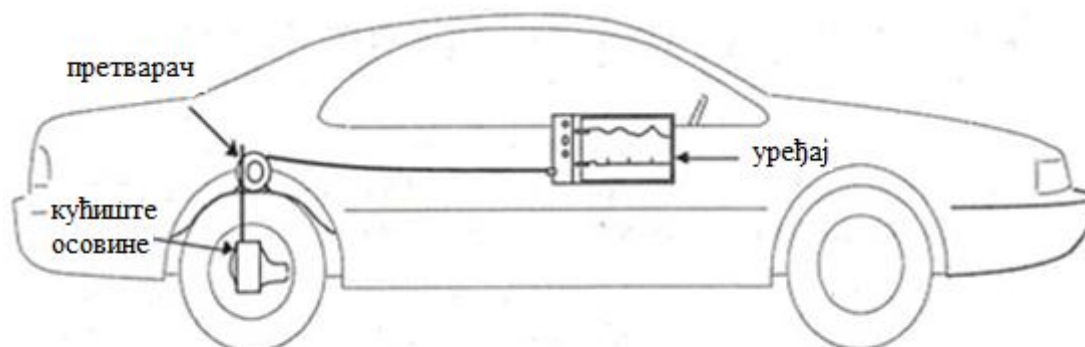


Слика 18. Компјутеризовани профилограф фирме “AMES Engineering”, модел 4200 [6]

2.6. Системи за мерење неравнина пута на принципу одзива возила - *RTRRMS* системи

Много година, већина података о неравнинама пута добијана је са возилима опремљеним са профиломерима, називаним по више генеричких имена, укључујући и назив “*Response-Type Road Roughness Measuring Systems – RTRRMS*”, односно системи за мерење неравнина пута на принципу одзива возила. *RTRRMS* системи раде при великим брзинама кретања, монтирају се на возило, лаки камион или на специјалну приколицу. *RTRRMS* уређаји мере одзив возила на неравнине пута, па то није право мерење неравнина пута. У ову групу уређаја спадају и уређаји који мере релативно кретање између осовине и ослоњене масе и уређаји који мере убрзање осовине или ослоњене масе.

Најчешће коришћен уређај на принципу одзива је “*Mays Ride Meter*”, слика 19. Уређај одређује глаткоћу коловоза мерењем релативног хода између кућишта осовине и ослоњене масе возила. Метода заправо мери релативно кретање ослоњене масе система као одзив на неравнине пута, при чему је маса ослоњена на систем еластичног ослањања и тачкове аутомобила. Рад захтева екипу од два човека.



Слика 19. Возило са “*Mays Ride Meter*” профиломером [6]

Главне компоненте уређаја “*Mays Ride Meter*” су: обртни давач, инструмент за регистровање стања коловоза и инструмент за мерење растојања. Обртни давач претвара релативно кретање између осовине и каросерије у електрични сигнал. Инструмент за мерење растојања је електрични бројач километраже (одометар). Инструмент за регистровање стања коловоза је микропроцесор који прихвата улаз са обртног давача и одометра, а уз помоћ тастатуре, разни сигнали се претварају у излаз. Излаз је обично у акумулираним инчима по пређеном растојању.

Путни мерачи су развијани да буду јефтини, поуздани и лаки за коришћење. Због тога, чињеница да систем на принципу одзива зависи од динамике возила има више негативних ефеката: методе мерења неравнина пута нису биле стабилне у времену. Данашња мерења помоћу путних мерача не могу се поредити са поверењем са мерењима од пре неколико година. Такође, мерења неравнина пута нису била преносна - мерења путним мерачима које је одрадио један систем не могу се репродуковати другим системом.

Упркос овим и другим проблемима везаним за уређаје на принципу одзива, они су у употреби у протеклих 50 година и, чак и појава бесконтактних профиломера не смањује употребу уређаја “*Mays Ride Meter*”. Трошкови приколице за уређај и одговарајућег инструмента за регистровање су око 8000\$. Цена инструмента за регистровање стања коловоза је око 10000\$, у зависности од произвођача.

2.7.Профиломери

2.7.1. Инерцијални профиломери

Профиломери мере и региструју подужни профил пута у једном или у два трага. Најчешће су у употреби инерцијални профиломери, као што су “*K.J. Law*”, слика 20, и “*South Dakota*”, слика 21.



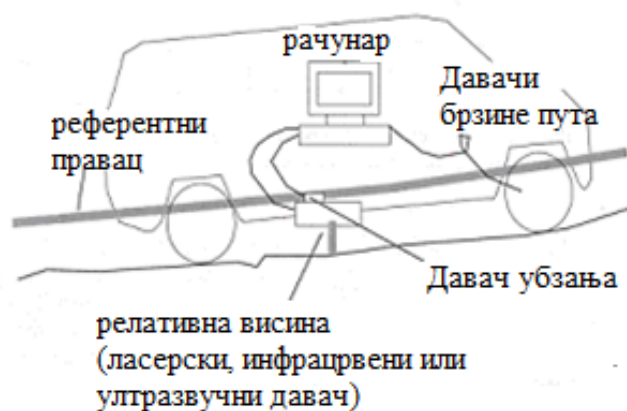
Слика 20. “*K. J. Law*” профиломер[6]



Слика 21. “*South Dakota*” профиломер[6]

Инерцијални профиломери могу да мере и региструју профил површине пута брзинама између 16 и 112 km/h. Профиломер мери и прорачунава подужни профил коловоза кроз креирање инерцијалног референтног положаја, слика 22, коришћењем

давача убрзања постављених на каросерији мерног возила. Релативно померање између давача убрзања и површине пута мери се помоћу бесконтактних светлосних или акустичких мерних система монтираних са давачем убрзања на каросерији возила.



Слика 22. Принципиални рад инерцијалних профиломера [6]

За рад је потребна екипа од два човека – један је возач, а други систем оператер. Цео систем се монтира на комби у пуној величини. Рачунар и друге компоненте система се налазе у возилу. Профиломер има даваче за мерење висина неравнина пута и дубину колотрага. Давачи убрзања одређују референтну равну мерењем вертикалних осцилација возила. Пут који систем пређе се мери давачем за мерење пређеног пута. То је обично импулсни давач који се монтира на предњи точак возила.

Обрада сигнала снимљеног профила се обавља уз помоћ рачунара монтираног у возилу. Прорачуни се врше у реалном времену док се возило креће по путу. Веза између корисника и система профиломера обезбеђује се преко терминала и принтера.

Подаци о профили неравнина пута се осредњавају у интервалима од 12 inch и региструју као тачке профила на сваких 1, 2 или 6 inch (25, 50, 150 mm) пута. Програм за мерење дубине колотрага израчунава и региструје просечну дубину колотрага на сваких 100 ft (55 m) за податке узете на сваке 3 ft (1.6 m).

Цена бесконтактног инерцијалног профиломера варира са нивоом прецизности. “K. J. Law” профиломер је најпрецизнији уређај и кошта око 160000\$ до 200000\$ у зависности од опције. “South Dakota” профиломер садржи јефтиније ултразвучне даваче, који су мање прецизни. Овај систем мери профил у једном трагу и кошта око 50000\$ у зависности од произвођача.

2.7.2. Бесконтактни лаки профиломери

Нова генерација лаких, бесконтактних профиломера јавила се у сврху контроле квалитета израде и прихватања квалитета израде. Они су много мањи и лакши од других профиломера и обезбеђују предност употребе одмах након постављања вреле смеше асфалта и много пре него што би било могуће са осталим профиломерима код

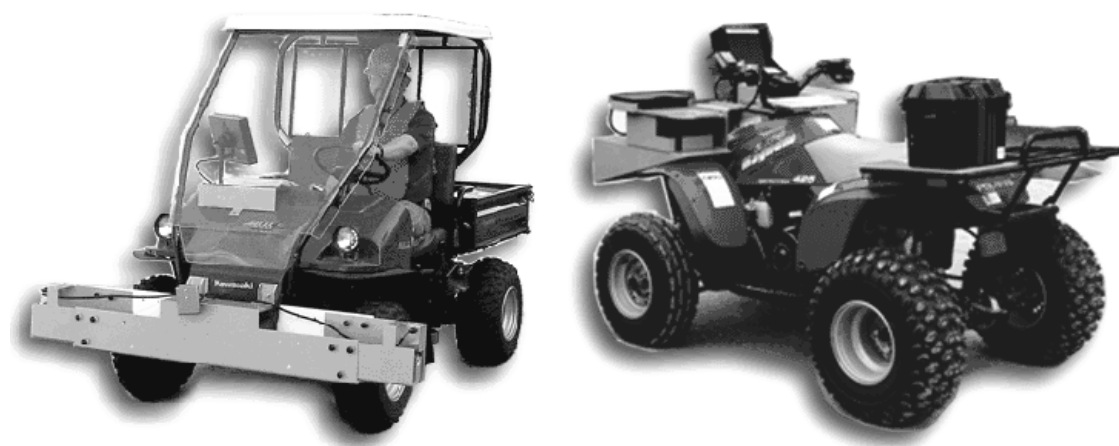
бетонских коловоза. Међутим, њихове радне брзине су од 13 km/h до 40 km/h, што их чини непрактичним за прикупљање података на мрежи путева великим брзинама.

