

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Рударско-геолошки факултет

Наставно-научном већу

Предмет: Извештај о оцени докторске дисертације кандидата Филипа Милетића, маг. инж. рударства и маг. инж. машинства

Одлуком Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета бр. 1/198 од 03.07.2023. године, именована је Комисија за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Филипа Милетића, маг. инж. рударства и маг. инж. машинства, под насловом:

УТИЦАЈ ПОХАБАНОСТИ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА РОТОРНОГ БАГЕРА НА НИВО ВИБРАЦИЈА ПОГОНА ЗА КОПАЊЕ

Комисија у саставу:

1. др Дејан Ивезић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет,
 2. др Драган Игњатовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет,
 3. др Милош Милованчевић, ванредни професор
Универзитет у Нишу, Машински факултет,
- на основу прегледа достављене документације, подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1 Обим дисертације

Докторска дисертација садржи 149 страна рачунарски обрађеног текста (од Увода па закључно са Литературним изворима), 12 почетних страна (насловна страна и сажетак на српском и енглеском језику, садржај, списак слика и табела), 27 страна прилога и 5 завршних страна (биографија аутора и изјаве о ауторству). Укупан број страна дисертације је 193 и све су А4 формата. У дисертацији је садржано:

- 132 слике у текстуалном делу дисертације;
- 82 табеле у текстуалном делу и 7 табела у прилогу дисертације;
- 4 прилога различитог облика (формулари коришћени при мерењу потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација, улазни подаци за ANFIS модел и резултати ANFIS модела);
- 113 литературних извора коришћених у дисертацији.

1.2 Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Филип Милетић, мастер инжењер рударства и мастер инжењер машинства је пријавио тему докторске дисертације под насловом „Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање“ на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, 10.01.2022. године (пријава број 1/1).

На основу пријаве теме докторске дисертације, Катедра за опште машинство и термодинамику предложила је Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, покретање поступка за именовање Комисије за оцену научне заснованости докторске дисертације кандидата (пријава број 1/4).

Одлуком Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду број 1/12 од 20.01.2022. године именована је Комисија у саставу: проф. др Милош Танасијевић, дипломирани инжењер рударства, проф. др Предраг Јованчић, дипломирани инжењер рударства, проф. др Драган Игњатовић, дипломирани инжењер рударства, сви са Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, проф. др Милош Милованчевић, дипломирани инжењер машинства са Машинског факултета, Универзитета у Нишу и проф. др Небојша Гњатовић, дипломирани инжењер машинства са Машинског факултета, Универзитета у Београду.

Кандидат је пред формираном Комисијом, 24.02.2022. године обранио приступни рад под поменутиим насловом (записник број 1/33), након чега је Комисија саставила извештај о научној заснованости теме докторске дисертације (извештај број 1/34).

На основу извештаја који је Комисија саставила, Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду на седници одржаној 24.03.2022. године, донело је одлуку број 1/55 којом се усваја извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Филипа Милетића, мастер инжењера рударства и мастер инжењера машинства и одобрава израда докторске дисертације по насловом „Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање“, а за менторе именују др Милош Танасијевић, редовни професор и др Предраг Јованчић, редовни професор.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 12.04.2022. године донело је одлуку број 61206-1291/2-22 године којом се даје сагласност на предлог теме кандидата Филипа Милетића, под насловом „Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање“ и потврђује менторство проф. др Милошу Танасијевићу и проф. др Предрагу Јованчићу.

Кандидат Филип Милетић је 09.06.2023. године поднео молбу број 1/164 за именовање Комисије за оцену докторске дисертације под насловом „Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање“. Уз молбу, кандидат је поднео сагласност ментора за предају урађене докторске дисертације (број 1/165). Катедра за опште машинство и термодинамику је упутила допис број 1/175 од 14.06.2023. године Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду са предлогом Комисије за оцену докторске дисертације у саставу: проф. др Дејан Ивезић, дипломирани инжењер машинства и проф. др Драган Игњатовић, дипломирани инжењер рударства, обојица са Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду и проф. др Милош Милованчевић, дипломирани инжењер машинства са Машинског факултета, Универзитета у Нишу.

На седници Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду донета је одлука број 1/198 од 03.07.2023. године којом се потврђује предлог матичне Катедре и именује Комисија за оцену докторске дисертације, чиме су испуњени услови за писање предметног Извештај о урађеној докторској дисертацији.

1.3 Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација кандидата Филипа Милетића, мастер инжењера рударства и мастер инжењера машинства, припада научној области „Рударско инжењерство“, односно ужој научној области „Елементи машинских и енергетских система“ за коју је матичан Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду.

