

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ  
КРАЉЕВО

Факултет за машинство и грађевинарство  
у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу,  
Број: 117  
Датум: 06.02. 2015 год.  
Краљево, Доситејева 19.

## НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај Комисије о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата мр Небојше Богојевића, дипл. инж. маш.

Одлуком Наставно научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, бр. 1516 од 09. 12. 2014. год. именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата мр Небојше Богојевића, дипл. инж. маш, под називом „РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА СИМУЛАЦИЈЕ ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА“.

На основу прегледа докторске дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у области истраживања

Експериментална испитивања железничких возила представљају најпоузданији начин за утврђивање њихових својстава, и пресудни критеријум за одобрење њихове експлоатације. Међутим, експериментална испитивања су обимна, дуготрајна и скупа, па су алтернативни методи, који би се користили током пројектовања возила, од највећег интереса. У том циљу се развијају нумеричке симулације кретања железничких возила, које на основу математичког модела возила и колосека омогућавају израчунавања динамичких величина у временском и фреквентном домену. С обзиром да су динамичке величине стохастичког типа, непосредно поређење експерименталних резултата са резултатима симулација нема смисла, па је потребно развити критеријуме којима се оцењује квалитет симулације. Мада су у литератури доступни различити методи оцене квалитета симулације, није усвојен јединствен метод оцене квалитета симулације динамичког понашања железничких возила, па су истраживања овог проблема актуелна и од научног интереса.

Према досадашњем стању области железничког машинства и динамике железничких возила, поређење резултата добијених симулацијом и резултата експерименталних испитивања се заснива на визуелном поређењу графикана

одабраних величина за валидацију модела, при чему се степен слагања сигнала формира на основу искуства експерта који врши валидацију модела. Овакав приступ је субјективан и оцена у великој мери зависи од искуства експерта који врши оцену нумеричког модела. Поред наведеног, овакав приступ валидације карактерише и постојање велике несагласности у оценама које различити експерти дају истим подацима одабраним за валидацију модела.

Базирајући се на препорукама међународног железничког стандарда UIC 518, као и на познатим валидационим метрикама, у овој докторској дисертацији је предложена нова валидациона метрика за оцену слагања резултата симулације и експерименталних резултата, која је заснована на поређењу кумулативних функција стохастичких сигнала. Поређење кумулативних функција према новопредложеној метрици се заснива на оценама одступања:

1. Средњих вредности кумулативних функција расподела резултата симулација и експеримента, на основу њихове релативне разлике;
2. Варијација кумулативних функција расподела резултата симулација и експеримента, на основу вероватноће њихових разлика према Фишеровој статистици;

Према томе, резултати поређења формиран на основу ове метрике у суштини одражавају сличност облика кумулативних функција расподеле које се пореде. У оквиру предложене методологије валидације модела железничког возила дефинисана је валидациона хијерархија, дефинисане су величине за оцену, предложена је нова валидациона метрика, као и граничне вредности валидационе оцене за прихватање валидности модела.

Валидација модела железничког возила базирана на новопредложеној валидационој метрици, представља објективну оцену слагања резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањем. На основу валидираног модела железничког возила могуће је у знатном обиму смањити обим експерименталних испитивања као и унапредити сигурност и безбедност нових возила.

## **2. Оцена оригиналности научног рада кандидата**

Проблем који се решава у оквиру докторске дисертације кандидата је у области железничког машинства дефинисан у првој деценији двадесетог века, када су нумеричке симулације кретања постале широко доступно средство за проучавање и предвиђање кретања железничких возила. Велики број модела, који су давали различите резултате, је створио потребу да се они међусобно упореде и да се одреди оцена њихове тачности и поузданости.

На постављени проблем су пружена два одговора, од којих је први, упоређивање временских дијаграма од стране стручњака, описан у претходној тачки, у којој су објашњена његова концепција и његови недостаци. Иако је још увек тај метод званичан метод који струка прихвата, почетком друге деценије овог века су у оквиру међународног пројекта „DYNOTrain“ уложени значајни напори да се уведе објективна мера слагања теоријских превиђања са експерименталним резултатима.