Ови бесконтактни профиломери захтевају једног до два оператера. Неке покреће акумулатор, друге бензински мотор. Основни систем се састоји од: једног давача убрзања, бесконтактнoг давача пута, графичког екрана и рачунара са штампачем. Улази са давача убрзања и бесконтактнoг давача се убацују у рачунар, који рачуна и памти индекс храпавости по жељи корисника, а може да сачува податке снимљене са 21 000 km пута. Тачке профила пута се узоркују сваког инча, осредњавају у интервалима од 12 inch (305 mm) и чувају као тачке профила на сваких 6 inch (152 mm) или на сваком инчу ако је потребно. Резултати се могу видети на екрану или штампати на штампачу. Подужна мерења не зависе од промене тежине возила, брзине, екстремних вредности температура, светла, ветра и боје и структуре коловоза. Ови профиломери могу да рачунају различите индексе храпавости, коришћењем истих података.

Неки од најновијих профиломера овог типа су: лаки профиломер *T6400* фирме “*K. J. Law*”, анализатор површине “*LISA*” (енгл. “*Lightweight Inertial Surface Analyzer*”), фирме “*Ames Engineering*”, и лаки профиломер “*ICC*” фирме “*International Cybernetics Corporation*”, слика 23 и слика 24. Цена им је од 45000\$ до 60000\$, зависно од произвођача.



Слика 23. Профиломер “*LISA*”: лево - возило, десно - детаљ бесконтактнoг давача [6]

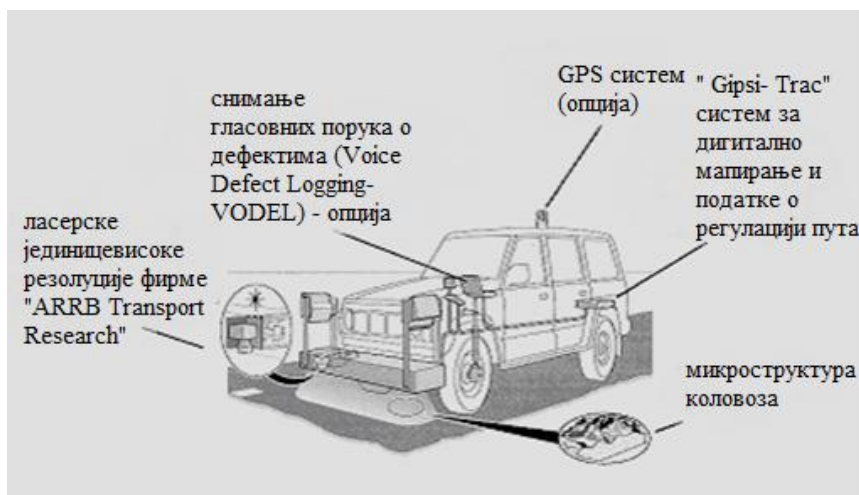


Слика 24. Профиломер “ICC” [6]

2.7.3. Преносни ласерски профиломери

Систем мулти-ласерских профиломера (енгл. “*Multi-Laser Profiler*” - *MLP*) је монтиран на возилу и аутоматски сакупља интегрисане податке о стању пута снимањем ласерских профила површине пута при путним брзинама. Врло су корисни за контролу великих мрежа путева. Брзина при којој раде је од 29 km/h до 120 km/h. *MLP* систем захтева два оператера и има уграђен рачунарски систем и гаму софтвера за аквизицију и анализу података. Он истовремено мери храпавост површине, дубину колотрага и макро-структуру у подужном и попречном правцу. Користи инерцијалне даваче због компензације карактеристика CEO и пнеуматика. Прегледа до приближно 600 km пута дневно у интервалима од по 2 inch (50 mm) код мерења дубине колотрага и од по 0,25 inch (6 mm) за структуру коловоза.

Преносни ласерски профиломери садрже многе друге даваче и модуле који нису потребни за мерење неравнина пута, слика 25. Опциони системи укључују глобални систем позиционирања – *GPS* систем, податке о регулацији пута и дигитални систем мапирања - *DMS*, као и систем за записивање гласовних порука о дефектима пута који омогућава оператору да сними дефекте пута док вози. Значајнији произвођачи *MLP* система су: “*TRIGG Industries, Inc.*” и “*Pathway Services*”. *MLP* системи коштају око 75 000 \$, зависно од произвођача. Мањи, јефтинији преносни уређаји су боље прилагођени захтевима контроле квалитета израде коловоза.



Слика 25. Мулти-ласерски профиломер [6]

Најновији аутоматизовани преносни ласерски профиломер је “*ROSAN*” (скраћено од енгл. “*ROad Surface ANalyzer*”), слика 26, конструисан од стране америчке Агенције за путеве – *FHWA*. То је преносни систем монтиран на возилу намењен за мерење висине подужног профила пута при великим брзинама, пожељно преко 48 km/h. Овај систем је подесан за мерење структуре и храпавости коловоза. Мерења структуре се обављају у интервалима узорковања од 0,25 m и ограничена су до брзине 24 km/h. “*ROSAN*” систем се ослања на софтвер за регистровање мерења. Захтева возило са браником са степеником. Цео систем осим преносног рачунара стаје у заштитни кофер са точкићима и кошта око 50000\$.



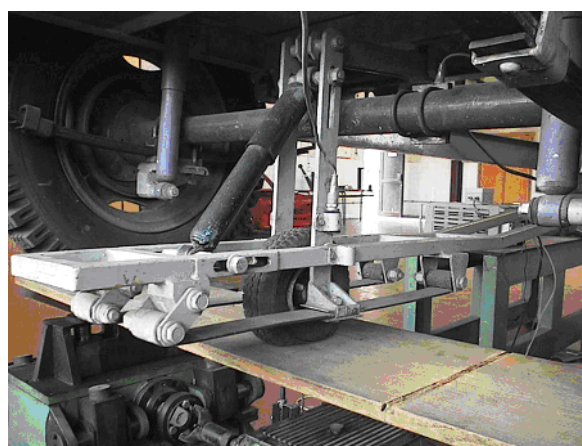
Слика 26. “ROSAN” преносни ласерски профиломер [6]

2.8. Мерна приколица за мерење неравнина пута развијена на Факултету инжењерских наука

На Факултету инжењерских наука развијена је мерна приколица намењена мерењу неравнина пута, слика 27. Ова приколица припада групи уређаја који раде на принципу посредног мерења висина неравнина пута мерењем вертикалног убрзања у центру тачка.



а)



б)

Слика 27. а) Мерна приколица за снимање неравнина пута, б) детаљ тачка за мерење неравнина пута са давачима [3]

Руда приколице има дужину од приближно 4 m и има функцију да елиминише утицај угаоног заокретања приколице на положај сензора вертикалног убрзања на помоћном тачку малих габарита, намењеном за мерење неравнина пута. Товарни део приколице се користи за смештај мерне опреме и додатних оптерећења за постизање неопходних динамичких реакција на тачковима приколице. Поред тога, структура приколице укључује додатни модул направљен на бази „петог тачка“ који је везан за

приколицу и има функцију да контролише утицај еласто-пригушних карактеристика точка на резултате мерења неравнина пута, слика 27 б).

На овој приколици могуће поставити следећи давачи: два давача вертикалног убрзања у центрима точкова приколице и један давач вертикалног убрзања у центру додатног точка малих димензија.

3. МЕТОДЕ ЗА ОБРАДУ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА НЕРАВНИНА ПУТА

Реални профил пута може да се сматра стохастичким узорком кога треба проучити и обрадити. За ову обраду најпре се треба упознати са елементима математичке статистике и дефинисати величине које дају адекватан опис квалитета пута из стохастичког сигнала. Идентификација стохастичких сигнала се може обавити у временском, амплитудном и фреквентном домену.

