

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Филип М. Милетић

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

Докторска дисертација

Београд, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Filip M. Miletić

**INFLUENCE OF CUTTING ELEMENTS
WEARNESS OF THE BUCKET WHEEL
EXCAVATOR TO BUCKET WHEEL DRIVE
VIBRATION LEVEL**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

КОМИСИЈА

Ментори:

др Милош Танасијевић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Елементи машинских и енергетских система

др Предраг Јованчић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Механизација у рударству и енергетици

Чланови комисије:

др Дејан Ивезић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Елементи машинских и енергетских система

др Драган Игњатовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Механизација у рударству и енергетици

др Милош Милованчевић, ванредни професор
Универзитет у Нишу, Машински факултет
Ужа научна област: Машинске конструкције

Датум одбране: _____

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

Сажетак

У докторској дисертацији је анализиран утицај похабаности резних елемената роторног багера на потрошњу електричне енергије и ниво амплитуде вибрација погона за копање. Креиран је модел који у функцији стања резних елемената дефинише зависност разматраних физичких феномена. За развој модела примењене су једначине теорије осцилација и Ватметарска метода [1] којом се одређује потрошња електричне енергије.

За верификацију модела извршена су мерења на роторном багеру SRs2000.32/5+VR ангажованом на откопавању откривке на површинском копу Тамнава–Западно поље. Обављено је пет мерења. Резни елементи су били нови и потпуно похабани. Међумерења су рађена за случај похабаности 25 %, 50 % и 75 %. Степен похабаности дефинисан је применом ручног мерног алата. Утврђени су микротехнолошки параметри блока који су били исти при сваком мерењу.

Ниво амплитуде је одређен мерењем вибрација на улазном пару вратила редуктора погона за копање. Истовремено је мерена јачина струје при истом процесу. Добијени резултати су представљали улаз у Ватметарску методу [1].

Модел интегрише два методолошка приступа. Првим се пореде амплитуда вибрација и потрошња електричне енергије. Другим се амплитуда представља преко поремећајне силе добијене од процеса копања. У областима мање похабаности, модел је имао мањи степен сагласности излазних резултата. За веће степене похабаности, разлика оба приступа је мање изражена, што доказује исправност модела.

Утицај похабаности на ниво амплитуде потврђен је DIN ISO 10 816–3 [2] стандардом примењеним за мерење 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.

Предложени модел је унапређен адаптивним неуро–фази системом закључивања (ANFIS) [3], [4]. Циљ је предикција потрошње електричне енергије. Добијени су нови улазни подаци генерисани у основни модел (зависност похабаности зуба, потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација), без директног мерења на багеру. Поређење резултата измерене потрошње електричне енергије и резултата ANFIS [3], [4] модела извршено је одговарајућим статистичким показатељима и потврђена највећа сагласност у случају *Bellove* функције припадности са осам функција по атрибуту.

Кључне речи: роторни багер, резни елементи, хабање, вибрације, потрошња електричне енергије

Научна област: Рударско инжењерство

Ужа научна област: Елементи машинских и енергетских система

UDK број: 622.539:621.649.6:620.178.16(043.3)

INFLUENCE OF CUTTING ELEMENTS WEARNESS OF THE BUCKET WHEEL EXCAVATOR TO BUCKET WHEEL DRIVE VIBRATION LEVEL

Abstract

In the doctoral dissertation is analysed the influence of the wear of cutting elements to energy consumption and bucket wheel drive amplitude level. Created model defines the dependence of the considered physical phenomena as a function of the cutting elements state. For model development were applied equations of the oscillations theory and Wattmeter method [1] to determine the energy consumption. Measurements were made on the bucket wheel excavator SRs2000.32/5+VR to verify the model. Bucket wheel excavator is engaged to overburden excavation at the Tamnava–West field open cast mine. Five measurements were carried out. The cutting elements were new and completely worn. Intermediate measurements were made for wear cases of 25 %, 50 % and 75 %. The degree of wear was defined using a manual measuring tool. The microtechnological parameters of the block were determined, which are the same at each measurement.

The amplitude level is determined by vibrations measuring on the input shafts pair of bucket wheel excavator drive. At the same time was measured the current for the cutting process. The obtained results were the input to the Wattmeter method.

The model integrates two methodological approaches. The first compares the vibration amplitude and the electricity energy consumption. With the other, the amplitude is represented by the disturbance force obtained from the cutting process. In less wear areas, the model had lower agreement degree with the output results. For higher wear levels, the difference between both approaches is less pronounced, which proves the correctness of the model. The effect of wear on the amplitude level is confirmed by the DIN ISO 10 816–3 [2] standard applied for vibration measurement. According to the amplitude level, the general condition of the drive is classified into groups from A to D. In areas of less wear, the drive is in the lower groups (group A and B). With wear increasing, the amplitude level is higher. By analyzing the standards, it can be concluded that working for a long period of time increases the risk of damage to the drive.

The proposed model is improved by the adaptive neuro–fuzzy inference system (ANFIS) [3], [4]. The goal is to predict electricity consumption. New input data generated in the basic model (dependence of tooth wear, electricity consumption and vibration amplitude) were obtained, without direct measurement on the excavator. The comparison of the results of the measured energy consumption and the results of the ANFIS [3], [4] model was carried out with the appropriate statistical indicators and was confirmed the highest agreement in the case of *Bell's* membership function with eight functions per attribute.

Key words: bucket wheel excavator, cutting elements, wear, vibration, energy consumption

Scientific field: Mining engineering

Scientific subfield: Elements of mechanical and energy systems

UDC: 622.539:621.649.6:620.178.16(043.3)

Садржај:

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
1.1 Предмет и циљ истраживања.....	2
1.2 Научне хипотезе истраживања.....	3
1.3 Научне методе истраживања	3
1.4 Научни допринос дисертације.....	3
1.5 Структура дисертације са кратким прегледом поглавља	4
2. АНАЛИЗА ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА	6
2.1 Системски приступ анализи радних перформанси техничких система применом модела вештачке интелигенције.....	6
2.2 Резни елементи и процес хабања резних елемената.....	8
2.3 Мерење струје на роторним багерима и другим погонима великих снага.....	9
2.4 Мерење вибрација на роторним багерима и другим погонима великих снага.....	11
2.5 Динамика и интегритет конструкције роторних багера	13
2.6 Примена DIN ISO 10 816–3 стандарда при мерењу вибрација.....	14
3. РОТОРНИ БАГЕРИ	15
3.1 Конструкција роторних багера.....	16
3.2 Радни орган роторних багера.....	16
3.3 Резни елементи роторних багера	19
3.3.1 Технолошки поступци израде резних елемената.....	21
3.3.2 Материјали за израду резних елемената.....	22
3.3.3 Хабање резних елемената	24
4. ВИБРАЦИЈЕ КАО ПАРАМЕТАР СТАЊА СИСТЕМА	26
4.1 Параметри вибрација	27
4.2 Динамички и механички системи.....	29
4.3. Мерење амплитуде вибрација	30
4.4 Сложене вибрације	32
4.5 Енергија и снага	33
4.6 Природне фреквенције. Појам резонанце.....	33
4.7 Анализа фреквенције	34
4.8 Узроци вибрација и утицај на машине и опрему	36
4.9 Вибродиагностички параметри и норме.....	38
4.9.1 DIN ISO стандарди у вибрوديјагностици.....	40
4.9.2 Испитивање вибрационих параметара у току и након старта машине.....	42
5. СПЕЦИФИЧНИ ОТПОР МАТЕРИЈАЛА НА КОПАЊЕ	43
6. АДАПТИВНИ НЕУРО–ФАЗИ СИСТЕМ ЗАКЉУЧИВАЊА	46
7. МОДЕЛ ЗАВИСНОСТИ СПЕЦИФИЧНЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ И НИВОА ВИБРАЦИЈА ПОГОНА ЗА КОПАЊЕ РОТОРНОГ БАГЕРА	51

7.1 Мерење похабаности резних елемената	51
7.3 Мерење амплитуде брзине вибрација на погону за копање.....	53
7.4 Зависност потрошње електричне енергије процеса копања и амплитуде брзине вибрација погона за копање	53
8. ИЗВЕДЕНА МЕРЕЊА НА РОТОРНОМ БАГЕРУ SRs2000.32/5+VR	55
8.1 Резултати мерења специфичног отпора материјала на копање.....	58
8.1.1 Резултати мерења за случај нових резних елемената.....	58
8.1.2 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 25 %	63
8.1.3 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 50 %	68
8.1.4 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 75 %	73
8.1.5 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 100 %	78
8.2 Резултати мерења вибрација.....	83
8.2.1 Резултати мерења за случај нових резних елемената.....	84
8.2.2 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 25 %	85
8.2.3 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 50 %	88
8.2.4 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 75 %	91
8.2.5 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 100 %	92
9. ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА ЗАВИСНОСТИ СПЕЦИФИЧНЕ ПОТРОШЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ И НИВОА ВИБРАЦИЈА ПОГОНА ЗА КОПАЊЕ.....	95
9.1 Компаративна анализа резултата мерења специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација погона за копање	105
9.2 Препорука за коришћење DIN ISO 10 816-3 стандарда за мерење вибрација	110
10. ANFIS МОДЕЛ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ ПОТРОШЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ПРОЦЕСУ КОПАЊА	113
10.1 Дефинисање улазних и излазних скупова података	113
10.2 Развој ANFIS модела.....	113
10.3 Индекс тачности	118
10.4 Резултати примене ANFIS модела.....	119
10.5 Компаративна анализа измерене потрошње електричне енергије и предикције ANFIS модела.....	138
11. ЗАКЉУЧАК.....	139
ЛИТЕРАТУРА.....	142
СПИСАК ПРИЛОГА.....	I
Прилог 1 – Формулар коришћен при мерењу струје на роторном багеру [91].....	II
Прилог 2 – Формулар коришћен при мерењу вибрација на роторном багеру.....	III
Прилог 3 – Улазни подаци за ANFIS модел	IV
Прилог 4 – Резултати ANFIS модела.....	XX

Списак слика:

Слика 1.1.	Алгоритам истраживања.....	5
Слика 3.1.	Пресипна места на роторним багерима [6].....	15
Слика 3.2.	Основне компоненте роторних багера [5].....	16
Слика 3.3.	Приказ трапезних и лучних ведрица и изглед одрезака [5].....	17
Слика 3.4.	Изведбе ведрица: <i>a</i> – затворено дно; <i>b</i> – отворено дно са ланцима.....	17
Слика 3.5.	Конструкција радног органа роторних багера [5].....	18
Слика 3.6.	Елементи роторног точка [5].....	18
Слика 3.7.	Оптерећење зуба у процесу копања [81].....	19
Слика 3.8.	Зуб роторног багера SRs2000.32/5+VR.....	20
Слика 3.9.	Дијаграм промене температуре са временом [82].....	21
Слика 3.10.	Микроструктура \check{C} .3160 у гашеном стању (<i>a</i>) и након отврдњавања (<i>b</i>) [82].....	22
Слика 3.11.	Расподела тврдоће у површинском слоју [82].....	22
Слика 3.12.	Најчешћи недостаци зуба.....	24
Слика 3.13.	Фазе хабања зуба [85].....	25
Слика 4.1.	Дефинисање степени слободе кретања [86].....	26
Слика 4.2.	Једноставно хармонијско кретање [86].....	27
Слика 4.3.	Зависност времена и померања – дефинисање периода и амплитуде [86], [89].....	28
Слика 4.4.	Систем крутост–маса са пригушењем [86].....	29
Слика 4.5.	Природа вибрација [86], [89].....	30
Слика 4.6.	Начини изражавања амплитуде [86].....	31
Слика 4.7.	Дефинисање <i>RMS</i> [86].....	31
Слика 4.8.	Дефинисање сложених вибрација [86].....	32
Слика 4.9.	Периодично хармонијско кретање [86].....	32
Слика 4.10.	Домен времена у домен фреквенција: први начин приказивања [86].....	34
Слика 4.11.	Домен времена у домен фреквенција: други начин приказивања [86].....	34
Слика 4.12.	Домен времена у домен фреквенција: трећи начин приказивања [86].....	35
Слика 4.13.	Типови сигнала [86].....	35
Слика 4.14.	Основни разлози неуравнотежености [90].....	36
Слика 4.15.	Графички приказ зона квалитета [2], [88].....	39
Слика 4.16.	Мерне тачке на издвојеним лежајним и прирубничким ослонцима [2].....	42
Слика 5.1.	Блок шема процеса копања [81].....	43
Слика 5.2.	Укупни отпор материјала на копање [39], [5].....	43
Слика 6.1.	ANFIS слојеви [4].....	46
Слика 6.2.	ANFIS архитектура [99], [100], [94], [105].....	48
Слика 6.3.	Хибридни алгоритам обуке ANFIS модела [100], [3].....	48
Слика 7.1.	Мере зуба и дефинисање степена похабаности.....	51
Слика 7.2.	Развијен аналитички модел – алгоритам зависности похабаности резних елемената, потрошње енергије и нивоа амплитуде вибрација погона за копање.....	54
Слика 8.1.	Електронско снимање података на багеру SRs2000.32/5+VR [92].....	56
Слика 8.2.	Роторни точак багера SRs2000.32/5+VR у раду [37].....	56
Слика 8.3.	Блок у којем су вршена мерења [4], [92].....	56
Слика 8.4.	Нивои похабаности резних елемената у току мерења.....	57
Слика 8.5.	Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – нови резни елементи.....	58
Слика 8.6.	Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – нови резни елементи.....	58
Слика 8.7.	Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 25 %.....	63
Слика 8.8.	Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 25 %.....	63
Слика 8.9.	Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 50 %.....	68
Слика 8.10.	Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 50 %.....	68

Слика 8.11.	Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 75 %.....	73
Слика 8.12.	Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 75 %.....	73
Слика 8.13.	Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 100 %.....	78
Слика 8.14.	Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 100 %.....	78
Слика 8.15.	Референтни правци за мерење вибрација [92].....	83
Слика 8.16.	Измерене вибрације са новим зубима (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]) [92]....	84
Слика 8.17.	Измерене вибрације са новим зубима (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]) [92]....	84
Слика 8.18.	Измерене вибрације са новим зубима (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]) [92]....	84
Слика 8.19.	Измерене вибрације за похабаност зуба 25 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])....	85
Слика 8.20.	Измерене вибрације за похабаност зуба 25 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]).....	86
Слика 8.21.	Измерене вибрације за похабаност зуба 25 % (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]).....	87
Слика 8.22.	Измерене вибрације за похабаност зуба 50 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])....	88
Слика 8.23.	Измерене вибрације за похабаност зуба 50 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]).....	89
Слика 8.24.	Измерене вибрације за похабаност зуба 50 % (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]).....	90
Слика 8.25.	Измерене вибрације за похабаност зуба 75 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹]).... [92].....	91
Слика 8.26.	Измерене вибрације за похабаност зуба 75 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])..... [92].....	91
Слика 8.27.	Измерене вибрације за похабаност зуба 75 % (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])..... [92].....	91
Слика 8.28.	Измерене вибрације за похабаност зуба 100 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])....	92
Слика 8.29.	Измерене вибрације за похабаност зуба 100 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])....	93
Слика 8.30.	Измерене вибрације за похабаност зуба 100 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min ⁻¹])....	94
Слика 9.1.	Доказ креираног модела зависности похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација.....	105
Слика 9.2.	Тренд специфичне потрошње електричне енергије у односу на стање зуба.....	106
Слика 9.3.	Предикција специфичне потрошње електричне енергије.....	107
Слика 9.4.	Разлика измерених и предвиђених вредности потрошње електричне енергије.....	108
Слика 9.5.	Тренд нивоа амплитуде брзине вибрација у вертикалном правцу.....	108
Слика 9.6.	Предикција нивоа амплитуде брзине вибрација.....	110
Слика 9.7.	Разлика измерених и предвиђених нивоа амплитуде брзине вибрација.....	110
Слика 9.8.	Корекција амплитуде вибрација за различита стања резних елемената.....	112
Слика 9.9.	Корекција амплитуде за похабаност 25 % у односу на нове зубе.....	112
Слика 9.10.	Корекција амплитуде за похабаност 50 % у односу на нове зубе.....	113
Слика 9.11.	Корекција амплитуде за похабаност 75 % у односу на нове зубе.....	113
Слика 9.12.	Корекција амплитуде за похабаност 100 % у односу на нове зубе.....	113
Слика 10.1.	Графички приказ коришћених функција припадности [111].....	116
Слика 10.2.	Дијаграм тока ANFIS модела [112], [3].....	118

Слика 10.3.	Подаци за тренинг – Q_{ost} , I_{max} , N_{max} , E_{max}	120
Слика 10.4.	Фази систем закључивања.....	120
Слика 10.5.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF1 модела.....	121
Слика 10.6.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF2 модела.....	121
Слика 10.7.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF3 модела.....	121
Слика 10.8.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF4 модела.....	122
Слика 10.9.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF5 модела.....	122
Слика 10.10.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF6 модела.....	122
Слика 10.11.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF7 модела.....	123
Слика 10.12.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF8 модела.....	123
Слика 10.13.	Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF9 модела.....	123
Слика 10.14.	ANFIS структура – варијанта са три и шест функција припадности по атрибуту...	124
Слика 10.15.	ANFIS структура – варијанта са осам функција припадности по атрибуту.....	124
Слика 10.16.	Функције припадности улазне променљиве I_{max} за моделе ANF1 и ANF2.....	125
Слика 10.17.	Функције припадности улазне променљиве I_{max} за модел ANF3.....	125
Слика 10.18.	Функције припадности улазне променљиве I_{max} за моделе ANF4 и ANF5.....	125
Слика 10.19.	Функције припадности улазне променљиве I_{max} за модел ANF6.....	126
Слика 10.20.	Функције припадности улазне променљиве I_{max} за моделе ANF7 и ANF8.....	126
Слика 10.21.	Функције припадности улазне променљиве I_{max} за модел ANF9.....	126
Слика 10.22.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF1 модел.....	127
Слика 10.23.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF2 модел.....	127
Слика 10.24.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF3 модел.....	127
Слика 10.25.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF4 модел.....	128
Слика 10.26.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF5 модел.....	128
Слика 10.27.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF6 модел.....	128
Слика 10.28.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF7 модел.....	129
Слика 10.29.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF8 модел.....	129
Слика 10.30.	Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF9 модел.....	129
Слика 10.31.	Предикција потрошње електричне енергије ANF1 модела – тренинг скуп	130
Слика 10.32.	Предикција потрошње електричне енергије ANF1 модела – тест скуп	130
Слика 10.33.	Предикција потрошње електричне енергије ANF2 модела – тренинг скуп	131
Слика 10.34.	Предикција потрошње електричне енергије ANF2 модела – тест скуп	131
Слика 10.35.	Предикција потрошње електричне енергије ANF3 модела – тренинг скуп	131
Слика 10.36.	Предикција потрошње електричне енергије ANF3 модела – тест скуп	132
Слика 10.37.	Предикција потрошње електричне енергије ANF4 модела – тренинг скуп	132
Слика 10.38.	Предикција потрошње електричне енергије ANF4 модела – тест скуп	132
Слика 10.39.	Предикција потрошње електричне енергије ANF5 модела – тренинг скуп	133
Слика 10.40.	Предикција потрошње електричне енергије ANF5 модела – тест скуп	133
Слика 10.41.	Предикција потрошње електричне енергије ANF6 модела – тренинг скуп	133
Слика 10.42.	Предикција потрошње електричне енергије ANF6 модела – тест скуп	134
Слика 10.43.	Предикција потрошње електричне енергије ANF7 модела – тренинг скуп	134
Слика 10.44.	Предикција потрошње електричне енергије ANF7 модела – тест скуп	134
Слика 10.45.	Предикција потрошње електричне енергије ANF8 модела – тренинг скуп	135
Слика 10.46.	Предикција потрошње електричне енергије ANF8 модела – тест скуп	135
Слика 10.47.	Предикција потрошње електричне енергије ANF9 модела – тренинг скуп	135
Слика 10.48.	Предикција потрошње електричне енергије ANF9 модела – тест скуп	136
Слика 10.49.	Показатељи $RMSE$ и MAE – тренинг скуп	137
Слика 10.50.	Показатељи $RMSE$ и MAE – тест скуп	137
Слика 10.51.	Упоредни приказ показатеља $RMSE$ за тренинг и тест скуп.....	137
Слика 10.52.	Упоредни приказ показатеља R за тренинг и тест скуп.....	138
Слика 10.53.	Упоредни приказ показатеља $MAPE$ за тренинг и тест скуп.....	138

Списак таблица:

Таблица 3.1.	Карактеристике челика за зубе на откривци [82].....	23
Таблица 4.1.	Преглед узрока и карактеристика вибрација механичких система [88].....	37
Таблица 4.2.	Кључни елементи вибродијагностике [88].....	38
Таблица 4.3.	Области квалитета према DIN ISO вибродијагностичким стандардима [2], [88].....	39
Таблица 8.1.	Основне техничке карактеристике багера SRs2000.32/5+VR [4], [92].....	55
Таблица 8.2.	Очитане вредности пикова струје – доњи погон копања, нови зуби.....	59
Таблица 8.3.	Очитане вредности пикова струје – горњи погон копања, нови зуби.....	59
Таблица 8.4.	Специфични отпор материјала на копање за случај нових резних елемената, доњи погон.....	60
Таблица 8.5.	Специфични отпор материјала на копање за случај нових резних елемената, горњи погон.....	61
Таблица 8.6.	Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај нових резних елемената.....	62
Таблица 8.7.	Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 25 %.....	64
Таблица 8.8.	Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 25 %.....	64
Таблица 8.9.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 25 % доњи погон.....	65
Таблица 8.10.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 25 %, горњи погон.....	66
Таблица 8.11.	Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 25 %.....	67
Таблица 8.12.	Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 50 %.....	69
Таблица 8.13.	Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 50 %.....	69
Таблица 8.14.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 50 %, доњи погон.....	70
Таблица 8.15.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 50 %, горњи погон.....	71
Таблица 8.16.	Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 50 %.....	72
Таблица 8.17.	Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 75 %.....	74
Таблица 8.18.	Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 75 %.....	74
Таблица 8.19.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 75 %, доњи погон.....	75
Таблица 8.20.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 75 %, горњи погон.....	76
Таблица 8.21.	Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 75 %.....	77
Таблица 8.22.	Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 100 %.....	79
Таблица 8.23.	Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 100 %.....	79
Таблица 8.24.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 100 %, доњи погон.....	80
Таблица 8.25.	Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 100 %, горњи погон.....	81
Таблица 8.26.	Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 100 %.....	82
Таблица 9.1.	Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min]) [92].....	95
Таблица 9.2.	Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min ⁻¹]).....	96
Таблица 9.3.	Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E	96
Таблица 9.4.	Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево.....	96
Таблица 9.5.	Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно.....	97
Таблица 9.6.	Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево.....	97

Таблица 9.7. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно.....	97
Таблица 9.8. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево.....	97
Таблица 9.9. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно.....	97
Таблица 9.10. Збирни однос похабаног 25 % и новог резног елемента.....	97
Таблица 9.11. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min]).....	98
Таблица 9.12. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min ⁻¹]).....	98
Таблица 9.13. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E	98
Таблица 9.14. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево.....	99
Таблица 9.15. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно.....	99
Таблица 9.16. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево.....	99
Таблица 9.17. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно.....	99
Таблица 9.18. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево.....	99
Таблица 9.19. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно.....	99
Таблица 9.20. Збирни однос похабаног 50 % и новог резног елемента.....	100
Таблица 9.21. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min]) [92].....	100
Таблица 9.22. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min ⁻¹]).....	100
Таблица 9.23. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E	101
Таблица 9.24. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево.....	101
Таблица 9.25. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно.....	101
Таблица 9.26. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево.....	101
Таблица 9.27. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно.....	101
Таблица 9.28. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево.....	102
Таблица 9.29. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно.....	102
Таблица 9.30. Збирни однос похабаног 75 % и новог резног елемента.....	102
Таблица 9.31. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min]).....	102
Таблица 9.32. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min ⁻¹]).....	103
Таблица 9.33. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E	103
Таблица 9.34. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево.....	103
Таблица 9.35. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно.....	103
Таблица 9.36. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево.....	103
Таблица 9.37. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно.....	104
Таблица 9.38. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево.....	104
Таблица 9.39. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно.....	104
Таблица 9.40. Збирни однос похабаног 100 % и новог резног елемента.....	104
Таблица 9.41. Потрошња електричне енергије – линеарни тренд.....	106
Таблица 9.42. Потрошња електричне енергије – експоненцијални тренд.....	107
Таблица 9.43. Амплитуда вибрација на основу дефинисаног линеарног тренда.....	109
Таблица 9.44. Амплитуда вибрација на основу дефинисане полиномне регресије.....	109
Таблица 10.1. ANFIS модел 1 – <i>Bellova</i> функција припадности.....	117
Таблица 10.2. ANFIS модел 2 – Троугласта функција припадности.....	117
Таблица 10.3. ANFIS модел 3 – Трапезна функција припадности.....	117
Таблица 10.4. Вредности грешака тренирања и средњих грешака (ANF1–ANF6).....	124
Таблица 10.5. Вредности грешака тренирања и средњих грешака (ANF7–ANF9).....	124
Таблица 10.6. Индекси тачности модела ANF1–ANF9.....	136
Таблица 10.7. Улазни подаци у основни модел – измерено/ANFIS.....	139
Таблица 10.8. Резултати <i>MAPE</i> – улаз у основни модел (измерена потрошња/ANFIS).....	139

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Континуална површинска експлоатација минералних сировина изводи се путем БТО система (багер–транспортер са гуменом траком–одлагач) и БТД (багер–транспортер са траком–дробилана/депонија) система [5]. Основна улога ових система је откопавање, транспорт и депоновање/одлагање угља или откривке. Примарну улогу у систему има роторни багер. Роторни багери представљају машине великог јединичног капацитета. Изложени су променљивим климатским и геолошким факторима [6]. Структура материјала који се откопава је различита.

Резни елементи представљају једине елементе багера у контакту са откопаваним материјалом. Зависно од његове врсте, хабање резних елемената може бити изражено у мањој или већој мери.

При откопавању откривке и међуслојне јаловине у материјала се могу наћи компоненте које изазивају хабање резних елемената. Хабање утиче на ефикасност рада роторних багера, од чега је најважније истаћи:

- повећану потрошњу електричне енергије; и
- више нивое амплитуде вибрација.

Синтеза потрошње електричне енергије, амплитуде вибрација и похабаности резних елемената представља предмет разматрања докторске дисертације. Циљ је креирање модела који дефинише корелациону везу између потрошње енергије и амплитуде вибрација, зависно од степена похабаности. За развој модела примењује се Ватметарска метода [1], којом се израчунава потрошња електричне енергије процеса копања и једначине теорије осцилација за дефинисање нивоа амплитуде.

Процес верификације модела се спроводио на роторном багеру SRs2000.32/5+VR који ради на површинском копу Тамнава–Западно поље у оквиру I ВТО система. Мерења су обављена за следећа стања резних елемената:

- нови резни елементи;
- похабани резни елементи 25 %;
- похабани резни елементи 50 %;
- похабани резни елементи 75 %; и
- похабани резни елементи 100 %.

Истовремено је мерена јачина струје процеса копања и амплитуда вибрација на улазном пару вратила редуктора. Фреквенција побуде је дефинисана бројем обртаја вратила електромотора. Постављени услови су исти при сваком мерењу. На овај начин се омогућава компаративна анализа утицаја похабаности резних елемената на разматране показатеља рада роторног багера.

Хибридни карактер модела остварен је применом адаптивног неуро–фази система закључивања (*eng. Adaptive neuro–fuzzy inference system – ANFIS*) [3], [4] развијеног коришћењем програмског пакета MATLAB [7]. ANFIS [3], [4] модел има емпиријски карактер заснован на улазним подацима добијеним мерењем. Фази логика представља битан сегмент модела због структуре података у којима доминира хетерогеност, некохерентност и нејасност, док неуронске мреже пружају могућност предикције.

ANFIS [3], [4] омогућава добијање нових улазних података без директних мерења. Подаци могу да омогуће итеративни процес верификације модела зависности похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде погона за копање.

1.1 Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања представља технолошки процес копања роторног багера SRs2000.32/5+VR. Са аспекта технолошких могућности, овај роторни багер представља једну од најзначајних откопних машина у Електропривреди Србије. За потребе израде докторске дисертације врше се *in situ* мерења за различита стања резних елемената.

Основни циљ истраживања је креирање аналитичког модела који дефинише међусобну зависност потрошње електричне енергије, амплитуде вибрација и похабаности резних елемената. Такође, дата методологија има корективни утицај на коришћење стандарда DIN ISO 10816–3 [2], што се може сматрати јединственим приступом у пракси. Методологија се заснива на две врсте мерења.

Мерењем струје за процес копања одређује се потрошња електричне енергије. Истовремено се мере вибрације на улазном пару вратила редуктора. Предуслов за мерење представља дефинисање микротехнолошких параметара откопаног блока:

- висине подетаже;
- дебљине реза (наступа багера);
- брзине кружног кретања; и
- угаони положај стреле роторног точка.

Вибрације су мерене у три референтна правца: аксијалном, хоризонталном и вертикалном. Амплитуда се бележи у тренутку када се стрела роторног тачка налази у обртној оси.

Мерење јачине струје и вибрација се изводи са променом три дебљине реза: 0,25 [m], 0,40 [m] и 0,50 [m] и истом брзином кружног кретања (70 % од максималне брзине). Циљ је могућност поређења резултата у односу на степен похабаности резних елемената.

Откопавање блока се најчешће изводи дефинисаним дебљинама реза и брзинама кружног кретања. Корекција параметара се врши при откопавању материјала са већим интензитетом отпора на копање.

Степен похабаности је утврђен ручним мерним алатом. Називна мера зуба која одговара стању потпуне похабаности је 100 [mm]. Мера новог зуба износи 200 [mm]. Степен похабаности 25 %, 50 % и 75 % дефинише димензије: 175 [mm], 150 [mm] и 125 [mm].

Потрошња електричне енергије се представља као kWh по m³ откопаног материјала. Производња роторних багера износи више милиона m³ откривке на годишњем нивоу. У основи, мале процентуалне разлике потрошње енергије за стање новог и потпуно похабаног зуба, имају велики значај са аспекта уштеде енергије у дужем периоду.

Стандард DIN ISO 10 816–3 [2] се примењује за мерење вибрација на погонима великих снага. Погонска група се, према нивоу амплитуде сврстава у групе од А–D (таблица 4.3.). Дефинисање утицаја похабаности резних елемената на вредност амплитуде вибрација представља примарни задатак.

Рад погона у дужем временском периоду са недозвољеним нивоом амплитуде (групе C, D) повећава ризик од настанка већих последица по рад машине. Правовременом заменом резних елемената проблем се отклања.