Ови напори до довели до развоја објективног метода поређења резултата симулација и мерења који је описан у раду О. Polach, А. Böttcher, "A new approach to define criteria for rail vehicle model validation", 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Track, Qingdao, Chin, August 19-23, 2013, paper No.2.2 (ID278), који представља кључна правила новог приступа. Тај приступ се заснива на поређењу екстремних и средњих вредности кумулативних функција расподеле, тако да се сличност симулације и експеримента дефинише као мера у којој они дају исту оцену безбедности и сигурности кретања железничког возила према стандарду UIC 518, на основу кога се издају дозволе за железничка возила. Важна одлика овог метода је да је резултат поређења логичког (модел је „прихватљив“ или „неприхватљив“) а не нумеричког карактера, тако да није могуће међусобно поредити два прихватљива (или два неприхватљива) модела одређујући који од њих боље описује реалан систем. У том смислу, метод који су предложили О. Polach и А. Böttcher не представља метрику у строгом математичком смислу.

У свом раду кандидат надграђује резултате претходних истраживања у овој научној области, јер приказује објективну валидациону метрику која на свеобухватан начин пореди кумулативне функције расподеле. Наиме, валидациона метрика који су предложили О. Polach и А. Böttcher упоређује само екстремне и средње вредности кумулативних расподела резултата експеримента и симулације, док валидациона метрика коју кандидат предлаже пореди кумулативне функције расподеле у целокупном домену њихових вредности, а увођењем пробабилистичког приступа применом Фишерове статистике укључује и чињеницу да су поређене величине случајне, те да се њихово потпуно слагање не очекује, односно да не би имало смисла потпуне валидности модела којим се описује реални објекат. Посебно је важно да метод валидације који кандидат предлаже у свом раду представља валидациону метрику чији је резултат нумеричка оцена валидности модела, па је могуће међусобно поредити валидности различитих модела, како прихватљивих, тако и неприхватљивих.

Кандидат је у свом раду на коректан и потпун начин приказао стање у области и резултате претходних истраживања, и предложио оригиналан метод за потпуно решавање проблема који је у научној области железничког машинства дефинисан изван оквира овог рада. Према томе, представљени резултати докторске дисертације представљају оригинални научни допринос кандидата, што је и потврђено публиковањем тих резултата у међународном научним часопису.

### **3. Преглед остварених резултата рада кандидата у оквиру докторске дисертације**

Докторска дисертација кандидата **мр Небојше Богојевића**, дипл. инж. маш., под називом „**РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА СИМУЛАЦИЈЕ ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА**“ написана је на 216 страна. Цитирана литература, наведена је у 96 библиографских јединица.

Докторски рад приказан је у осам поглавља:

1. Уводне напомене, циљеви дисертације.
  2. Валидација и верификација модела.
  3. Преглед метода за валидацију модела
  4. Методологија валидације модела железничког возила
  5. Моделирање железничког возила
  6. Експериментално испитивање
  7. Имплементација валидационе метрике
  8. Закључак
- Литература  
Прилози

У првом поглављу рада дефинисане су основе, предмет и циљеви истраживања, као и основне хипотезе. У овом поглављу су такође дефинисана и основна питања на која је потребно дати одговоре, као и очекивани резултати које треба постићи у оквиру овог истраживања.

У другом поглављу су описани поступци валидације и верификације модела, дефинисане фазе процеса валидације и верификације модела и њихова међусобна зависност. У оквиру овог поглавља, посебна пажња је посвећена значају валидације нумеричких модела у области железничког машинства уопште.

Треће поглавље је посвећено анализи постојећих метода валидације нумеричких модела. У њему је извршена категоризација метода валидације нумеричких модела у зависности од врсте валидационе метрике која се примењује. На основу те категоризације је дат преглед метода које су тренутно у употреби за оцену квалитета симулације динамичког понашања железничких возила.

Четврто поглавље описује методолошки приступ развоја нове валидационе метрике. Базирајући се на важећим прописима за оцену динамичког понашања железничких возила UIC 518 и EN 14363, као и на анализи постојећих валидационих метода и метрика, развијена је нова методологија за оцену квалитета симулације динамичког понашања железничких возила. У оквиру овог поглавља, које садржи кључне резултате и научне доприносе истраживања, дефинисана је валидациона хијерархија, предложена је нова валидациона метрика за оцену валидности модела, дат је предлог за избор величина за оцену понашања, и дефинисане су граничне вредности величина које указују на прихватљивост модела за описивање железничког возила. Суштинску новопредложене валидационе метрике чини поређење кумулативних функција вероватноћа резултата симулација и експеримента, при чему се оцена о слагању поређених величина формира 1) на основу Фишеровог теста и 2) на основу разлике између средњих вредности величина за оцену.