3.1. Идентификација случајних сигнала у временском домену

Случајан сигнала у временском домену карактерише неколико величина које ће бити објашњене у даљем тексту.

3.1.1. Средња вредност (аритметичка средња вредност, математичко очекивање)

Средња вредност случајне функције, $z(t)$, у временском интервалу, T , дефинише се на следећи начин:

$$z_{sr} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z(t) dt. \quad (3)$$

За довољно велики, али коначан интервал времена, T , важи:

$$z_{sr} \approx \frac{1}{T} \int_0^T z(t) dt, \quad (4)$$

Док за дискретне сигнале, средња вредност износи:

$$z_{sr} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i. \quad (5)$$

Ако се усвоји довољно велики интервал времена, T , који се дели на N подинтервала, $\Delta t = \frac{T}{N}$, онда је средња вредност приближно једнака:

$$z_{sr} \approx \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N z_i \Delta t = \frac{1}{T} \frac{T}{N} \sum_{i=1}^N z_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i. \quad (6)$$

У појединим проблемима користи се „једносмерна“ средња вредност:

$$z_{sr} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |z(t)| dt. \quad (7)$$

Средња вредност висине неравнина, као статистички податак, не дају представу о квалитету пута. Ова вредност зависи од избора референтне осе и може бити мала за веома велике амплитуде супротних знакова.

3.1.2. *Средња квадратна вредност (квадрат ефективне вредности)*

Средња квадратна вредност сигнала, $z_{ef}^2 = \psi_z^2$ се рачуна на основу израза:

$$\psi_z^2 = z_{ef}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z^2(t) dt . \quad (8)$$

Ефективна вредност висина неравнина је тада:

$$z_{ef} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z^2(t) dt} , \quad (9)$$

док је код дискретних сигнала:

$$z_{ef} = \sqrt{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2} . \quad (10)$$

Ефективна вредност случајног сигнала је статистичка карактеристика једне реализације. У општем случају даје представу о интензитету стохастичког процеса. И ова величина је неприкладан показатељ оцено пута, јер исте ефективне вредности могу имати неравнине различитих таласних дужина.

3.1.3. *Дисперзија*

Дисперзија, σ_z^2 , представља меру расипања резултата случајних величина око њене средње вредности:

$$\sigma_z^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [z(t) - z_{sr}]^2 dt = z_{ef}^2 - z_{sr}^2 . \quad (11)$$

За дискретне сигнале важи:

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z_i - z_{sr}]^2 . \quad (12)$$

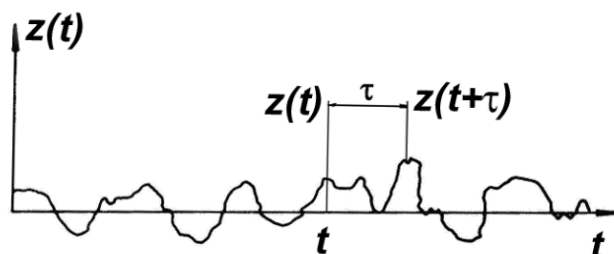
3.1.4. *Средње квадратно одступање (стандардна девијација)*

Стандардна девијација, σ_z је позитивни квадратни корен из дисперзије:

$$\sigma_z = + \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [z(t) - z_{sr}]^2 dt} . \quad (13)$$

3.1.5. Аутокорелациона функција

Аутокорелациона функција стохастичког процеса, $R_{zz}(\tau)$, описује зависност између тренутне вредности случајне величине у два различита временска тренутка, на растојању, τ , слика 28:



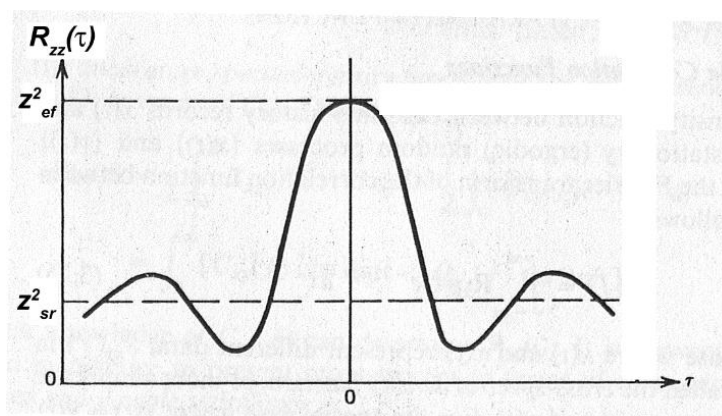
Слика 28. Уз дефиницију аутокорелационе функције[3]

За ергодичан процес важи:

$$R_{zz}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z(t)z(t+\tau)dt. \quad (14)$$

Особине аутокорелационе функције су, слика 29:

- парност $R_{zz}(-\tau) = R_{zz}(\tau)$,
- за $\tau = 0$: $R_{zz}(0) = z_{ef}^2 = \sigma_z^2 + z_{sr}^2$,
- за $\tau \rightarrow \infty$: $R_{zz}(\infty) = z_{sr}^2$.



Слика 29. Особине аутокорелационе функције[3]

Нормирана аутокорелациона функција се дефинише као:

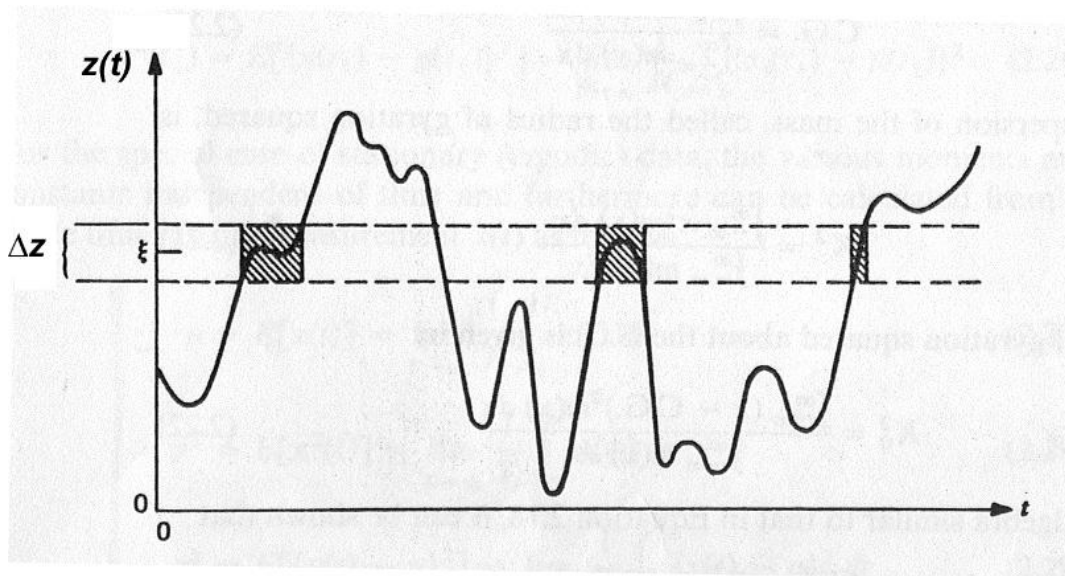
$$R_n(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)} = \frac{R(\tau)}{z_{ef}^2} \quad (15)$$

3.2.2. Функција густине вероватноће

Функција густине вероватноће, $p(z)$, је брзина промене вероватноће у односу на амплитуду. Код случајног стационарног ергодичног процеса $z(t)$, дефинише се на следећи начин:

Израчунавање функције густине вероватноће се врши на следећи начин, слика 31:

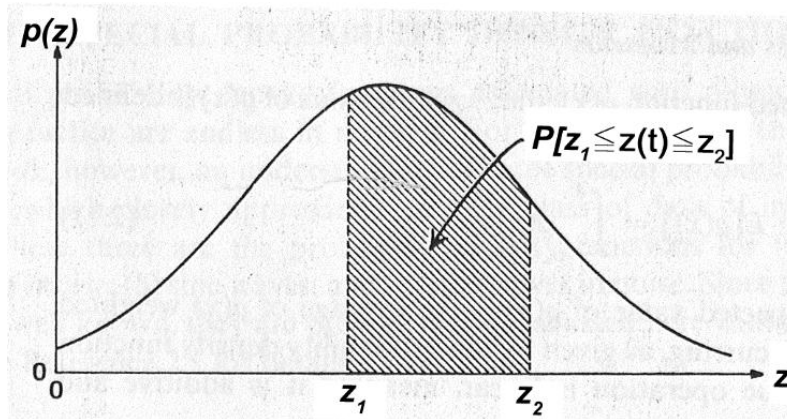
$$\begin{aligned}
 P[z(t) \in \Delta z_\xi] &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T[z(t) \in \Delta z_\xi]}{T} \\
 p(z) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{P[z(t) \in \Delta z_\xi]}{\Delta z} \\
 p(z) &= \frac{dP(z)}{dz}
 \end{aligned} \tag{19}$$