Именована су два ментора за вођење кандидата при изради докторске дисертације:

- проф. др Милош Танасијевић, редовни професор Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, аутор великог броја радова из области системског приступа одржавања рударских машина и развоја математичких и концепцијских модела из области експертних система, пре свега, фази логичког закључивања. Према референтном извору *Scopus* аутор или коаутор је на 36 рада, *h-index*: 10, при чему је цитираност радова 347.
- проф. др Предраг Јованчић, редовни професор Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, аутор великог броја научних радова из области механизације у рударству и енергетици. Посебно се истичу радови из области техничке дијагностике, пре свега вибродијагностике и динамике рударских машина. Према референтном извору *Scopus* аутор или коаутор је на 31 раду, *h-index*: 9, при чему је цитираност радова 226.

Компетентност именованих ментора за вођење кандидата, оправдана је ауторством великог броја научних радова објављених у референтним међународним и домаћим часописима, као и у зборницима међународних и националних конференција и саветовања.

1.4 Биографски подаци о кандидату

Филип Милетић, мастер инжењер рударства и мастер инжењер машинства рођен је 30.10.1994. године у Београду. Средњу техничку школу „Колубара“ у Лазаревцу, похађао је у периоду од 2009. до 2013. године и завршио са одличним успехом.

Основне академске студије на Рударско–геолошком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина уписао је 2013. године и завршио у року са просечном оценом 9,66 (девет и 66/100). Завршни рад под називом „*Одређивање снаге основних погона и капацитета багера SchRs1400.28/3 на површинском копу Поље Ц*“ – одбранио је 14.09.2017. године са оценом 10 (десет). Тиме је стекао звање дипломирани инжењер рударства.

Школске 2017/2018. године уписао је мастер академске студије на Рударско–геолошком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, модул Механизација у рударству које је завршио у року са освојених 78 ЕСПБ поена и просечном оценом 10 (десет). Мастер рад под називом „*Утицај резних елемената роторног багера на погон роторног точка*“ одбранио је 14.09.2018. године са оценом 10 (десет), стекавши звање мастер инжењер рударства. Носилац је награде Рударско–геолошког факултета за најбољег студента Мастер академских студија.

Школске 2018/2019. године је уписао докторске академске студије на Рударско–геолошком факултету, Универзитета у Београду, на студијском програму Рударско инжењерство. Положио је све испите предвиђене планом и програмом, остваривши 175 ЕСПБ поена са просечном оценом 10 (десет).

Школске 2019/2020, уписао је мастер академске студије на Машинском факултету Универзитета у Нишу, на студијском програму Машинско инжењерство, модул Машинске конструкције, развој и инжењеринг. Положио је све испите и остварио просечну оцену 9,33 (девет и 33/100). Мастер рад на тему „Пројекат унапређења пословања рудника“ одбранио је 10.03.2021. и тиме стекао звање мастер инжењер машинства.

Филип Милетић је 01.04.2019. године изабран у звање Истраживач приправник на Рударско–геолошком факултету Универзитета у Београду. Као студент докторских академских студија, кандидат је помагао у држању вежби из предмета Машински елементи и Основи конструисања, у сегменту прегледа графичких радова.

Филип Милетић је 20.07.2020. године изабран у звање асистента за ужу научну област Елементи машинских и енергетских система на Катедри за опште машинство и термодинамику Рударско–геолошког факултета Универзитета у Београду. Реизабран је у звање асистента 29.06.2023. године.

Задужен је за одржавање вежби из предмета Машински елементи, Основи конструисања, Технологија машинске обраде и Хидрауличке и пнеуматичке машине у рударству на основним академским студијама, односно, Поузданост техничких система и Пројектовање и избор рударских машина на мастер академским студијама.

Филип Милетић је коаутор помоћног уџбеника под називом Машински елементи – приручник.

У периоду од школске 2014/2015. до 2016/2017. године био је добитник стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја, за остварену просечну оцену преко 9,0 у току студија.

Школске 2016/2017. године био је добитник стипендије „Доситеја“ која се додељује талентованим и успешним студентима из Фонда за младе таленте Републике Србије, у надлежности Министарства омладине и спорта, Владе Републике Србије.

Школске 2016/2017 кандидат је био добитник награде општине Лазаревац, за просечну оцену током студија већу од 9,50.

Учествовао је у програму *Erasmus*, одржавши предавање на Универзитету у Леобену у мају 2019. године на тему „*Optimizing the organization of resources and the cost of auxiliary mechanization in order to increase the utilization of waste and coal systems of Electric Power Industry of Serbia surface mines*“.

Филип Милетић је у више наврата током школске 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 и 2018/2019 обављао праксу у оквиру Електропривреде Србије у трајању од по месец дана, на површинским коповима колубарског басена, у служби машинског одржавања. Говори и пише енглески језик. Користи пакете: Solidworks, Catia, AutoCad, Prezi, Ansys и Matlab.