1.2 Научне хипотезе истраживања

Истраживање које ће бити обављено кроз израду докторске дисертације заснива се на неколико полазних поставки и ставова које треба доказати:

- већи степен похабаности резних елемената роторног багера генерише већу потрошњу електричне енергије и више нивое амплитуде вибрација (анализирани феномени);
- дати феномени се представљају преко модела извршеног рада (енергије) у радном процесу. Роторни багери имају милионску производњу (откривке или корисне минералне сировине), па се развојем одговарајућег аналитичког модела зависности специфичне потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација ствара простор за знатне енергетске уштеде;
- похабаност резних елемената утиче на тренд потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација са потенцијалном променом, линеарног у експоненцијални или неки други тренд;
- стање резних елемената одређује групу вибрација у коју се погон класификује према DIN ISO 10816–3 [2] стандарду. Полазна хипотеза је да се погон из „више групе“ вредности амплитуде вибрација (С,Д група) може превести у „нижу“ (А,В група) благовременом заменом резних елемената; и
- примена ANFISA омогућава одређивање потрошње електричне енергије без извођења нових теренских мерења.

1.3 Научне методе истраживања

У докторској дисертацији ће бити коришћене следеће научне методе:

- статистичка обрада резултата мерења, анализа и адаптација дијаграма јачине струје погона за копање (подаци преузети из диспечерског центра површинског копа) – идентификација улазних параметара;
- Ватметарска метода [1] за одређивање специфичне потрошње електричне енергије (директно мерење параметара струје за погон роторног точка);
- вибродијагностичка метода за анализу нивоа вибрација (амплитуда брзине), користећи основне постулате из теорије осцилација;
- метода регресије за дефинисање међусобне зависности похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација; и
- Адаптивни неуро–фази модел за предикцију потрошње електричне енергије.

1.4 Научни допринос дисертације

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

- *системске науке* – 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;

- *техничка дијагностика* – 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 [3], [4] модела за предикцију потрошње електричне енергије у процесу копања; 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.

1.5 Структура дисертације са кратким прегледом поглавља

Докторска дисертација садржи 11 целина које прате логичан след дефинисан кроз предмет и циљеве истраживања, односно, полазне хипотезе.

Прво поглавље обухвата уводна разматрања, предмет и циљ истраживања, научне хипотезе истраживања, научне методе и допринос, са освртом на структуру дисертације.

Друго поглавље садржи преглед литературе, усмерене ка системском приступу анализи радних перформанси техничких система применом модела вештачке интелигенције, резним елементима и процесу хабања резних елемената, мерењима струје и вибрација на роторним багерима и другим погонима великих снага, динамици и интегритету конструкције роторних багера и примени DIN ISO 10 816–3 [2] стандарда при мерењу вибрација.

Треће поглавље се односи на роторне багере, њихову конструкцију и радни орган. Даље су дефинисани резни елементи, поступци израде, примењени материјали и процес хабања.

Четврто поглавље дефинише појам вибрација и основних параметара, дефинисање и мерење амплитуде, енергију и снагу, природне фреквенције и резонанцију, анализу фреквенције, узроке вибрација и вибродијагностичке параметре и норме при мерењу вибрација. Посебно је обрађен DIN ISO 10 816–3 [2] стандард, са утврђеним зонама квалитета и дефинисаним мерним местима.

Пето поглавље уводи појам специфични отпор материјала на копање, са алгоритмом Ватметарске методе, на основу које се израчунава специфична потрошња електричне енергије процеса копања.

У оквиру **шестог поглавља** обрађен је Адаптивни неуро–фази систем закључивања (ANFIS) [3], [4]. Дефинисани су слојеви ANFIS [3], [4] модела, фази правила и архитектура мреже, процес тренирања и процена грешке.

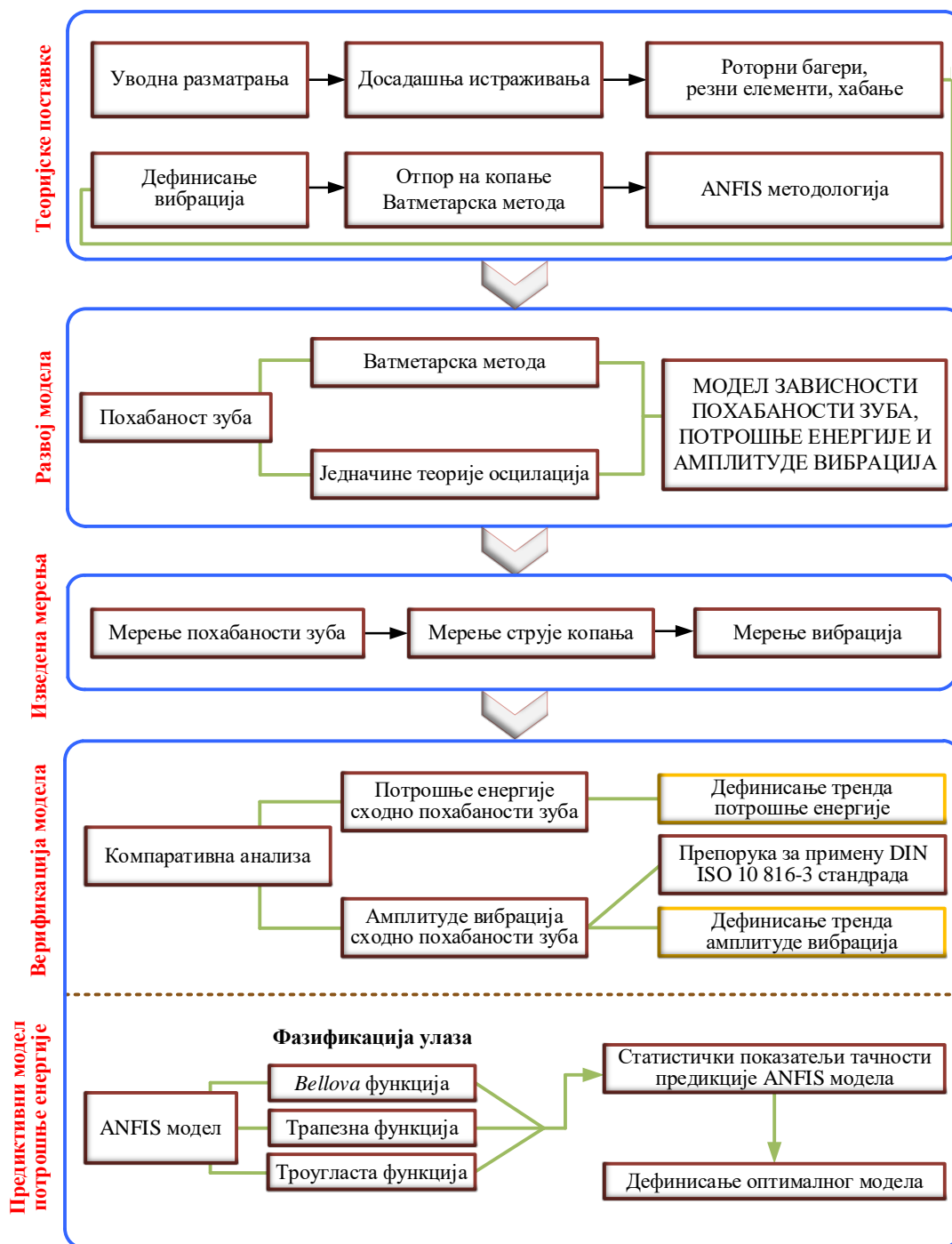
Седмо поглавље интегрише теоријске поставке процеса хабања резних елемената, анализе вибрације, специфичне потрошње електричне енергије и адаптивног неуро–фази система закључивања у нумерички модел који дефинише зависност анализираних физичких величина.

Осмо поглавље представља студију случаја којом је тестиран модел. Описана је процедура мерења струје и вибрација погона за копање роторног багера SRs2000.32/5+VR и приказани резултати који чине улазне податке за верификацију модела и компаративну анализу.

У **деветом поглављу** извршена је верификација модела, компаративна анализа резултата и дата препорука за коришћење DIN ISO 10 816–3 [2] стандарда при мерењу вибрација. Посебно је разматран утицај похабаности резних елемената на нивое амплитуде брзине и утврђене групе у којима се погон класификује, сходно измереним вредности.

Десето поглавље обухвата резултате примене ANFIS [3], [4] модела, који за циљ има добијање нових улазних података (резултата мерење) на основу којих се може поново извршити тестирање модела и дефинисати степен сагласности са експерименталним подацима. Креирано је девет парцијалних модела. Провера перформанси извршена је применом показатеља *RMSE*, *MAE* [9], *R* и *MAPE* [7].

Једанаесто поглавље даје закључна разматрања и правце даљег истраживања. Након закључних разматрања, наведен је списак коришћене литературе и прилог дисертације садржан од формулара за мерење струје и вибрација, улазних података за ANFIS [3], [4] модел и резултата предикције.



Слика 1.1. Алгоритам истраживања

2. АНАЛИЗА ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

У наставку је дат списак релевантне литературе, подељене у следеће области:

- системски приступ анализи радних перформанси техничких система применом модела вештачке интелигенције;
- резни елементи и процес хабања резних елемената;
- мерење струје и вибрација на роторним багерима и другим погонима великих снага;
- динамика и интегритет конструкције роторних багера; и
- примена стандарда DIN ISO 10 816–3 [2] при мерењу вибрација.

2.1 Системски приступ анализи радних перформанси техничких система применом модела вештачке интелигенције

Đenadić и остали [10] креирали су модел за одређивање расположивости машина помоћне механизације (студија случаја – булдозери). Модел је заснован на примени фази логике и АНР [11] методе (*eng. Analytic Hierarchy Process*). Парцијални индикатори који утичу на расположивост (поузданост, погодност одржавања и подршка одржавању) дефинисани су експертским оцењивањем. Анализом су обухваћене машине које се налазе у гарантном периоду (две године рада) и машине пред расхоровањем (седам година рада). Модел је верификован компаративном анализом са класичним математичким приступом за одређивање расположивости.

Đenadić и остали [12], [6] креирали су хибридни модел за оцену ризика који је базиран на примени фази логике и две методе вишекритеријумског одлучивања АНР [11] и TOPSIS [13] (*eng. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*). АНР је коришћен за дефинисање међусобног односа парцијалних индикатора, док је улога TOPSIS методе смањење расипања излазних резултата. Верификација модела извршена је на роторном багеру SRs2000.32/5+VR.

Tanasijević [14] је у докторској дисертацији креирао модел за одређивање сигурности функционисања механичких компоненти роторног багера. Модел је заснован на теорији фази логике. Представља синтезу поузданости, погодности одржавања, логистичке подршке одржавању, конструкцијских и логистичких карактеристика техничког система. Модел комбинује квалитативне показатеље рада засноване на експертској оцени и квантитативне показатеље. Модел је применљив и код осталих техничких система.

Tanasijević и остали [15] развили су модел сигурности функционисања техничког система који се заснива на парцијалним индикаторима поузданост, погодност одржавања и логистичка подршка одржавању. За одређивање сигурности функционисана коришћена је max–min композиција.

Tanasijević и остали [16] приказали су могућност синтезне анализе сигурности функционисања применом теорије фази скупова. Бенефит оваквог приступа је анализа података који се односе на радне перформансе рударских машина. Студијом случаја обухваћен је роторни багер, као машина значајне инвестиционе вредности и остварених радних учинака. Модел је применљив и код осталих техничких система.

Gomilanović и остали [3] креирали су модел за израчунавање фази оцена парцијалних индикатора расположивости континуалних система површинске експлоатације. Модел је заснован на примени ANFIS [3], [4] методологије.

Улазни подаци у модел представљају реалне податке прикупљене током досадашњег рада система. Распољивост се одређује на бази експертских оцена у одређеном временском интервалу. Применом статистичких показатеља *RMSE* и *MAE* [9] утврђен је оптималан предиктивни модел заснован на фазификацији улазних променљивих Гаусовом функцијом припадности.

Gomilanović и остали [17] развили су модел за израчунавање располољивости континуалних система површинске експлоатације применом теорије фази логике. Модел представља синтезу индикатора располољивости (поузданост и погодност одржавања). Интеграција наведених индикатора изведена је композицијама *max–min* и *min–max*.

Petrović и остали [18] су извршили процену ризика отказа елемената рударских машина применом теорије фази логике. Парцијални индикатори ризика представљени су у RPN [19] облику, али исказани на лингвистички начин. Студија случаја обухвата транспортере са гуменом траком [6]. Ризик је процењен са два аспекта: одређивањем RPN [19] и коришћењем фази логике.

Wang и остали [20] предлажу модел за анализу ризика техничких система базиран на теорији фази логике. Структура система се декомпонује на хијерархијске нивое. Анализа отказа се разматра преко следећих параметара: вероватноћа појаве отказа, озбиљност и могућност детекције [6]. Субјективност при оцени ризика отклоњена је применом EG методе (*eng. Evidential Reasoning*).

Bowles & Peláez [21] имплементирали су фази логику у FMECA методу [22] (*eng. Failure Mode, Effects & Criticality Analysis*) за процену ризика. Парцијални индикатори ризика (вероватноћа појаве отказа, озбиљност и могућност детекције) функцијом припадности се пресликавају у фази скупове [6]. Интеграција је извршена применом *min–max* композиције. Процесом дефазификације одређене су нумеричке вредности ризика.

Bevilacqua и остали [23] предлажу комбинацију FMECA [22] и симулације Monte Carlo [24] за процену ризика. Одређивање RPN [19] (*eng. The Risk Priority Number*) унапређено је разматрањем већег броја парцијалних индикатора ризика [6]. Узети су у обзир радни услови, трошкови одржавања, учесталост појаве отказа, значај машине, безбедност и приступ месту отказа [6].

Wang и остали [25] су у оквиру свог истраживања предложили фази FMEA [26] методу којом се омогућава лингвистички начин процене парцијалних индикатора ризика. Фази лингвистичке променљиве се користе за анализу парцијалних индикатора. Модел узима у обзир релативни значај између парцијалних индикатора [6]. Фази RPN [19] је представљен пондером геометријске средине фази оцена парцијалних индикатора. Ранг је одређен дефазификацијом методом *centroid* [6].

Balaraju и остали [27] истичу да је императив повећање продуктивности рударске индустрије са циљем остваривања планиране производње. Примењене машине су склоне отказима елемената. Класичан приступ процене ризика FMEA [26] методом има низ недостатака. Аутори предлажу комбинацију фази логике и FMEA [26] методе. Студија случаја се односи на механизацију у подземној експлоатацији. Дефинисано је 16 потенцијалних ризика [6], са највећом вредношћу на електро систему.

2.2 Резни елементи и процес хабања резних елемената

Virag & Szirbik [28] представили су нови дизајн резних елемената багера ведричара. Анализа резних елемената је извршена применом методе коначних елемената, са дефинисаним линеарним повећањем бочне компоненте отпора на копање. Симулацијом је добијена расподела напона и померање карактеристичних тачака. Резултати показују да се максимални напони смањују са повећањем бочне силе.

Golubović и остали [29] дефинисали су концепт кашике и резних елемената роторних багера. Спроведено истраживање је засновано на одређивању силе копања у односу на механичке карактеристике откопаног материјала, нови дизајн резне ивице кашике, брзине резања и вертикалних вибрација погона роторног точка. Сила копања у првом реду зависи од специфичног отпора материјала на копање и дужине резне ивице. Динамички модел роторног багера у вертикалној равни омогућио је дефинисање функције промене дужине резне ивице у времену. Бенефити оваквог приступа су побољшање продуктивности, енергетске ефикасности и поузданости система.

Alabdullah и остали [30] извршили су мерење профила резне ивице алата са циљем добијања одзива геометрије резне ивице са аспекта хабања у односу на дефинисане параметре резања. Урађено је осам проба, са променом две брзине резања, два корака и две дубине резања. За преглед резних ивица коришћен је скенирајући електронски микроскоп. Резултати су показали присуство различитих типова хабања на грудној и бочним странама алата. Адхезионо хабање представља формирање надограђене ивице, док абразивно хабање представља трошење бокова. Оптималан век трајања алата, дефинисан је према минималној дужини и дубини хабања.

Chuangwen и остали [31] су снимали сигнале силе резања, убрзање вибрација и дубину хабања на бочној страни резног алата. Истраживање је обухватало посматрање морфологије хабања алата коришћењем скенирајућег електронског микроскопа и дистрибуције површинских елемената на оштећеним алатима, анализом енергетског спектра. Дефинисање механизма хабања алата, омогућило је даље проучавање утицаја параметара резања и хабања алата на силу резања и вибрације.

Резултати су показали да се оксидационо, адхезионо и дифузионо хабање углавном појављују на грудној површини алата, док се на бочној површини јавља адхезивно и дифузионо хабање. Правилно повећање брзине и дубине резања, може побољшати продуктивност и контролисати силу резања и вибрације.

Břinas и остали [32] указују да у процесу откопавања материјала роторним багерима, на процес резања утичу силе супростављене радном органу и резном алату. Одређују избор машине, њене параметре и начин рада. Студије рађене за потребе утврђивања узрока механичких кварова багера, показале су да систем копања и утовара узрокује највећу стопу отказа, око 32 % од свих забележених механичких кварова.

Shi и остали [33] наводе да тачна процена морфологије хабања алата пружа прилику да се истражи утицај хабања алата на перформансе резања, што позитивно утиче и на трошкове производње. У раду је развијена методологија за симулацију стварног формирања струготине и развоја хабања кроз 3D модел коначних елемената.

Како би се побољшала тачност добијених резултата, разматран је утицај похабаности алата, расподеле напона и температуре на брзину хабања. Експериментални и симулациони резултати показује висок ниво сагласности што доказује тачност предложеног модела у предвиђању хабања алата.

Kritski Dmitri и остали [34] извршили су модификацију једначина за праћење абразивног хабања зуба, разјаснивши константе у једначинама. Појашњење је направљено на основу експерименталних података уз коришћење доступне литературе и препорука стручњака. Анализирани су реални подаци о степену хабања.

Уооп и остали [35] су развили приступ за уштеду енергије код процеса троосног глодања који се састоји у праћењу и процени потрошње енергије. Од укупне потрошње енергије чак 68 % одлази на снагу потребну за уклањање материјала и она се повећава трошењем алата са бочне стране. Разлика између снаге у условима јаког и благог хабања емпиријски је моделирана коришћењем методологије површинске реакције.

Меена & Mansori [36] истраживали су утицај услова резања на морфологију и површинску хрпавост. Експериментални резултати показали су да веће брзине резања доводе до знатних механичких оптерећења резне ивице алата, што резултира вишим специфичним вредностима силе резања.

2.3 Мерење струје на роторним багерима и другим погонима великих снага

Miletić и остали [37] вршили су мерење специфичне потрошње електричне енергије погона за копање и амплитуде брзине вибрација у радном технолошком процесу роторног багера SRs2000.32/5+VR, са циљем утврђивања утицаја стања резних елемената на рад погона. Резултати су показали да са порастом похабаности, расте специфична потрошња електричне енергије и амплитуда брзине вибрација.

Miletić и остали [4] развили су модел процене понашања погона за копање роторног багера SRs2000.32/5+VR са аспекта специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација у односу на похабаност резних елемената. Рад је заснован на примени ANFIS [3], [4] модела, применом вештачких неуронских мрежа и фази логике. Резултати показују да је са порастом похабаности резних елемената присутан тренд раста специфичне потрошње електричне енергије и амплитуде брзине вибрација, што неповољно утиче на рад погона за копање.

Jakovljević и остали [38] пратили су утицај односа ширине према дебљини одреска на специфични отпор материјала копања на копање. Мерења су извршена на багеру SRs2000.32/5+VR на површинском копу Тамнава–Западно поље, за две висине одреска; $h = 6,3$ [m] и $h = 2,8$ [m]. Максимална вредност специфичног отпора на копање за обе висине одреска била је за однос $s/b = 1,3$. За висину одреска $h = 2,8$ [m] највећа вредност специфичног отпора на копање је за однос $s/b = 1,3$; док је за висину одреска $h = 6,3$ [m] највећа вредност специфичног отпора на копање за однос $s/b = 1,1$.

Воšković [39] је у докторској дисертацији за дефинисане микротехнолошке параметре блока дошао до закључка да су ангажована снага (струја) за процес копања и потрошња електричне енергије веће при откопавању хоризонталним у односу на вертикалне резове. Убрзање вибрација је такође веће у свим правцима и неповољно утиче на структуру багера. Побуда изазвана хоризонталним резом је израженија и неповољнија од побуде изазване вертикалним резом. Код појединих мерења са вертикалним резом појављују се већа убрзања само у бочном правцу. Разлог томе су лоше пројектовани резни елементи који материјал откопавају бочном страном зуба.

Vrinas и остали [40] предлажу модел за прорачун снаге мотора погона за копање роторног багера који је заснован на рачунарском моделирању. Метода се базира на дефинисању запремине откопаног материјала за један пролаз стреле роторног точка, времена потребног за пролаз и геометрије блока који се откопава.

Други део обухвата утврђивање специфичне потрошње електричне енергије у процесу копања, која је одређена у лабораторијским условима, на узорку материјала са анализираним површинског копа. Недостатак оваквог приступа је што не узима у обзир похабаност резних елемената роторног багера.

András и остали [41] развили су графо–нумеричку методу за одређивање снаге за процес копања роторних багера. Метода се заснива на моделирању параметара одреска, како би се смањила потрошња електричне енергије, уз повећање количине откопане масе, истовремено користећи минималну снагу за процес копања.

Li & Yuan [42] изложили су нови приступ процене потрошње електричне енергије којим се врши оптимизација процеса машинске обраде. Представљен је нумерички модел који процењује потрошњу енергије процеса обраде на основу снаге вретена и брзине уклањања материјала. Валидација модела је извршена експерименталним подацима.

Zhou и остали [43] разматрали су значај енергетске ефикасности алатних система као предуслова за уштеду енергије у производњи. Обавили су детаљан преглед литературе, након чега је истакнуто да се потрошња електричне енергије односи на мапирање односа потрошње енергије и параметара обраде, што одражава енергетску ефикасност машина из перспективе ефикасног улаза и излаза. Тачност модела тренутне потрошње електричне енергије може се побољшати увођењем корелацијске анализе машинских алата, делова и стања обраде.

Carvalho и остали [44] развили су методологију која је смањила време обраде лица блока мотора са унутрашњим сагоревањем. Поступак утрђивања параметара обраде заснивао се на минимизирању потрошње електричне енергије и вибрација резног алата, узимајући у обзир путању и дубину резања алата. Имплементирана нова методологија је драстично продужила животни век резног алата, што је додатни допринос развијене методологије.

Popescu и остали [45] развили су графо–аналитичку методу за одређивање снаге мотора погона за копање роторног багера. Виртуелни модел је креиран у програмском пакету Solidworks [46]. Предност примене виртуелних модела за анализу рада компоненти роторних багера је позитиван утицај на специфичну потрошњу електричне енергије, повећање производње и утовара материјала.

Ladányi & Sümegi [47] су анализирали потрошњу електричне енергије погона за копање роторног багера. Мерења са новим кашикама, обликом резних елемената и обновљеним резним ивицама наваривањем, уз употребу материјала отпорног на хабање, доводе до мање потрошње електричне енергије у процесу копања.

He и остали [48] развили су модел за предикцију потрошње енергије механичких процеса који је заснован на емпиријским моделима и компјутерски потпомогнутој производњи [49] (*eng. Computer Aided Manufacturing*). Извори потрошње енергије подељени су на енергију кретања помоћних уређаја и енергију унутрашњих кретања. Резултати показују да је предложени модел ефикасан у предвиђању потрошње енергије механичких процеса са високим нивоом тачности.

He и остали [50] истичу значај потрошње енергије у процесима машинске обраде. У раду је дефинисана корелација између нумерички управљаних кодова и компоненти машине алатке које троше енергију. Свака компонента се процењује узимањем у обзир њених техничких карактеристика и параметара преузетих из нумеричких контролних кодова. Развијен је модел за процену потрошње енергије рачунањем укупне потрошње енергије компоненти преко NC [51] (*eng. Numerical Control*) програма.

2.4 Мерење вибрација на роторним багерима и другим погонима великих снага

Chinchusak & Pannawan [52] доказали су да се са **повећањем амплитуде вибрација, повећава и потрошња електричне енергије**. Почетна хипотеза кроз развијену једначину у потпуности одговара експерименталним истраживањима са великим нивоом поверења.

Atmаса A. & Atmаса N. [53] су у оквиру свог истраживања пратили кретање вибрација на моторима млина у индустрији цемента у зависности од брзине пуњена куглица, садржаја влаге и величине сировине за пуњење. Резултат истраживања указује на чињеницу да је **величина вибрација у директној вези са потрошњом енергије**. Предузимање одговарајућих активности (смањење величине сировине и садржаја влаге) генерисало је нижи ниво вибрација за 12 %, а самим тим и потрошње енергије за 2,16 %, у односу на вредности пре спроведених корективних мера, што је донело **уштеду енергије по тони произведене сировине**.

Elkhatib [54] је развио методологију за израчунавање **изгубљене енергије услед вибрација**. Извршено је поређење са стварно измереним губицима енергије. Из овог поређења се предлаже рационална методологија за предвиђање губитака енергије за вибрационе машине.

Zuber и остали [55] су истакли да се развојем информационих технологија створио простор за примену тзв. удаљеног надгледање стања опреме. Аутори су у раду изнели читав низ предности овог приступа које се заснива на мерењима оптерећења и вибрација.

Czmoschowski и остали [56] су извршили анализу вибрација издувног вентилатора у блоку електране. Током експлоатације вентилатора уочене су прекомерне вибрације које су онемогућавале правилан рад. Да би се идентификовали узроци прекомерних вибрација, извршени су FEM [57] (*eng. Finite Element Method*) прорачуни вибрација канала за димне гасове, склопа вратила и мерења на објекту истраживања.

На основу анализе вибрација, уочена је појава резонантних вибрација канала за димне гасове и склопа вратила. Прорачуни извршени помоћу ласерског виброметра потврдили су појаву вибрација са фреквенцијама сличним фреквенцији изазваној кретањем ротора издувног вентилатора. Резултати су допринели модификацији склопа вратила и додатног укрућења зидова усисних и потисних канала димних гасова.

Więckowski и остали [58] приказују поступак мерења вибрација и анализу добијених података који се акумулирају у кабину руковоаца роторног багера. У првом делу, дати су подаци о избору и локацији мерних места. Пример се односи на роторни багер SchRs1200, који је ангажован на површинском копу у Пољској. Услови радне средине дефинисани су у описима мерних серија. Добијени подаци се приказују на два начина. Први показује временске таласне облике за сваки мерни канал. Други представља спектре FFT [59] (*eng. Fast Fourier Transform*) након филтрирања сигнала. Добијени подаци се користе за развој алгорита за контролу вибрација.

Więckowski и остали [60] су приказали алгоритам за идентификацију и контролу вибрација кабине руковоаца роторним точком. Аутори предлажу полуактиван систем пригушења вибрација који се заснива на магнето–реолошким пригушивачима и на наменском алгоритму контроле учења (ILC) [61] (*eng. Iterative Learning Control*).

Ghazali & Rahiman [62] наводе да анализа вибрација представља ефикасну методу за праћење стања и перформанси машине јер садржи информације које се односе на извор (узрок) отказа и његову озбиљност. Правовремена реакција радника на одржавању може спречити појаву неравнотеже, хабања и других оштећења елемената.

У раду је дат преглед најсавременијих метода мерења и анализе вибрација, са освртом на предности и недостатке приказаних метода, као и технике за препознавање грешака применом вештачке интелигенције.

Vishwakarma [63] и остали истичу анализу вибрација као ефикасну методу за праћење стања ротационих машина. Технике издвајања сигнала вибрација имају битну улогу у дијагностици ротирајућих машина. Кроз рад је дат преглед најчешће примењених метода издвајања вибрационих карактеристика примењених на различите ротационе машине.

Graja и остали [64] су у оквиру свог истраживања поставили пиезоелектрични сензор на индустријски планетарни редуктор у вертикалном правцу, да би се добили сигнали у временском домену. Рад представља нов приступ одређивања динамичког понашања редуктора у временском домену. Извршена анализа указује на карактеристичне фреквенције, што представља иновативно решење.

Dziedziech и остали [65] су представили хибридни приступ анализе вибрација, комбиновањем резултата две оперативне модалне анализе и експерименталне модалне анализе са циљем унапређења квалитета модела. Предложени приступ је тестиран на подацима добијеним од турбогенератора, снаге 215 [MW]. Овакав приступ омогућава дијагностиковање прекомерних нивоа вибрација машине и корективни утицај на излазне перформансе турбогенератора.

Gottvald [66] је извршио експерименталну анализу мерења природних фреквенција роторног багера и упоредио добијене резултате са креираном нумеричком симулацијом применом софтверског пакета Ansys [67]. Разлог оваквог приступа је чест случај да нумеричке симулације приликом пројектовања не одговарају реалним структурама.

Gursky и остали [68] направили су синтезу пројектних параметара двофреквенцијског инерцијског вибрационог система према наведеним карактеристикама снаге. На основу математичког модела, изведени су параметри променљиве периодичне силе за две угаоне брзине 157 и 314 [rad/s] и њихови односи 0,5 и 2. У случају односа тренутних угаоних брзина 0,5 резултујући вектор силе је 2,0–3,5 пута већи него за однос 2.

Утврђено је да при односу угаоних брзина 0,5, други хармоник убрзања преовлађује на 50 [Hz], док у односу 2, први хармоник има већу амплитуду на 25 [Hz]. За прву варијанту, снага не зависи од почетног угла између дебаланса, а код друге варијанте варира. Угао ротације од неравнотеже утиче на путању центра масе и фазе хармоника, али не утичу на њихову амплитуду. Због таквих динамичких карактеристика, инерцијални погон са два мотора омогућава вибрационим машинама да раде на ширем опсегу фреквенција и амплитуде.

Milovančević и остали [69] извршили су анализу вибрација пумпног агрегата. У оквиру система, постоје четири позиције које могу имати штетан утицај на рад пумпног агрегата. Модел чине методе меког рачунарства јер наведени приступ не подразумева познавање модела вибрација, већ је довољно да се скупе парови улазних и излазних података кроз извршено експериментално мерење. Извршено је рангирање утицаја вибрација на мерним позицијама пумпног агрегата за три различите методе меког рачунарства и дата дискусија о добијеним резултатима.

2.5 Динамика и интегритет конструкције роторних багера

Ѓијатовић и остали [70] развили су методологију за одређивање броја кашика на роторном точку на основу динамичког одзива горње градње роторног багера. На основу граничних вертикалних и бочних убрзања средишта кашике, прописаних DIN 22261–2 стандардом, одбачено је 14 од 16 анализираних варијанти дизајна, чиме се смањује сет могућих решења на два; пројектовану варијанту са 17 кашика и варијанту са 20 кашика. Закључци о валидности дизајна изведени су на основу анализе динамичког одзива референтних тачака.