У петом поглављу приказан је модел теретног железничког возила типа "Fanoo040" за превоз руде гвожђа. У оквиру овог поглавља дат је технички опис вагона, детаљно је описан и приказани модели железничког возила и колосека који су кориштени за симулацију динамичког понашања железничког возила.

У шестом поглављу је приказано експериментално испитивање теретног железничког возила типа "Fanoo040", са описом распореда мерних места, мерних

величина, деоница на којима је вршено експериментално испитивање, као и резултатима испитивања.

У седмом поглављу је описана примена предложене валидационе метрике (описане у четвртном поглављу) на валидацију модела железничког вагона за превоз руде гвожђа (приказаног у петом поглављу). Валидација модела железничког возила извршена је како са новопреложеном валидационом метриком, тако и са валидационом метриком коју су предложили О. Polach и А. Böttcher. На основу анализе резултата које дају обе метрике су утврђене граничне вредности валидационе оцене којом обе метрике постају еквивалентне када се оцењује применљивост модела у сврхе оцене безбедности и сигурности кретања железничког возила према стандарду UIC 518. Даљом анализом је показано да новопреложена метрика представља финалну меру квалитета нумеричких модела јер омогућава да се међусобно пореде валидности модела. Овим поглављем су, поређењем са експерименталним подацима, убедљиво демонстрирани применљивост и значајне предности методологије која је развијена у оквиру дисертације.

У осмом поглављу дати су закључци, и дефинисани правци даљих истраживања сагласно резултатима приказаним у овом раду.

#### **4. Оцена испуњености обима и квалитета докторске дисертације у односу на пријављену тему**

У раду су у потпуности остварени очекивани резултати дати у Извештају комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације број 1/6 од 9.1.2013. године и испоштован оквирни садржаји рада дати у поменутом извештају. Поступак остварења резултата описан је у претходном поглављу, а њихов садржај је дат у наредном поглављу.

#### **5. Научни резултати докторске дисертације**

Кључна научни резултате ове докторске дисертације представља развијена методологија за оцену валидности нумеричког модела железничког возила. Ова методологија се састоји од:

- Валидационе хијерархије, којом се утврђује да се валидност нумеричког модела железничког возила оцењује тако што се оцењују валидност нумеричких модела осовинских склопова, обртних постоља и сандука вагона; нумерички модел железничког возила је валидан ако су валидни нумерички модели сваког од наведених склопова;
- Величине за оцену валидности су силе и убрзања која су дефинисана у међународном стандарду UIC 518;
- Валидациона метрика, којом се израчунава валидациона оцена као производ два фактора. Први фактор је вероватноћа да варијације кумулативних густина расподеле величина за оцену добијених симулацијом (према нумеричком моделу који се оцењује) и експериментом представљају исту случајну величину. Овај фактор се израчунава на основу Фишерове расподеле у току

поступка који се назива Фишеров тест, који је стандардни статистички алат којим се мери да ли две случајне расподеле описују исту случајну величину. Други фактор је релативна разлика средњих вредности густина расподела добијених симулацијом и експериментом, односно количник разлике средњих вредности и њиховог полузбира. Овако добијена оцена валидности је нормирана између 0 и 1, при чему већа вредност значи мању разлику између предвиђања модела и измерених вредности.

- Граничне вредности валидационе оцене за прихватљивост нумеричког модела; у раду је показано да је за величине и услове које прописује UIC 518 ова гранична вредност треба да износи 0,3

Поред главних резултата, који су били циљ истраживања, дисертација доноси и резултате који се односе на својства валидационе метрике коју су предложили О. Polach и А. Böttcher, а која ће, већ у следећем издању међународног стандарда UIC 518 постати допунски критеријум оцене валидности нумеричких модела за симулацију динамике железничких возила. Кандидат је, наиме, показао да су границе прихватљивости нумеричких модела које прописује ова валидациона метрика превише широке у случају када се разматра кретање празних теретних железничких возила, односно да неки од нумеричких модела који су према новопредложеној метрици, а и према мишљењима експерата, сматрани неприхватљивим, оцењени као прихватљиви применом валидационе метрике коју су предложили О. Polach и А. Böttcher. Кандидат је у дисертацији објаснио да је узрок који доводи до уоченог неслагања ових оцена суштинска особина валидационе метрике коју су предложили О. Polach и А. Böttcher, те да се у будућности треба размотрити њена допуна или замена.