Слика 31. Функција расподеле вероватноће стационарног ергодичног сигнала[3]

Веза између функције расподеле вероватноће и функције густине вероватноће илустрована је на слици 32:

$$\begin{aligned}
 P(z) &= \int p(z) dz \\
 P[z_1 \leq z(t) \leq z_2] &= \int_{z_1}^{z_2} p(z) dz = P(z_2) - P(z_1)
 \end{aligned} \tag{20}$$



Слика 32. Израчунавање функције расподеле вероватноће из функције густине вероватноће[3]

Када $z_1 \rightarrow -\infty$, важи следеће:

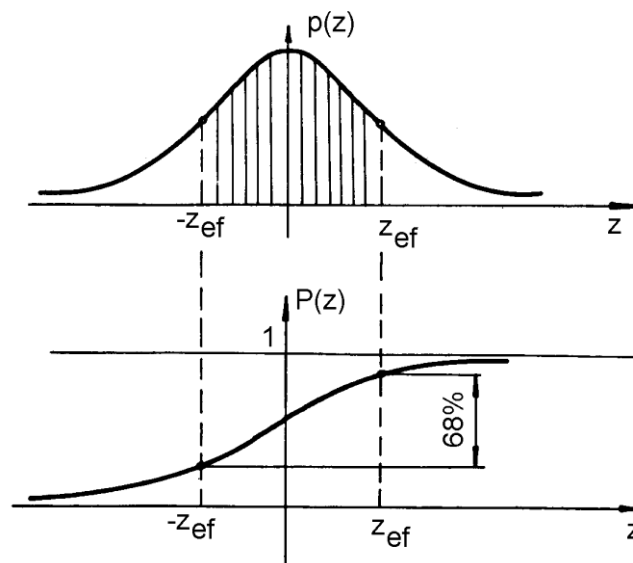
$$P[-\infty \leq z(t) \leq z_2] = \int_{-\infty}^{z_2} p(z) dz = P(z_2), \quad (21)$$

а када $z_1 \rightarrow \infty$, $z_2 \rightarrow \infty$, важи:

$$P[-\infty \leq z(t) \leq \infty] = \int_{-\infty}^{\infty} p(z) dz = 1. \quad (22)$$

Што представља површину испод криве $p(z)$.

Испитивања су показала да се микро-профил пута подвргава нормалној (Гаусовој) расподели, слика 33: За стохастичке стационарне процесе важи да је средња вредност непроменљива тј. $z_{sr} = \text{const}$.



Слика 33. Нормална расподела вероватноће микро-профила пута[3]

Функција густине нормалне расподеле је изражена законом:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{(z-z_{sr})^2}{2\sigma_z^2}}. \quad (23)$$

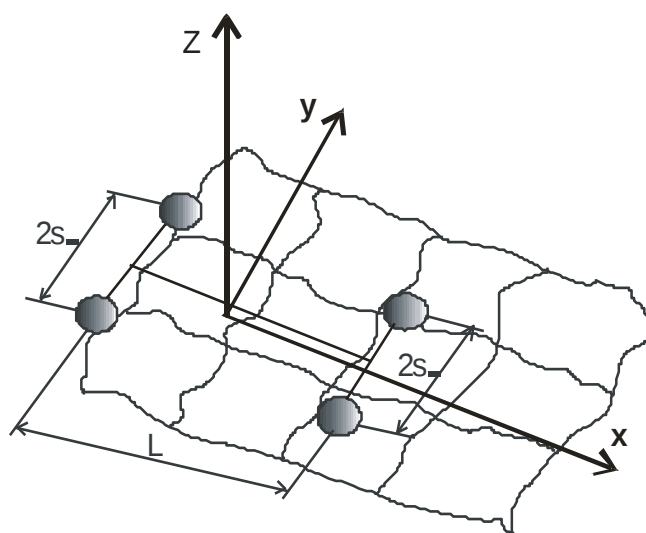
где су: z_{sr} - средња вредност, σ_z^2 - варијанса и σ_z - дисперзија. Увођењем нормиране променљиве се добија нормирана Гаусова расподела, чиме се постиже да је средња вредност узорка нула ($z_{sr} = 0$), а дисперзија јединична ($\sigma_z = 1$).

Када се сигнал подвргава нормалној расподели, онда важи следеће:

$$\begin{aligned} P[-z_{ef} < z \leq z_{ef}] &= 68\% \\ P[-2z_{ef} < z < 2z_{ef}] &= 95\% \\ P[-3z_{ef} < z < 3z_{ef}] &= 99,7\% \end{aligned} \quad (24)$$

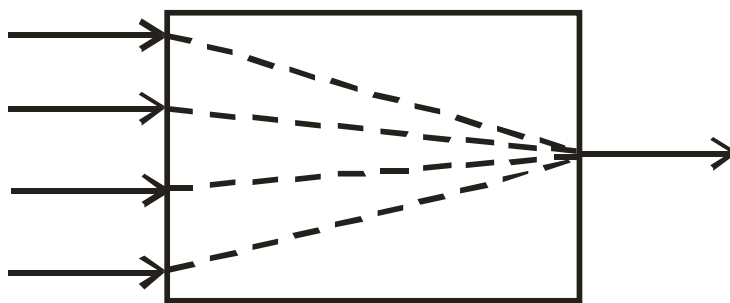
3.3. Идентификација случајних сигнала у фреквентном домену

Посматра се један оријентисани део коловоза по коме се креће возило распона точкова, l , са два трага, $2s_1, 2s_2$, на коме постоји нека референтна раван x - y , слика 34. Са аспекта микро-рељефа површине коловоза, могу се правити подужни пресеци и попречни пресеци, тј. функција висине неравнина може се исказати као $z(x, y)$.



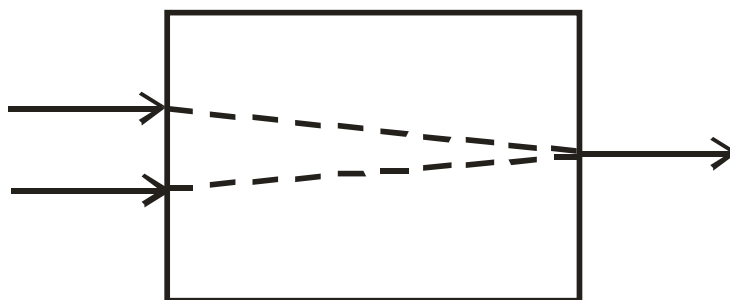
Слика 34. Тродимензионална површина коловоза [9]

Нека су од интереса само неравнине пута у подужном правцу. Сваки тачак има свој колотраг на површини коловоза (сваки тачак побуђен је одговарајућим неравнинама пута) – у случају када је траг предњих точкова различит од трага задњих. Дакле, ради се о побуди возила у 4 трага, слика 35.



Слика 35. Побуда возила у 4 трага [9]

У случају када је $2s_1 = 2s_2$ побуда возила врши се у два трага, с тим што задњи точкови „касне“ за предњим, слика 36. Време кашњења задњих точкова у односу на предње може се израчунати из релације: $\tau = \frac{l}{v}$, где су τ - време кашњења, l – међуосовинско растојање и v – константна брзина кретања возила.



Слика 36. Побуда возила у 2 трага [9]

3.3.1. Спектар снаге случајних сигнала

Побуда од неравнина пута је сума хармоника одговарајућих амплитуда и учестаности. Зависност између функције неравнина пута, $z(t)$, и функције комплексних амплитуда неравнина пута, $Z(f)$, изражава се инверзном Фуријеовом трансформацијом:

$$z(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(f) e^{j2\pi ft} df, \quad -\infty < t < \infty. \quad (25)$$

или директном Фуријеовом трансформацијом:

$$Z(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad -\infty < f < \infty. \quad (26)$$

Функција $Z(f)$ је комплексна функција и може се записати у следећем облику:

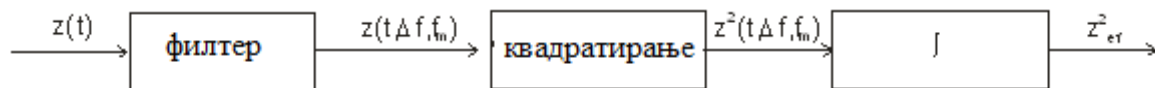
$$Z(f) = |Z(f)| e^{-j\theta(f)}. \quad (27)$$

где су: $|Z(f)|$ - амплитудни спектар (амплитудно-фреквентна карактеристика - $A\Phi K$) и $\theta(f)$ - фазни спектар (фазно-фреквентна карактеристика - $\Phi\Phi K$) сигнала.