Арсич и остали [71] извршили су анализу динамичког оптерећења заварене конструкције стреле роторног точка багера SchRs 650/5×24 са променљивом амплитудом вибрација, добијеном експерименталним истраживањем са циљем утврђивања чврстоће конструкције. Спољашња оптерећења одређена су на основу измерених вредности јачине струје погона за копање, чиме су добијена променљива излазна оптерећења. Корелација између снаге мотора погона за копање и производње багера зависно од специфичног отпора материјала на копање одређује напрезање на кашици. У првом делу рада дати су резултати теоријски и експериментално одређених природних и принудних осцилација носеће конструкције за различите експлоатационе услове. Деформације ε_i које су одређене тензометријским мерењима на вратилу роторног точка, претворене су у тангенцијалне напоне увођењем модула еластичности и *Poissonovog* односа, који, уз поларни момент инерције попречног пресека, дефинише момент ротације на вратилу роторног точка.

Рореску и остали [72] бавили су се модалном анализом и анализом фреквентног одзива стреле роторног багера добијене симулацијом на основу виртуелног модела постојеће стреле. Стрела роторног багера је подвргнута великим радним оптерећењима које карактерише изражена циклична, динамичка и стохастичка варијабилност. Класични приступ који препоручују стандарди и норме не може предвидети појаву отказа изазваних вибрацијама, које стварају замор услед променљивог оптерећења у времену и деформације које настају резонантним вибрацијама неких конструктивних елемената. Спољашње оптерећење представљају силе које делују на роторни точак у току рада багера. На овај начин могу се узети у обзир конструктивне карактеристике – код модалне анализе и вибрациони режим – код анализе фреквентног одзива. Модел је применљив, како у фази пројектовања нових конструкција стреле роторног точка, тако и у фазама модернизације постојећих конструкција.

Андрусзко и остали [73] су анализирали недостатке носеће конструкције роторног точка роторног багера SchRs4600. Аутори су разматрали случајеве оштећења ове врсте конструкција која су се дешавала у току периода коришћења. Са циљем утврђивања оштећења носеће конструкције роторног багера, изведена су неструктивна испитивања визуелним и магнетним методама. Утврђена су оптерећења у раду машине која доводе до појаве замора материјала. Мерења су изведена због верификације нумеричког модела. Анализа чврстоће је спроведена коришћењем методе коначних елемената [57]. Узрок заморних пукотина је утврђен мерењима и нумеричким прорачунима.

Петровић и остали [74] извршили су анализу динамичког понашања стреле роторног багера SchRs740. Дужина стреле је повећана за један до десет метара, са кораком промене од једног метра. Највећи продужетак је дефинисан са аспекта структурне изведбе, динамичког понашања и поља напрезања. Метода коначних елемената [57] је коришћена са циљем одређивања сопствене фреквенце осциловања, померања и напрезања конструкције.

2.6 Примена DIN ISO 10 816–3 стандарда при мерењу вибрација

Deore & Khandekar [75] применили су модел заснован на фази логици са LabVIEW алатом, како би класификовали стање машине коришћењем DIN ISO 10816–3 [2] стандарда. Развијени модел је способан да класификује стање машина као, „машине новопуштене у рад“, „неограничено операција“, „ограничено операција“ и „дошло је до оштећења“. Модел се односи на електричне машине које имају широку примену као извори механичке енергије погона који се користе у различитим индустријама.

Robichaud [76] у оквиру рада даје преглед референтних стандарда који се користе при мерењу вибрација. Постоје бројни стандарди за вођење или управљање праћењем и анализом вибрација, укључујући неке који успостављају класификације како треба да се врше мерења и како анализирати добијене податке.

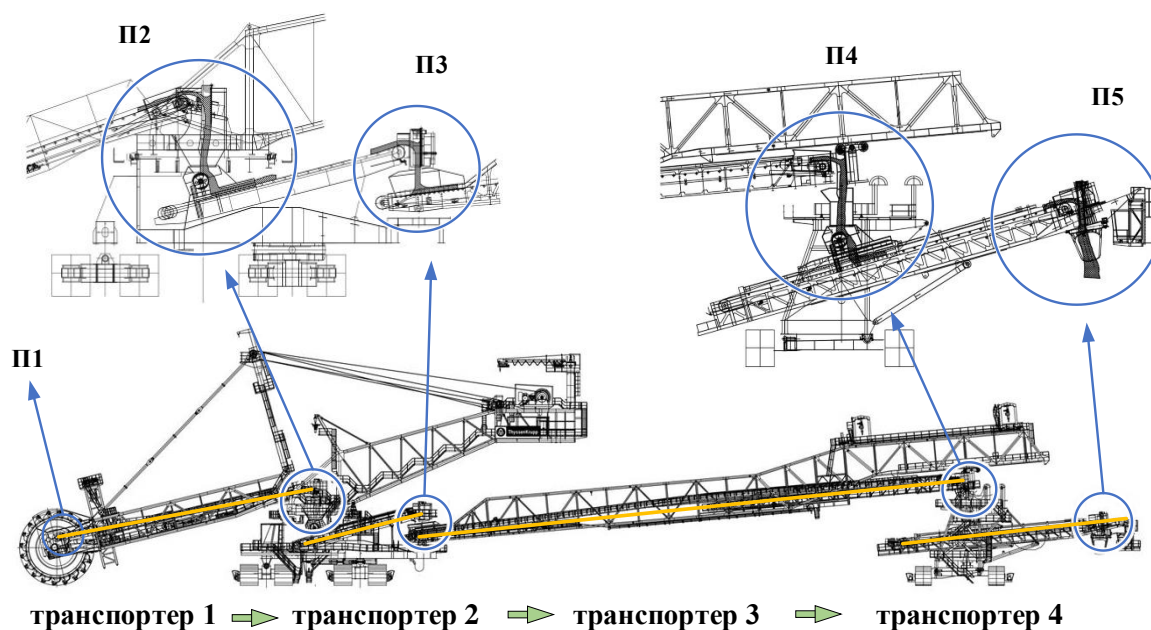
Tomaszewski & Rusinsky [77] наводе да се компресори према стандарду VDI 3836 који је подржан стандардом DIN ISO 10816–3 [2] деле у четири групе. У раду је извршена процена техничког стања појединих уређаја на основу регистрованих дијагностичких симптома који су упоређени са дозвољеним границама. Дијагностика је обављена помоћу бежичног система WiViD. Овај систем је јединствено дизајнерско решење, у коме је неколико функција подељено и обављају их по два одвојена уређаја. Поменуте функције уређаја су руковање подацима, обрада, њихова анализа и презентација.

Osada и остали [78] анализирали су применљивост предложених критеријума вибрација на пумпама датих у оквиру DIN ISO 10816–3 [2] стандарда. Применљивост ISO критеријума за процену нивоа вибрација пумпи доказана је теренским истраживањима. Утврђено је да су границе евалуационих зона задовољавајуће и прихватљиве за дугорочан рад пумпи.

3. РОТОРНИ БАГЕРИ

Роторни багери су самоходне машине континуалног дејства које се на површинским коповима користе за откопавање отривке и корисне минералне сировине [5]. Материјал се откопава ведрицама које су причвршћене на ободу роторног точка. Добијање одреска из масива омогућено је истовременим обртањем роторног точка у вертикалној и стреле роторног точка, заједно са платформом у хоризонталној равни [5].

Обртањем роторног точка, ведрице наилазе у зону истоварног сектора, где се материјал празни на пријемни транспортер са гуменом траком [5]. Материјал иде на друго пресипно место у обртној оси и даље редом, зависно од броја пресипних места предаје истоварном транспортеру [5]. Континуалан рад роторних багера огледа се у томе да се са откопавањем материјала истовремено врши његов транспорт и утовар у средства транспорта. На слици 3.1 приказана су пресипна места на роторним багерима [5].



Слика 3.1. Пресипна места на роторним багерима [6]

Роторни багери остварују капацитете који се налазе у широком интервалу. На површинским коповима Електропривреде Србије, теоријски капацитети роторних багера су од 1260–6600 m³/h. Капацитет роторног багера из студије случаја – SRs2000.32/5+VR износи 6600 m³/h. Представља машину највећег јединичног капацитета.

За копање материјала, примењују се ведрице са резном ивицом, ведрице са допунским резним елементима (зубима) и ведрице са међурезачима [5]. Отпор материјала на копање зависи од радне средине у којој машина ради. Креће се у границама између 600 и 1000 N/cm (по дужини резне ивице). У специфичним случајевима, вредност отпора на копање може имати такав интензитет да доведе до лома резних елемената.

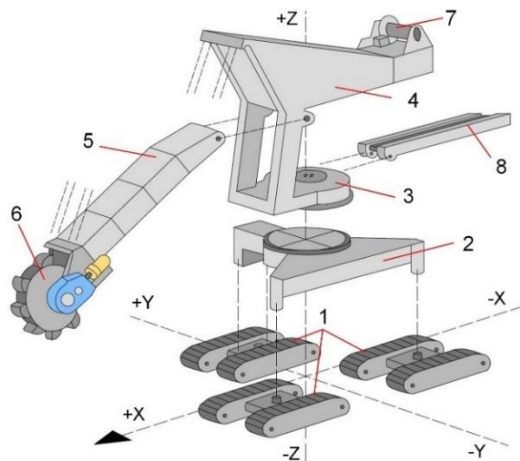
У зависности од отпора материјала на копање, сила копања по јединици површине може имати интензитет од 0,7 [N/mm²] до 2 [N/mm²] и више.

За погон роторног точка у примени су један или више мотора. Роторни багер SRs2000.32/5+VR за погон користи два мотора, инсталисане снаге по 670 [kW].

3.1 Конструкција роторних багера

Конструкција роторних багера зависи од захтеваног капацитета, начина утовара материјала и услова рада [5]. Од значаја су и нагиби етажних косина, чврстоћа материјала који се откопава и дозвољени специфични притисак на тло. Облик и конструкција роторних багера морају се прилагодити условима ефикасног одржавања [5].

Роторне багере чине основни и помоћни уређаји [5]. У основне уређаје сврставају се радни, погонски уређај и уређај за управљање. Помоћни уређаји су уређаји за подмазивање, загревање, расвету, потребе техничког одржавања, ремонта, итд. На слици 3.2 приказане су основне компоненте роторних багера [5].



- 1 – гусенични транспортни механизам;
- 2 – доња градња;
- 3 – ослоно–обртни део;
- 4 – горња градња са противтегом;
- 5 – стрела роторног точка;
- 6 – роторни точак;
- 7 – систем за дизање и спуштање стреле роторног точка; и
- 8 – истоварна стрела.

Слика 3.2. Основне компоненте роторних багера [5]

Роторни багери су састављени од низа подсистема, при чему сваки извршава одређену функцију. Основни подсистеми су [5]:

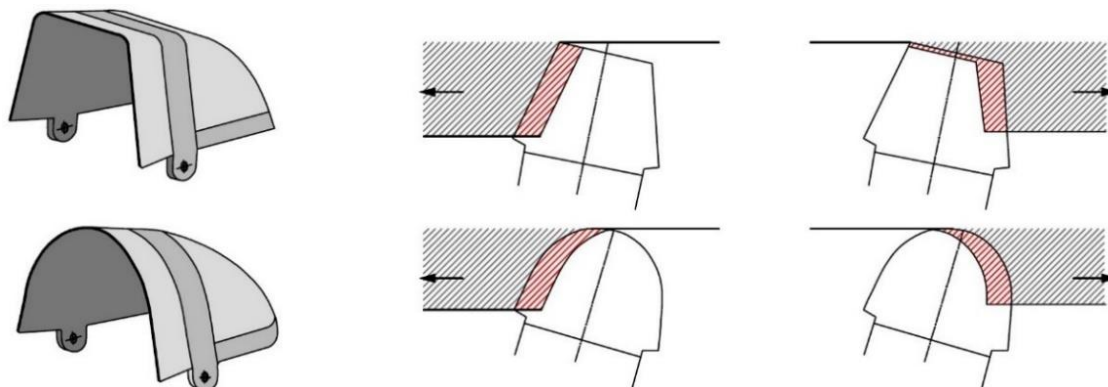
- подсистем за копање;
- подсистем за окретање горње градње;
- подсистем за кретање багера;
- подсистем за подизање/спуштање стреле; и
- подсистем транспорта материјала.

3.2 Радни орган роторних багера

Радни орган роторних багера је *стрела роторног точка* и *роторни точак* са припадајућим елементима и погоном (погонски мотор, редуктор, спојница, тело точка, ведрице, склизнице, итд.) [5]. Основни показатељи рада роторних багера (капацитет багера, специфична потрошња електричне енергије, тежина, итд.) одређују се на основу димензијама роторног точка. Основни параметри роторног точка, поред теоретског капацитета Q су [5]:

- број ведрица z ;
- запремина ведрица q ;
- угаоно растојање између ведрица β_z ;
- угаона брзина ω ;
- пречник роторног точка по резним ивицама D ; и
- пречник роторног точка по омотачу D_o .

Роторни точак чини заварени безћелијски точак са хабајућим лимовима. Налази се на вратилу које је улежиштено на стрели котрљајним лежајевима. По ободу роторног точака су причвршћене ведрице. Према облику, ведрице могу бити: трапезне, лучне и правоугаоне (ретко у употреби). На слици 3.3 приказан је изглед трапезне и лучне ведрице и облик формираног одреска [5].



Слика 3.3. Приказ трапезних и лучних ведрица и изглед одресака [5]

Ведрице могу имати затворено или отворено дно које је израђено са ланчастом мрежом. На слици 3.4 приказане су изведбе дна ведрица роторних багера [5].



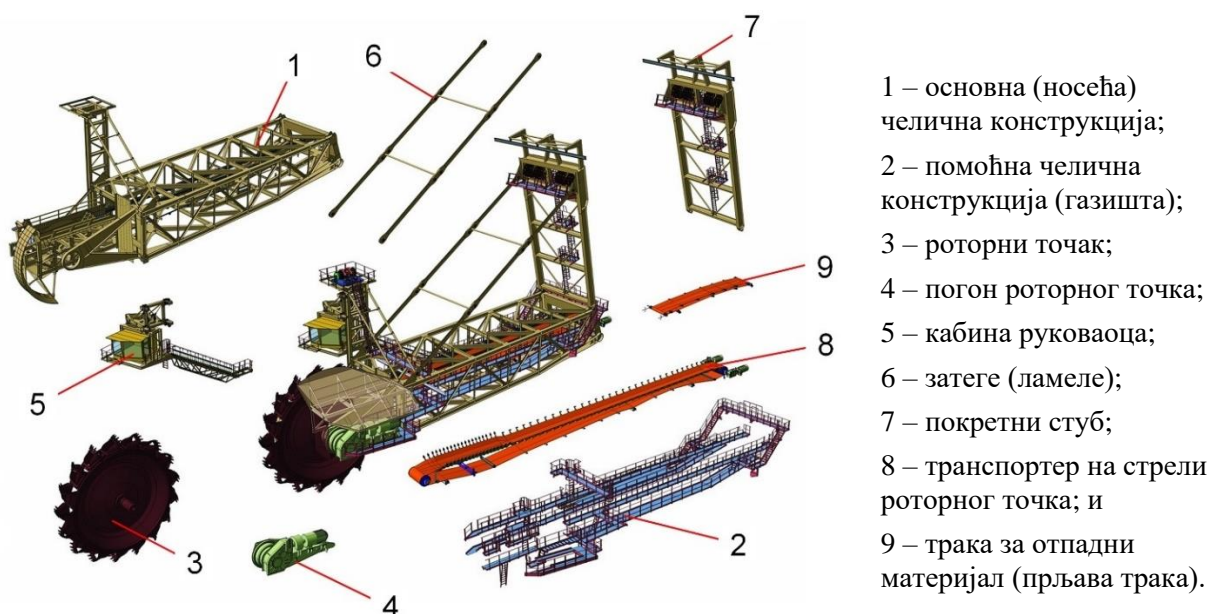
Слика 3.4. Изведбе ведрица: *a* – затворено дно; *b* – отворено дно са ланцима

Најчешћи недостаци ведрица у експлоатацији су следећи [79]:

- појава напрстина у зони ушке;
- појава напрстина на телу ведрице;
- пуцање отвора за чауре на ушкама;
- интензивно хабање ланчaste завесе и пуцање ланаца;
- просипање откопаног материјала;
- лоше пражњење ведрица; и
- хабање ножа ведрице услед неадекватног положаја и распореда „цепова“ за зубе.

Све наведено узрокује непланиране застоје услед замена ведрица и пад коефицијента временског искоришћења багера [79].

Стрела роторног точка представља најоптерећенији део конструкције роторних багера и припада главној носећој конструкцији [5]. Технолошки процес рада роторних багера састоји се од главних и помоћних кретања. Главно кретање чине обртање роторног точка и кружно кретање горње градње [5]. Под помоћним кретањем подразумева се кретање багера у правцу наступа и промена положаја роторног точка у вертикалној равни, промену подетаже или маневрисања роторним точком код обављања послова одржавања (замена ведрица, резних елемената, итд.) [5]. Дизањем и спуштањем стреле врши се заузимање жељеног положаја роторног точка. Елементи за копање и транспорт материјала уграђени су на основној конструкцији стреле, као и одговарајуће помоћне конструкције (конструкција газишта, пресипних места, конструкција за вешање кабине багеристе, инсталације и уређаји неопходни за рад багера) [5]. На слици 3.5 приказана је конструкција радног органа роторних багера [5].



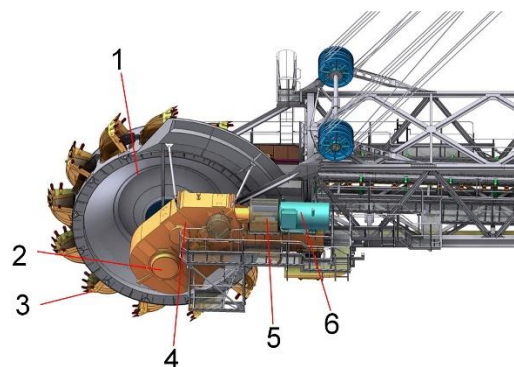
Слика 3.5. Конструкција радног органа роторних багера [5]

Основни елементи роторног точка су [5]:

- носећа конструкција (1);
- вратило роторног точка са лежајевима (2); и
- ведрице са резним елементима (3).

Погонски механизам роторног точка чине:

- извор механичке енергије, електромотор (6);
- редуктор за погон роторног точка (4); и
- спојница за везу електромотора и редуктора (5).



Слика 3.6. Елементи роторног точка [5]

3.3 Резни елементи роторних багера

У зависности од врсте материјала који се откопава роторним багерима, ведрнице се опремају различитим резним елементима [5]:

- ножевима;
- угаоним сечивима; и
- зубима.

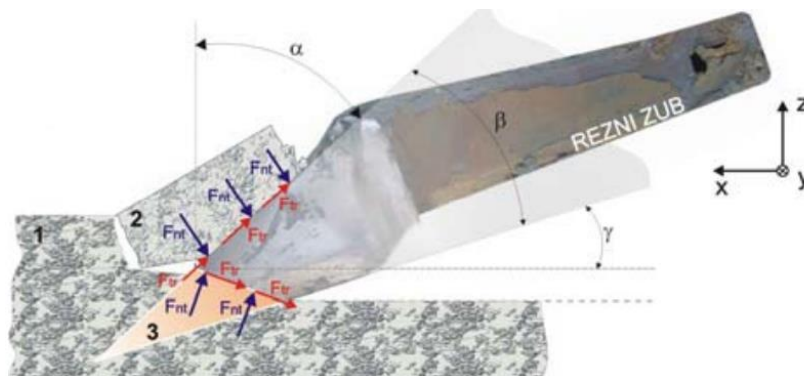
Када се откопава материјал мањег отпора на копање, као резни елементи користе се *ножеви*. Ивице ножа се ојачавају наваривањем тврдим електродама чиме се штите од хабања. Виши степен хабања присутан је код откопавања песка, као материјала са израженим абразивним дејством [5].

Правилним избором материјала продужава се радни век зуба. Зуб се може заштитити наваривањем, уметањем плочице од тврдог метала [80], [5]. Ради постизања задовољавајућег квалитета, зуби се израђују ливењем, квалитетним ливовима отпорним на хабање. Врста материјала која се откопава има знатан утицај на радни век зуба [5], [80]. Из тог разлога се врше испитивања материјала на конкретном површинском копу где ће багер радити. Тело зуба мора имати одговарајућу чврстоћу и жилавост јер је зуб у току рада изложен силама које у првом реду настају услед отпора материјала копању. Тело зуба се ломи или савија у случају лоше изабраног материјала од кога се зуб прави [5], [80].

За откопавање чвршћих материјала ведрнице се опремају *зубима* на местима која су посебно оптерећена [5], [80]. Зуб као елемент склопа ведрнице има двоструку функцију. Прва је разарање материјала, друга његов ископ из масива. Код примене зуба као резних елемената, резна сила се концентрише на малу дужину што омогућава лакше продирање ведрнице у масив. Најважнији захтеви који се постављају пред зубе су [5], [80]:

- висока чврстоћа и отпорност на хабање;
- релативно лака замена; и
- повољна геометрија са аспекта резања.

Геометријски параметри зуба су: дужина резне ивице, слободан угао α , угао оштрице β , предњи угао γ . Угао резања чини збир слободног угла α и угла оштрице β . Угао резања се обично креће у границама од 28 до 33° , уз слободан угао резања од 5 до 12° [5], [80]. Веће вредности слободног угла резања односе се на тврђе материјале. Мањи углови резања позитивно утичу на отпор копању, али се истовремено зуб брже хаба. На слици 3.7 приказано је оптерећење зуба у процесу копања [5], [80].



Слика 3.7. Оптерећење зуба у процесу копања [81]

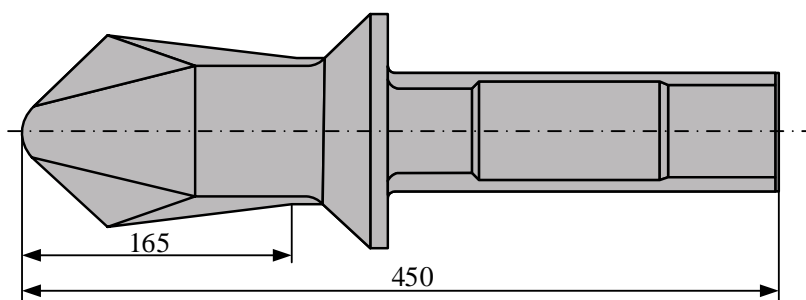
Геометријска идентификација димензија резних елемената представља комплексан процес [81]. Неопходно је познавање спољашњег оптерећења које потиче од карактеристичних делова роторног точка (ведрице, зуби, нож, итд.) [81]. За дефинисање оптерећења по једном зубу, потребно је установити како се оптерећење ведрице дели на резне елементе, имајући у виду да не учествују сви подједнако у процесу резања [81].

3D моделирање у великој мери олакшава процес конструисања резних елемената [81]. Методом коначних елемената [57] могуће је задавање спољашњег оптерећења, слично експлоатационом у каквом ће зуб радити, чиме се врши провера слабих места и њихово отклањање пре пуштања у рад.

Применом савремених метода конструисања смањују се трошкови, у фази тестирања се користи рачунар, уместо тестирања у процесу експлоатације [81]. Процес се одвија брзо јер се могу одбацили концепти који нису задовољавајући, чиме се смањује број циклуса развоја производа [81].

Метода коначних елемената [57] омогућава да се из низа варијантних решења одабере оптимално [81]. Одабрана структура финалног производа се верификује у експлоатацији. На тај начин се добија повратна информација о развијеном производу, чиме је могуће направити корекције према радним условима [81].

Због честог лома зуба и ремонта ведрица у раду потребно је да се замена зуба врши лако. Тело зуба се ставља у „деп“ који се налази на ведрици и учвршћује клином, ређе завртањском везом [5]. Лом зуба генерише велике трошкове. Приликом њихове замене стоји комплетан експлоатациони систем. Повећана учесталост лома зуба среће се у ситуацијама када се у масиву нађу камени самци или заостали делови конструкције машина [5]. На слици 3.8 приказан је зуб роторног багера SRs2000.32/5+VR.



Слика 3.8. Зуб роторног багера SRs2000.32/5+VR

3.3.1 Технолошки поступци израде резних елемената

Зуби роторних багера се најчешће израђују технолошким поступком *ливења у пешчаним калупима* са додатном термичком обрадом. Зависно од материјала за израду зуба, технолошких и механичких особина, користе се следећи поступци термичке обраде [82]:

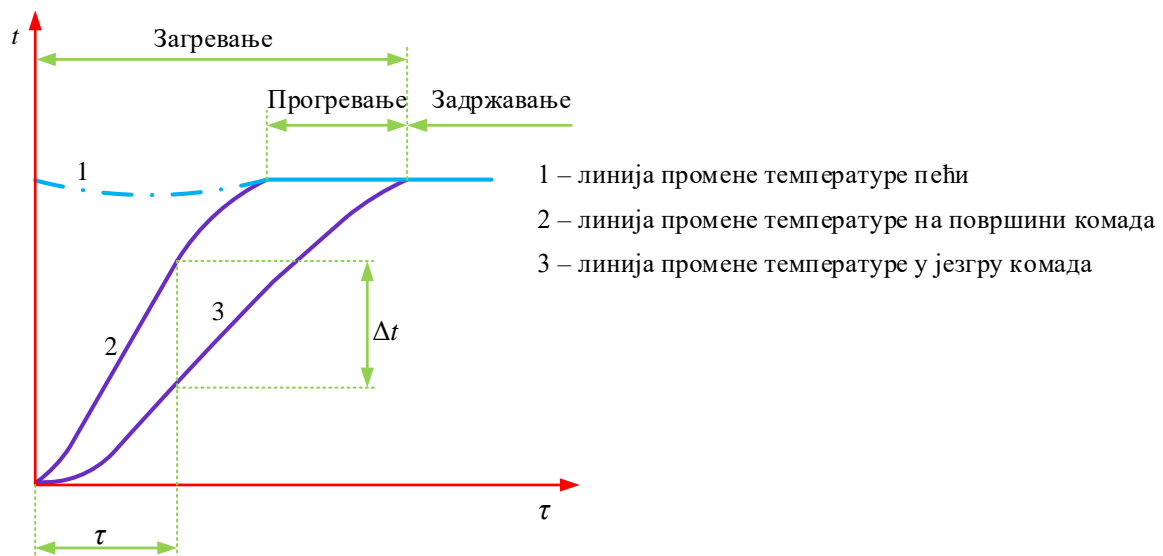
- *каљење* и *средње* или *ниско отпуштање* (у случајевима када се користи високолегирано ливено гвожђе или високолегирани челик легиран хромом или неким другим елементима); и
- *побољшање* (у случајевима када се зуби израђују од нисколегираног V, Mo, Cr и Mn челика или неких других врста челика).

Зуби се ливењем израђују на тај начин што се течни метал улива у одговарајући простор – калуп. Након процеса кристализације метал задржава облик калупа. Очврснути метал се назива одливак. Ливење може бити кокилно, центрифугално, гравитационо, ливење под притиском и ливење у пешчаним калупима [83]. Подела је формирана у зависности од начина уливања течног метала у калуп (центрифугално, гравитацијом, под притиском) и врсте калупа (метални, шкољкаст, пешчани) [82], [83].

Циљ накнадне термичке обраде је побољшање једног или више својстава материјала. Поступак се састоји од загревања материјала на одређену температуру, задржавања на тој температури и хлађења, претходно дефинисаном брзином. За хлађење се користе следећа средства [82]:

- *уље*, за средње легиране челике;
- *вода* и *водени раствори*, за угљеничне и нисколегиране челике;
- *гасови* (ваздух или заштитни гасови) за брзорезне челике; и
- *хладне металне плоче*, које делују додиром.

Након процеса термичке обраде, својства материјала су таква да је он у стању да издржи радна оптерећења без оштећења. Врста термичке обраде бира се тако да не дође до већих промена мера и облика предмета. Термичка обрада зуба роторних багера за крајни циљ има повећање отпорности на хабање и жилавости. На слици 3.9 дат је дијаграм промене температуре са временом [82].



Слика 3.9. Дијаграм промене температуре са временом [82]

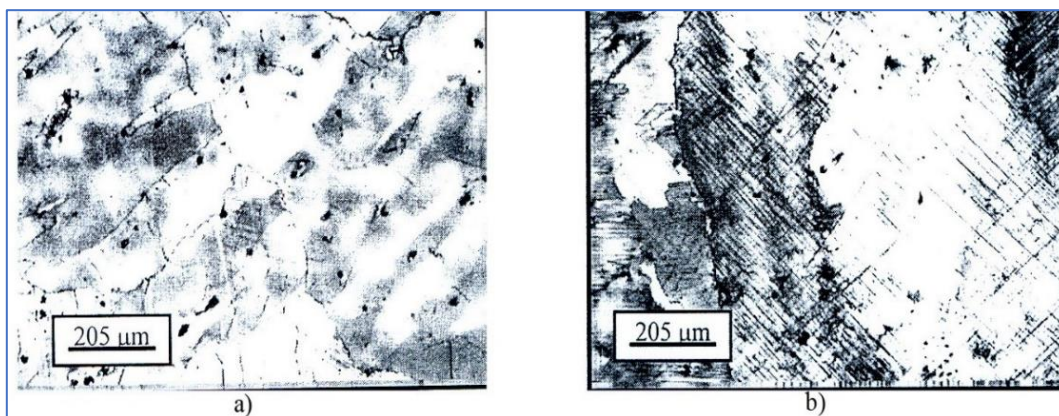
3.3.2 Материјали за израду резних елемената

Зуби се израђују од следећих материјала [82]:

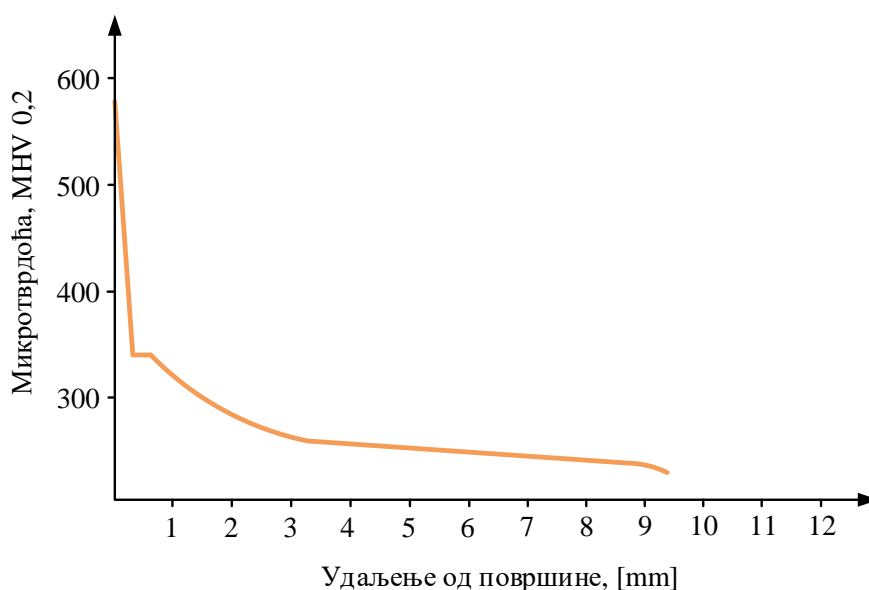
- високолегираних манганских челика отпорних на хабање (Ѓ.3160 и други);
- нисколегираних манганских челика отпорних на хабање (Ѓ.3134 и други); и
- високолегираних хромираних челика.