Бави се научно–истраживачким радом из области одржавања и поузданости техничких система из којих је као аутор или коаутор објавио 36 радова, међу којима су 2 из категорије М21а, 3 из категорије М22, 19 из категорије М33, 4 из категорије М52 и 8 из категорије М63. Учествује у изради једног научно–истраживачког пројекта, више стручних пројеката и студија. Члан је Савеза инжењера и техничара Србије и Друштва за интегритет и век конструкција (DIVK).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Филипа Милетића, написана је на ћириличном писму и садржи следећа основна поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Анализа досадашњих истраживања
3. Роторни багери
4. Вибрације као параметар стања система
5. Специфични отпор материјала на копање
6. Адаптивни неуро-фази систем закључивања
7. Модел зависности специфичне потрошње електричне енергије и нивоа вибрација погона за копање
8. Изведена мерења на роторном багеру SRs2000.32/5+VR
9. Верификација модела зависности специфичне потрошње електричне енергије и нивоа вибрација погона за копање
10. ANFIS модел за предикцију потрошње електричне енергије у процесу копања
11. Закључак

Докторску дисертацију поред поменутих поглавља чине још Сажетак на српском и енглеском језику, Садржај, Списак слика, Списак таблица, Литература, Прилози, Биографија, Изјава о ауторству, Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу. Поголавља од 1-4 и 7-10 садрже више подпоглавља.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација је структурирана сходно предмету и циљевима истраживања и примењеној методологији истраживања.

Прво поглавље (стр. 1-5) чине подпоглавља уводна разматрања, предмет и циљ истраживања, научне хипотезе и методе истраживања, научни допринос дисертације и структура дисертације са кратким прегледом истраживања употпуњена графичким приказом алгорита истраживања. Представљен је значај роторних багера у површинској експлоатацији лигнита, утицај хабања резних елемената на ефикасност рада багера, са аспекта потрошње електричне енергије и нивоа вибрација. Дата је теоријска поставка модела који дефинише зависност анализираних феномена (хабање резних елемената, потрошња електричне енергије и ниво вибрација) и добијени хибридни карактер модела применом адаптивног неуро-фази система закључивања (ANFIS).

Друго поглавље (стр. 6-14) садржи преглед литературе подељен у следећа подпоглавља:

- системски приступ анализи радних перформанси техничких система применом модела вештачке интелигенције;
- резни елементи и процес хабања резних елемената;
- мерење потрошње електричне енергије и амплитуда вибрација на роторним багерима и другим погонима великих снага;
- динамика и интегритет конструкције роторних багера; и
- примена стандарда DIN ISO 10 816–3 при мерењу вибрација.

У трећем поглављу (стр. 15-25) представљен је технолошки процес рада роторних багера, конструкција и радни орган. Затим су обрађени резни елементи багера, технолошки поступци израде и примењени материјали, процес хабања резних елемената, са посебним освртом на механизам настанка хабања и утицај истог на ефикасност рада роторних багера. Анализом референтне литературе из ове области утврђено је да са повећањем похабаности резних елемената долази до пораста потрошње електричне енергије процеса копања и специфичног отпора материјала на копање.

Четврто поглавље (стр. 26-42) обухвата дефинисање основних параметара вибрација (период, фреквенција, елонгација, амплитуда, брзина, убрзање). Уведени су појмови динамички и механички систем, мерење амплитуде вибрација и сложене вибрације. У посебном подпоглављу обрађени су енергија и снага, природне фреквенције и резонанца и анализа фреквенције. Посебна пажња је посвећена узроцима вибрација и утицају на машине и опрему. У оквиру вибродиагностичких параметара и норми дат је DIN ISO стандард који је применљив при мерењу вибрација. Стандард прописује одговарајуће зоне квалитета рада погонских група машине према измереним вредностима амплитуде брзине вибрација. На крају је обрађен поступак мерења вибрација на ротирајућим и неротирајућим деловима машине.

Пето поглавље (стр. 43-45) дефинише специфични отпор материјала на копање. Дата је блок шема процеса копања и укупан отпор материјала на копање који се уводи при димензионисању погона роторних багера. Затим је представљен алгоритам за одређивање специфичне потрошње електричне енергије у процесу копања заснован на примени ватметарске методе.

Шесто поглавље (стр. 46-50) обухвата Адаптивни неуро-фази систем закључивања (ANFIS). Приказана је структура ANFIS модела коју чине пет слојева. Први слој прима улазне сигнале и помоћу функције припадности претвара их у фази вредности. Други слој умножава фази сигнале из улазног слоја, на основу чега се обезбеђује покретање правила. У оквиру трећег слоја дефинишу се правила над нормализованим сигнаlima који долазе из другог слоја. Четвртим слојем долази се до закључка о дефинисаним правилима, сигнали се преводе у јасне вредности. Пети слој сумира све сигнале и даје вредност излазној величини.