Према Парсеваловој теореме, ако се формира сума квадрата временске функције, $z(t)$, онда је та сума једнака суми квадрата модула одговарајућих комплексних амплитуда:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} z^2(t) dt = \int_0^{+\infty} |Z(f)|^2 df. \quad (28)$$

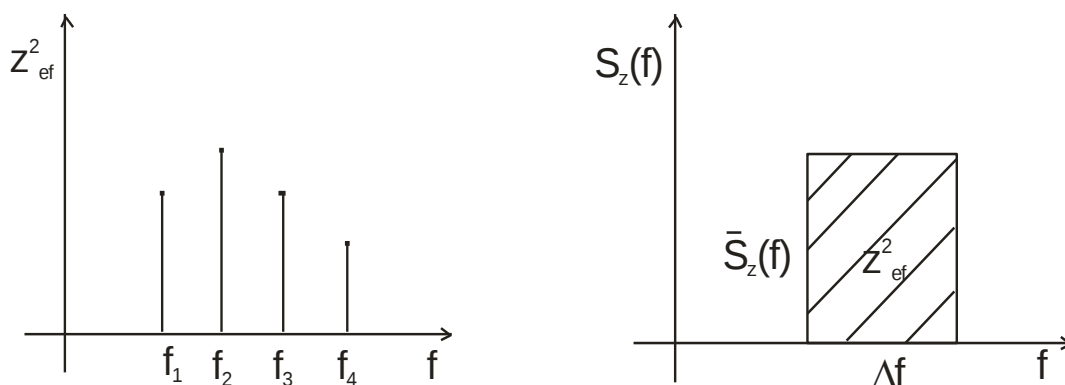
Ако се сигнал $z(t)$ уведе у селективни аналогни филтер (спектрални анализатор) са променљивом централном фреквенцијом, f_m , и константним ширином појаса, Δf , на излазу се добија само део сигнала, $z(t, \Delta f, f_m)$ слика 37.



Слика 37. Добијање спектра снаге сигнала помоћу аналогног филтера[7]

Затим сигнал $z(t, \Delta f, f_m)$ улази у блокове за квадрирање и сумирање и добија се квадрат ефективне вредности сигнала, $z_{ef}^2(f) = \psi_z^2(f_m, \Delta f)$, слика 37. Вредност $\psi_z^2(f_m, \Delta f)$ сводимо на површину правоугаоника ширине Δf и непознате висине $\bar{S}_z(f)$, слика 38, одакле се добија дефиниција спектра снаге сигнала $\bar{S}_z(f)$:

$$\bar{S}_z(f) = \frac{\psi_z^2(f_m, \Delta f)}{\Delta f}. \quad (29)$$



Слика 38. Уз дефиницију спектра снаге сигнала[9]

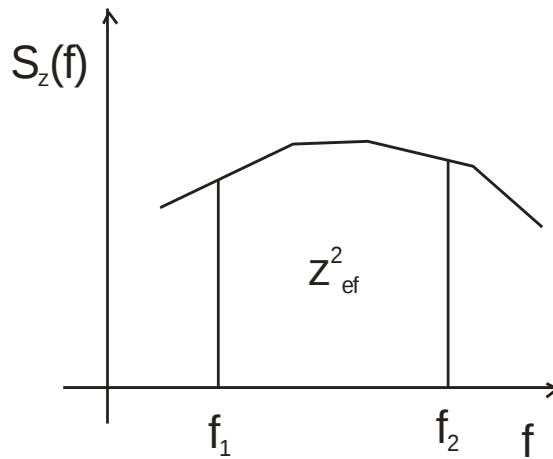
Стварна вредност спектра снаге одређује се као гранична вредност када $\Delta f \rightarrow 0$:

$$S_z(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\psi_z^2(f)}{\Delta f} = \frac{d\psi_z^2(f)}{df} = \frac{dz_{ef}^2}{df}. \quad (30)$$

одакле је:

$$\psi_z^2 = z_{ef}^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_z(f) df, \quad (31)$$

Што значи да површина испод криве спектра снаге, $S_z(f)$, показује у одређеној размери ефективну вредност сигнала, слика 39.

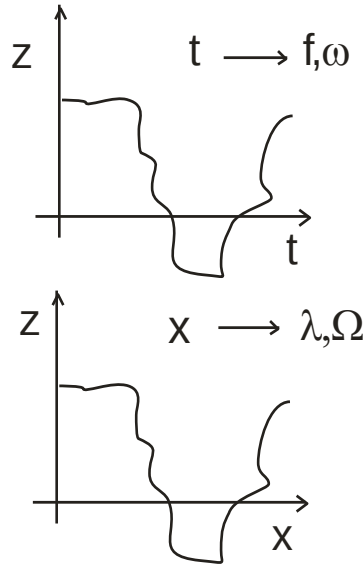


Слика 39. Добијање ефективне вредности сигнала из спектра снаге[9]

Неравнине пута могу се посматрати на одређеној дужини пута, x , слика 40, па се случајна функција неравнина пута може приказати као:

$$z(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(\Omega) e^{j\Omega x} d\Omega. \quad (32)$$

где су $Z(\Omega)$ - комплексне амплитуде неравнина пута, Ω - кружна учестаност таласа неравнина пута.



Слика 40. Праћење неравнина пута у времену и дуж дела пута[9]

Ако би се возило кретало малом брзином, вредност $z(x)$ би могла да се одреди у свакој тачки, међутим, возило пут прелази неком константном брзином, па важи следећа релација која повезује брзину, пут и време $x = vt$.

Функција $z(x)$ се преводи у временски домен на следећи начин:

$$z(vt) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(\Omega) e^{j\Omega vt} d\Omega. \quad (33)$$

Очигледне су и следеће везе:

$$\omega = \Omega v \Rightarrow \Omega = \frac{\omega}{v} \Rightarrow d\Omega = \frac{d\omega}{v} \Rightarrow z(vt) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(\Omega) \frac{1}{v} e^{j\omega t} d\omega, \quad (34)$$

$$Z(\omega) = \frac{1}{v} Z(\Omega), \quad (35)$$

$$S_z(f) = \frac{1}{v} S_z(\Omega). \quad (36)$$

Последња формула није само једноставна математичка релација, већ има и физички смисао: снимљена полазна величина, $S_z(\Omega)$, подељена брзином, v , даје спектар побуђивања возила од датог пута.

Ако возило неравнину таласне дужине λ , пређе за време T , онда важи:

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad \frac{1}{T} = f, \quad \omega = 2\pi f, \quad \omega = \Omega v = \Omega \frac{\lambda}{T} = \Omega \lambda f = \Omega \lambda \frac{\omega}{2\pi}, \quad (37)$$

одакле следи релација:

$$\frac{\Omega\lambda}{2\pi} = 1 \Rightarrow \Omega = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (38)$$

Уколико се посматрају изводи спектра снаге амплитуда неравнина пута, добија се следеће:

$$\begin{aligned} \dot{S}_z(f) &= V(f) = \frac{d\dot{z}_{ef}^2}{df} \\ \ddot{S}_z(f) &= B(f) = \frac{d\ddot{z}_{ef}^2}{df} \end{aligned} \quad (39)$$

где су $\dot{S}_z(f)$ - густина спектра снаге брзине неравнина пута, и $\ddot{S}_z(f)$ - густина спектра снаге убрзања неравнина пута.