Када се у раду зуба јављају удари, за израду се користе високолегирани мангански челици аустенитне структуре, нпр. челик Ѓ.3160, који се састоји од 1,2 % С и 12,5 Мп. Структура челика Ѓ.3160 након процеса ливења састоји се од аустенита и знатне количине мешовитих карбида који су распоређени по границама аустенитских зрна, чиме се смањује жилавост и чврстоћа. Већа количина карбида захтева да се ливени делови накнадно термички обраде растворним жарењем на температурама од 1050–1100⁰ С са хлађењем у води. Хлађење у води доводи до разлагања карбида и добијања потпуно аустенитне структуре челика. Обрада резањем оваквих челика је врло тешка [82].

Процесом експлозије постиже се отврдњавање површинског слоја високолегираних аустенитских челика. Микроструктура челика, пре и након отврдњавања приказана је на слици 3.10, док је на слици 3.11 дата расподела тврдоће у површинском слоју [82].



Слика 3.10. Микроструктура Ѓ.3160 у гашеном стању (а) и након отврдњавања (b) [82]



Слика 3.11. Расподела тврдоће у површинском слоју [82]

У ситуацијама када је примена високолегираних манганских челика неекономична, као материјали за израду зуба користе се нисколегирани челици, нпр. \check{C} .3132 са 0,5 % С и 1,8 % Мп. Њихова отпорност на хабање заснива се на отпорности фаза, насталих отпуштањем мартензита. Код оваквих челика, манган делом улази у карбид гвожђа, а делом у чврсти раствор. Поред отпорности на хабање, ова врста челика у каљеном и отпуштеном стању има и високу пластичност [82].

Високолегирани хромирани челици своју отпорност на абразију заснивају на структури, која у саставу има висок садржај карбидне фазе, високолегираног мартензита, уз учешће заосталог аустенита. Добри резултати код израде висококвалитетних зуба за откопавање откривке, постижу се применом челика са више од 1,65 % С и више од 12 % Сr. Овакви челици припадају групи ледебуритних. Одликује их висока отпорност на хабање, постојаност резне ивице, облика и димензија. Постојаност резне ивице постигнута је учешћем до 30 % карбидне фазе (карбида хрома и легираног цементита) у структури. Ови челици се, поред хрома, неретко легирају са W, Мо и V, што додатно повећава способност резања и отпорност на хабање [82].

За израду зуба роторних багера ангажованих на откопавању откривке на површинском копу Тамнава–Западно поље користи се више врста челика, зависно од препоруке произвођача и резултата изведених истраживања. У табlici 3.1 приказани су челици који су показали најбоље резултате у експлоатацији [82].

Меродавни критеријуми су отпорност на хабање (дефинисана материјалом), геометрија зуба и положај на ведрици. Отпорност на хабање омогућава ефикасан рад багера у дужем временском интервалу. Највећи капацитет багера, најмањи отпор материјала на копање и потрошња електричне енергије су у случају нових резних елемената.

Таблица 3.1. Карактеристике челика за зубе на откривци [82]

Зуби од челика \check{C} .4782 (DIN ознака: 42CrMoS4)			
ХЕМИЈСКИ САСТАВ	2–2,5 % С	МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ	$R_m = 950$ [N/mm ²]
	0,5–0,6 % Si		$R_{eH} \geq 700$ –800 [N/mm ²]
	0,6–0,75 % Mn		A = 7–8 %
	14,8–15,7 % Cr		Z = 20–22 %
	max 0,02 % S		KV = 24–25 [J]
	max 0,02 % P		
Режим термичке обраде: нормализација и отпуштање			
Зуби од челика \check{C} .4757 (DIN ознака: X50CrVMo51)			
ХЕМИЈСКИ САСТАВ	2,4–2,5 % С	МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ	$R_m = 955$ [N/mm ²]
	0,4–0,45 % Si		$R_{eH} = 720$ [N/mm ²]
	0,54–0,56 % Mn		A = 8 %
	14,5–15,5 % Cr		Z = 20–22 %
	1,9–2 % Мо		KV = 24–25 [J]
Нормализација и отпуштање на тврдоћу од 60–62 [HRC]			

3.3.3 Хабање резних елемената

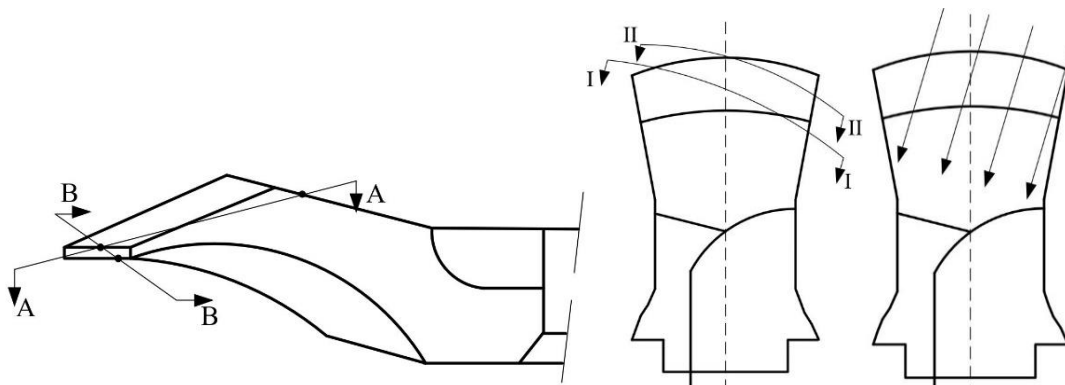
Резни елементи су у процесу копања изложени абразивном хабању комбинованим са динамичким оптерећењем [84]. Конструкција резних елемената је сложена, имајући у виду да оптерећење и његова расподела нису познати у довољној мери. Интензитет хабања зависи од карактеристика материјала који се копа, режима рада багера и отпорности на хабање материјала од којег су резни елементи направљени [81].

Абразивно хабање у комбинацији са ударним оптерећењем зуба доводи до појаве прогресивног трошења. Резни елементи не могу правилно да обављају своју функцију, што има директан или индиректан утицај на *потрошњу енергије процеса копања и специфични отпор материјала на копање* [81].

Абразивно хабање резултира одношењем материјала са површине зуба. Након „скидања“ једног слоја, утицају хабања се излаже наредни слој, чиме се он „скида“, итд. Абразивне честице на хабајућим површинама изазивају огреботине у виду бразди које су праћене пластичним деформацијама и течењем материјала [81].

Све наведено има за последицу смањење расположивости због честих замена резних елемената, што се одражава на повећање трошкова услед стајања комплетног система. Трошкове услед хабања материјала зуба није могуће елиминисати, али се могу значајно смањити. Основни недостаци зуба у процесу рада су (слика 3.12.) [81]:

- неадекватна геометрија резног дела (углови резног клина су погрешно усвојени или је ширина оштрице неодговарајућа);
- неадекватан начин на који је зуб постављен на ведрицу (број и распоред зуба на ведрици, осигурање и фиксирање, итд.);
- последица процеса израде зуба (лоша технологија израде, пропусти у процесу ливења и хлађења); и
- неадекватан облик зуба (дужина зуба је превелика, мали отпорни момент критичних пресека, гомилање материјала са једне, што индукује слабљење зуба са друге стране, превелика крост, жилавост и хабање).



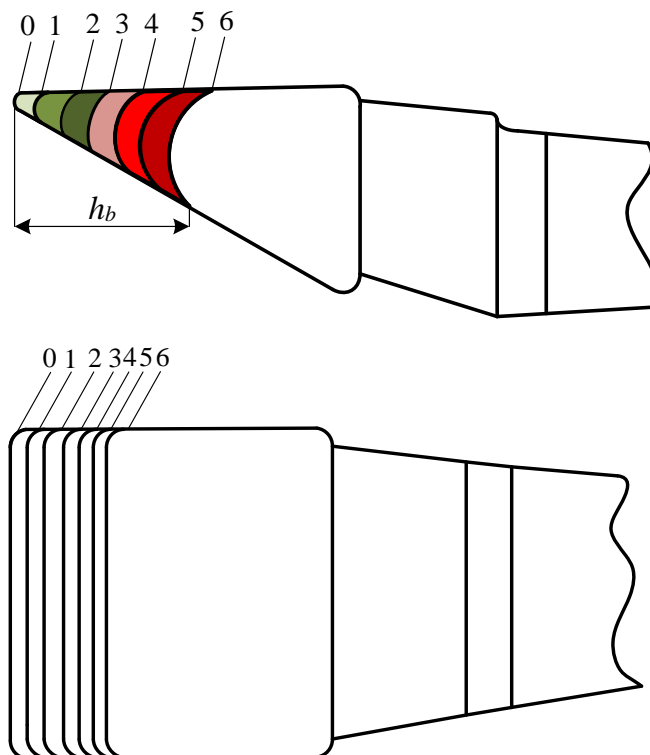
Слика 3.12. Најчешћи недостаци зуба

a – велики интензитет трења леђне површине зуба (раван А–А)

b – неравномерно трошење бочних страна зуба (I–I, II–II)

c – неадекватан положај зуба на ножи ($\Delta\alpha$)

Истраживања су показала да се повећањем похабаности резних елемената *специфични отпор материјала на копање* повећава за 30 % [80]. Са аспекта геометрије зуба у току процеса копања, хабање се манифестује на начин приказан на слици 3.13 [85].



Слика 3.13. Фазе хабања зуба [85]

Позиција 0 (слика 3.13.) представља почетну контуру врха зуба пре почетка хабања. Позицијама од 1–6 дате су контуре зуба у односу на време хабања у раду. Након одрађених 200–250 сати, изглед геометрије зуба представљен је линијом 6, што одговара величини h_b када је похабаност између 30 и 40 [mm]; [85].

Хабање се не може спречити ни обављањем одговарајућих превентивних мера. Ипак се може утицати на ову појаву, ако се препозна механизам њеног настанка. Подмазивање мастима има ограничен утицај на обим трошења. Утицај масти на успоравање процеса хабања је присутан само у периоду прилагођавања површина које су у међусобном контакту. У каснијој експлоатацији, незнатан утицај на ублажавање абразивног дејства ситних делова страног тела могу имати уља, тако што задржавају део нечистоћа у фино диспергованом стању. Од наведених начина, квалитетнији ефекат могу имати металуршке и технолошке мере које се огледају у повећању отпорности површина у контакту према абразивном хабању [85].

Повећана похабаност резних елемената утиче на капацитет роторних багера. Капацитет је највећи када су зуби нови [85]. Услед абразивног хабања, са протоком времена, похабаност је већа, што директно утиче на скок *специфичног отпора материјала на копање* и *специфичне потрошње електричне енергије* [85]. Све наведено, у коначном, утиче на промену режима рада багера и економске ефекте производног процеса [85].

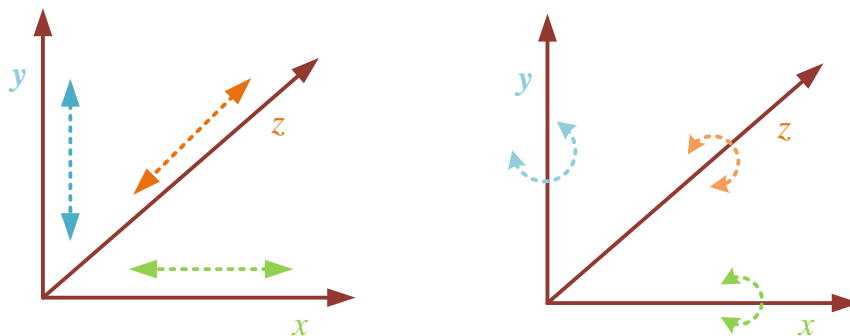
4. ВИБРАЦИЈЕ КАО ПАРАМЕТАР СТАЊА СИСТЕМА

Вибрације се дефинишу као осцилације или кретање објекта које се понавља око неког равнотежног положаја. Положај у којем објекат остаје ван утицаја спољашњих сила назива се равнотежни положај. Имајући у виду да се сваки део тела заједно креће у истом правцу и смеру, овај тип вибрација је познат под термином „кретање целог система“ [86].

Динамичке силе у машинама са покретним деловима и машинским структурама уопште генеришу вибрације, које настају као динамички ефекти производних толеранција, дебаланса код машина са обртним кретањем, клизних и котрљајућих контаката међу елементима, итд [87].

Неретко се дешава да у почетку мале и безначајне вибрације побуде резонанцу других делова структуре. Вибрације могу бити одговорне за отказ машине, изазивајући при томе хабање и замор. У одговарајућем контексту, вибрације могу бити корисне. Сита, разбијачи камена, бетонски компактори и сличне машине и уређаји, своју функцију заснивају на вибрацијама [87].

Вибрационо кретање целог тела у потпуности се може описати комбинацијом појединачних кретања и то као translација и ротација око x , y и z осе. Комбинацијом ових шест једноставних типова кретања могуће је представити свако сложено кретање тела. Тело поседује шест степени слободе (слика 4.1.) [86].



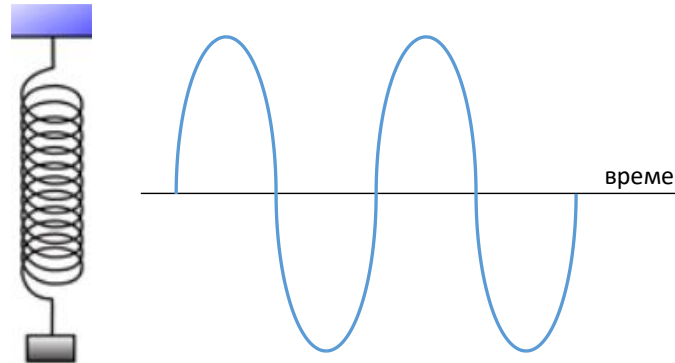
Слика 4.1. Дефинисање степени слободе кретања [86]

Механичке вибрације подразумевају осцилаторно кретање крутог тела у односу на равнотежни положај. Поремећајна сила је узрочник принудног вибрационог кретања и по својој природи може бити случајна или детерминисана. Из тог разлога се кретања која она изазива називају принудним вибрацијама. Слободне вибрације представљају периодично кретање тела по престанку деловања поремећајне силе [88].

Вибрације објекта изазива сила побуде (ексцитације). На објекат може деловати спољна сила или сила која настаје у самом објекту [86]. Кретање се представља хармонијском временском функцијом. Основни параметри за идентификацију поремећајне силе су, поред фреквенције осциловања [87] (броја циклуса у јединици времена) још и амплитуда осциловања, брзина, односно убрзање [88]. Фреквенција и величина вибрације објекта одређена је [86]:

- силом побуде;
- правцем; и
- фреквенцијом.

Анализа вибрација се примењује за одређивање силе побуде у току рада машине [86]. Сила побуде зависи од стања машине, познавања њених карактеристика и могућности дијагностиковања проблема у раду [86]. Једноставно хармонијско кретање представља најједноставније вибрационо кретање. Представља се кретањем масе у једном правцу, контролисано опругом (слика 4.2.) [86].



Слика 4.2. Једноставно хармонијско кретање [86]

Овакав механички систем представља систем са једним степеном слободне кретања [86]. Померањем масе на сигурну удаљеност од равнотежног положаја и њеним отпуштањем, опруга се враћа у равнотежни положај. У том случају, маса има кинетичку енергију на основу које прелази преостали део пута и може скренути са путање у супротном правцу [86]. Брзина се полако смањује, до заустављања, када поново иде ка равнотежном положају [86]. Процес се понавља, при чему се кинетичка енергија претвара у потенцијалну [86].

Ако у систему не постоји трење, осцилације се понављају, истим интензитетом и амплитудом. Овакав вид идеалног хармонијског кретања није присутан код механичких система. Присуство трења индукује амплитуду вибрација до постепеног смањења, где се енергија претвара у топлоту [86].

4.1 Параметри вибрација

Основни параметри који се разматрају при вибрационом кретању су [88], [86]:

- период;
- фреквенција;
- елонгација;
- амплитуда;
- брзина; и
- убрзање.

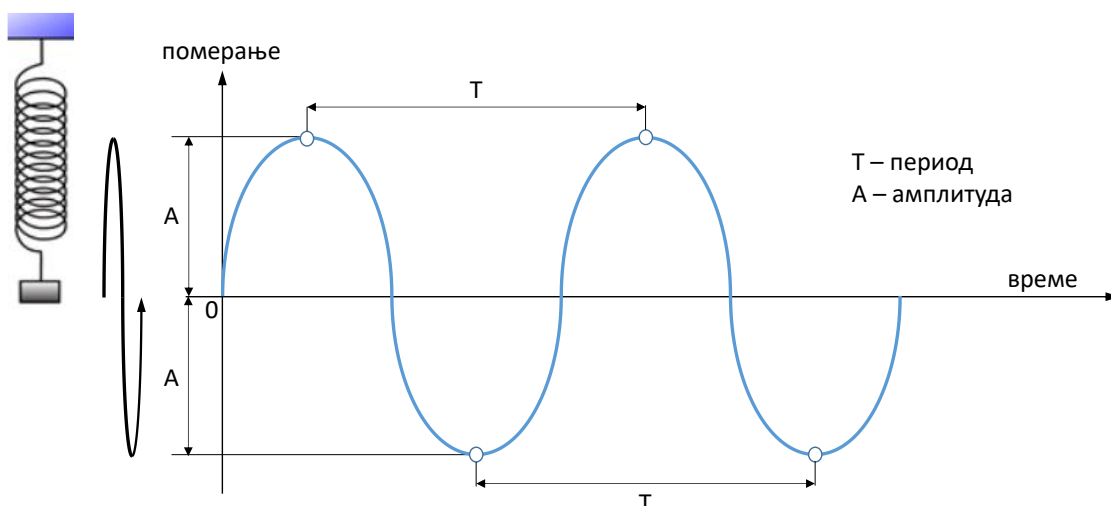
Период представља време потребно за један циклус [89]. Изражава се у секундама или милисекундама, зависно од брзине промене [86]. Реципрочна вредност периода је *фреквенција*. Фреквенција је број понављања циклуса у јединици времена. Осим у техници (електротехника, акустика) фреквенција је присутна у медицини (број откуцаја срца), саобраћају (број пролазака возила делом града), итд. Математички облик фреквенције:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

где је:

f – фреквенција, [Hz].

На слици 4.3 дата је зависност време/померање, дефинисање периода и амплитуде [86].



Слика 4.3. Зависност времена и померања – дефинисање периода и амплитуде [86], [89]

Растојање тела које осцилује од равнотежног положаја представља *елонгацију*. Највећа елонгација, тј. највеће растојање тела од равнотежног положаја сматра се *амплитудом* [86]. Приказана крива је синусоида за случај једноставног хармонијског кретања објекта. Описује се следећом једначином [86]:

$$d = D \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.2)$$

где је:

d – тренутно померање;

D – максимум или врх померања; и

t – време.

Брзина кретања представља меру помераја у јединици времена [86]. Износ промене се представља изводом [86]:

$$v_t = \frac{dD}{dt} = \omega \cdot D \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (4.3)$$

где је:

v_t – тренутна брзина, [mm/s, m/s].

Убрзање представља меру промену брзине [86]:

$$a_t = \frac{dv_t}{dt} = \frac{d^2D}{dt^2} = -\omega^2 D \sin(\omega \cdot t) \quad (4.4)$$

где је:

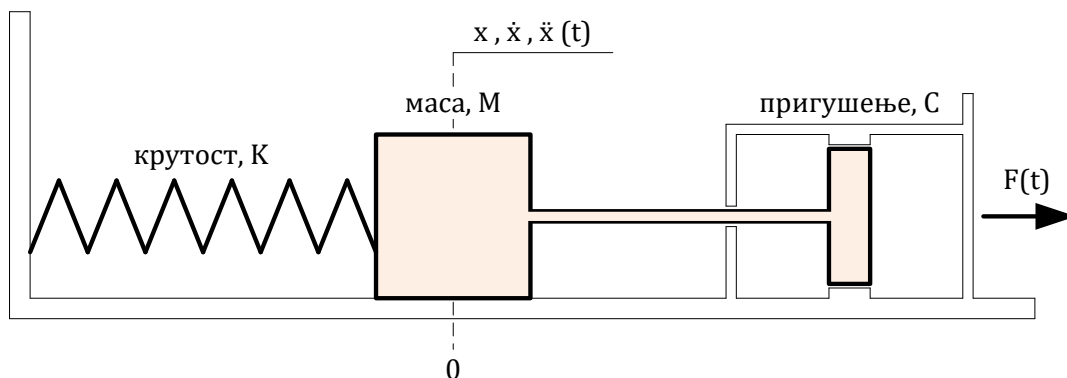
a_t – тренутно убрзање, [mm/s², m/s²].

4.2 Динамички и механички системи

Материјална тачка, као пример компактне физичке структуре сматра се једноставном масом [86]. Њено кретање генерише спољашња сила. Положај материјалне тачке одређује Њутнов закон. Убрзање материјалне тачке је пропорционално дејству спољашње силе. Механички системи су доста комплекснији. Није неопходно њихово кретање под дејством спољашње силе [86].

Ротационе машине нису бескрајно крути механички системи. Имају различите степене флексибилности на различитим фреквенцијама [86]. Кретање система представља реакцију на дејство спољашње силе. Зависи од њене природе и динамичких карактеристика механичке структуре [86]. Научне дисциплине, *модална анализа* [63] и *метода коначних елемената* [57] проучавају реакцију структура на дејство силе [86].

Вибрације представљају периодично хармонијско кретање дискретног система крутост–маса при одговору на спољашње оптерећење [86]. На слици 4.4 приказан је систем крутост–маса са пригушењем.



Слика 4.4. Систем крутост–маса са пригушењем [86]

Динамичка једначина принудних пригушених вибрација има облик [86]:

$$m \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = m \cdot a + C \cdot v + K \cdot d = F(t) \quad (4.5)$$

где су:

m – маса, [kg];

\ddot{x} , a – убрзање, [mm/s², m/s²];

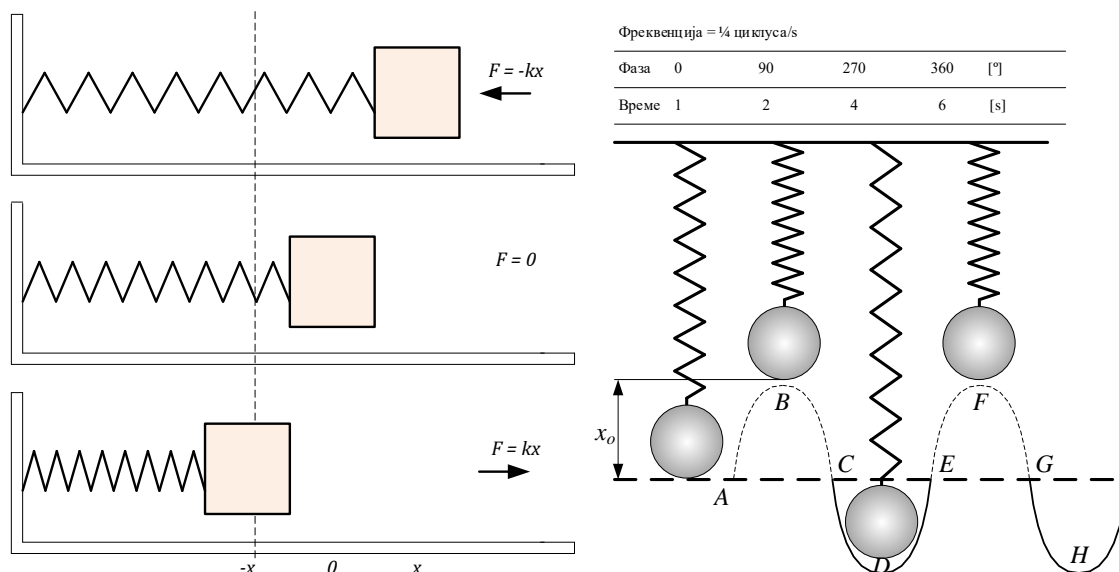
C – пригушење, [Nm/s];

K – крутост, [N/m];

\dot{x} , v – брзина, [m/s, mm/s]; и

x , d – деформација, [mm, μm].

Лева страна израза 4.5, тј. решења слободних непригушених осцилација представљају сопствене (слободне, природне) осцилације [86]. Главне облике осциловања на тим фреквенцијама представља амплитуда осциловања. Уколико принудна сила осцилује или изазива осцилације блиске некој сопственој осцилацији конструкције, долази до резонантног понашања. На слици 4.5 приказана је природа вибрација.



Слика 4.5. Природа вибрација [86], [89]

4.3. Мерење амплитуде вибрација

Амплитуда представља показатељ интензитета поремећајне силе. Величина амплитуде показује [86]:

- да ли машина ради мирно или не;
- какво је опште динамичко стање машине; и
- да ли се рад може толерисати или треба зауставити њен рад.

Стање машине се мења са променом амплитуде вибрација. Најчешћи случај је промена стања у смеру повећања амплитуде. Комплексне вибрације садрже низ компонентни различитих фреквенција, па укупна амплитуда одговара векторском збиру парцијалних компоненти [86].

Амплитуда укупних вибрација зависи од величине амплитуде сваке од компоненти и односа фазних углова [86]. Амплитуда укупних вибрација се може смањити повећањем амплитуде компоненте која је фазно супротна са векторском резултантом [86]. Амплитуда вибрација зависи од два фактора [86]:

$$A = \frac{F}{c} \tag{4.6}$$

где су:

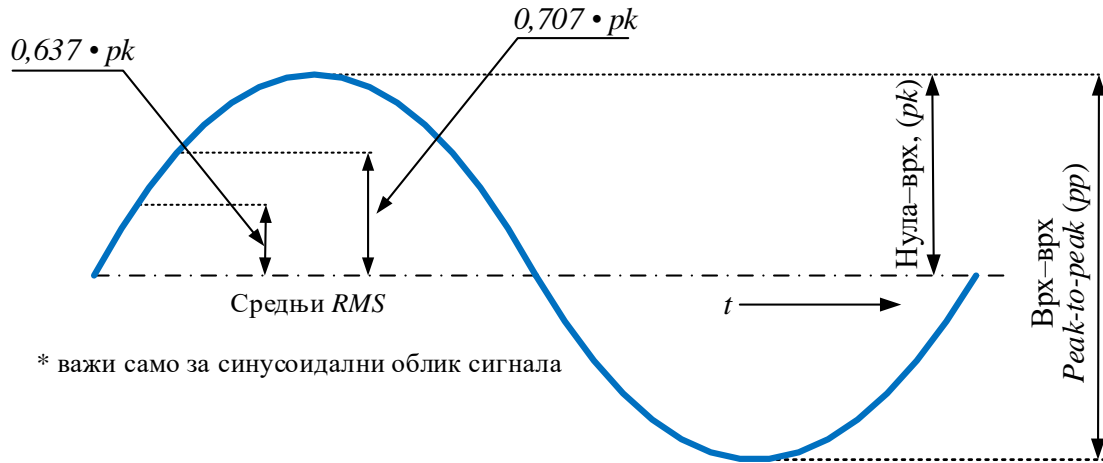
F – величина амплитуде побудне (поремећајне) силе; и

c – крутост система.

При математичком разматрању осцилаторних процеса, амплитуда вибрација представља највећи помак од почетног (равнотежног) положаја до неког крајњег положаја (у негативном или позитивном смеру) [86]. Амплитуда је изражена као нула–врх. Начини изражавања амплитуде вибрација су следећи (слика 4.6.) [86]:

- *Врх амплитуде* pk је максимална вредност од нуле до равнотежног положаја;
- *Нула–врх* (*Zero-to-peak*; pk се примењује при мерењу вибрација кућишта система, тачније код мерења амплитуде вибрацијске брзине и вибрацијског убрзања;

- *Врх–врх (Peak-to-peak; pp)*; при мерењу вибрацијског померања вратила; и
- *RMS (root mean square)* у случају синусоидалног облика вибрација одговара 0,707 вредности амплитуде нула–врх. За сложене сигнале, сачињене од више хармонијски повезаних компоненти, *RMS* амплитуда представља други корен аритметичке средине квадрата парцијалних компоненти.

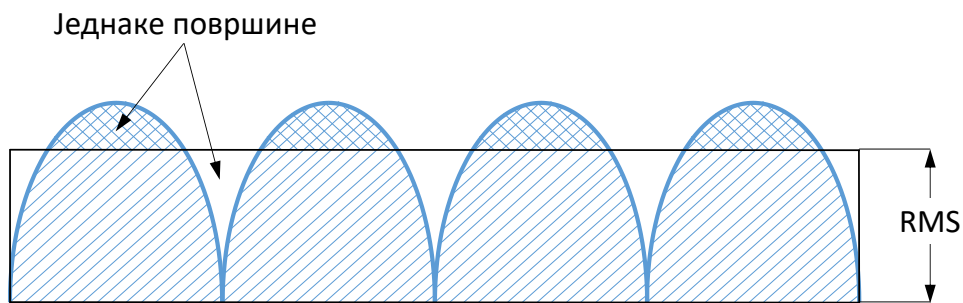


Слика 4.6. Начини изражавања амплитуде [86]

За израчунавање амплитуде врши се квадрирање тренутне вредности амплитуде, чиме се одређује просечна вредност стварног времена [86]. Квадрати су увек позитивни. На крају се извлачи квадратни корен просечне вредности, на основу чега се добија *RMS* вредност [86]:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2}{n}} \quad (4.7)$$

Графички приказ дефинисања *RMS* вредности амплитуде дат је на слици 4.7.



Слика 4.7. Дефинисање *RMS* [86]

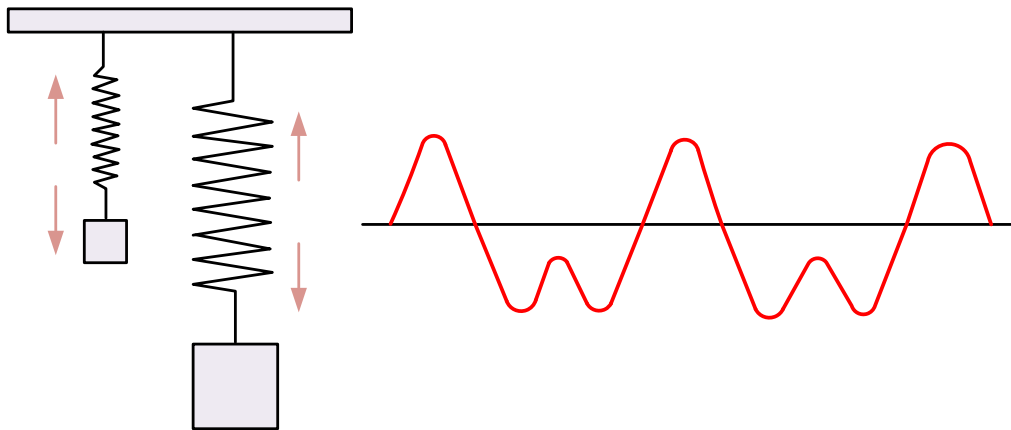
Средња вредност амплитуде одговара 0,637 амплитуде *pk* [86]. Амплитуда вибрација се изражава у следећим јединицама [86]:

- вибрацијско померање, [μm] (*pp*, *pk*);
- вибрацијска брзина, [mm/s] (*pk*, *RMS*); и
- вибрацијско убрзање, [m/s^2] или *g* (гравитацијска константа).