## **6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Основна корист од добијених резултата је што омогућују да се нумерички оцени валидност неког нумеричког модела железничког возила, чиме се отвара могућности:

1. да се тај модел убудуће користи као замена за скупа, дуготрајна, и по обиму ограничена, експериментална испитивања и истраживања;
2. да се, у конкуренцији више модела истог возила, за конкретну сврху изабере онај модел који има најбољу валидациону оцену за симулацију величина које су у ту сврху потребне;
3. да се више не прихватају субјективне и често произвољне процене слагања теоријских и експерименталних резултата истраживања у динамици железничких возила;
4. да се унапреде национални и међународни стандарди за испитивање железничких возила;

## 7. Начин презентирања резултата научној јавности

Методологија валидације нумеричких модела железничких возила описана у четвртом поглављу рада и имплементације исте, дате у седмом поглављу, су објављени у следећим радовима:

### M23

„The proposal of validation metrics for the assessment of the quality of simulations of the dynamic behaviour of railway vehicles“, Nebojsa Bogojevic and Vojkan Lucanin, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, DOI: 10.1177/0954409714552700, Published online 15 October 2014

### M33

“Iron Ore Transportation Wagon with Three-Piece Bogies – Simulation Model and Validation”, Nebojša Bogojević, Per-Anders Jönsson, Sebastian Stichel, VII Triennial International Conference HEAVY MACHINERY - HM 2011 7 (No1), 30-44

“Can Simulation Help to Find the Sources of Wheel Damages?: Investigation of Rolling Contact fatigue on the Wheels of a Three-Piece Bogie on the Swedish Iron ore Line via Multibody Simulation Considering Extreme Winter Condition”, Hossein Nia, S., Stichel, S., Jönsson, P., Nordmark, T., Bogojevic, N., 10Th International Heavy Haul Association Conference IHHA, New Delhi, India on February 4 - 6, 2013, pp. 357-363

„Validation of a railway vehicle model based on comparison of cumulative distribution functions“, Nebojša Bogojević, Jelena Tomić, Slobodan Todosijević, Vojkan Lučanin, Proceedings of the 8th International Conference Heavy Machinery HM 2014, Zlatibor, 24-26.06.2014, pp. F 69-76, ISBN 978-86-82631-74-3

### M51

„Signal analysis techniques for rail vehicle model validation“, Nebojša Bogojević, Mechanics Transport Communications, volume 12, issue 3/2, 2014, article No 1021, pp.XI-20 - XI-26

### M52

„Model Validation of a Railway Vehicle With Three Piece Bogie“, Bogojević Nebojša, Lučanin Vojkan, IMK 14 – Research & Development, Volume 19, Number 3, 2013, page EN67 – EN 74

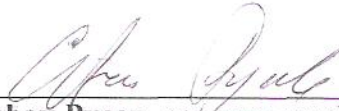
## 8. Закључак и предлог комисије

На основу извршене анализе докторске дисертације, Комисија је утврдила да је она у потпуности реализована сагласно плану истраживања.

Резултати истраживања су методолошки јасно презентирани, а њихова анализа дата је на одговарајућем научном нивоу. Сви кључни резултати ове дисертације публиковани су у једном научном раду који је публикован у међународном научном часопису категорије M23.

На основу претходно наведеног, Комисија позитивно оцењује ову докторску дисертацију и предлаже Наставно научно већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву да прихвати Извештај о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата **мр Небојше Богојевића, дипл. инж. маш,** под називом **„РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА СИМУЛАЦИЈЕ ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА“.**

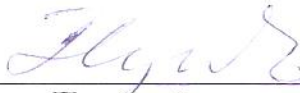
1.



проф. др **Срђан Русов**, редовни професор,  
Саобраћајни факултет у Београду,  
Универзитет у Београду.

Ужа научна област: Возна средства и погонски системи,  
председник

2.



проф. др **Драган Петровић**, ванредни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву,  
Универзитет у Крагујевцу.

Ужа научна област: Железничко машинство,  
члан

3.



проф. др **Златан Шошкић**, ванредни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву,  
Универзитет у Крагујевцу.

Ужа научна област: Техничка физика,  
члан

4.



проф. др **Војкан Лучанин**, редовни професор  
Машински факултет у Београду,  
Универзитет у Београду

Ужа научна област: Железничко машинство, ментор

У Краљеву,  
фебруар 2015.год.