Између карактеристичних величина постоје следеће међузависности:

$$\begin{aligned} v = \lambda f &\Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow \frac{d\lambda}{df} = -\frac{v}{f^2} \\ S_z(f) &= \frac{dz_{ef}^2}{df} \\ S_z(\omega) &= \frac{dz_{ef}^2}{d\omega} \\ S_z(f) &= \frac{dz_{ef}^2}{df} \frac{d\lambda}{d\lambda} = S_z(\lambda) \left(-\frac{v}{f^2} \right) \Rightarrow S_z(\lambda) = -S_z(f) \frac{f^2}{v} \end{aligned} \quad (40)$$

На сличан начин, добијају се и следеће зависности:

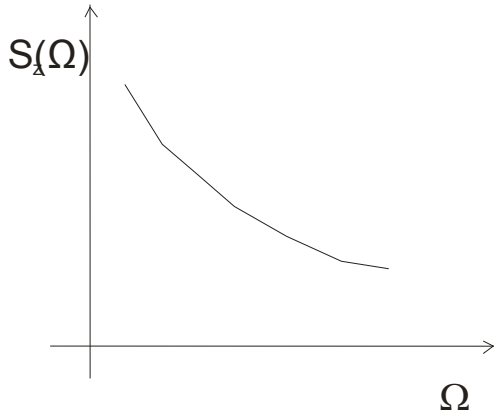
$$\begin{aligned} V_z(f) &= -4\pi^2 f^2 S_z(f) \\ B_z(f) &= 16\pi^4 f^4 S_z(f) = (2\pi)^5 f^4 \frac{1}{v} S_z(\Omega) \end{aligned} \quad (41)$$

Одавде је:

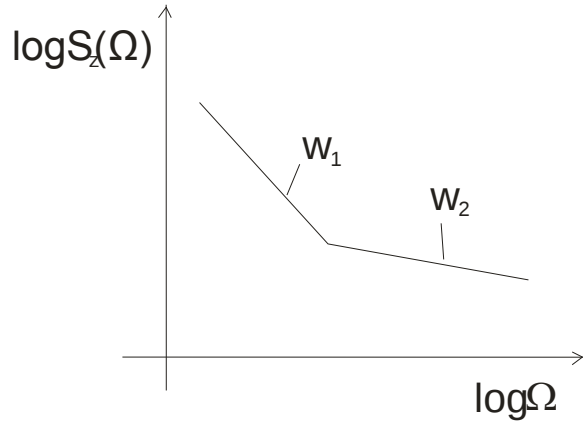
$$S_z(\Omega) = \frac{B_z(f)v}{(2\pi)^5 f^4}, \quad (42)$$

што је израз за израчунавање спектра побуде од неравнина пута, ако је познат спектар снаге вертикалног убрзања у центру точка и биће коришћен у даљој анализи.

Спектар снаге, $S_z(\Omega)$, је по облику хипербола неприкладна за анализу, слика 41. Зато је преводимо у логаритамски облик, слика 42.



Слика 41. Хипербола спектра снаге
неравнина пута[9]



Слика 42. Спектар снаге неравнина пута у
логаритамском облику[9]

Испитивања су показала да се у логаритамском облику, спектар снаге неравнина пута може приказати следећим изразом:

$$S_z(\Omega) = \begin{cases} S_z(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w_1}, & \Omega \leq \Omega_0 \\ S_z(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w_2}, & \Omega > \Omega_0 \end{cases} \quad (43)$$

Величине $S_z(\Omega_0)$, Ω_0 , w_1 , w_2 су параметри пута који се, за поједине врсте путева одређују експериментално и приказују табеларно.

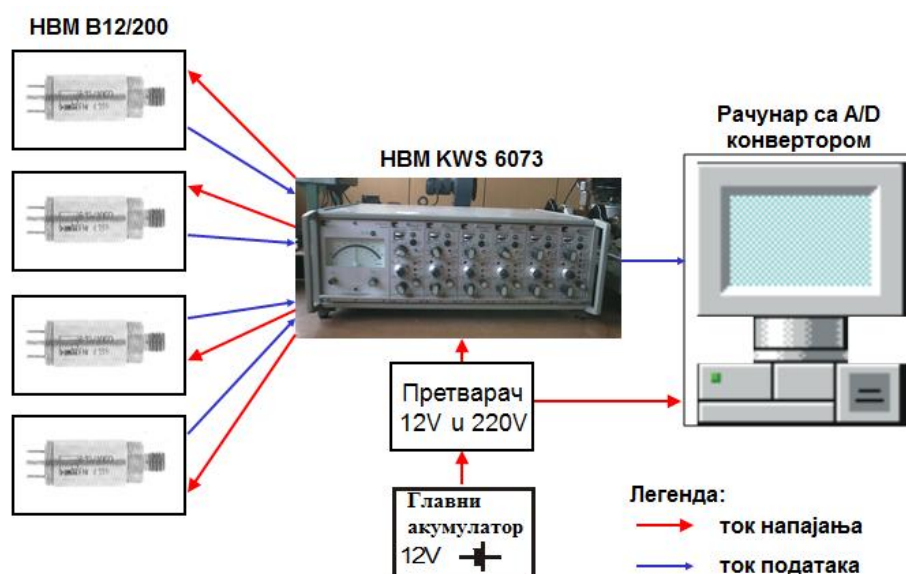
4. ОБРАДА ПОДАТАКА О СНИМЉЕНИМ ВИСИНАМА НЕРАВНИНА ПУТА МЕРЕЊЕМ ВЕРТИКАЛНОГ УБРЗАЊА У ЦЕНТРУ ТОЧКА ВОЗИЛА

На Факултету инжењерских наука развијена је метода за посредно мерење висина неравнина пута мерењем вертикалних убрзања у центрима сва четири точка лабораторијског возила, слика 43 [11].



Слика 43. Постављање давача вертикалног убрзања на: а) предњим точковима, б) задњим точковима експерименталног возила[11]

Структура развијене опитне инсталације је приказана на слици 44. Сигнали вертикалног убрзања у центрима сва четири точка се са давача убрзања се шаљу на мерно-појачавачки мост, а са мерно-појачавачког моста даље ка рачунару са аналогно-дигиталним конвертором. Напајање уређаја се обезбеђује помоћу претварача једносмерног у наизменични напон.

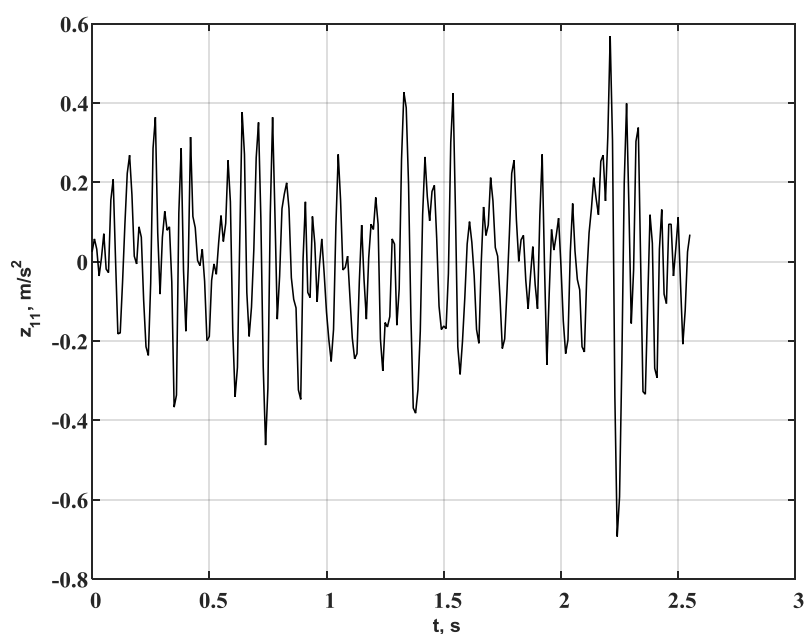


Слика 44. Структура опитне инсталације

Такође, развијени су и одговарајући софтвери за обраду података о посредном снимању неравнина пута помоћу мерења вертикалних убрзања у центрима сва четири точка експерименталног возила.

На слици 45, приказан је оригинални запис вертикалног убрзања у центру предњег левог точка, $z_1(t)$, који ће послужити као пример временске функције неравнина пута дуж једног трага возила, над којом ће се извршити идентификација сигнала у временском, амплитудном и фреквентном домену.

Датотека садржи $N = 256$ узорака, узоркованих фреквенцијом од $f = 100 \text{ Hz}$, тако да је укупна дужина записа $T = 2,56 \text{ s}$. Из графичког приказа тока временских функција, очигледно је да се ради о стохастичким (случајним) временским сигналимa.