4.4 Сложене вибрације

Карактеристика линеарних механичких система је да све компоненте система егзистирају заједно, при чему ниједна не утиче на ону другу. Код нелинеарних система, компоненте вибрација реагују и креирају нове компоненте које немају функцију силе [86].

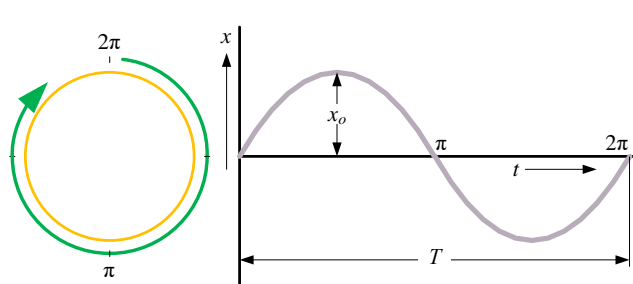
Код линеарних механичких система, фреквенција вибрације је исто што и фреквенција силе [86]. У случају да постоји више фреквенција сила које делују истовремено, резултујућа вредност вибрација представља суму вибрација сваке фреквенције [86]. Резултујући график има сложен изглед и не представља синусоиду (слика 4.8.) [86].



Слика 4.8. Дефинисање сложених вибрација [86]

Машине које раде на нижим обраћајима генеришу вибрације које се једноставно интерпретирају. На графичком приказу, ниска и висока фреквенција се представљају заједно. У једноставном случају попут овог, релативно је лако наћи фреквенције и амплитуде двеју компоненти испитивањем облика таласа [86]. Већина вибрација су знатно сложеније. Код ротационих машина, теже се долази до података о унутрашњем раду, са аспекта облика вибрација [86].

Решење диференцијалне једначине представља периодично хармонијско кретање (померање, деформација) еластичног система у синусоидном облику (слика 4.9.) [86]:



$$x = x_0 \cdot \sin \omega \cdot t \quad (4.8)$$

где су:

x_0 – максимално померање;

ω – кружна фреквенција = $2 \cdot \pi \cdot f$ [rad/s];

t – време, [s];

f – фреквенција, [циклус/s, Hz] = $1/T = n/60$;

T – период, [s]; и

n – број обраћаја, [min^{-1}].

Слика 4.9. Периодично хармонијско кретање [86]

4.5 Енергија и снага

Енергија је потребна да би се произвела вибрација [86]. Код машинских вибрација, енергија стиже од извора. На погонима роторних багера извор механичке енергије (снаге, обртног момента) је електромотор. Механички рад представља производ силе и одговарајућег растојања на којем сила делује. Јединица за енергију у изведеном SI систему је Џул [J], (*eng. Joule*) [86].

Снага се дефинише као износ урађеног рада или преноса енергије у јединици времена [86]. Јединица за снагу је Џул по секунди [J/s] или Ват [W], (*eng. Watt*). Снага је пропорционална квадрату амплитуде вибрација, као што је електрична енергија пропорционална квадрату напона или квадрату струје [86].

Енергија се преноси од извора енергије вибрација до енергије пригушивача, где се претвара у топлоту. Најважнији апсорбер енергије је трење код машина, вискозно трење и трење клизања. Ако машина има мало трење, амплитуда вибрација тежи да буде прилично висока [86].

4.6 Природне фреквенције. Појам резонанце.

Било која физичка структура се може представити преко одређеног броја еластичности, масе и пригушивача [86]. За разлику од пригушивача, еластичност и маса не апсорбују енергију [86]. Ако се енергија примењује на систем еластичност–маса, вибрације су *природне*. Ниво вибрација зависи од снаге извора енергије. Природне фреквенције су представљене једначином [86]:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.9)$$

где су:

f_n – природна фреквенција;

m – маса; и

k – константа еластичности, односно крутости.

Закључак је да када крутост расте, расте и природна фреквенција [86]. Уколико маса расте, природна фреквенција опада [86]. Код пригушеног система, какав је углавном случај, природна фреквенција је нешто нижа од масе и зависи од количине пригушења [86].

Овакви системи довели су до појаве механичких система са одређеним бројем степени слободе. Зависно од степена слободе, природне фреквенције, пригушења и фреквенције извора енергије зависи како се дистрибуира енергија вибрација [86].

Дистрибуција вибрација машине није униформна. Код машина где је извор механичке енергије електромотор, основни извор енергије вибрација представља неуравнотеженост ротора. Тиме се омогућава мерење вибрација на лежајевима мотора [86].

Када се процењује ниво вибрација машине, локација максималног нивоа не сме да буде близу извора енергије [86]. Енергија вибрација фреквентно прелази велике путање дуж структуре и може да изазове озбиљне хаварије, у случају да наиђе на удаљену структуру са природном фреквенцијом у близини њеног извора [86]. Резонанца представља појаву када се фреквенција побуде налази у близини природне фреквенције машинске структуре или када се оне изједначе [86]. Тада настају високи нивои вибрација који су углавном опасни [86].

4.7 Анализа фреквенције

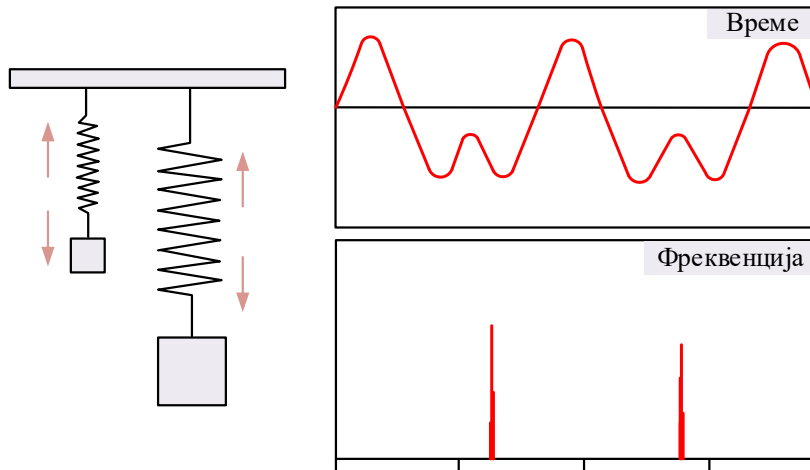
Анализа фреквенције или *анализа спектра* је методологија којом се долази до ограничења анализе на основу сигнала вибрација [86]. Талас је у домену графика, док је спектар у домену фреквенције [86].

Анализа спектра представља аналогну трансформацију сигнала временског домена у фреквентни домен [86]. Веза између времена и фреквенције дефинисана је једначинама:

$$t = \frac{1}{f} \quad (4.10)$$

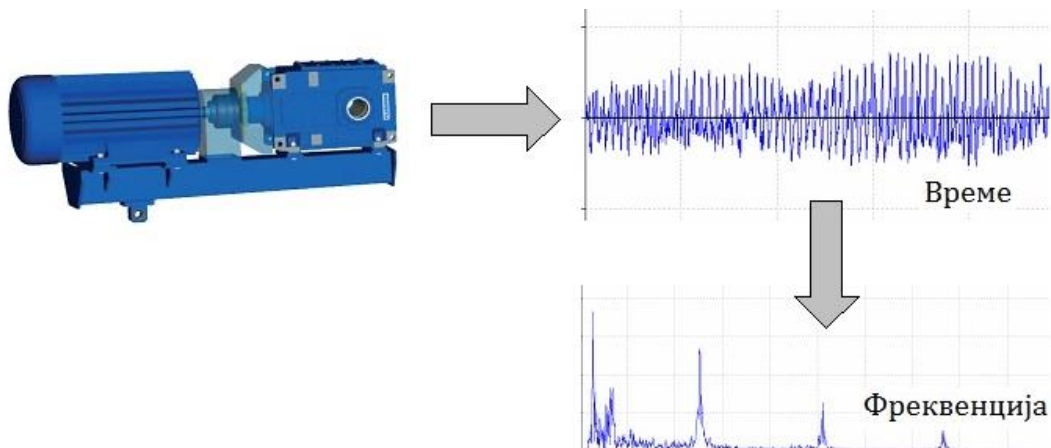
$$f = \frac{1}{t} \quad (4.11)$$

Чест случај примене фреквентне анализе је тај што су појединачне компоненте фреквенције одвојене и јасне у спектру, чиме се њихови нивои могу једноставно идентификовати [86]. Из домена таласа (времена) подаци се тешко читају.

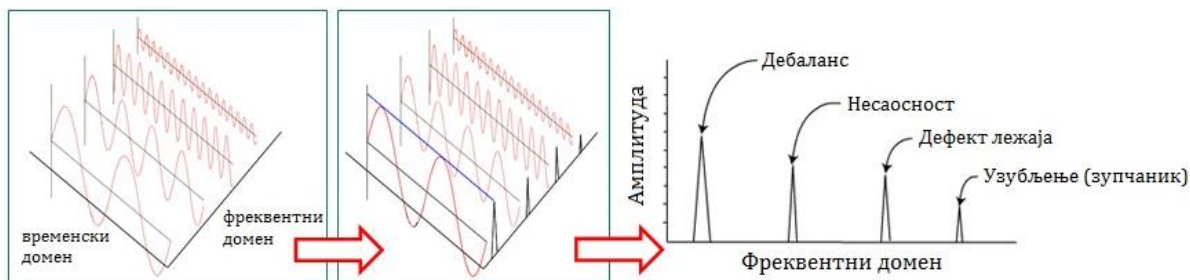


Слика 4.10. Домен времена у домен фреквенција: први начин приказивања [86]

Таласи вибрација садрже одређени број података који нису очигледни. Неки од њих су представљени ниским компонентама чија величина може бити мања од ширине линије таласа [86]. Иако ниске, ове компоненте могу имати битну улогу у решавању проблема који се односе на неисправност лежајева. Способност препознавања малих вредности сигнала вибрација омогућава детекцију почетних неисправности [86].



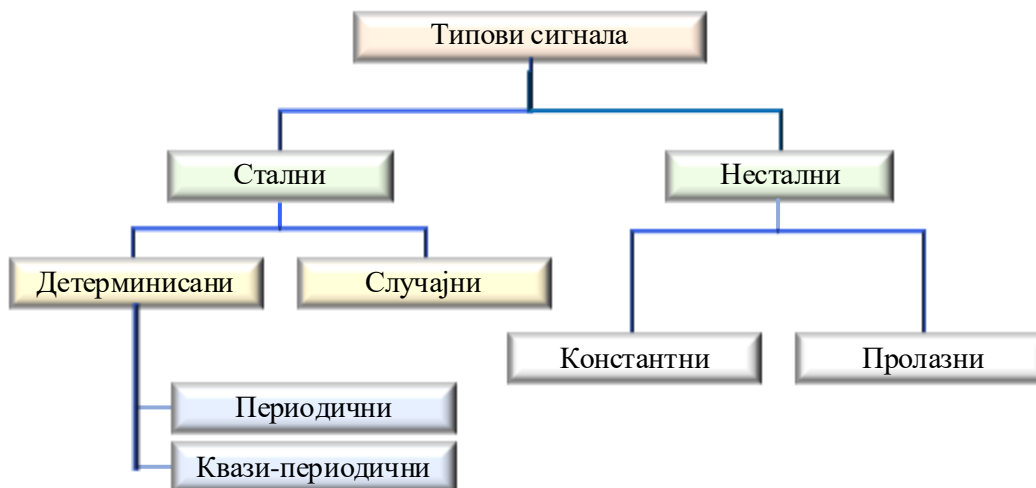
Слика 4.11. Домен времена у домен фреквенција: други начин приказивања [86]



Слика 4.12. Домен времена у домен фреквенција: трећи начин приказивања [86]

Анализа фреквенције изводи се на основу типа сигнала [86]. Сигнали садрже информације, које је потребно пренете од места настанка на одређено место. Настоји се да облик сигнала остане веродостојан месту настанка. Вредности који се не могу унапред прецизно знати представљају *случајне сигнале*. Постоје две групе сигнала: *аналогни* и *дискретни* [86].

Уколико је сигнал континуална функција независне променљиве (углавном време) реч је о *аналогном сигналу*. Континуални су по вредностима и у времену [86]. Представљају се континуалним временским функцијама $f_x(t)$ [86]. *Дискретни сигнали* су дефинисани у дискретним временским тренуцима, нпр. сваке секунде или у неком другом интервалу времена [86]. Може се представити функцијом $f(n)$, n – цео број из интервала (n_1, n_2) осе $(-\infty \leq n_1 \leq n_2 \leq +\infty)$. Типови сигнала приказани су на слици 4.13 [86].



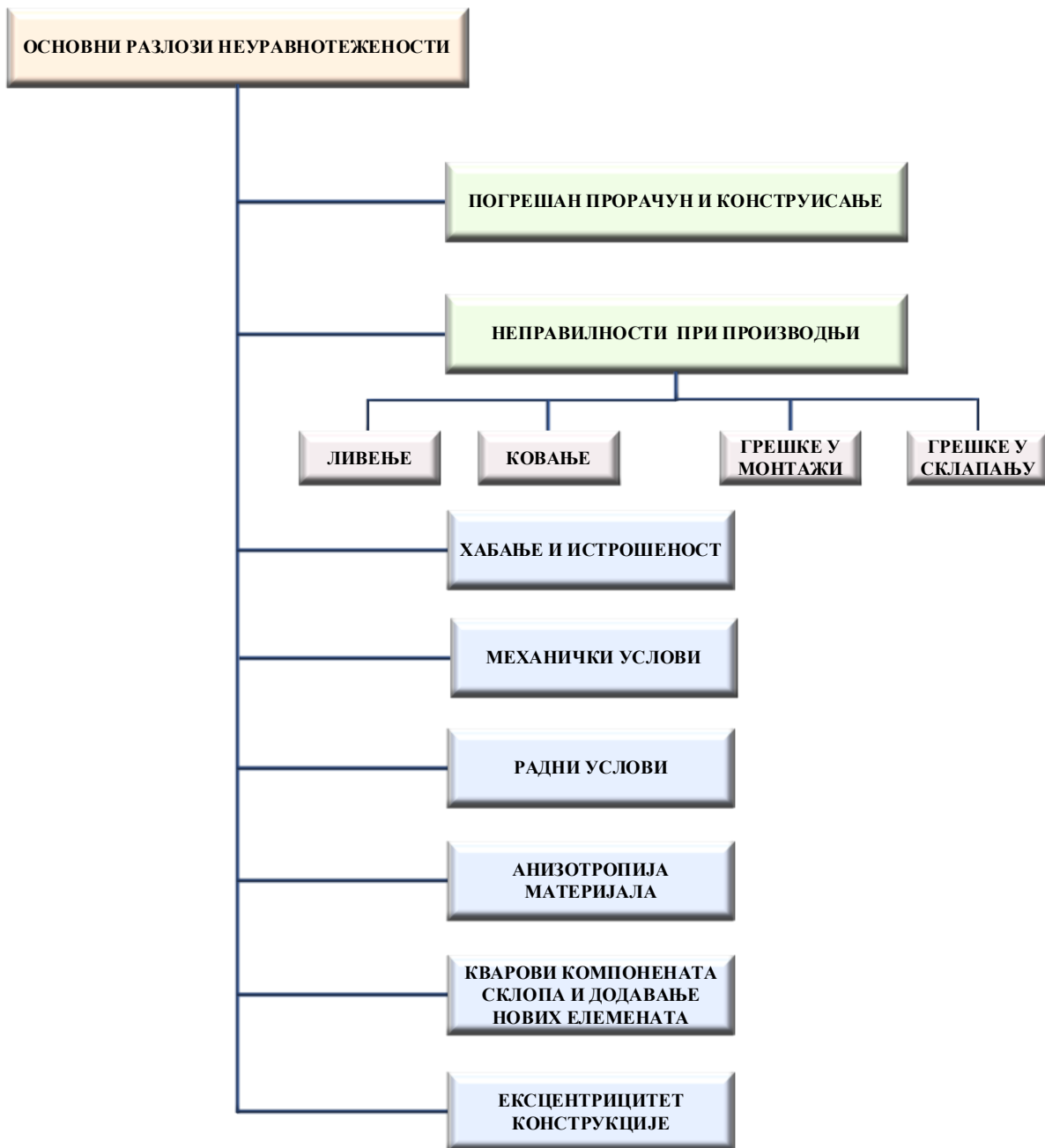
Слика 4.13. Типови сигнала [86]

Основна подела сигнала је на *сталне* и *несталне* [86]. Стални сигнали су константни у времену. Ротационе машине производе овакве сигнале. Даље се деле на *детерминисане* и *случајне*. Ниво амплитуде и фреквенција случајних сигнала нису предвидиви. Примери су: бука машине, кавитација, турбуленција пумпе [86]. Детерминисани сигнали имају релативно константну фреквенцију током времена. Представљају најважнију врсту сигнала за анализу вибрација [86]. Стварају их музички инструменти, ротационе машине. Деле се на две подгрупе: *периодичне* и *квази-периодичне*. Периодични сигнали се понављају у једнаким временским интервалима, за разлику од квази-периодичних, који изгледом подсећају на периодичне [86].

Нестални сигнали могу бити: *константни* и *пролазни* [86]. *Пролазни сигнали* почињу и завршавају се на нултом нивоу [86]. Примери пролазних сигнала су ударци чекића, бука при стартовању, заустављању мотора и слично [86].

4.8 Узроци вибрација и утицај на машине и опрему

Механички системи у свом саставу имају низ ротационих компоненти (вратила, осовине, зупчасти преносници, лежајеви, итд.) [90]. Најчешћи откази система настају услед неуравнотежености унутар ротационих компоненти [90]. Овај проблем је у индустрији све више изражен због великих обимних брзина [90]. На слици 4.14 представљени су основни узроци неуравнотежености [90].



Слика 4.14. Основни разлози неуравнотежености [90]

Неуравнотеженост изазива низ потешкоћа у раду система [90]. Неки од њих су: оштећења на склоповима, истрошеност, хабање, итд. Неуравнотежена ротациона компонента може се уравнотежити додавањем или смањењем масе [90]. Основни циљ овог процеса представља спречавање извора вибрација [90]. У табlici 4.1 приказани су неки од извора вибрација механичких система.

Таблица 4.1. Преглед узрока и карактеристика вибрација механичких система [88]

Случај	Узрок појаве вибрација	Амплитуда вибрација	Фаза
I	Несаосност спојених вратила Несаосност осе рукавца и осе лежаја Угиб вратила Недовољна крутост	Константна	Константна
II	Повећан зазор у клизном лежају Неодговарајући уљни вискозитет	Константна	Променљива
III	Силе трења у клизним лежајевима	Променљива	Постепено променљива
IV	Лоше озубљење у редуктору Оштећен клизни лежај Неисправан каишни преносник	Променљива	Неправилна

Утицај вибрација на делове машина и уређаја огледа се у следећем [86]:

- на местима са израженом концентрацијом напона долази до појаве еластичних и пластичних деформација, ломова, хаварија; и
- кроз *енергетске губитке* што резултира мањим радним учинцима.

Вибрације су са аспекта функционалности машина штетне. Машине и уређаји, према нивоу амплитуде и фреквенције морају одговарати утврђеним граничним вредностима. У противном се јавља неправилан рад и грешке у функционисању, генеришући следеће проблеме [86]:

- лежишта турбине услед прекомерних вибрација раде при већим оптерећењима што за последицу има краћи радни век;
- прекомерне вибрације доводе до физичког контакта и промене карактеристика електричних кола код електронске опреме; и
- услед прекомерних вибрација долази до неправилног рада електромотора и генератора.

4.9 Вибродиагностички параметри и норме

Превенција оштећења или хаварија машине може се спречити правилним надзором вибрација, чиме се благовремено детектује проблем и предузимају одговарајуће мере заштите. Циљ је оптималан приступ праћења стања и понашања система. Најзначајнији елементи вибрационог надзора приказани су у табlici 4.2 [88].

Таблица 4.2. Кључни елементи вибрoдијагностике [88]

Мерне методе	Вибрације неротирајућих делова Вибрације ротирајућих делова
Мерни параметри	Апсолутне вибрације Релативне вибрације
Давачи	Апсолутни Релативни
Мерне тачке	Лежајни блокови
Постављање давача	Вертикално, хоризонтално, аксијално
Релевантни прикупљени подаци о вибрацијама	Амплитуда Учестаност Фаза
Режим рада машине	Растерећен или под оптерећењем
Конфигурација мониторинг система	Стабилни или преносни
Кондиционирање изворних сигнала	Појединачно или у блоку
Метода праћења	Континуално Периодично
Метода анализе	У интервалима По догађају

Мерење апсолутних вибрација стационарне структуре углавном се мери се тако што се прати *брзина вибрација*. Помаком се прате релативне вибрације покретних делова. *Мерење убрзања* препоручљиво је код специфичних мерења, каква су мерења на редуктору, котрљајним лежајевима и оштећења која карактеришу високе фреквенције [88].

Амплитудни опсег мерења се у ситуацијама када не постоје препоруке произвођача одређује према вредностима које су садржане у нормама стандарда DIN ISO 7919 и DIN ISO 10816 [2]. Према овим стандардима, примењена опрема за мерење вибрација мора имати сопствени шум за најмање 10 [dB] нижи од мерних сигнала, док горња маргина мерног опсега мора бити виша за најмање 10 [dB] од очекиваних максималних вредности [88].

Да би подаци о вибрацијама система били поуздани, није довољно да опрема покрива основне и пар виших хармоника, већ је неопходно обухватити спектралне компоненте и пратећих елемената (зупчаника, лежајева, итд.) [88].

За оцену тренда вибрација користе се три врсте критеријума: укупна вредност вибрација, промена укупне вредности и градијент промене вибрација. За процену вибрација користе се два стандарда [88]:

- DIN ISO 7919 за релативне вибрације обртних делова; и
- DIN ISO 10816 за апсолутне вибрације стабилне структуре.

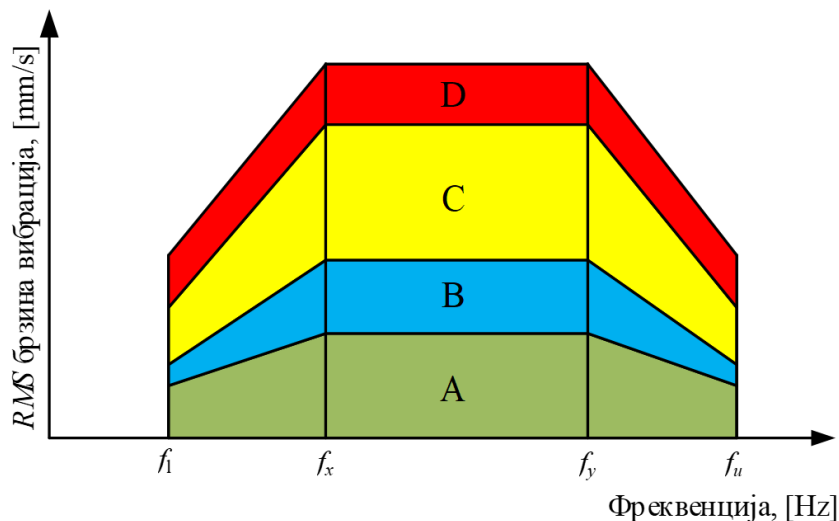
Оба стандарда за процену вибрација одређују четири квалитативне зоне (таблица 4.3.). Према DIN ISO 10816 [2] стандарду као меродавна величина за оцену квалитета рада већине машина користе се укупне вибрације (*RMS* вредност). За одређени опсег $f_x - f_y$ гранична зона је дефинисана константном брзином вибрација. Зоне квалитета су оборене ка нижим вредностима у граничном простору ниских и високих режима (слика 4.15.) [88].

Таблица 4.3. Области квалитета према DIN ISO вибродиагностичким стандардима [2], [88]

<i>RMS</i> брзина вибрација, [mm/s]	Класа I	Класа II	Класа III	Класа IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71	B	B	A	A
1,12				
1,8	C	B	B	B
2,8				
4,5	D	C	C	B
7,1				
11,2	D	D	D	C
18				
28				D

Према нормама стандарда DIN ISO 10816 [2] све машине су подељене у следеће класе [88]:

- I класа – машине мале величине, снаге до 15 [kW];
- II класа – машине средње величине, 15–75 [kW] без посебног фундамента или са постољем, до 300 [kW];
- III класа – велике машине на чврстом фундаменту; и
- IV класа – велике машине на посебном фундаменту, турбоагрегати изнад 10 [MW].



Слика 4.15. Графички приказ зона квалитета [2], [88]

4.9.1 DIN ISO стандарди у вибротијагностици

ISO (Међународна организација за стандардизацију) представља светску федерацију националних тела за стандардизацију [2]. Припрема међународних стандарда обавља се путем ISO техничких комитета [2]. Усвојени нацрт међународних стандарда се доставља члановима на гласање. Процес усвајања стандарда завршава се одобрењем од стране 75 посто чланова [2].

Технички комитет ISO/TC 108 припремио је ISO 10816–3 стандард са аспекта удара, праћења стања система и механичких вибрација. Подкомитет SC 2 даје још мерење и евалуацију механичких вибрација и удара примењену на возила, машине и конструкције [2].

Важећи ISO 10816–3 [2] стандард у односу на првобитну верзију из 1998. године не узима у обзир пумпе, које су део ISO 10816–7 стандарда. ISO 10816 [2] стандард чине следећи делови, који се генерално сврставају под *Механичке вибрације – евалуација вибрација машина мерењем на неротирајућим деловима* [2]:

- део 1 – опште смернице;
- део 2 – парне турбине и генератори преко 50 [MW] са радним брзинама од 1500 [min⁻¹], 1800 [min⁻¹], 3000 [min⁻¹] и 3600 [min⁻¹];
- део 3 – индустријске машине са номиналном снагом изнад 15 [kW] и бројем обртаја између 120 [min⁻¹] и 15000 [min⁻¹] при мерењима на терену (*in situ*);
- део 4 – гасно турбинске гарнитуре;
- део 5 – машине за производњу хидрауличке енергије и пумпна постројења;
- део 6 – клипне машине са номиналном снагом изнад 100 [kW]; и
- део 7 – турбо пумпе у индустрији, са мерењима на ротирајућим вратилима.

Према DIN ISO 10816 стандарду јачина вибрација подељена је на основу [2]:

- типа машине;
- називне снаге или висине вратила; и
- врсте постоља на коме се машина налази.

Разлике са аспекта типа, дизајна, врсте лежајева и конструкције на којој се машина налази, намећу потребу да се машине класификују у две различите групе (висина вратила h дефинисана је ISO 496 стандардом). Ове две групе машина могу имати нагнута, вертикална или хоризонтална вратила и могу бити монтиране на еластичним или крутим постољима [2].

- група 1: велике машине, снаге погона изнад 300 [kW]; електричне машине са вратилом висине $h \geq 315$ [mm]. На овим машинама обично су клизни лежајеви, са широким опсегом бројева обртаја од 120 [min⁻¹] до 15 000 [min⁻¹]; и
- група 2: машине средње величине са снагом погона изнад 15 [kW] до 300 [kW] са висином вратила $h \leq 315$ [mm]. Користе котрљајне лежајеве са бројевима обртаја изнад 600 [min⁻¹].

Висина вратила h дефинисана је ISO 496 стандардом и представља растојање између осе вратила и основне равни машине [2]. Висина вратила машине без стопа, машина са подигнутим стопама или било које вертикалне машине треба да буде узета као висина вратила у истом основном оквиру [2]. Када оквир није познат треба користити половину пречника машине. Подела постоља у односу на флексибилност извршена је на [2]:

- круто постоље; и
- еластично постоље.

Да ли је постоље круто или еластично зависи од међусобног односа еластичности машине и постоља [2]. У случају да је најнижа фреквенција у правцу мерења већа од фреквенције побуде (углавном је то фреквенција обртања) онда се постоље сматра крутим. У осталим варијантама постоље је еластично [2].

Крута постоља се примењују код средњих и великих електромотора са малим бројевима обртаја, док се еластична постоља користе код компресора, турбогенератора, итд [2].

У неким ситуацијама постоље може бити круто у једном, а еластично у другом правцу мерења [2]. Најнижа сопствена фреквенција у вертикалном правцу може бити далеко изнад фреквенције силе побуде, а у хоризонталном правцу испод. Тада би систем био крут у вертикалној, а еластичан у хоризонталној равни [2]. Вибрације се даље процењују сходно врсти постоља која одговара правцу мерења [2].

4.9.1.1 Мерење вибрација на ротирајућим деловима машине

Када се мерење вибрација врши на вратилу машине, један од основних захтева је да мерење буде широкопојасно (нефилтрирано). Препоручени мерни опсег инструмента је од 2–1000 [Hz]. Постоје два, у основи различита поступка мерења вибрација [2]:

- *мерење релативних вибрација* – изводи се бесконтактним давачем који региструје релативну промену растојања између мерног места и стабилне структуре; и
- *мерење апсолутних вибрација* које се изводи на један од два начина:

Први начин, клизним давачем радијално ослоњеним на обртну површину вратила, док је на супротном крају фиксиран апсолутни давач вибрација [2]. Други начин, комбинацијом два давача, бесконтактног и апсолутног. Бесконтактни давач мери релативни помак вратила у односу на референтну структуру [2]. Са друге стране, апсолутни давач мери вибрације референтне структуре; збир два сигнала представља апсолутне вибрације вратила [2].

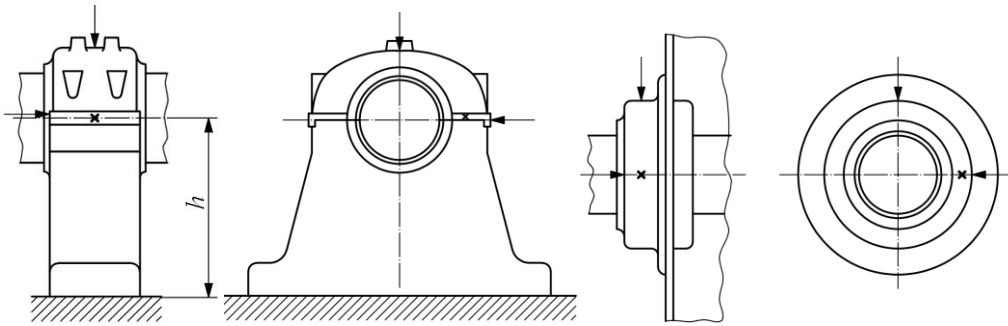
4.9.1.2 Мерење вибрација на неротирајућим деловима машине

Као и код мерења вибрација на вратилу машине (ротирајућем делу), код мерења на неротирајућим машинским деловима, неопходно је да мерење буде широкопојасно. Мерни опсег инструмента мора бити у опсегу од 2–1000 [Hz]; [2].