Приказани су процеси тренирања неуро-фази система – алгоритам простирања грешке уназад и хибридни алгоритам. За оцену квалитета модела, односно његових генерализацијских својстава, користе се различити статистички тестови: корен средње квадратне грешке *RMSE*, средња апсолутна грешка *MAE*, Пирсонов коефицијент *R* и средња апсолутна процентуална грешка *MAPE*. На крају су дате предности и недостаци ANFIS модела у односу на предиктивни моделе засноване на примени неуронских мрежа.

У седмом поглављу (стр. 51-54) је предложен модел зависности похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и амплитуде брзине вибрација. Ниво похабаности утврђен је применом ручног мерног алата. Потрошња електричне енергије и амплитуда брзине вибрација одређени су мерењима на роторном багеру који представља предмет истраживања. Надградња предложеног основног модела остварена је применом адаптивног неуро-фази система закључивања којим се добијају нови подаци везани за потрошњу електричне енергије, без обављања директних мерења на багеру.

Осмо поглавље (стр. 55-94) представља изведена мерења на роторном багеру SRs2000.32/5+VR којима се добијају неопходни подаци за верификацију предложеног модела. Прво мерење је вршено у тренутку када је похабаност резних елемената износила 75 % од стања новог зуба. Након извршеног сервиса багера, мерење је рађено са потпуно новим резним елементима. Наредња мерења су вршена за стања резних елемената која одговарају похабаности од 25 %, 50 % и 100 %.

Дате су процедуре мерења потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација. Приликом мерења, дефинисани су основни микротехнолошки параметри блока (висина подетаже, дебљина одреска, брзина кружног кретања, угаони положај стреле роторног точка). Промена параметара одреска вршена је на тај начин, да се за константну висину одреска: $h_1 = 7$ врши промена три дебљине одреска: $s_1 = 0,25$ m, $s_2 = 0,40$ m и $s_3 = 0,50$ m, док је брзина кружног кретања горње градње багера била фиксирана и износила 70 % од максималне брзине, $v_1 = 21$ m/min.

Приказани су резултати мерења специфичног отпора материјала на копање, за сва стања резних елемената и дебљине реза 0,25 m, 0,40 m и 0,50 m. На погону за копање багера SRs2000.32/5+VR ангажована су два мотора, снаге по 670 kW. На основу парцијалних вредности јачине струје коју погон повлачи из мреже, њиховим сабирањем, долази се до укупне вредности, која је меродавна за даље одређивање специфичног отпора материјала и потрошње електричне енергије.

За исте микротехнолошке параметре блока, упоредно са мерењем ангажоване струје у процесу копања, мерене су вибрације на улазном пару вратила редуктора погона за копање. Вибрације су бележене у тренутку када се стрела багера налазила у обртној оси багера. Мерења су вршена у три референтна правца: вертикалном (управно на улазни пар), хоризонталном (попречно на улазни пар) и аксијалном (уздужно на улазни пар). Вредности амплитуде у аксијалном правцу немају изражени утицај на рад погона, па нису даље разматране. Мерење вибрација изводило се SKF Microlog CMXA80 уређајем, док су анализе спроводене у наменски пројектованом софтверу SKF @plitude Analyst for Microlog. Дијаграми који показују ниво амплитуде брзине вибрација дати су по истом принципу као резултати мерења потрошње електричне енергије, за сва стања резних елемената и дефинисане дебљине реза.

Девето поглавље (стр. 95-112) обухвата верификацију модела на основу резултата изведених мерења. Утврђено је да за већи ниво похабаности резних елемената модел даје боље резултате. Дате су препоруке за коришћење DIN ISO 10 816-3 стандарда при мерењу вибрација. Према нивоу амплитуде, опште стање погона се класификује у групе од А до D. У областима мање похабаности, погон се налази у нижим групама (групе А и В). Са повећањем похабаности, ниво амплитуде је већи. Анализом стандарда, може се извести закључак да рад у дужем периоду повећава ризик по настанак хаварија на погонској групи.