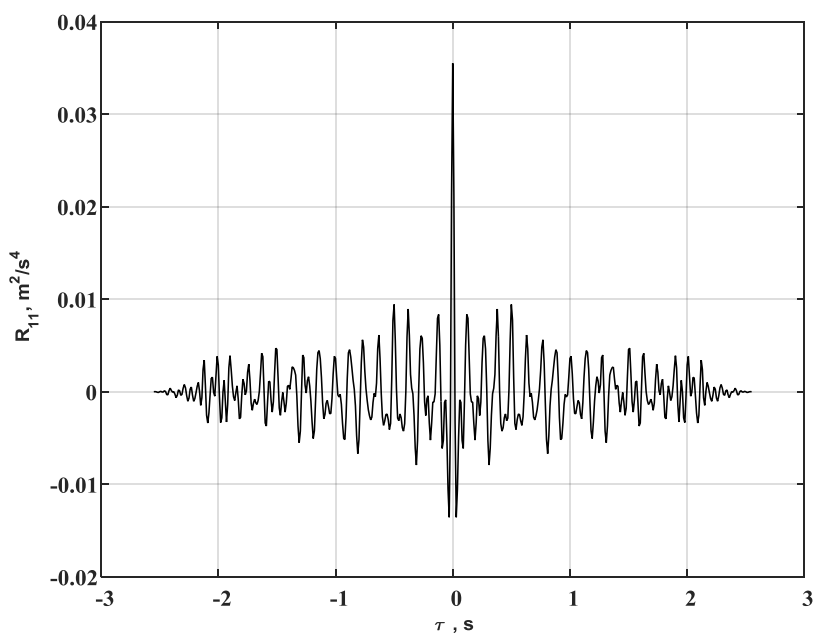
Слика 45. Оригинални запис вертикалног убрзања у центру предњег левог точка

У табели 6, приказани су резултати идентификације записа вертикалних убрзања у временском домену:

Табела 6. Резултати идентификације сигнала у временском домену

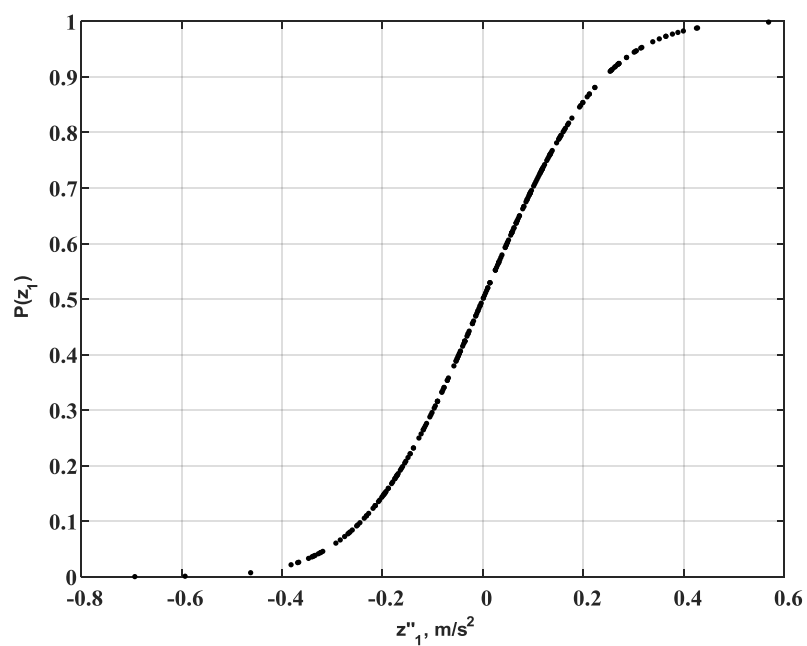
	Предњи леви точак
Минимална вредност, V	-0,6178
Максимална вредност, V	0,6439
Средња вредност, V	0,0753
Стандардна девијација, V	0,1888
Дисперзија, V ²	0,0353

На слици 46 приказане су аутокорелационе функције записа вертикалних убрзања у центрима предњих точкова:



Слика 46. Аутокорелациона функција вертикалног убрзања у центру предњег левог точка

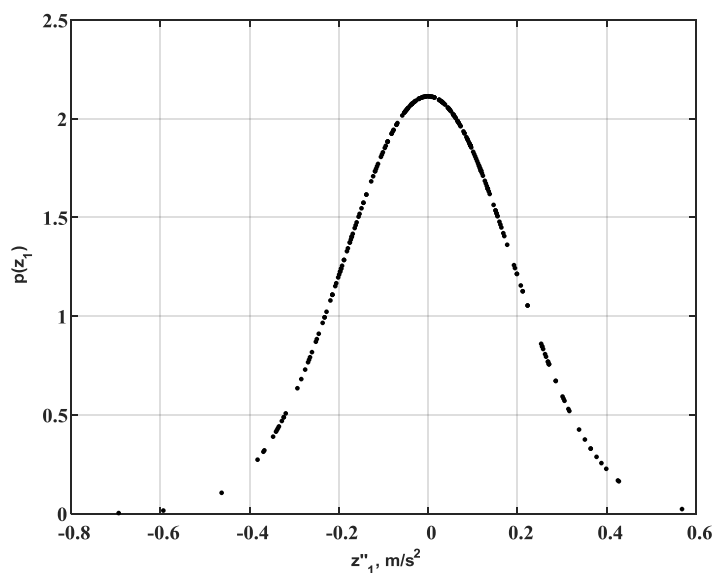
На слици 47, је приказана функција расподеле вероватноће сигнала вертикалног убрзања у центру предњег левог точка возила.



Слика 47. Функција расподеле вероватноће

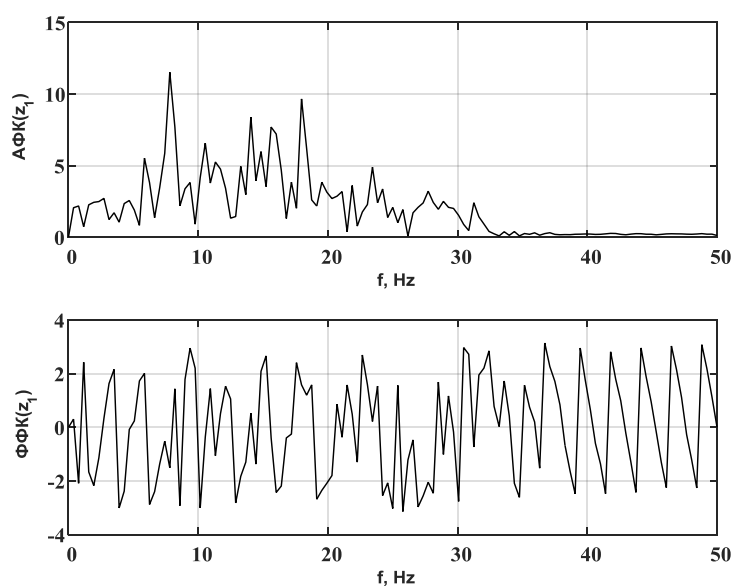
Функција расподеле вероватноће дефинише вероватноћу да ће тренутна вредност сигнала у произвољном тренутку времена бити мања или једнака некој амплитуди од интереса.

Слика 48, приказује функцију густине расподеле вероватноће



Слика 48. Функција густине расподеле вероватноће

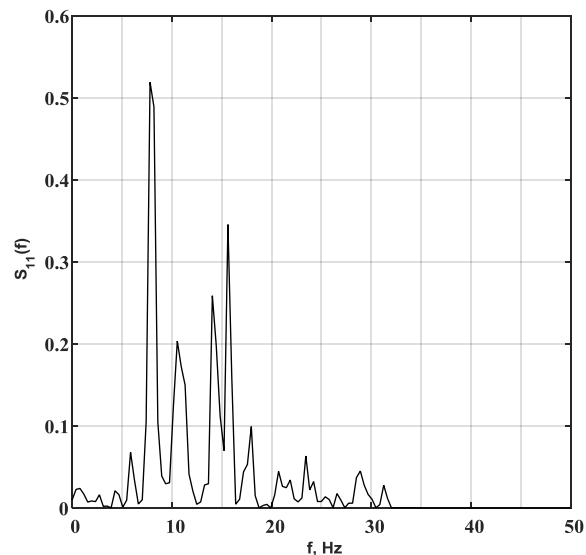
Применом директне Фуријеове трансформације, добијен је спектар комплексних амплитуда убрзања, а на слици 49, приказане су амплитудно-фреквентна и фазно-фреквентна карактеристика сигнала.