На неротирајућим машинским деловима мери се брзина вибрација, као *RMS* вредност [mm/s]; [2]. Допуштено је мерити и помак [μm] или убрзање [mm/s^2], меродавна вредност се прерачунава у *брзину вибрација*, према препорукама ISO 10816–3 стандарда [2].

Код мерења на неротирајућим машинским деловима, посебно је значајан избор мерних места [2]. Мерење вибрација се изводи на кућишту лежаја машине или што је могуће ближе тој позицији. Мерење је могуће извршити у три референтна правца: *хоризонталном*, *вертикалном* и *аксијалном* [2].

Мерења амплитуде вибрација у аксијалном правцу ретко кад имају значајнији карактер, стога се често избацују из даљих разматрања [2]. На слици 4.16 приказане су мерне тачке и референтни правци мерења [2].



Слика 4.16. Мерне тачке на издвојеним лежајним и прирубничким ослонцима [2]

Мерење треба вршити у номиналном режиму рада машине. У случају да машина има више радних режима, неопходно је назначити при ком режиму су изведена мерења. Режим рада са највећим нивоом вибрација прихвата се као меродаван [2].

За процену прихватљивости подједнако се користе резултати који су добијени испитивањем вибрација неротирајућих машинских делова, према DIN ISO 10816–3 [2] стандарду и вибрација вратила према DIN ISO 7919–2 стандарду. Референтним се сматра стандард који прописује оштрије услове у случају да су доступни резултати оба мерења [2].

Приоритет у односу на друге критеријуме за оцену прихватљивости динамичког стања машине свакако имају препоруке произвођача. У недостатку истих користе се интерне или препоруке DIN ISO стандарда [2].

4.9.2 Испитивање вибрационих параметара у току и након старта машине

Значај мерења параметара вибрација у току и након старта је следећи [88]:

- могућ је надзор динамичког стања при залетању, где се у циљу заштите машине врши обуства процедуре, ако се примети прекорачење допуштених вредности; и
- у случају обуства процедуре, могуће је накнадно анализирати механичке утицаје и открити извор нерегуларности.

Анализира се динамика залетања (временске секвенце и карактеристичне тачке у режиму $0-n_{nominalno}$) као и вредност допуштених вибрација у свакој тачки режима, са посебним освртом на резонантно подручје [88].

Ако не постоји упутство произвођача опреме, мерење се врши радијално на свим лежајним блоковима једновремено, док се на аксијалним лежајевима врши мерење и аксијално, посебно, за сваку тачку режима [88].

Мерења се изводе када се достигне номинална брзина, почевши од растерећеног стања, 0 %, а ако су остали услови задовољени, врши се сукцесивно повећање до пуне снаге, 100 % [88]. Препоручљиво је да се скок врши постепено, по 25 %, тј. да се мерења врше за 0, 25, 50, 75 и 100 %. Мерење вибрација се врши на вратилу машине или на неротирајућим машинским деловима [88].

5. СПЕЦИФИЧНИ ОТПОР МАТЕРИЈАЛА НА КОПАЊЕ

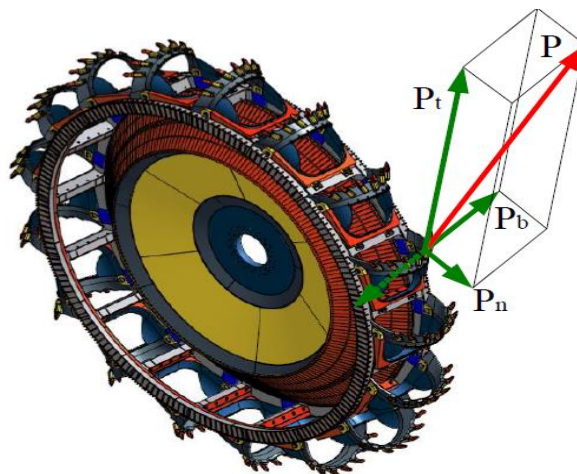
Процес откопавања материјала роторним багерима је сложен [38]. Ефикасност процеса зависи од низа утицајних фактора. Посебно се издвајају усвојени технолошки параметри блока (висина подетаже, наступ багера, брзина кружног кретања), физичко–механичке карактеристике материјала, геометрија и стање резних елемената [38].

Да би ефикасност рада роторних багера била на задовољавајућем нивоу, потребно је усагласити конструктивне параметре, технологију рада и параметре резних елемената са карактеристикама радне средине [38]. Значајан утицај огледа се у правилном избору багера, тј. степену усаглашености резне силе и очекиваних отпора који зависе од врсте материјала. На слици 5.1 приказана је блок шема процеса копања [5], [81].



Слика 5.1. Блок шема процеса копања [81]

Укупни отпор материјала на копање при димензионисању погона роторних багера разликује се у односу на багере са једним радним елементом [5]. Поред тангентне P_t и нормалне P_n компоненте отпора на копање, код роторних багера се јавља још и бочна компонента P_b , јер се процес откопавања врши истовременим окретањем стреле роторног точка и самог роторног точка [5]. Тангентна компонента отпора савлађује се снагом погона за транспорт багера, нормална снагом за дизање и спуштање стреле роторног точка, а бочна компонента снагом за кружно кретање горње градње. На слици 5.2 дате су компоненте укупног отпора материјала на копање [39], [5].



Слика 5.2. Укупни отпор материјала на копање [39], [5]

При откопавању материјала, ободна сила на роторном точку мора да савлада следеће отпоре [38], [5], [39]:

- P_{rez} – отпор на резања материјала у масиву, укључујући отпор трења резних елемената о чело блока;
- P_{pod} – отпор подизања материјала у ведрици до висине пражњења;
- P_{punj} – отпор пуњења ведрица материјалом;
- P_{tr} – отпор трења између материјала у ведрици и кружне склизнице роторног точка при подизању материјала до висине пражњења; и
- P_{kin} – отпор на саопштење кинетичке енергије материјала у ведрици, тј. убрзање материјала до брзине ведрице.

Ободна сила на роторном точку се дефинише једначином [38]:

$$P_t = P_{rez} + P_{pod} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} \quad (5.1)$$

Произвођачи роторних багера при одређивању ободне силе на роторном точку користе следећи приступ [38]:

$$P_t = P_k + P_{pod} \quad (5.2)$$

При чему је:

$$P_k = P_{rez} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} \quad (5.3)$$

где је:

P_k – сила копања.

Постоји више алгоритама за одређивање специфичног отпора материјала на копање. Најширу примену има Ватметарска метода [1] (*eng. Wattmeter method*). Метода се заснива на мерењу снаге мотора погона роторног точка, помоћу које се израчунава специфични отпор материјала на копање [38], [91].

Средња моментна струја I_m коју погон повлачи из мреже представља средњу вредност максималних и минималних пикова струје који се очитавају са електронског снимача података. Ефективна струја се одређује према једначини [38], [91]:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (5.4)$$

где су:

I_{ef} , I_m – ефективна (очитана вредност), % и тренутна јачина струје мотора (прерачуната), [А].

Снага потребна за процес откопавања рачуна се на основу једначине [38], [91]:

$$N_s = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} \quad (5.5)$$

где су:

N_s – снага која се троши у процесу копања, [kW];

η – коефицијент корисног дејства погона;

U – номинални напон, [V]; и

$\cos \varphi$ – фактор снаге мотора.

Снага која се предаје мотору за погон роторног точка [38], [91]:

$$N_p = N_s \cdot \eta \quad (5.6)$$

Утрошена снага на процес копања представља разлику предате снаге и снаге потребне за подизање материјала до висине пражњења [38], [5], [92]:

$$N_k = N_p - N_{pod} \quad (5.7)$$

Сила потребна за откопавање материјала израчунава се на основу снаге копања и ободне брзине роторног точка [38], [5], [92]:

$$P_k = \frac{N_k}{v} \quad (5.8)$$

где је:

v – ободна брзина роторног точка, [m/s].

Однос утрошене снаге на процес копања и укупне дужине резних ивица у контакту са материјалом $\sum L_i$, представља *специфични отпор материјала на копање по дужини резних ивица* [38], [5], [92]:

$$K_L = \frac{P_k}{\sum_{i=1}^m L_i} \quad (5.9)$$

Однос утрошене снаге за процес копања и укупне површине попречних пресека свих ведрица у контакту са материјалом $\sum F_i$ представља *специфични отпор материјала на копање по површини попречних пресека* [38], [5]:

$$K_F = \frac{P_k}{\sum_{i=1}^m F_i} \quad (5.10)$$

Потрошња електричне енергије потребна за откопавање 1 m^3 материјала (*специфична потрошња*) [38] израчунава се као разлика предате снаге и снаге празног хода мотора према тренутном капацитету багера [38], [5], [92]:

$$E = \frac{N_p - N_{ph}}{Q_{ost}} \quad (5.11)$$

где су:

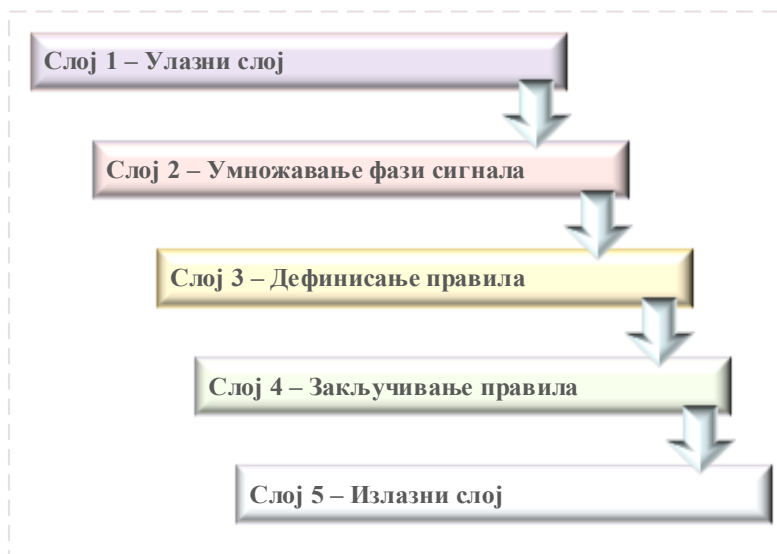
N_{ph} – снага празног хода мотора за погон роторног точка, [kW]; и

Q_{ost} – остварени капацитет роторног багера у датом тренутку, [m³/h].

6. АДАПТИВНИ НЕУРО-ФАЗИ СИСТЕМ ЗАКЉУЧИВАЊА

ANFIS [7] (*eng. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) представља технику машинског учења која интегрише правила адаптивне неуронске мреже и теорију фази логике за формирање логичког односа између улазних и излазних величина [93], [94], [4], [95], [96]. Детаљна поставка модела неуронских мрежа и фази логике дата је у оквиру литературе [14], [97], [6], [98], [99]. У склопу ANFIS [7] модела, неуронске мреже омогућавају процедуре учења, док фази логика омогућава доношење закључака о релацијама код којих доминира неизвесност и вишезначност. Процес тренирања (обучавања) заснива се на одређивању вредности параметара, подешених према подацима за обуку [100]. *Back-propagation method* [101] (алгоритам простирања грешке уназад) представља основни начин обучавања система. Настоји да грешку између мрежног и жељеног излаза сведе на минимум. Недостаци овог алгорита су нешто веће време потребно за обучавање и склоност „заборављању” у локалном минимуму [96]. Да би се отклонили недостаци *back-propagation* алгорита, развијен је хибридни модел учења [102], који се заснива на комбинацији *back-propagation* алгорита са методом најмањих квадрата [103] (*eng. Least squares method*). Примена ANFISA је погодна за нелинеарне узорке података [4], [104].

ANFIS [7] структура има пет слојева (слика 6.1.). Фази систем закључивања (FIS) представља језгро ANFIS [7] мреже [4]. Први слој (*Layer*) 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 [100]. 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 [4].



Слика 6.1. ANFIS слојеви [4]

ANFIS [7] може да имплементира следећа фази правила [100]:

- укупан излаз представља пондерисани просек прецизног излаза појединачног правила, добијен снагом правила (минимум степена припадности премисе) и функције припадности излаза (монотон неоппадајућа) [100]; и
- излаз према Sugeno фази IF-THEN правилима; излаз сваког правила представља линеарну комбинацију улазних променљивих, док је укупан излаз њихова пондерисана средина [100].

Sugeno фазни модел првог типа са два улаза x и y има облик [100]:

Правило 1: АКО је x A_1 и y је B_1 ОНДА је $f_1 = p_1 x_1 + q_1 y + r_1$

Правило 2: АКО је x A_2 и y је B_2 ОНДА је $f_2 = p_2 x_2 + q_2 y + r_2$

где су:

A_1, A_2, B_1, B_2 – фази скупови улаза x и y , респективно; и
 $p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ – параметри излазних функција.

Први слој ANFIS [7] структуре садржи функције припадности, којима се нумерички улазни подаци претварају у фази променљиве. Параметри првог слоја одговарају параметрима премисе фазни модела [94], [100]. Једначинама (6.1) и (6.2) одређује се излаз из сваког чвора O_{ij} , док μ_{xi} и μ_{yi-2} представљају функције припадности премисе [100].

$$O_{1i} = \mu_x(x), \quad i = 1, 2 \quad (6.1)$$

$$O_{1i} = \mu_x(y), \quad i = 3, 4 \quad (6.2)$$

где су:

x, y – улази у чвор; и

A_1, B_1 – фази скупови унутар анализираниог чвора дефинисани обликом функције припадности (најчешће се користе *Bellova* функција, троугласта, трапезна, итд.).

Други слој чине чворови означени са П. Улазни сигнали се множе, чиме се добија излаз из чвора $O_{2,i}$ који представља утицајни фактор i -тог правила w_i [100]:

$$O_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.3)$$

У трећем слоју, чворови су означени са N. Рачунају однос снаге (утицај) i -тог правила и суме снага осталих правила, чиме се израчунава нормализована снага i -тог правила [100]:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.4)$$

У оквиру четвртог слоја, рачуна се допринос дефинисаних правила излазу система, са функцијом чвора, која има облик [100]:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i \cdot (p_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.5)$$

где су:

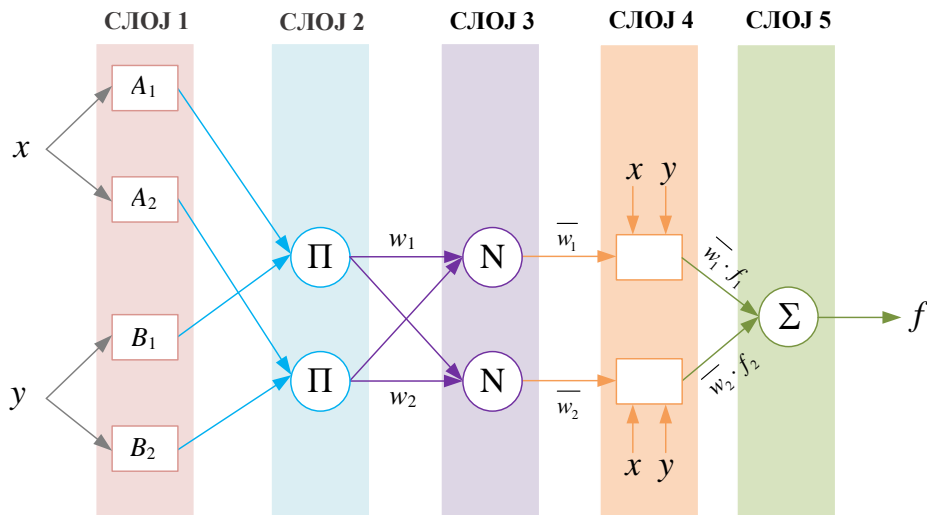
\bar{w}_i – излаз из трећег слоја; и

p_i, q_i, r_i – скуп параметара који одговарају параметрима консеквенци.

У петом слоју рачуна се укупан излаз из ANFIS [7] модела. Слој се састоји од само једног чвора, означеним \sum .

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6.6)$$

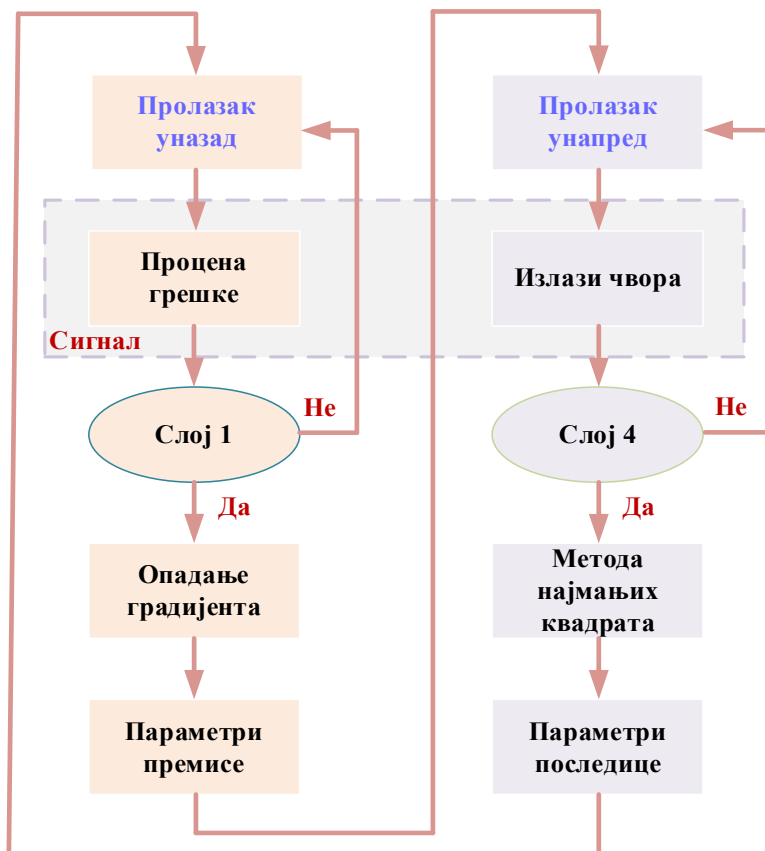
На слици 6.2 приказана је архитектура ANFIS [7] модела.



Слика 6.2. ANFIS архитектура [99], [100], [94], [105]

ANFIS [7] архитектура садржи два адаптивна слоја, први и четврти. У првом слоју се подешавају параметри који су у вези са функцијом припадности улаза. У четвртом слоју, подешавани параметри се односе на полином првог степена (p_i, q_i, r_i) и то су параметри последице [100].

Тренирање неуро-фази система углавном се врши применом хибридног алгоритма (слика 6.3.). Суштина овог приступа огледа се у простирању унапред до четвртог слоја, где се методом најмањих квадрата врши процена последичних параметара. При простирању уназад, до првог слоја, врши се пренос податка о величини грешке, чиме се ажурирају параметри премисе, методом по правцу пада градијента (*eng. Gradient descent*) [100].



Слика 6.3. Хибридни алгоритам обуке ANFIS модела [100], [3]

Када су постављени параметри улазних функција припадности, излаз из ANFIS [7] модела израчунава се на следећи начин [100]:

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} \cdot f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} \cdot f_2 = \bar{w}_1 \cdot f_1 + \bar{w}_2 \cdot f_2$$

$$f = (\bar{w}_1 \cdot x) \cdot p_1 + (\bar{w}_1 \cdot y) \cdot q_1 + (\bar{w}_1) \cdot r_1 + (\bar{w}_2 \cdot x) \cdot p_2 + (\bar{w}_2 \cdot y) \cdot q_2 + (\bar{w}_2) \cdot r_2 \quad (6.7)$$

Процес обуке ANFIS [7] модела почиње одређивањем фази скупова, броја скупова улазних променљивих и облика њихове функције припадности. Сви подаци о обуци пролазе кроз неуронске мреже, подешавањем улазних параметара, на основу којих се налази најбољи однос између улазних и излазних величина, чиме се грешке своде на минимум [100].

Пре усвајања модела потребно је утврдити његова генерализацијска својства [106]. Тачност модела се оцењује применом различитих статистичких критеријума [106]. Најчешће се за оцену квалитета користи корен средње квадратне грешке *RMSE* [9] (*eng. Root Means Square Error*), средња апсолутна грешка *MAE* (*eng. Mean Absolute Error*), Пирсонов (*eng. Pearson' Linear Correlation Coefficient*) линеарни коефицијент корелације (*R*) и средња апсолутна процентуална грешка *MAPE* (*eng. Mean Absolute Percentage Error*) [106].

RMSE [9] је представљен обрасцем [102], [107]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (6.8)$$

где су:

P_i, O_i – експерименталне и предвиђене вредности [107]; и

N – укупан број података.

MAE критеријум представља меру апсолутне тачности модела. Користи се за приказ средње апсолутне грешке [106]:

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (6.9)$$

Пирсонов коефицијент R представља релативни показатељ тачности. Дефинише се на следећи начин [107]:

$$R = \frac{N \cdot \left(\sum_{i=1}^N O_i \cdot P_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)}{\sqrt{\left(N \cdot \sum_{i=1}^N O_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right) \cdot \left(N \cdot \sum_{i=1}^N P_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)^2 \right)}} \quad (6.10)$$

Средња апсолутна процентуална грешка *MAPE* (често се назива средњи апсолутни проценат девијације *MAPD*) представља меру тачности предвиђања модела [106]:

$$MAPE = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{P_i} \right| \quad (6.11)$$

ANFIS [3], [4] методологија се примењује код скупова података у којима је присутна нелинеарна форма. За примену ANFISA није непоходно познавање функционалне везе између улазних и излазне променљиве. У односу на предиктивне моделе засноване на неуронским мрежама, ANFIS [3], [4] има следеће предности:

- *комбинација неуронских мрежа и фази логике* омогућава ефикасније закључивање код непотпуних и нејасних скупова података;
- *боље разумевање проблема*, применом лингвистичких променљивих које су лако разумљиве експертима при решавању различитих проблема;
- *скалабилност*, могућност скалирања без губитка прецизности модела;
- *висока прецизност*, комбинацијом информација из различитих извора, укључујући експертска знања што омогућава боље закључивање;
- *способност учења*, лако се адаптира променама података. Ова карактеристика чини ANFIS [3], [4] флексибилним и применљивим у различитим случајевима;
- *транспарентност*, ANFIS [3], [4] модели су транспарентни у смислу да је могуће пратити процес доношења одлука;
- *робустност*, ANFIS [3], [4] модели су робустни и отпорни на шум у подацима, што их чини погодним за коришћење код података у којима доминира неизвесност и неодлучност;
- *мања осетљивост на пренаученост*, мања склоност пукотинама у подацима и боље резонување на новим подацима; и
- *једноставна имплементација*, краће време потребно за развој модела и примена у различитим научним дисциплинама.

Предности ANFIS [3], [4] модела у односу на регресионе предиктивне моделе:

- способност прилагођавања нелинеарним односима између података, док је примена регресионих модела ограничена на линеарне релације;
- отпорност на шум и нејасноће у скупу података; и
- примена за анализу великог броја проблема (предикција, класификација, контрола и идентификација система).

7. МОДЕЛ ЗАВИСНОСТИ СПЕЦИФИЧНЕ ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ И НИВОА ВИБРАЦИЈА ПОГОНА ЗА КОПАЊЕ РОТОРНОГ БАГЕРА

Модел је базиран на зависности следећих величина [92]:

- нивоа похабаности резних елемената;
- потрошње електричне енергије; и
- нивоа амплитуде брзине вибрација.

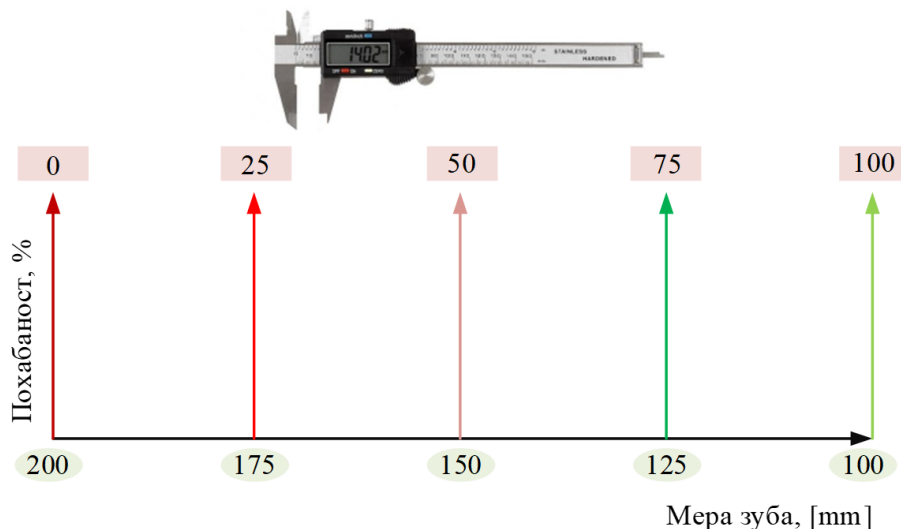
Заснован је на две врсте мерења. Прво је мерење потрошње електричне енергије при радном процесу, а друго мерење вибрација које се приказује преко амплитуде брзине. Постоји међусобни утицај између поменутих физичких феномена. Повећањем потрошње електричне енергије, повећава се вредност амплитуде брзине вибрација. У наставку се даје теоријска анализа физичких величина које чине модел [92].

7.1 Мерење похабаности резних елемената

Процес рада роторних багера карактерише континуалан рад. Радни орган је роторни точак на коме се налазе ведрице, чији број зависи од пречника роторног точка, броја обртаја истог и задатог капацитета. По ободу ножа сваке ведрице налазе се резни елементи који су једини у контакту са масивом који се откопава. Радни елемент се при пролазу кроз материјал, креће по резултанти ободне брзине при окретању роторног точка око своје осе и ободне брзине окретања роторне стреле око вертикалне осе багера [92].

Расположива сила резања зуба/ведрице се концентрише на малу дужину и на тај начин се олакшава продирање ведрице у материјал. Последица рада зуба је његово хабање, које у зависности од материјала који се откопава, може бити мање или више изражено. Услед хабања долази до брзе промене геометрије (рад у песку). Похабаност зуба условљава повећање потрошње електричне енергије. Коначно, повезаност између похабаности зуба, потрошње електричне енергије и амплитуде брзине вибрација је очигледна [92].

За утврђивање нивоа похабаности коришћен је ручни мерни алат [92]. Када је резни елемент нов, номинална мера износи 200 [mm]. Максимална похабаност одговара граничној мери зуба која износи 100 [mm]. На слици 7.1 дат је опсег мера зуба од новог до стања максималне похабаности и дефинисан степен похабаности према мери зуба.



Слика 7.1. Мере зуба и дефинисање степена похабаности

7.2 Мерење потрошње електричне енергије у процесу копања

Електрична енергија је погонска енергија за рад роторног багера [92]. Електромотором се претвара у механичку енергију и даље користи за обављање корисног рада. Ниво потрошње електричне енергије директно зависи од ефикасности рада машине. У моделу се користи специфична потрошња у односу на остварени капацитет копања као индикатор потрошње [92].

$$E = \frac{N_p - N_{ph}}{Q_{ost}} \quad (7.1)$$

Предата снага мотора за погон роторног точка [92], [38]:

$$N_p = N_s \cdot \eta = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} \cdot \eta = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} \cdot \eta \quad (7.2)$$

Снага празног хода мотора зависи од модела багера. За пример из студије случаја износи 35 [kW]. Остварени капацитет багера израчунава се помоћу једначине [92]:

$$Q_{ost} = 60 \cdot h \cdot s \cdot v_b \cdot \left(\cos \frac{\varphi_L + \varphi_D}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (7.3)$$

где су:

h, s – висина подетаже и наступ багера (дебљина реза), [m];

v_b – брзина кружног кретања багера, [m/min]; и

$\varphi_{L,D}$ – угао окретања стреле роторног точка у лево и десно у односу на уздужну осу, [°].

Сила потребна за процес копања, односно, савладавање отпора на копање [92]:

$$F = \frac{N_p - N_d}{v} \quad (7.4)$$

где су:

v – ободна брзина роторног точка, [m/s]; и

N_d – снага потребна за подизање материјала до висине пражњења, [kW].

Снага за подизање материјала до висине пражњења [92]:

$$N_d = \frac{Q_{ost} \cdot \gamma \cdot g \cdot h_d}{3600} \quad (7.5)$$

где су:

γ – специфична маса материјала, [t/m³]; и

h_d – висина подизања материјала до висине пражњења (конструктивна величина), [m].

Анизотропија материјала који се откопава захтева посебан режим континуалног мерења помоћу електронског снимача струје [91], [92]. Електронски снимач региструје тренутну струју, помоћу које се израчунава укупна ефективна снага за процес копања [91]. Преко ефективне снаге израчунава се ангажована снага, односно предата снага. Величине које дефинишу потрошњу електричне енергије одређују се мерењем тренутне струје, а остале величине (h, s, v_b и углови окретања стреле) помоћу инструмената на багеру [91].

7.3 Мерење амплитуде брзине вибрација на погону за копање

Електромотори током рада стварају вибрације које представљају утрошену енергију. Виша амплитуда изазива већу потрошњу енергије. Вибрације електромотора обично ствара сила побуде (ексцитације) [92]. Силу побуде–поремећајну силу изазива сила копања (спољашња сила) чији интензитет зависи од стања резних елемената. Фреквенција и величина вибрација електромотора одређена је правцем и фреквенцијом силе побуде. Из тог разлога се анализа вибрација користи за одређивање сила побуде када је машина у раду. Амплитуда вибрација A зависи од вредности поремећајне силе и крутости, тј. отпорности конструкције према деформацији коју изазива поремећајна сила: маса односно инерција, пригушење) [92].

$$A = \frac{F}{c} \quad (7.6)$$

Амплитуда се може повећати услед повећања интензитета поремећајне силе или услед смањења крутости [86], [92]. Обрнуто, може се смањити услед смањења интензитета поремећајне силе или повећања крутости. Повећање крутости може се постићи смањењем амплитуде, повећањем масе, дефинисањем геометрије (меродавне површине дела), начина и места ослањања, што утиче на повећање прве сопствене фреквенције [92].