У десетом поглављу (стр. 113-138) представљен је ANFIS модел за предикцију специфичне потрошње електричне енергије. Креирана су три базна ANFIS модела: првим се фазификација улаза изводи Bellovom функцијом припадности, са три функције по атрибуту. Другим се фазификација улаза изводи троугластом функцијом припадности, са три функције по атрибуту, док се трећим фазификација изводи

трапезном функцијом припадности, са три функције по атрибуту. Базни модели се диференцирају додавањем шест и осам функција по атрибуту за сваку од примењених функција припадности. Коначан број модела износи девет. Предикција ANFISA проверена је индексима тачности *RMSE*, *MAE*, *R* и *MAPE*. Установљено је да модел ANF3 заснован на Velloвој функцији припадности има највећи степен сагласности измерених и предвиђених вредности потрошње електричне енергије. Потрошња енергије ANF3 модела упоређена је са улазним подацима у основни модел. Показатељем *MAPE* потврђена је највећа сагласност измерене потрошње енергије и потрошње ANF3 модела за мерења са похабаним резним елементима 50 %.

Једанаесто поглавље (стр. 139-141) даје закључна разматрања, са освртом на концепцију модела, добијене резултате процеса верификације и научне доприносе дисертације, са правцима будућег истраживања.

Након закључних разматрања, наведени су литературни извори и прилози који садрже формуларе коришћене при мерењу струје и вибрација, улазне податке у ANFIS модел и резултате примене ANFIS модела.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација кандидата Филипа Милетића, мастер инжењера рударства и мастер инжењера машинства под насловом „*Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање*“ представља савремен и оригиналан истраживачки рад на формирању модела који даје синтезу похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије у процесу копања и нивоа амплитуде вибрација на улазном пару вратила редуктора погона за копање. Модел обухвата два парцијална методолошка приступа. Првим се пореде амплитуда вибрација и потрошња електричне енергије. Другим се амплитуда представља преко поремећајне силе добијене од процеса копања. Улазни подаци у модел добијени су мерењима на роторном багеру SRs2000.32/5+VR који ради на површинском копу Тамнава-Западно поље у саставу Електропривреде Србије.

Савременост се између осталог огледа у примени неуро-фази система закључивања, као једне од тренутно најактуелнијих области вештачке интелигенције у техници. Оригиналност дисертације је у примени ANFIS модела за дефинисање међусобне зависности радних параметара рада роторних багера и динамичког понашања конструкције у циљу предикције ефикасности рада.

Значај докторске дисертације се односи на корекцију амплитуде брзине вибрација сходно степену похабаности резних елемената из чега је уследила препорука, да се према стању зуба, може предвидети ниво вибрација и дефинисати опште стање погонске групе. Такав концепт управљања опремом представља оптималан вибродијагностички приступ који омогућава смањење ризика у раду погона за копање.

DIN ISO 10 816-3 стандардом дефинисане су зоне у којима се погон класификује сходно вредности амплитуде брзине. За случај мерења са новим резним елементима, погон је класификован у нижу групу (А, В), док се код мерења са потпуно похабаним зубима, погонска група налази у групи С. Анализом стандарда, закључак је да рад погона у дужем временском периоду са похабаним резним елементима повећава ризик по настанак хаварија.

Додатни значај представља смањење потрошње електричне енергије у технолошком процесу, благовременом заменом резних елемената. Добијени резултати указују да постоји разлика у потрошњи електричне енергије у случају мерења са новим резним елементима и мерења са похабаним, где долази до повећања потрошње електричне енергије.

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и резултата у извештају из програма „iThenticate“ којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације „Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање“ кандидата Филипа Милетића, мастер инжењера рударства и мастер инжењера машинства, констатује се да је према првобитно добијеном извештају укупно подударане текста износило 9 %. Овај степен подударности последица је случајних подударанја које садрже називе институција, називе метода на енглеском језику и њихових скраћеница, случајних подударанја нумеричких података, библиографских података о коришћеној литератури, и слично, што је у складу са чланом 9. Правилника.

Приступом ментора у софтверску платформу „iThenticate“ након филтрирања препознатих преклапања текста који су већи или једнаки 1 %, добијено је референтно преклапање које укупно износи 1 %, што се односи на објављени рад кандидата који се односи на анализу споведену у оквиру докторске дисертације.

Имајући у виду да је кандидат током писања докторске дисертације узео у обзир све академске норме у погледу навођења и цитирања литерарних извора, Комисија сматра да докторска дисертација представља у потпуности резултат оригиналног научно-истраживачког рада кандидата.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

При изради докторске дисертације, коришћена литература обухвата 113 литературних јединица које се односе на: системски приступ анализи радних перформанси техничких система применом модела вештачке интелигенције (вишекритеријумске методе, фази логика, неуронске мреже, адаптивни неуро-фази систем закључивања). Даље је наведена литература везана за резне елементе и процес хабања резних елемената, мерења струје и вибрација на роторним багерима и другим погонима великих снага, динимику и интегритет конструкција роторних багера и примену DIN ISO 10 816-3 стандарда при мерењу вибрација.