Слика 49. Амплитудно-фреквентна и фазно фреквентна карактеристика сигнала

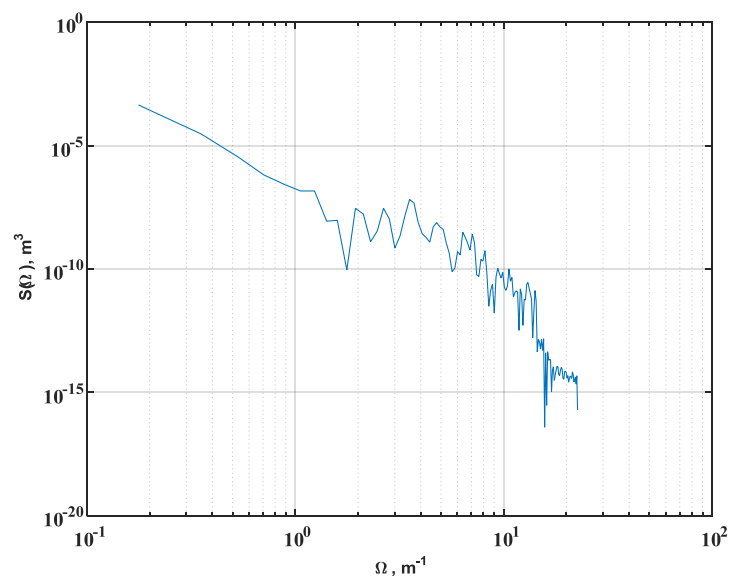
Из дијаграма амплитудно-фреквентне карактеристика, види се да функција убрзања у центру точка има компоненте претежно до фреквенције нешто веће од 30 Hz, док су компоненте виших фреквенција снажно пригушене.

До истог закључка се може доћи и анализом дијаграма ауто-спектра снаге сигнала приказаног на слици 50.



Слика 50. Ауто-спектар снаге снимљеног сигнала

Примењујући у претходном поглављу објашњену методологију добијања спектра побуде од неравнина пута из спектра снаге вертикалног убрзања снимљеног у центру точка, добија се дијаграм у облику, слика 51:



Слика 51. Спектар снаге побуде од неравнина пута

ЗАКЉУЧАК

Неравност површине пута већ дуго је призната као важна мера перформанси пута. Неравнине пута директно утичу на комфор вожње, безбедност и хабање возила, при динамичкој побуди возила. Са друге стране, динамичко оптерећење точкова један је од фактора који утичу на пропадање путева. Неравност површине пута се мерио дуги низ година при изградњи, и са увођењем профиломера, истраживања су показала велику популарност. Стандардизација различитих мерних метода ће бити помоћ свим садашњим корисницима.

Током раних дана конструисања путева, неравнине пута нису биле од примарног значаја при прављењу пута. Претпостављало се да ће извођач радова направити пут са прихватљивом глаткоћом. Од тих давних дана, истраживања су потврдила да корисници ауто-путева цене стање система путева превасходно према вожњи коју искусе путујући тим путевима. Стање пута је главни приоритет у односу на то шта корисници путева траже од путне инфраструктуре. Истраживања су показала да равни, глатки путеви коштају агенције за путеве мање у току века коловоза, што резултује смањењем оперативних трошкова корисника путева.

Неравнине пута обухватају све од великих ударних рупа на путу, насталих као резултат локализованог пропадања саобраћајнице, до увек присутних случајних неравнина које настају услед практичних ограничења тачности израде и одржавања пута. Иако су ударне рупе увек под лупом јавности, случајне неравнине пута су већи проблем за инжењере путева, чији је циљ да одржавају мрежу путева на најбољи могући начин са ограниченим средствима. У литератури постоје разни термини који се односе на неравнине пута, али углавном се користе називи макро- и микро-профил пута.

Опрема за мерење неравнине пута треба да покрије широк спектар истраживања, брзинама кретања возила од 20 km/h до 80 km/h, без утицаја на тачност података. Процес калибрације би требало да буде што једноставнији, а уређај треба да буде способан за доступно приказивање података. Трошкови опреме не би требало да буду веома високи, а опрема би требало да буде једноставна за одржавање.

Међународни индекс храпавости је стандардни индикатор неравнина пута у САД и широм света. Развијен је у оквиру пројекта истраживања Националног програма за истраживање путева. Главни циљ истраживања био је развој временски стабилног поступка за калибрацију система који раде на принципу одзива возила на побуду од неравнина пута. Као референтна вредност за калибрацију, предложена је математичка трансформација измереног подужног профила неравнина пута. Метода анализе је развијена, поједностављена и стандардизована користећи финансирање од стране Светске банке. Индекс добијен стандардизованом методом назван је *IRI*, а припремљене су и препоруке за његово мерење различитом опремом, укључујући и

профилометре. Истраживања су показала да је алгоритам за израчунавање овог индекса у већем делу независан од карактеристика профила, више од било ког другог предложеног индекса храпавости.

Методe за снимање неравнина пута разликују се по томе у коју сврху ће се користити резултати. За грађевинаре је најбитније да се опише реално стање коловоза, па користе профилографе који тачно снимају подужни и попречни профил пута. У фази експлоатације, за њих је корисно да прате хабање и оштећење коловоза. За инжењере који се баве одржавањем возила, битна је интеракција возила са коловозом, па користе методе снимања пута које користе динамичке уређаје.

Профилографи су релативно јефтини, лаки за потребу и одржавање и дају податке лако разумљиве корисницима. Обично се ручно покрећу од стране једне особе, брзином хода. Међутим, због везе између точкова, не могу се користити за прикупљање података о неравнинама пута на путевима за велике брзине.

У групу метода које користе динамичке уређаје за снимање неравнина пута, спадају методе снимања пута конкретним возилом или се користи посебан уређај (пнеуматик који се не деформише). Пнеуматик не може да измери све неравнине пута као профилограф, али има филтрирајуће дејство. Ако у центар пнеуматика поставимо давац убрзања, па снимљена убрзања двоструко интегралимо, добија се профил у центру точка. Тако се добија преносна функција, која узима у обзир димензије пнеуматика и брзину кретања.

Идентификација стохастичких сигнала се може обавити у временском, амплитудном и фреквентном домену.

У временском домену, случајан сигнал карактерише неколико величина: средња вредност, средња квадратна вредност, дисперзија, стандардна девијација и аутокорелациона функција.

Идентификација случајних сигнала неравнина пута у амплитудном домену обавља се преко функције расподеле вероватноће и функције густине вероватноће.

У фреквентном домену, може се код случајног сигнала израчунати спектар снаге неравнина пута. У практичним извођењима користи се методологија одређивања спектра снаге неравнина пута на основу одређених спектра снаге вертикалних убрзања у центрима точкова возила.

На Факултету инжењерских наука развијена је метода за посредно мерење висина неравнина пута мерењем вертикалних убрзања у центрима сва четири точка лабораторијског возила. У раду су приказани резултати обраде снимљеног сигнала вертикалног убрзања у центру точка возила у циљу одређивања побуде возила од неравнина пута.

Литература

- [1] Demić, M., Diligenski Dj.: *"THE ROAD SURFACE PROFILE INVESTIGATION PERSPECTIVE"*, Military Technical Academy, Romania Ministry of National Defence, Bucharest 06 – 07, November 2003
- [2] Shafizadeh, K. et al.: *"A statistical analysis of factors associated with driver-perceived road roughness on urban highways"*, Final research report, Washington State Transportation Center (TRAC), University of Washington, Washington, 2002
- [3] Демић, М.: *„Динамичке побуде аутомобила“*, Машински факултет, Крагујевац, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд, 2006.
- [4] Јанковић, А.: *„Динамика аутомобила“*, Крагујевац: Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- [5] Gillespie, T. D., Sayers, M.: *"Role of Road Roughness in Vehicle Ride"*, Transportation Research Record 836, 60th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, USA, pp. 15-20, 1981
- [6] Gillespie, D. : *"Everything You Always Wanted to Know about the IRI"*, The University of Michigan Transportation Research Institute, Users Group Meeting September 22-24, Nebraska, Lincoln 1992
- [7] Benett C. R., et al.: *"Data Collection Technologies for Road Management"*, World Bank East-Asia Transport Unit, Washington, D.C., 2005
- [8] Sayers, M., Karamihas, S. M.: *"Interpretation of road roughness profile data"*, UMTRI 96-12, Final Report, The University of Michigan, Transportation Research Institute, 1996
- [9] Милорадовић, Д., Радоњић Р., Тарановић, Д.: *"Испитивање моторних возила и мотора 2"*, Скрипта у електронском облику, Факултет инжењерских наука, 2013.
- [10] International organization for standardization (ISO): *"ISO 13473-3:2002: Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 3: Specification and classification of profilometers"*, ISO, 2002
- [11] Радоњић, Р.: *„Идентификација динамичког система возила“*, Машински факултет, Крагујевац, 1995.