7.4 Зависност потрошње електричне енергије процеса копања и амплитуде брзине вибрација погона за копање

Сила копања коју развија погон роторног точка користи се за савлађивање специфичног отпора материјала на копање, односно омогућава процес откопавања [92]. Похабаност зуба има директан утицај на силу копања. Ако се претпостави да је ова сила у ствари и сила побуде (поремећајна сила која директно утиче на погон роторног точка), може се поставити директна зависност између израза (7.6) и израза (7.4). Друга претпоставка је да је крутост $c = const.$ при сваком мерењу (мала је вероватноћа да ће се променити при блиским мерењима). Узевши у обзир поменуте претпоставке, долази се до релације [92]:

$$A = \frac{F}{c} = \frac{N_p - N_d}{c \cdot v} = \frac{N_p - N_d}{c \cdot v} \quad (7.7)$$

Да би се измерене амплитуде вибрација у хоризонталном и вертикалном правцу упоредиле са специфичном потрошњом електричне енергије, неопходно је извршити њихово слагање. Слагање међусобно нормалних амплитуда (хармонијско осцилаторно кретање) изводи се према једначини [92], [108]:

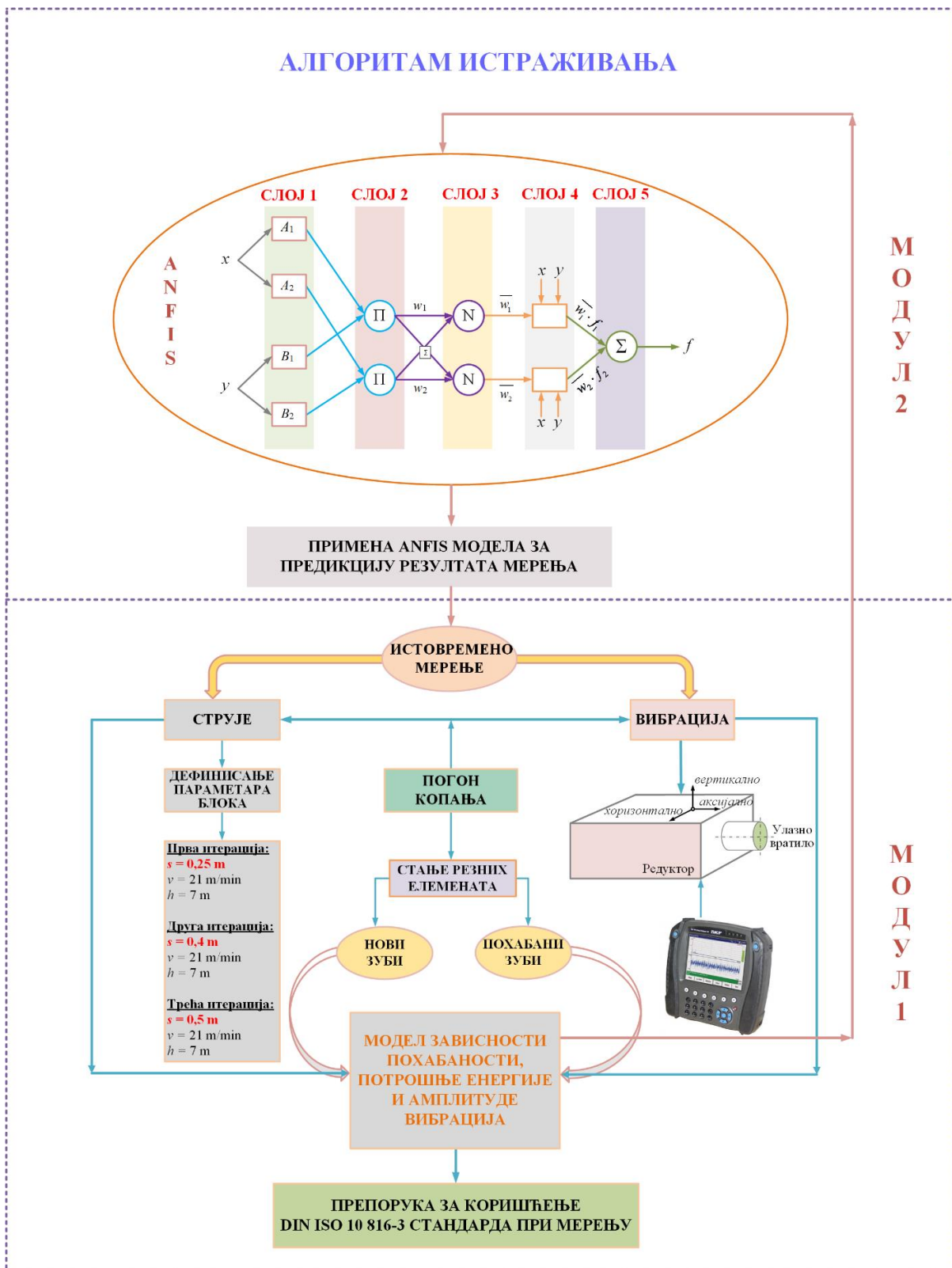
$$A = \sqrt{A_{HOR}^2 + A_{VER}^2} \quad (7.8)$$

где су:

A_{HOR} – хоризонтална компонента амплитуде вибрација, [mm/s]; и

A_{VER} – вертикална компонента амплитуде вибрација, [mm/s].

Надградња предложеног модела реализована је применом ANFIS [7] методологије за предикцију потрошње електричне енергије. Примена ANFISA је погодна за скупове података у којима је присутна хетерогеност, нејасност и нелинеарна форма. ANFIS [7] пружа могућност поновног тестирања основног модела (зависност похабаности, потрошње енергије и амплитуде) добијањем нових улазних података у модел, без мерења на багеру. Графички приказ развијеног модела дат је на слици 7.2.



Слика 7.2. Развијен аналитички модел – алгоритам зависности похабаности резних елемената, потрошње енергије и нивоа амплитуде вибрација погона за копање

8. ИЗВЕДЕНА МЕРЕЊА НА РОТОРНОМ БАГЕРУ SRs2000.32/5+VR

Мерењем ангажоване снаге мотора за погон роторног точка и применом Ватметарске методе [1] одређен је специфични отпор материјала на копање [91]. Истовремено је вршено мерење вибрација и утврђивање степена похабаности резних елемената, као битних утицајних параметара на рад погона за копање. Припремни радови на багеру односили су се на планирање планума и монтажу мерне опреме на багер [91]. Мерења су извођена у реалном времену рада система, откопавањем вертикалним резовима, са претходно дефинисаним микротехнолошким параметрима блока [91].

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 %. На тај начин, створена је могућност за креирање модела који дефинише утицај похабаности резних елемената на тренд потрошње електричне енергије и ниво амплитуде вибрација.

На багеру SRs2000.32/5+VR на погону за копање ангажована су два мотора инсталисане снаге по 670 [kW]. Ови мотори раде паралелно, па је за одређивање специфичног отпора материјала на копање неопходно сабрати парцијалне вредности струје коју мотори повлаче из мреже. Специфични отпор материјала на копање је у функцији микротехнолошких параметара блока, од којих су најзначајнији [91], [92]:

- висина подетаже;
- дебљина реза;
- брзина кружног кретања (окретања горње градње); и
- угаони положај стреле роторног точка (мерено од уздужне осе багера).

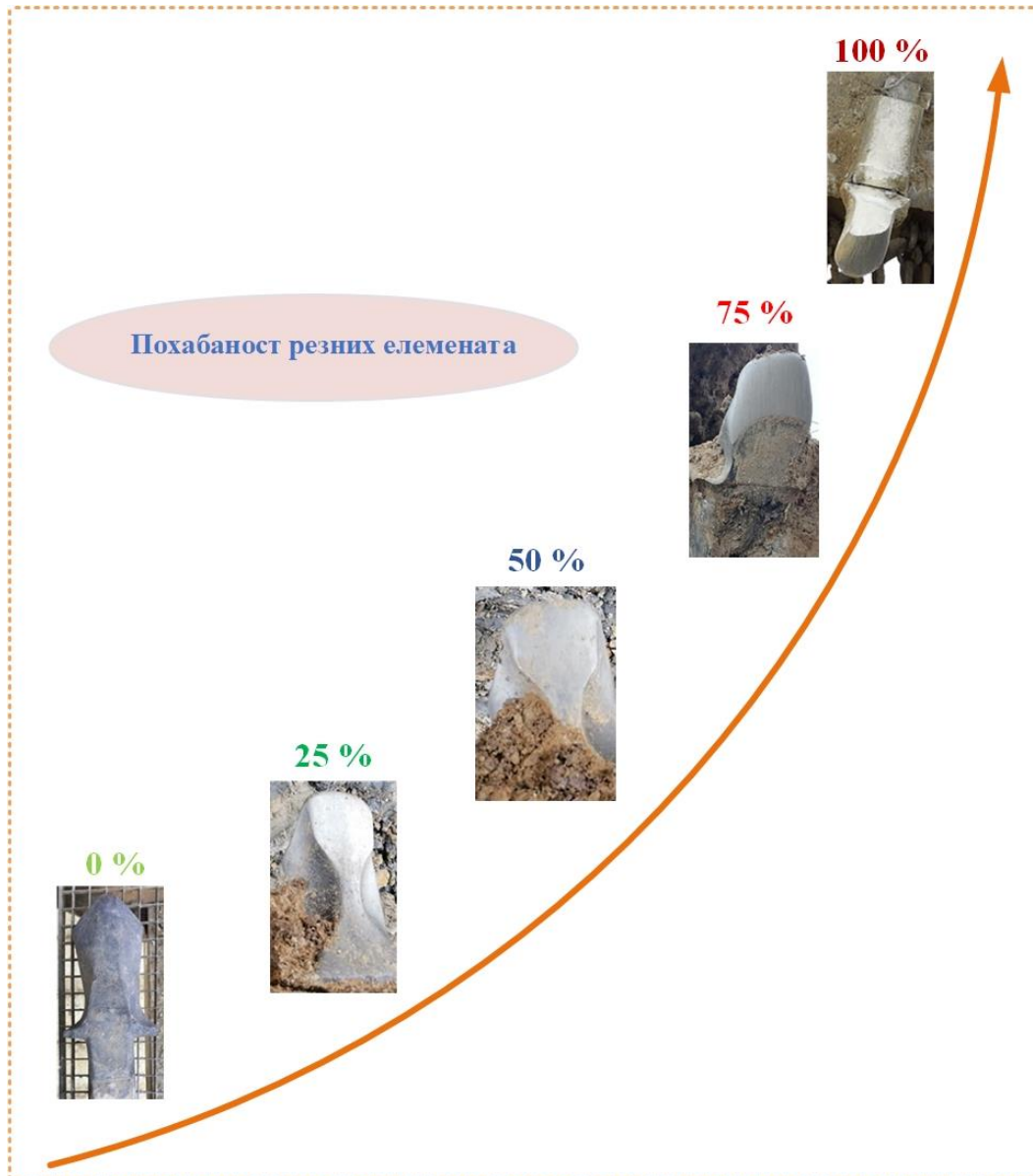
Техничке карактеристике багера SRs2000.32/5+VR су у табели 8.1.

Таблица 8.1. Основне техничке карактеристике багера SRs2000.32/5+VR [4], [92]

Површински коп Тамнава–Западно поље – Багер SRs2000.32/5+VR		
Инсталисана снага мотора за погон роторног точка	2 • 670	[kW]
Запремина ведрице са прстенастим простором	2000	[l]
Број ведрица	20	ком.
Брзина кружног кретања горње градње	30	[m/min]
Угаоно растојање између ведрица	18	[°]
Пречник роторног точка	12	[m]
Напон мотора	6000	[V]
Ободна брзина роторног точка	2,7	[m/s]
Специфична резна сила	1000	[N/cm]

Приликом мерења, промена параметара одреска вршена је тако да се за константну висину одреска: $h_1 = 7$ [m] 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 [92], а то је $v_1 = 21$ [m/min].

На сликама 8.1 и 8.2 приказано је електронско снимање података током мерења и роторни точак у раду. На слици 8.3 дат је изглед блока у ком су вршена мерења, док су на слици 8.4 представљени резни елементи багера SRs2000.32/5+VR за одговарајуће степене похабаности. Формулар коришћен при мерењу струје налази се у прилогу 1.



Слика 8.4. Нивои похабаности резних елемената у току мерења

8.1 Резултати мерења специфичног отпора материјала на копање

8.1.1 Резултати мерења за случај нових резних елемената

Резултати мерења специфичног отпора материјала на копање биће приказани парцијално. Прво резултати мерења за доњи мотор погона за копање (слика 8.5, таблица 8.2) и његова специфична потрошња електричне енергије (таблица 8.4.), затим исти резултати за горњи мотор (слика 8.6, таблице 8.3 и 8.5.) и на крају збирне вредности за цео погон (таблица 8.7.) (два мотора погона за копање, инсталисане снаге по 670 [kW]), помоћу којих се долази до укупног специфичног отпора материјала на копање. Микротехнолошки параметри блока задржани су код свих мерења, са одступањима који немају утицај на могућност поређења добијених резултата.

За одређивање специфичног отпора материјала на копање коришћена је Ватметарска метода [1], по алгоритму представљеном у поглављу 5. Извештаји на основу којих се ушло у анализу јачине струје коју погон за копање повлачи из мреже преузети су из диспечерског центра површинског копа Тамнава–Западно поље за роторни багер SRs2000.32/5+VR.



Слика 8.5. Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – нови резни елементи



Слика 8.6. Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – нови резни елементи

Дијаграми се обрађују према дефинисаним микротехнолошким параметрима блока. Дебљина реза имала је три промене: 0,25 [m], 0,4 [m] и 0,5 [m]. При мерењу, багер је за једну дебљину реза ишао у леву (L) и десну (D) страну. Бележена су времена уласка и изласка роторног точка из реза.

Дијаграм је подељен на одговарајуће секције; 1L, 1D за дебљину реза 0,25 [m], 2L, 2D, за дебљину 0,4 [m] и 3L, 3D за дебљину 0,5 [m]. У оквиру једног пролаза, у односу на ширину блока и углове окретања стреле роторног точка, једна секција редукована је на четири дела (1L1, 1L2, 1L3, 1L4,...). За сваку секцију читава се *минимална, средња и максимална вредност струје*. Пикови струје су дати у процентима. За примену Ватметарске методе [1] процентуалне вредности се преводе у јачину струје (Ампере), према обрасцу који представља препоруку електро службе одржавања [92]:

$$I_m = \frac{79 \cdot I, \%}{100} \quad (8.1)$$

У таблицама 8.2 и 8.3 приказане су вредности очитаних пикова струје за доњи и горњи погон роторног точка за мерење са новим резним елементима. Погон је за дебљину реза 0,5 [m] и кретање у десно избацио. Мерење је настављено, али је код анализе резултата узет у обзир период од уласка у рез до првог избацивања.

Таблица 8.2. Очитане вредности пикова струје – доњи погон копања, нови зуби

I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]
1L1	MIN	45		35,55	2L1	MIN	65		51,35	3L1	MIN	70		55,3
	SREDNJA	47,25		37,328		SREDNJA	75,75		59,843		SREDNJA	75,75		59,8425
	MAX	49,5		39,105		MAX	86,5		68,335		MAX	81,5		64,385
1L2	MIN	44		34,76	2L2	MIN	62		48,98	3L2	MIN	65		51,35
	SREDNJA	47,25		37,328		SREDNJA	66		52,14		SREDNJA	71,75		56,6825
	MAX	50,5		39,895		MAX	70		55,3		MAX	78,5		62,015
1L3	MIN	41,5		32,785	2L3	MIN	46		36,34	3L3	MIN	54,5		43,055
	SREDNJA	44,25		34,958		SREDNJA	48,75		38,513		SREDNJA	59		46,61
	MAX	47		37,13		MAX	51,5		40,685		MAX	63,5		50,165
1L4	MIN	39,5		31,205	2L4	MIN	39,5		31,205	3L4	MIN	54		42,66
	SREDNJA	40		31,6		SREDNJA	41,75		32,983		SREDNJA	58,75		46,4125
	MAX	40,5		31,995		MAX	44		34,76		MAX	63,5		50,165
1D1	MIN	40		31,6	2D1	MIN	45,5		35,945	3D1	MIN	44		34,76
	SREDNJA	42		33,18		SREDNJA	47,25		37,328		SREDNJA	49		38,71
	MAX	44		34,76		MAX	49		38,71		MAX	54		42,66
1D2	MIN	44		34,76	2D2	MIN	50		39,5	3D2	MIN	50,5		39,895
	SREDNJA	45,5		35,945		SREDNJA	52,5		41,475		SREDNJA	53		41,87
	MAX	47		37,13		MAX	55		43,45		MAX	55,5		43,845
1D3	MIN	49,5		39,105	2D3	MIN	63		49,77	3D3	MIN	64		50,56
	SREDNJA	50		39,5		SREDNJA	60		47,4		SREDNJA	69,5		54,905
	MAX	50,5		39,895		MAX	57		45,03		MAX	75		59,25
1D4	MIN	52		41,08	2D4	MIN	60		47,4	3D4	MIN	65		51,35
	SREDNJA	54,25		42,858		SREDNJA	70		55,3		SREDNJA	81,25		64,1875
	MAX	56,5		44,635		MAX	80		63,2		MAX	97,5		77,025

Таблица 8.3. Очитане вредности пикова струје – горњи погон копања, нови зуби

I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]
1L1	MIN	45,5		35,945	2L1	MIN	60		47,4	3L1	MIN	64,5		50,955
	SREDNJA	47,25		37,328		SREDNJA	67,75		53,523		SREDNJA	72,25		57,0775
	MAX	49		38,71		MAX	75,5		59,645		MAX	80		63,2
1L2	MIN	44,5		35,155	2L2	MIN	63,5		50,165	3L2	MIN	65,5		51,745
	SREDNJA	47		37,13		SREDNJA	75		59,25		SREDNJA	71		56,09
	MAX	49,5		39,105		MAX	86,5		68,335		MAX	76,5		60,435
1L3	MIN	41		32,39	2L3	MIN	58,5		46,215	3L3	MIN	53		41,87
	SREDNJA	43,25		34,168		SREDNJA	66,75		52,733		SREDNJA	56,5		44,635
	MAX	45,5		35,945		MAX	75		59,25		MAX	60		47,4
1L4	MIN	38,5		30,415	2L4	MIN	40,5		31,995	3L4	MIN	42,5		33,575
	SREDNJA	40,5		31,995		SREDNJA	42,75		33,773		SREDNJA	45,5		35,945
	MAX	42,5		33,575		MAX	45		35,55		MAX	48,5		38,315
1D1	MIN	41		32,39	2D1	MIN	40		31,6	3D1	MIN	39		30,81
	SREDNJA	44,25		34,958		SREDNJA	41,5		32,785		SREDNJA	40,25		31,7975
	MAX	47,5		37,525		MAX	43		33,97		MAX	41,5		32,785
1D2	MIN	40		31,6	2D2	MIN	48,5		38,315	3D2	MIN	54,5		43,055
	SREDNJA	42,75		33,773		SREDNJA	52,25		41,278		SREDNJA	55,75		44,0425
	MAX	45,5		35,945		MAX	56		44,24		MAX	57		45,03
1D3	MIN	47,5		37,525	2D3	MIN	54,5		43,055	3D3	MIN	58,5		46,215
	SREDNJA	51,25		40,488		SREDNJA	61,5		48,585		SREDNJA	69,5		54,905
	MAX	55		43,45		MAX	68,5		54,115		MAX	80,5		63,595
1D4	MIN	53,5		42,265	2D4	MIN	60,5		47,795	3D4	MIN	81,5		64,385
	SREDNJA	55,5		43,845		SREDNJA	72,75		57,473		SREDNJA	98,75		78,0125
	MAX	57,5		45,425		MAX	85		67,15		MAX	116		91,64

Таблица 8.4. Специфични отпор материјала на копање за случај нових резних елемената, доњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	-33	-11	L	7	0,25	21	2044	37,33	39,11	35,55	251,8	263,8	239,8	52,9	89,8	0,097	0,102	4,33	0,23	1,64	122,4	207,5	14,2	24,1	165,0	19,1
2.	-11	13	L	7	0,25	21	2157	37,33	39,90	34,76	251,8	269,1	234,5	51,1	91,6	0,092	0,099	4,33	0,23	1,64	118,2	211,8	13,7	24,6	165,0	19,1
3.	13	37	L	7	0,25	21	1998	34,96	37,13	32,79	235,8	250,5	221,2	48,2	85,2	0,092	0,098	4,33	0,23	1,64	111,5	197,1	12,9	22,9	154,3	17,9
4.	37	62	L	7	0,25	21	1432	31,60	32,00	31,21	213,2	215,8	210,5	49,7	73,4	0,113	0,115	4,33	0,23	1,64	114,9	169,8	13,3	19,7	142,3	16,5
5.	62	37	D	7	0,25	21	1432	33,18	34,76	31,60	223,8	234,5	213,2	53,3	79,8	0,120	0,127	4,33	0,23	1,64	123,3	184,5	14,3	21,4	153,9	17,9
6.	37	13	D	7	0,25	21	1998	35,95	37,13	34,76	242,5	250,5	234,5	50,5	85,2	0,095	0,098	4,33	0,23	1,64	116,8	197,0	13,5	22,9	156,9	18,2
7.	13	-11	D	7	0,25	21	2157	39,50	39,90	39,11	266,5	269,1	263,8	56,1	91,6	0,098	0,099	4,33	0,23	1,64	129,8	211,7	15,1	24,6	170,7	19,8
8.	-11	-33	D	7	0,25	21	2044	42,86	44,64	41,08	289,1	301,1	277,1	65,7	102,5	0,114	0,119	4,33	0,23	1,64	152,0	236,9	17,6	27,5	194,4	22,6
9.	-33	-11	L	7	0,4	21	3271	59,84	68,34	51,35	403,7	461,0	346,4	85,0	157,0	0,103	0,120	4,89	0,36	1,64	173,7	320,8	14,2	26,3	247,2	20,3
10.	-11	13	L	7	0,4	21	3451	52,14	55,30	48,98	351,7	373,0	330,4	64,3	127,0	0,084	0,090	4,89	0,36	1,64	131,3	259,5	10,8	21,3	195,4	16,0
11.	13	37	L	7	0,4	21	3197	38,51	40,69	36,34	259,8	274,5	245,1	36,9	93,4	0,064	0,068	4,89	0,36	1,64	75,4	190,9	6,2	15,7	133,1	10,9
12.	37	62	L	7	0,4	21	2291	32,98	34,76	31,21	222,5	234,5	210,5	38,9	79,8	0,075	0,079	4,89	0,36	1,64	79,5	163,1	6,5	13,4	121,3	9,9
13.	62	37	D	7	0,4	21	2291	37,33	38,71	35,95	251,8	261,1	242,5	48,9	88,9	0,086	0,090	4,89	0,36	1,64	100,0	181,6	8,2	14,9	140,8	11,5
14.	37	13	D	7	0,4	21	3197	41,48	43,45	39,50	279,8	293,1	266,5	43,7	99,7	0,070	0,074	4,89	0,36	1,64	89,4	203,9	7,3	16,7	146,6	12,0
15.	13	-11	D	7	0,4	21	3451	47,40	45,03	49,77	319,8	303,8	335,7	53,3	103,3	0,076	0,071	4,89	0,36	1,64	108,9	211,1	8,9	17,3	160,0	13,1
16.	-11	-33	D	7	0,4	21	3271	55,30	63,20	47,40	373,0	426,3	319,8	74,5	145,2	0,095	0,110	4,89	0,36	1,64	152,2	296,7	12,5	24,3	224,5	18,4
17.	-33	-11	L	7	0,5	21	4089	59,84	64,39	55,30	403,7	434,3	373,0	71,7	147,8	0,083	0,090	5,27	0,45	1,64	135,9	280,5	9,6	19,8	208,2	14,7
18.	-11	13	L	7	0,5	21	4314	56,68	62,02	51,35	382,4	418,3	346,4	60,7	142,4	0,074	0,082	5,27	0,45	1,64	115,1	270,2	8,1	19,1	192,6	13,6
19.	13	37	L	7	0,5	21	3997	46,61	50,17	43,06	314,4	338,4	290,4	42,6	115,2	0,064	0,070	5,27	0,45	1,64	80,8	218,5	5,7	15,4	149,6	10,6
20.	37	62	L	7	0,5	21	2864	46,41	50,17	42,66	313,1	338,4	287,8	60,6	115,2	0,089	0,097	5,27	0,45	1,64	114,9	218,5	8,1	15,4	166,7	11,8
21.	62	37	D	7	0,5	21	2864	38,71	42,66	34,76	261,1	287,8	234,5	42,8	98,0	0,072	0,081	5,27	0,45	1,64	81,2	185,8	5,7	13,1	133,5	9,4
22.	37	13	D	7	0,5	21	2864	55,50	60,80	52,50	330,2	337,3	328,5	48,5	105,4	0,085	0,097	5,27	0,45	1,64	90,5	195,5	6,4	14,3	137,5	11,2

Таблица 8.5. Специфични отпор материјала на копање за случај нових резних елемената, горњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{of}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	-33	-11	L	7	0,25	21	2044	37,33	38,71	35,95	251,8	261,1	242,5	52,9	88,9	0,097	0,101	4,33	0,23	1,64	122,4	205,4	14,2	23,8	163,9	19,0
2.	-11	13	L	7	0,25	21	2157	37,13	39,11	35,16	250,5	263,8	237,2	50,7	89,8	0,091	0,097	4,33	0,23	1,64	117,1	207,6	13,6	24,1	162,3	18,8
3.	13	37	L	7	0,25	21	1998	34,17	35,95	32,39	230,5	242,5	218,5	46,4	82,5	0,089	0,095	4,33	0,23	1,64	107,3	190,8	12,4	22,1	149,0	17,3
4.	37	62	L	7	0,25	21	1432	32,00	33,58	30,42	215,8	226,5	205,2	50,6	77,1	0,115	0,122	4,33	0,23	1,64	117,0	178,2	13,6	20,7	147,6	17,1
5.	62	37	D	7	0,25	21	1432	34,96	37,53	32,39	235,8	253,1	218,5	57,4	86,2	0,128	0,139	4,33	0,23	1,64	132,8	199,2	15,4	23,1	166,0	19,3
6.	37	13	D	7	0,25	21	1998	33,77	35,95	31,60	227,8	242,5	213,2	45,5	82,5	0,088	0,095	4,33	0,23	1,64	105,1	190,8	12,2	22,1	148,0	17,2
7.	13	-11	D	7	0,25	21	2157	40,49	43,45	37,53	273,1	293,1	253,1	58,4	99,8	0,101	0,109	4,33	0,23	1,64	135,1	230,6	15,7	26,8	182,9	21,2
8.	-11	-33	D	7	0,25	21	2044	43,85	45,43	42,27	295,8	306,4	285,1	68,0	104,3	0,117	0,122	4,33	0,23	1,64	157,2	241,1	18,2	28,0	199,2	23,1
9.	-33	-11	L	7	0,4	21	3271	53,52	59,65	47,40	361,1	402,4	319,8	70,4	137,0	0,091	0,103	4,89	0,36	1,64	143,8	280,0	11,8	23,0	211,9	17,4
10.	-11	13	L	7	0,4	21	3451	59,25	68,34	50,17	399,7	461,0	338,4	80,7	157,0	0,097	0,113	4,89	0,36	1,64	164,9	320,8	13,5	26,3	242,9	19,9
11.	13	37	L	7	0,4	21	3197	52,73	59,25	46,22	355,7	399,7	311,8	69,8	136,1	0,092	0,105	4,89	0,36	1,64	142,6	278,1	11,7	22,8	210,3	17,3
12.	37	62	L	7	0,4	21	2291	33,77	35,55	32,00	227,8	239,8	215,8	40,7	81,6	0,077	0,082	4,89	0,36	1,64	83,2	166,8	6,8	13,7	125,0	10,3
13.	62	37	D	7	0,4	21	2291	32,79	33,97	31,60	221,2	229,2	213,2	38,4	78,0	0,074	0,077	4,89	0,36	1,64	78,5	159,4	6,4	13,1	119,0	9,8
14.	37	13	D	7	0,4	21	3197	41,28	44,24	38,32	278,5	298,4	258,5	43,3	101,6	0,070	0,075	4,89	0,36	1,64	88,5	207,6	7,3	17,0	148,0	12,1
15.	13	-11	D	7	0,4	21	3451	48,59	54,12	43,06	327,7	365,1	290,4	56,0	124,3	0,078	0,088	4,89	0,36	1,64	114,5	254,0	9,4	20,8	184,3	15,1
16.	-11	-33	D	7	0,4	21	3271	57,47	67,15	47,80	387,7	453,0	322,4	79,5	154,3	0,099	0,117	4,89	0,36	1,64	162,5	315,3	13,3	25,9	238,9	19,6
17.	-33	-11	L	7	0,5	21	4089	57,08	63,20	50,96	385,0	426,3	343,7	65,3	145,1	0,079	0,088	5,27	0,45	1,64	123,8	275,3	8,8	19,5	199,6	14,1
18.	-11	13	L	7	0,5	21	4314	56,09	60,44	51,75	378,4	407,7	349,1	59,3	138,8	0,073	0,079	5,27	0,45	1,64	112,5	263,2	8,0	18,6	187,9	13,3
19.	13	37	L	7	0,5	21	3997	44,64	47,40	41,87	301,1	319,8	282,5	38,0	108,8	0,061	0,065	5,27	0,45	1,64	72,1	206,4	5,1	14,6	139,3	9,8
20.	37	62	L	7	0,5	21	2864	35,95	38,32	33,58	242,5	258,5	226,5	36,4	88,0	0,066	0,071	5,27	0,45	1,64	69,0	166,9	4,9	11,8	118,0	8,3
21.	62	37	D	7	0,5	21	2864	31,80	32,79	30,81	214,5	221,2	207,8	26,8	75,3	0,057	0,059	5,27	0,45	1,64	50,9	142,8	3,6	10,1	96,8	6,8
22.	37	13	D	7	0,5	21	2864	45,50	50,00	42,50	327,5	249,7	325,2	38,5	102,5	0,082	0,065	5,27	0,45	1,64	65,2	152,7	4,8	13,2	105,2	8,8

Електромотори погона за копање (доњи и горњи) раде паралелно. Укупна вредност очитаних пикова струје, за дефинисање отпора на копање добија се сабирањем парцијалних вредности струје за доњи и горњи погон:

$$I_{uk} = I_d + I_g \quad (8.2)$$

где је:

I_{uk} – укупна вредност јачине струје коју погон повлачи из мреже, [А].