3.3 Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Научне методе примењене у докторској дисертацији су адекватне проблематици која се истражује и анализира, као и постављеном предмету и циљевима анализе. Сходно томе, у докторској дисертацији су примењене следеће научне и истраживачке методе:

- експериментална – мерење и одређивање специфичне потрошње електричне енергије у процесу откопавања (директно мерење параметара струје за погон роторног точка); мерење и анализа нивоа вибрација (амплитуда брзине), користећи основне постулате из теорије осцилација;
- статистичка обрада резултата мерења, анализа и адаптација дијаграма јачине струје погона за копање (подаци преузети из диспечерског центра површинског копа) – идентификација улазних параметара;
- метода регресије за дефинисање међусобне зависности похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација;
- адаптивни неуро–фази модел за предикцију потрошње електричне енергије.

Методе истраживања су савремене, комплементарне и заједно формирају алгоритам за одређивање зависности похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација. Примена метода у дисертацији заснована је и на примени савремених програмских алата (MATLAB) за развој ANFIS модела који врши предикцију потрошње електричне енергије у радном технолошком процесу роторног багера.

3.4 Оцена примењивости и верификација остварених резултата

Резултати истраживачког рада у оквиру докторске дисертације кандидата Филипа Милетића могу се применити у научном смислу у области техничке дијагностике праћењем стања и понашања погонских група роторних багера, на основу измереног нивоа амплитуде брзине вибрација. Доприноси који су остварени спроведеним истраживањем имају практичну примену у анализи и процене ефикасности рада рударске механизације и других техничких система где су у примени погони великих снага.

3.5 Оцена способности кандидата за самосталан научни рад

Кандидат Филип Милетић, мастер инжењер рударства и мастер инжењер машинства је током израде докторске дисертације показао да поседује потребне способности и вештине за самосталан научно-истраживачки рад. Формирање модела зависности похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација и даља анализа резултата, захтева изражену аналитичност у раду и систематичност у приступу решавању проблема. Кандидат је на основу вишегодишњег рада и искуства у овој и сличним областима, стекао способност да при изради докторске дисертације у потпуности реализује планирано истраживање, од почетне идеје до испуњавања постављених циљева дисертације.

Кандидат је докторску дисертацију концизно и садржајно презентовао кроз све сегменте развоја модела, изведеног експерименталног истраживања и верификације модела. Сходно оствареним резултатима у научно-истраживачком раду, може се констатовати да је кандидат Филип Милетић испунио услове који га квалификују да буде способан за даљи самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСТ

4.1 Приказ остварених научних доприноса

У докторској дисертацији је приказан нови методолошки приступ, где се по први пут на роторним багерима дефинише међусобна зависност између мерених величина – потрошње електричне енергије и амплитуде брзине вибрација у односу на стање резних елемената. Научни допринос докторске дисертације је у следећим научним областима:

- *техничка дијагностика* – дефинисање процедура при мерењу похабаности резних елемената (корекција укупног угла клина/зуба, угла резања, леђне и грудне површине, итд.), јачине струје и вибрација погона за копање; утврђивање стања и понашања погонских група роторног багера и његове носеће конструкције; антиципација стања система и давање прогнозе о будућем раду; периодичност спровођења мерења у зависности од степена значајности групе градње багера; давање препоруке да се сходно степену похабаности резних елемената са високим нивоом тачности може утврдити потрошња енергије и ниво амплитуде;
- *вештачка интелигенција* – дефинисање оптималног ANFIS модела за предикцију потрошње електричне енергије у процесу копања;
- *системске науке и одржавање техничких система* – повећање ефективности и сигурности рада роторних багера применом дијагностичких метода – идентификација оптималног времена рада резних елемената – интервал линеарног тренда потрошње енергије и нивоа амплитуде вибрација; дефинисање концепта управљања и одржавања рударском механизацијом.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Истраживање обављено у оквиру докторске дисертације заснивало се на неколико хипотеза:

- Већи степен похабаности резних елемената изазива већу потрошњу електричне енергије и више нивое амплитуде брзине вибрација;
- Похабаност резних елемената утиче на тренд потрошње електричне енергије и амплитуде брзине вибрација са потенцијалном променом линеарног у експоненцијални или неки други тренд;
- Стање резних елемената утиче на зону у коју се погонска група сврстава сходно измереним вредностима амплитуде брзине (DIN ISO 10 816-3 стандард);
- Примена ANFIS модела на адекватан начин даје предикцију потрошње електричне енергије процеса копања.

На основу изведених експерименталних мерења, добијени су улазни подаци у модел зависности похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и амплитуде брзине. Очигледно је да већи степен похабаности има директан утицај на скок вредности анализираних феномена. Потрошња електричне енергије је одређена применом Ватметарске методе, на основу измерене јачине струје, док је вредност амплитуде брзине добијена мерењем на редуктору погона за копање и даљом анализом података у софтверу SKF @ptitude Analyst for Microlog.

Креирани модел интегрише Ватметарску методу за одређивање потрошње електричне енергије у процесу копања и једначине теорије осцилација за израчунавање нивоа амплитуде. Модел представља синтезу два парцијална приступа. У првом се пореде амплитуда брзине вибрација и потрошња енергије зависно од похабаности резних елемената. Другим се амплитуда вибрација посматра преко поремећајне силе од процеса копања.

Резултати указују да модел у областима мање похабаности има нижи степен сагласности. Даљим растом похабаности, разлика оба приступа је мања. За случај нових резних елемената и мерења за похабаност 25% и 50% тренд потрошње електричне енергије је линеаран. Након степена похабаности 50%, долази до промене тренда и преласка у експоненцијални. Слични резултати добијени су и код тумачења тренда амплитуде, с том разликом, што након похабаности 50% тренд из линеарног прелази у полиномни.

Амплитуда вибрација је посматрана и кроз референтни DIN ISO 10 816–3 стандард који има широку примену код мерења вибрација. Референтна вредност амплитуде је измерена у вертикалном правцу (вредности су веће у односу на хоризонтални и аксијални правац) и као таква је поређена са дозволеним вредностима за зоне А, В, С и D стандарда.

За случај нових резних елемената и ниже степене похабаности (до 50%), погонска група се налазила у групама које не доводе до веће опасности по рад машине (групе А,Б). Даљи скок похабаности индукује веће амплитуде брзине, па се стање погона налази у вишим групама (за похабаност 75 % у групи В, са тенденцијом приближавања С групи), док код потпуне похабаности резних елемената, опште стање погона је у С групи. Анализом стандарда DIN ISO 10 816–3 препорука је да машина не сме да ради у дужем периоду јер долази до повећање вероватноће настанка последица по рад машине.

Модел развијен у докторској дисертацији је унапређен применом адаптивног неуро-фази система закључивања (ANFIS). Улазни подаци у модел обухватили су остварени капацитет багера у тренутку мерења, читану јачину струје и снагу за процес копања. Излаз из модела је представљен преко потрошње електричне енергије. За развој ANFIS модела, односно фазификацију улаза примењене су Bellova, троугласта и трапезна функција припадности, са три, шест и осам функција по атрибуту. Предикција ANFISA проверена је индексима тачности *RMSE*, *MAE*, *R* и *MAPE*. Потрошња електричне енергије оптималног ANFIS модела (модел заснован на Bellovoj функцији, са осам функција припадности по атрибуту) упоређена је са улазним подацима у основни модел (зависност похабаности зуба, потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација). На основу добијених резултата је утврђено да не постоје велика одступања измерених и предвиђених вредности.

4.3 Верификација научних dopриноса

Научни допринос из области истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације је верификован објављивањем радова у Научним часописима међународног значаја (M20) на коме је кандидат првопотписани аутор.

Категорија M21a – Рад штампан у међународном часопису изузетних вредности

Filip Miletić, Predrag Jovančić, Miloš Milovančević, Dragan Ignjatović, Adaptive neuro-fuzzy prediction of operation of the bucket wheel drive based on wear of cutting elements, Advances in Engineering Software, Volume 146, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102824>; **IF = 4,194**

Категорија M22 – Рад штампан у истакнутом међународном часопису

Filip Miletić, Predrag Jovančić, Miloš Milovančević, Miloš Tanasijević, Stevan Đenadić. Determining the Impact of Cutting Elements State on the Bucket–Wheel Excavator Vibration and Energy Consumption. Journal of Vibration Engineering & Technologies (2022). <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00482-3>, **IF = 2,333** (2021)

Током израде докторске дисертације, кандидат је презентовао и објавио више радова из предметне области као првопотписани аутор или коаутор у Научним часописима међународног значаја (M20), Зборницима радова међународних научних скупова (M30), Часописима националног значаја (M50) и Зборницима скупова националног значаја (M60). На тај начин је кандидат верификовао своје научне доприносе, примењену методологију и остварене резултате. У наставку је дат приказ резултата који верификују рад кандидата из предметне области.

Категорија M22 – Рад штампан у истакнутом међународном часопису

Miljan Gomilanović, Miloš Tanasijević, Saša Stepanović, **Filip Miletić**. A Model for Determining Fuzzy Evaluations of Partial Indicators of Availability for High-Capacity Continuous Systems at Coal Open Pits Using a Neuro-Fuzzy Inference System, Energies 2023, 16(7), 2958; <https://doi.org/10.3390/en16072958>; **IF = 3,252**

Vladimir Čebašek, Veljko Rupar, Stevan Đenadić, **Filip Miletić**, Cutting Resistance Laboratory Testing Methodology for Underwater Coal Mining, Minerals, <https://doi.org/10.3390/min11060564>. **IF = 2,818**

Категорија M33 – Саопштење са међународног скупа штампано у целини

Filip Miletić, Predrag Jovančić, Stevan Đenadić, Behavior determining of bucket wheel drive depending on the wear impact of cutting elements, 22th Conference on Fracture „Loading and Enviromental effects on Structural Integrity“ DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.345

Filip Miletić, Stevan Đenadić, Predrag Jovančić, Dragan Novaković, Bojana Vasiljević „Utvrđivanje ponašanja pogona rotornog točka u zavisnosti od pohabanosti reznih elemenata“ XIII Međunarodna konferencija o površinskoj eksploataciji, Jugoslovenski komitet za površinsku eksploataciju, Zlatibor 2018. ISBN 978-86-83497-25-6

Kategorija M52 - Rad у истакнутом часопису националног значаја

Filip Miletić, Marko Lazić, Stevan Đenadić, Predrag Jovančić, Dragan Ignjatović „Analiza efikasnosti rada bagera SRs2000.32/5+VR angažovanih na površinskim kopovima Elektroprivrede Srbije“ Savez inženjera i tehničara Srbije, časopis Tehnika, DOI 10.5937/tehnika1906795M

Kategorija M63 - Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу

Marko Lazić, Veljko Rupar, **Filip Miletić** „Studija slučaja povećanog specifičnog otpora materijala na kopanje jalovinskih sistema površinske eksploatacije – Analiza troškova proizvodnje usled loma reznih elemenata“ XI Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Rudarstvo 2020“, Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina i Privredna komora Srbije, Vrnjačka Banja, 8-11. septembar, s250-262. 15-24. ISBN 978-86-82867-28-9

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација „Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање“ кандидата Филипа Милетића, мастер инжењера рударства и мастер инжењера машинства, има савремен, оригиналан и научно утемељен приступ утврђивању утицаја похабаности резних елемената на рад погона за копање роторног багера, са аспекта потрошње електричне енергије у технолошком процесу и амплитуде брзине вибрација.

На основу теоријских поставки из области системских наука, вибродијагностике и инжењерских принципа рада роторних багера, формиран је синтетни модел који даје зависност анализираних параметара – потрошње електричне енергије и амплитуде сходно степену похабаности резних елемената.

Улазни подаци који описују поменуте параметре имају изражену хетерогену структуру, нису комплементарни и карактерише их неодређеност у смислу радних параметара. Због наведених карактеристика, за дефинисање синтетног модела примењен је неуро-фази систем закључивања. На овај начин модел је добио следеће атрибуте: адаптивни, хибридни и предиктивни.

Утицај стања резних елемената на амплитуду брзине вибрација доказан је DIN ISO 10 816-3 стандардом који сврстава погонску групу машине у класе од А до D, према измереним вредностима амплитуде. Анализом добијених резултата, утврђено је да степен похабаности резних елемената утиче на ниво амплитуде брзине, чиме се може превентивно утицати на опште стање погона и смањење ризика у раду, правовременом заменом резних елемената.

Компаративном анализом резултата истраживања утврђено је да постоји јасно изражен утицај стања резних елемената на радне параметре погона великих снага, какав је случај на роторним багерима. Креирани модел има алгоритамску структуру и даје препоруке за дефинисање утицаја хабања на рад погона за копање.

Докторска дисертација има велики научни значај и практичну примену, чему иде у прилог верификација предложеног модела на роторном багеру SRs2000.32/5+VR који представља једну од најзначајних машина у саставу Електропривреде Србије.

На основу прегледа докторске дисертације, Комисија за оцену докторске дисертације закључује да докторска дисертација кандидата Филипа Милетића, мастер инжењера рударства и мастер инжењера машинства под насловом „**Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање**“ испуњава све законске услове за јавну одбрану. Комисија закључује да је докторска дисертација урађена према свим стандардима о научно-истраживачком раду и да испуњава све услове прописане Законом о високом образовању, Стандардима за акредитацију, Статутом Рударско-геолошког факултета и прописаних критеријума Универзитета у Београду. Комисија констатује да докторска дисертација има значајну научну вредност.

На основу свега наведеног у Извештају, Комисија за оцену докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „**Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање**“ кандидата Филипа Милетића, прихвати, изложи на увид јавности и даље у складу са процедуром упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, након чега би се приступило јавној одбрани докторске дисертације пред комисијом у истом саставу.

У Београду, 12.07.2023.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

др Дејан Ивезић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Драган Игњатовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Милош Милованчевић, ванредни професор
Универзитет у Нишу, Машински факултет