Таблица 8.6. Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај нових резних елемената

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	-33	-11	L	7	0,25	21	2044	74,66	77,82	71,50	503,6	524,9	482,3	139,2	178,6	0,211	0,220	4,33	0,23	1,64	321,9	413,0	37,3	47,9	367,4	42,6
2.	-11	13	L	7	0,25	21	2157	74,46	79,00	69,92	502,3	532,9	471,6	136,9	181,4	0,199	0,212	4,33	0,23	1,64	316,6	419,3	36,7	48,6	368,0	42,7
3.	13	37	L	7	0,25	21	1998	69,13	73,08	65,18	466,3	493,0	439,7	127,2	167,8	0,198	0,211	4,33	0,23	1,64	294,1	387,9	34,1	45,0	341,0	39,6
4.	37	62	L	7	0,25	21	1432	63,60	65,57	61,62	429,0	442,3	415,7	123,6	150,5	0,253	0,261	4,33	0,23	1,64	285,8	348,0	33,2	40,4	316,9	36,8
5.	62	37	D	7	0,25	21	1432	68,14	72,29	63,99	459,6	487,6	431,7	134,1	165,9	0,272	0,291	4,33	0,23	1,64	310,1	383,7	36,0	44,5	346,9	40,2
6.	37	13	D	7	0,25	21	1998	69,72	73,08	66,36	470,3	493,0	447,7	128,6	167,7	0,200	0,211	4,33	0,23	1,64	297,2	387,8	34,5	45,0	342,5	39,7
7.	13	-11	D	7	0,25	21	2157	79,99	83,35	76,63	539,6	562,2	516,9	149,7	191,3	0,215	0,225	4,33	0,23	1,64	346,1	442,3	40,2	51,3	394,2	45,7
8.	-11	-33	D	7	0,25	21	2044	86,70	90,06	83,35	584,9	607,5	562,2	167,1	206,7	0,248	0,258	4,33	0,23	1,64	386,2	478,0	44,8	55,4	432,1	50,1
9.	-33	-11	L	7	0,4	21	3271	113,37	127,98	98,75	764,7	863,3	666,2	208,7	293,9	0,206	0,233	4,89	0,36	1,64	426,5	600,8	35,0	49,3	513,6	42,1
10.	-11	13	L	7	0,4	21	3451	111,39	123,64	99,15	751,4	834,0	668,8	201,2	283,9	0,191	0,213	4,89	0,36	1,64	411,2	580,3	33,7	47,6	495,7	40,7
11.	13	37	L	7	0,4	21	3197	91,25	99,94	82,56	615,5	674,2	556,9	158,8	229,5	0,167	0,184	4,89	0,36	1,64	324,5	469,0	26,6	38,5	396,8	32,5
12.	37	62	L	7	0,4	21	2291	66,76	70,31	63,20	450,3	474,3	426,3	116,9	161,4	0,167	0,176	4,89	0,36	1,64	239,0	329,9	19,6	27,1	284,4	23,3
13.	62	37	D	7	0,4	21	2291	70,11	72,68	67,55	473,0	490,3	455,7	124,7	166,8	0,176	0,183	4,89	0,36	1,64	254,9	341,0	20,9	28,0	297,9	24,4
14.	37	13	D	7	0,4	21	3197	82,75	87,69	77,82	558,2	591,5	524,9	139,1	201,3	0,151	0,160	4,89	0,36	1,64	284,4	411,5	23,3	33,7	347,9	28,5
15.	13	-11	D	7	0,4	21	3451	95,99	99,15	92,83	647,5	668,8	626,2	165,6	227,6	0,163	0,169	4,89	0,36	1,64	338,4	465,1	27,8	38,2	401,8	33,0
16.	-11	-33	D	7	0,4	21	3271	112,77	130,35	95,20	760,8	879,3	642,2	207,3	299,4	0,204	0,238	4,89	0,36	1,64	423,7	612,0	34,8	50,2	517,8	42,5
17.	-33	-11	L	7	0,5	21	4089	116,92	127,59	106,26	788,7	860,7	716,8	203,6	293,0	0,170	0,186	5,27	0,45	1,64	386,2	555,8	27,3	39,3	471,0	33,3
18.	-11	13	L	7	0,5	21	4314	112,77	122,45	103,10	760,8	826,0	695,5	190,3	281,2	0,155	0,169	5,27	0,45	1,64	361,1	533,4	25,5	37,7	447,2	31,6
19.	13	37	L	7	0,5	21	3997	91,25	97,57	84,93	615,5	658,2	572,9	145,7	224,0	0,134	0,144	5,27	0,45	1,64	276,5	425,0	19,5	30,0	350,7	24,8
20.	37	62	L	7	0,5	21	2864	82,36	88,48	76,24	555,6	596,9	514,3	143,7	203,1	0,167	0,181	5,27	0,45	1,64	272,5	385,4	19,3	27,2	329,0	23,3
21.	62	37	D	7	0,5	21	2864	70,51	75,45	65,57	475,6	508,9	442,3	116,3	173,2	0,141	0,152	5,27	0,45	1,64	220,6	328,6	15,6	23,2	274,6	19,4
22.	37	13	D	7	0,5	21	2864	101,00	110,80	95,00	680,5	747,2	650,7	180,5	254,4	0,169	0,229	5,27	0,45	1,64	354,2	485,4	17,5	25,2	289,5	21,2

8.1.2 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 25 %

По истој аналогiji биће приказани резултати мерења за случај похабаности резних елемената 25 %, 50 %, 75 % и 100 %.

Струја коју доњи погон повлачи из мреже



Слика 8.7. Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 25 %

Струја коју горњи погон повлачи из мреже



Слика 8.8. Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 25 %

Таблица 8.7. Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 25 %

I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]
1L1	MIN	50,6		39,974	2L1	MIN	70,35		55,577	3L1	MIN	74,55		58,8945
	SREDNJA	53,328		42,129		SREDNJA	81,988		64,77		SREDNJA	81,413		64,3159
	MAX	56,055		44,283		MAX	93,625		73,964		MAX	88,275		69,7373
1L2	MIN	47,25		37,328	2L2	MIN	67,2		53,088	3L2	MIN	69,3		54,747
	SREDNJA	51,178		40,43		SREDNJA	71,585		56,552		SREDNJA	77,183		60,9742
	MAX	55,105		43,533		MAX	75,97		60,016		MAX	85,065		67,2014
1L3	MIN	44,625		35,254	2L3	MIN	50,925		40,231	3L3	MIN	58,275		46,0373
	SREDNJA	47,993		37,914		SREDNJA	53,55		42,305		SREDNJA	63,645		50,2796
	MAX	51,36		40,574		MAX	56,175		44,378		MAX	69,015		54,5219
1L4	MIN	42,525		33,595	2L4	MIN	43,575		34,424	3L4	MIN	57,75		45,6225
	SREDNJA	56,538		44,665		SREDNJA	45,863		36,231		SREDNJA	63,383		50,0722
	MAX	70,55		55,735		MAX	48,15		38,039		MAX	69,015		54,5219
1D1	MIN	43,05		34,01	2D1	MIN	48,825		38,572	3D1	MIN	47,25		37,3275
	SREDNJA	45,6		36,024		SREDNJA	51,163		40,418		SREDNJA	53,05		41,9095
	MAX	48,15		38,039		MAX	53,5		42,265		MAX	58,85		46,4915
1D2	MIN	47,25		37,328	2D2	MIN	53,55		42,305	3D2	MIN	54,075		42,7193
	SREDNJA	49,305		38,951		SREDNJA	56,735		44,821		SREDNJA	57,265		45,2394
	MAX	51,36		40,574		MAX	59,92		47,337		MAX	60,455		47,7595
1D3	MIN	53,025		41,89	2D3	MIN	67,2		53,088	3D3	MIN	68,25		53,9175
	SREDNJA	54,065		42,711		SREDNJA	64,63		51,058		SREDNJA	74,785		59,0802
	MAX	55,105		43,533		MAX	62,06		49,027		MAX	81,32		64,2428
1D4	MIN	55,65		43,964	2D4	MIN	66,15		52,259	3D4	MIN	71,4		56,406
	SREDNJA	58,588		46,284		SREDNJA	76,41		60,364		SREDNJA	89,468		70,6793
	MAX	61,525		48,605		MAX	86,67		68,469		MAX	107,54		84,9527

Таблица 8.8. Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 25 %

I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]	I			%	I _m [A]
1L1	MIN	51,15		40,409	2L1	MIN	69,3		54,747	3L1	MIN	72,05		56,9195
	SREDNJA	53,75		42,463		SREDNJA	78,638		62,124		SREDNJA	80,98		63,9742
	MAX	56,35		44,517		MAX	87,975		69,5		MAX	89,91		71,0289
1L2	MIN	50,05		39,54	2L2	MIN	70,95		56,051	3L2	MIN	73,15		57,7885
	SREDNJA	53,488		42,255		SREDNJA	84,475		66,735		SREDNJA	79,975		63,1803
	MAX	56,925		44,971		MAX	98		77,42		MAX	86,8		68,572
1L3	MIN	46,2		36,498	2L3	MIN	66,55		52,575	3L3	MIN	59,4		46,926
	SREDNJA	49,263		38,917		SREDNJA	76,395		60,352		SREDNJA	64,775		51,1723
	MAX	52,325		41,337		MAX	86,24		68,13		MAX	70,15		55,4185
1L4	MIN	43,45		34,326	2L4	MIN	47,85		37,802	3L4	MIN	47,85		37,8015
	SREDNJA	46,738		36,923		SREDNJA	50,375		39,796		SREDNJA	52,388		41,3861
	MAX	50,025		39,52		MAX	52,9		41,791		MAX	56,925		44,9708
1D1	MIN	46,2		36,498	2D1	MIN	47,3		37,367	3D1	MIN	44		34,76
	SREDNJA	50,988		40,28		SREDNJA	48,95		38,671		SREDNJA	46,438		36,6856
	MAX	55,775		44,062		MAX	50,6		39,974		MAX	48,875		38,6113
1D2	MIN	45,1		35,629	2D2	MIN	54,45		43,016	3D2	MIN	61,05		48,2295
	SREDNJA	49,288		38,937		SREDNJA	60		47,4		SREDNJA	63,875		50,4613
	MAX	53,475		42,245		MAX	65,55		51,785		MAX	66,7		52,693
1D3	MIN	53,35		42,147	2D3	MIN	61,05		48,23	3D3	MIN	67,65		53,4435
	SREDNJA	58,875		46,511		SREDNJA	70,488		55,685		SREDNJA	79,465		62,7774
	MAX	64,4		50,876		MAX	79,925		63,141		MAX	91,28		72,1112
1D4	MIN	59,95		47,361	2D4	MIN	66,42		52,472	3D4	MIN	92,95		73,4305
	SREDNJA	63,613		50,254		SREDNJA	80,94		63,943		SREDNJA	107,32		84,7789
	MAX	67,275		53,147		MAX	95,46		75,413		MAX	121,68		96,1272

Таблица 8.9. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 25 %, доњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	15	30	L	7	0,25	21	2037	42,46	44,52	40,41	286,4	300,3	272,6	64,9	102,2	0,113	0,119	4,33	0,23	1,64	150,1	236,3	17,4	27,4	193,2	22,4
2.	0	15	L	7	0,25	21	2186	42,26	44,97	39,54	285,0	303,4	266,7	62,0	103,2	0,105	0,112	4,33	0,23	1,64	143,4	238,7	16,6	27,7	191,1	22,2
3.	-15	0	L	7	0,25	21	2186	38,92	41,34	36,5	262,5	278,9	246,2	54,3	94,9	0,095	0,102	4,33	0,23	1,64	125,6	219,4	14,6	25,5	172,5	20,0
4.	-30	-15	L	7	0,25	21	2037	36,92	39,52	34,33	249,1	266,6	231,6	52,1	90,7	0,096	0,104	4,33	0,23	1,64	120,5	209,8	14,0	24,3	165,2	19,2
5.	-15	0	D	7	0,25	21	2186	40,28	44,06	36,5	271,7	297,2	246,2	57,5	101,2	0,099	0,110	4,33	0,23	1,64	132,8	233,9	15,4	27,1	183,4	21,3
6.	0	15	D	7	0,25	21	2186	38,94	42,25	35,63	262,7	285,0	240,3	54,4	97,0	0,095	0,105	4,33	0,23	1,64	125,7	224,3	14,6	26,0	175,0	20,3
7.	15	30	D	7	0,25	21	2037	46,51	50,88	42,15	313,8	343,2	284,3	74,3	116,8	0,125	0,139	4,33	0,23	1,64	171,8	270,1	19,9	31,3	220,9	25,6
8.	15	30	D	7	0,25	21	2037	50,25	53,15	47,36	339,0	358,5	319,5	82,9	122,0	0,137	0,146	4,33	0,23	1,64	191,8	282,1	22,2	32,7	236,9	27,5
9.	0	15	L	7	0,4	21	3498	62,12	69,5	54,75	419,1	468,8	369,3	86,6	159,6	0,101	0,114	4,89	0,36	1,64	176,9	326,2	14,5	26,8	251,6	20,6
10.	-15	0	L	7	0,4	21	3498	66,74	77,42	56,05	450,2	522,3	378,1	97,2	177,8	0,109	0,128	4,89	0,36	1,64	198,7	363,5	16,3	29,8	281,1	23,1
11.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	60,35	68,13	52,57	407,1	459,6	354,7	86,4	156,5	0,105	0,120	4,89	0,36	1,64	176,5	319,8	14,5	26,2	248,2	20,4
12.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	39,8	41,79	37,8	268,5	281,9	255,0	38,8	95,9	0,065	0,069	4,89	0,36	1,64	79,4	196,1	6,5	16,1	137,7	11,3
13.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	38,67	39,97	37,37	260,9	269,7	252,1	32,4	91,8	0,059	0,061	4,89	0,36	1,64	66,1	187,5	5,4	15,4	126,8	10,4
14.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	47,4	51,78	43,02	319,8	349,3	290,2	52,5	118,9	0,075	0,082	4,89	0,36	1,64	107,4	243,0	8,8	19,9	175,2	14,4
15.	0	15	D	7	0,4	21	3498	55,69	63,14	48,23	375,6	425,9	325,4	71,7	145,0	0,089	0,103	4,89	0,36	1,64	146,5	296,4	12,0	24,3	221,5	18,2
16.	15	30	D	7	0,4	21	3259	63,94	75,41	52,47	431,4	508,7	354,0	94,6	173,2	0,112	0,134	4,89	0,36	1,64	193,5	354,1	15,9	29,0	273,8	22,5
17.	15	30	L	7	0,5	21	4074	63,97	71,03	56,92	431,6	479,2	384,0	81,4	163,1	0,089	0,100	5,27	0,45	1,64	154,5	309,5	10,9	21,9	232,0	16,4
18.	0	15	L	7	0,5	21	4372	63,18	68,57	57,79	426,2	462,6	389,8	74,7	157,4	0,082	0,090	5,27	0,45	1,64	141,8	298,7	10,0	21,1	220,3	15,6
19.	-15	0	L	7	0,5	21	4372	51,17	55,42	46,93	345,2	373,8	316,6	47,0	127,2	0,065	0,071	5,27	0,45	1,64	89,2	241,4	6,3	17,1	165,3	11,7
20.	-30	-15	L	7	0,5	21	4074	41,39	44,97	37,8	279,2	303,4	255,0	29,2	103,3	0,055	0,060	5,27	0,45	1,64	55,5	195,9	3,9	13,8	125,7	8,9
21.	-30	-15	D	7	0,5	21	4074	36,69	38,61	34,76	247,5	260,5	234,5	18,4	88,6	0,048	0,051	5,27	0,45	1,64	34,9	168,2	2,5	11,9	101,5	7,2
22.	-15	0	D	7	0,5	21	4372	50,46	52,69	48,23	340,4	355,5	325,4	45,4	121,0	0,064	0,067	5,27	0,45	1,64	86,0	229,5	6,1	16,2	157,8	11,2

Таблица 8.10. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 25 %, горњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{gr}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	15	30	L	7	0,25	21	2037	42,13	44,28	39,97	284,2	298,7	269,7	64,2	101,7	0,112	0,118	4,33	0,23	1,64	148,3	235,0	17,2	27,3	191,7	22,2
2.	0	15	L	7	0,25	21	2186	40,43	43,53	37,33	272,7	293,7	251,8	57,8	99,9	0,099	0,108	4,33	0,23	1,64	133,6	231,1	15,5	26,8	182,4	21,2
3.	-15	0	L	7	0,25	21	2186	37,91	40,57	35,25	255,8	273,7	237,8	52,0	93,2	0,092	0,100	4,33	0,23	1,64	120,2	215,4	13,9	25,0	167,8	19,5
4.	-30	-15	L	7	0,25	21	2037	44,66	55,73	33,59	301,3	376,0	226,6	70,0	128,1	0,120	0,154	4,33	0,23	1,64	161,9	296,1	18,8	34,4	229,0	26,6
5.	-15	0	D	7	0,25	21	2186	36,02	38,04	34,01	243,0	256,6	229,4	47,6	87,3	0,087	0,093	4,33	0,23	1,64	110,1	201,9	12,8	23,4	156,0	18,1
6.	0	15	D	7	0,25	21	2186	38,95	40,57	37,33	262,8	273,7	251,8	54,4	93,1	0,095	0,100	4,33	0,23	1,64	125,7	215,3	14,6	25,0	170,5	19,8
7.	15	30	D	7	0,25	21	2037	42,71	43,53	41,89	288,1	293,7	282,6	65,5	99,9	0,114	0,116	4,33	0,23	1,64	151,5	231,0	17,6	26,8	191,2	22,2
8.	15	30	D	7	0,25	21	2037	46,28	48,6	43,96	312,2	327,9	296,6	73,8	111,6	0,125	0,132	4,33	0,23	1,64	170,5	258,0	19,8	29,9	214,3	24,9
9.	0	15	L	7	0,4	21	3498	64,77	73,96	55,58	436,9	499,0	374,9	92,7	169,9	0,106	0,122	4,89	0,36	1,64	189,4	347,2	15,5	28,5	268,3	22,0
10.	-15	0	L	7	0,4	21	3498	56,55	60,02	53,09	381,5	404,9	358,1	73,7	137,8	0,091	0,097	4,89	0,36	1,64	150,6	281,6	12,4	23,1	216,1	17,7
11.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	42,3	44,38	40,23	285,4	299,4	271,4	44,6	101,9	0,070	0,074	4,89	0,36	1,64	91,2	208,2	7,5	17,1	149,7	12,3
12.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	36,23	38,04	34,42	244,4	256,6	232,2	30,6	87,3	0,059	0,062	4,89	0,36	1,64	62,6	178,5	5,1	14,6	120,5	9,9
13.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	40,42	42,27	38,57	272,7	285,1	260,2	36,4	97,0	0,062	0,065	4,89	0,36	1,64	74,4	198,3	6,1	16,3	136,3	11,2
14.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	44,82	47,34	42,3	302,4	319,3	285,4	46,6	108,7	0,070	0,074	4,89	0,36	1,64	95,2	222,1	7,8	18,2	158,6	13,0
15.	0	15	D	7	0,4	21	3498	51,06	49,03	53,09	344,4	330,7	358,1	61,0	112,5	0,081	0,077	4,89	0,36	1,64	124,6	229,9	10,2	18,9	177,3	14,5
16.	15	30	D	7	0,4	21	3259	60,36	68,47	52,26	407,2	461,9	352,5	86,4	157,3	0,105	0,120	4,89	0,36	1,64	176,6	321,4	14,5	26,4	249,0	20,4
17.	15	30	L	7	0,5	21	4074	64,32	69,74	58,89	433,9	470,4	397,3	82,2	160,1	0,090	0,098	5,27	0,45	1,64	156,0	303,8	11,0	21,5	229,9	16,3
18.	0	15	L	7	0,5	21	4372	60,97	67,2	54,75	411,3	453,3	369,3	69,7	154,3	0,079	0,088	5,27	0,45	1,64	132,1	292,8	9,3	20,7	212,5	15,0
19.	-15	0	L	7	0,5	21	4074	50,28	54,52	46,04	339,2	367,8	310,6	44,9	125,2	0,064	0,070	5,27	0,45	1,64	85,2	237,5	6,0	16,8	161,4	11,4
20.	-30	-15	L	7	0,5	21	4074	50,07	54,52	45,62	337,8	367,8	307,8	49,3	125,2	0,068	0,075	5,27	0,45	1,64	93,6	237,5	6,6	16,8	165,5	11,7
21.	-30	-15	D	7	0,5	21	4074	41,91	46,49	37,33	282,7	313,6	251,8	30,4	106,8	0,056	0,063	5,27	0,45	1,64	57,8	202,6	4,1	14,3	130,2	9,2
22.	-15	0	D	7	0,5	21	4372	45,24	47,76	42,72	305,2	322,2	288,2	33,3	109,6	0,057	0,060	5,27	0,45	1,64	63,2	208,0	4,5	14,7	135,6	9,6

Таблица 8.11. Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 25 %

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	15	30	L	7	0,25	21	2037	84,59	88,8	80,38	570,6	599,0	542,3	162,3	203,8	0,242	0,255	4,33	0,23	1,64	375,2	471,3	43,5	54,7	423,3	49,1
2.	0	15	L	7	0,25	21	2186	82,69	88,5	76,87	557,8	597,0	518,5	155,5	203,2	0,220	0,237	4,33	0,23	1,64	359,4	469,8	41,7	54,5	414,6	48,1
3.	-15	0	L	7	0,25	21	2186	76,83	81,91	71,75	518,3	552,6	484,0	141,9	188,1	0,203	0,218	4,33	0,23	1,64	328,2	434,8	38,1	50,4	381,5	44,3
4.	-30	-15	L	7	0,25	21	2037	81,59	95,25	67,92	550,4	642,6	458,2	155,4	218,8	0,233	0,275	4,33	0,23	1,64	359,2	505,9	41,7	58,7	432,5	50,2
5.	-15	0	D	7	0,25	21	2186	76,3	82,1	70,51	514,7	553,8	475,6	140,7	188,5	0,202	0,218	4,33	0,23	1,64	325,3	435,8	37,7	50,6	380,6	44,2
6.	0	15	D	7	0,25	21	2186	77,89	82,82	72,96	525,4	558,7	492,2	144,4	190,1	0,206	0,220	4,33	0,23	1,64	333,8	439,6	38,7	51,0	386,7	44,9
7.	15	30	D	7	0,25	21	2037	89,22	94,41	84,04	601,9	636,9	566,9	173,0	216,7	0,256	0,272	4,33	0,23	1,64	400,0	501,1	46,4	58,1	450,5	52,3
8.	15	30	D	7	0,25	21	2037	96,54	101,8	91,32	651,2	686,4	616,1	189,9	233,6	0,279	0,294	4,33	0,23	1,64	439,1	540,1	50,9	62,7	489,6	56,8
9.	0	15	L	7	0,4	21	3498	126,9	143,5	110,3	856,0	967,8	744,2	236,3	329,5	0,216	0,246	4,89	0,36	1,64	482,9	673,4	39,6	55,2	578,2	47,4
10.	-15	0	L	7	0,4	21	3498	123,3	137,4	109,1	831,7	927,1	736,2	227,9	315,6	0,210	0,235	4,89	0,36	1,64	465,8	645,1	38,2	52,9	555,5	45,6
11.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	102,7	112,5	92,81	692,5	759,0	626,1	184,1	258,3	0,186	0,205	4,89	0,36	1,64	376,3	528,0	30,9	43,3	452,2	37,1
12.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	76,03	79,83	72,23	512,9	538,5	487,2	122,6	183,3	0,135	0,142	4,89	0,36	1,64	250,5	374,6	20,5	30,7	312,5	25,6
13.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	79,09	82,24	75,94	533,5	554,8	512,3	125,8	188,8	0,131	0,137	4,89	0,36	1,64	257,1	385,8	21,1	31,6	321,4	26,4
14.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	92,22	99,12	85,32	622,1	668,7	575,6	156,1	227,6	0,155	0,167	4,89	0,36	1,64	319,1	465,1	26,2	38,2	392,1	32,2
15.	0	15	D	7	0,4	21	3498	106,7	112,2	101,3	720,1	756,7	683,5	189,7	257,5	0,180	0,190	4,89	0,36	1,64	387,7	526,3	31,8	43,2	457,0	37,5
16.	15	30	D	7	0,4	21	3259	124,3	143,9	104,7	838,6	970,6	706,5	234,2	330,5	0,227	0,265	4,89	0,36	1,64	478,6	675,5	39,3	55,4	577,1	47,3
17.	15	30	L	7	0,5	21	4074	128,3	140,8	115,8	865,4	949,6	781,3	230,1	323,2	0,188	0,207	5,27	0,45	1,64	436,5	613,2	30,9	43,4	524,9	37,1
18.	0	15	L	7	0,5	21	4372	124,2	135,8	112,5	837,5	915,9	759,2	215,7	311,8	0,169	0,186	5,27	0,45	1,64	409,2	591,5	28,9	41,8	500,3	35,4
19.	-15	0	L	7	0,5	21	4372	101,5	109,9	92,96	684,4	741,6	627,1	163,2	252,4	0,137	0,149	5,27	0,45	1,64	309,6	478,9	21,9	33,9	394,3	27,9
20.	-30	-15	L	7	0,5	21	4074	91,46	99,49	83,42	617,0	671,2	562,8	145,0	228,4	0,131	0,144	5,27	0,45	1,64	275,0	433,4	19,4	30,6	354,2	25,0
21.	-30	-15	D	7	0,5	21	4074	78,6	85,1	72,09	530,2	574,1	486,3	115,2	195,4	0,112	0,122	5,27	0,45	1,64	218,6	370,7	15,5	26,2	294,7	20,8
22.	-15	0	D	7	0,5	21	4372	95,7	100,5	90,95	645,6	677,6	613,5	149,9	230,6	0,129	0,135	5,27	0,45	1,64	284,4	437,5	20,1	30,9	360,9	25,5

8.1.3 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 50 %

Струја коју доњи погон повлачи из мреже



Слика 8.9. Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 50 %

Струја коју горњи погон повлачи из мреже



Слика 8.10. Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 50 %

Таблица 8.12. Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 50 %

			<i>I</i>	%	<i>I_m</i> [A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i> [A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i> [A]
1L1	MIN		50,49		39,887	2L1	MIN		69,615		54,996	3L1	MIN		74,97		59,2263
	SREDNJA		53,816		42,515		SREDNJA		82,936		65,52		SREDNJA		82,832		65,437
	MAX		57,143		45,143		MAX		96,257		76,043		MAX		90,693		71,6476
1L2	MIN		47,124		37,228	2L2	MIN		66,402		52,458	3L2	MIN		69,615		54,9959
	SREDNJA		51,66		40,812		SREDNJA		72,149		56,998		SREDNJA		78,485		62,0031
	MAX		56,196		44,395		MAX		77,896		61,538		MAX		87,355		69,0103
1L3	MIN		44,447		35,113	2L3	MIN		49,266		38,92	3L3	MIN		58,37		46,1119
	SREDNJA		48,374		38,215		SREDNJA		53,288		42,097		SREDNJA		64,516		50,9678
	MAX		52,302		41,318		MAX		57,309		45,274		MAX		70,663		55,8236
1L4	MIN		42,305		33,421	2L4	MIN		42,305		33,421	3L4	MIN		57,834		45,6889
	SREDNJA		56,954		44,994		SREDNJA		45,634		36,051		SREDNJA		64,248		50,7562
	MAX		71,604		56,567		MAX		48,963		38,681		MAX		70,663		55,8236
1D1	MIN		42,84		33,844	2D1	MIN		48,731		38,497	3D1	MIN		47,124		37,228
	SREDNJA		45,902		36,262		SREDNJA		51,629		40,787		SREDNJA		53,608		42,35
	MAX		48,963		38,681		MAX		54,527		43,076		MAX		60,091		47,472
1D2	MIN		47,124		37,228	2D2	MIN		53,55		42,305	3D2	MIN		54,086		42,7275
	SREDNJA		49,713		39,273		SREDNJA		57,377		45,328		SREDNJA		57,923		45,7591
	MAX		52,302		41,318		MAX		61,204		48,351		MAX		61,76		48,7907
1D3	MIN		53,015		41,881	2D3	MIN		67,473		53,304	3D3	MIN		68,544		54,1498
	SREDNJA		54,605		43,138		SREDNJA		65,451		51,707		SREDNJA		76,002		60,0416
	MAX		56,196		44,395		MAX		63,43		50,109		MAX		83,46		65,9334
1D4	MIN		55,692		43,997	2D4	MIN		64,26		50,765	3D4	MIN		69,615		54,9959
	SREDNJA		59,283		46,833		SREDNJA		76,642		60,547		SREDNJA		89,057		70,3546
	MAX		62,873		49,67		MAX		89,024		70,329		MAX		108,5		85,7134

Таблица 8.13. Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 50 %

			<i>I</i>	%	<i>I_m</i> [A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i> [A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i> [A]
1L1	MIN		51,051		40,33	2L1	MIN		67,32		53,183	3L1	MIN		72,369		57,1715
	SREDNJA		54,828		43,314		SREDNJA		78,809		62,259		SREDNJA		82,361		65,0648
	MAX		58,604		46,297		MAX		90,298		71,335		MAX		92,352		72,9581
1L2	MIN		49,929		39,444	2L2	MIN		71,247		56,285	3L2	MIN		73,491		58,0579
	SREDNJA		54,566		43,107		SREDNJA		86,001		67,941		SREDNJA		81,299		64,2263
	MAX		59,202		46,77		MAX		100,76		79,597		MAX		89,107		70,3947
1L3	MIN		46,002		36,342	2L3	MIN		65,637		51,853	3L3	MIN		59,466		46,9781
	SREDNJA		50,21		39,666		SREDNJA		76,499		60,434		SREDNJA		65,613		51,8343
	MAX		54,418		42,99		MAX		87,36		69,014		MAX		71,76		56,6904
1L4	MIN		43,197		34,126	2L4	MIN		45,441		35,898	3L4	MIN		47,685		37,6712
	SREDNJA		47,014		37,141		SREDNJA		49,631		39,208		SREDNJA		52,846		41,7479
	MAX		50,83		40,156		MAX		53,82		42,518		MAX		58,006		45,8247
1D1	MIN		46,002		36,342	2D1	MIN		44,88		35,455	3D1	MIN		43,758		34,5688
	SREDNJA		51,406		40,611		SREDNJA		48,154		38,042		SREDNJA		46,696		36,8898
	MAX		56,81		44,88		MAX		51,428		40,628		MAX		49,634		39,2109
1D2	MIN		44,88		35,455	2D2	MIN		54,417		42,989	3D2	MIN		61,149		48,3077
	SREDNJA		49,649		39,223		SREDNJA		60,697		47,95		SREDNJA		64,661		51,0818
	MAX		54,418		42,99		MAX		66,976		52,911		MAX		68,172		53,8559
1D3	MIN		53,295		42,103	2D3	MIN		61,149		48,308	3D3	MIN		65,637		51,8532
	SREDNJA		59,538		47,035		SREDNJA		71,538		56,515		SREDNJA		79,702		62,9643
	MAX		65,78		51,966		MAX		81,926		64,722		MAX		93,766		74,0755
1D4	MIN		60,027		47,421	2D4	MIN		66,647		52,651	3D4	MIN		91,443		72,24
	SREDNJA		64,399		50,875		SREDNJA		82,385		65,084		SREDNJA		108,45		85,6789
	MAX		68,77		54,328		MAX		98,124		77,518		MAX		125,47		99,1178

Таблица 8.14. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 50 %, доњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	15	30	L	7	0,25	21	2037	43,31	46,3	40,33	292,2	312,3	272,1	66,9	106,3	0,115	0,125	4,33	0,23	1,64	154,7	245,8	17,9	28,5	200,2	23,2
2.	0	15	L	7	0,25	21	2186	43,11	46,77	39,44	290,8	315,5	266,1	64,0	107,4	0,107	0,117	4,33	0,23	1,64	148,0	248,3	17,2	28,8	198,1	23,0
3.	-15	0	L	7	0,25	21	2186	39,67	42,99	36,34	267,6	290,0	245,2	56,0	98,7	0,097	0,107	4,33	0,23	1,64	129,6	228,2	15,0	26,5	178,9	20,8
4.	-30	-15	L	7	0,25	21	2037	37,14	40,16	34,13	250,5	270,9	230,2	52,6	92,2	0,097	0,106	4,33	0,23	1,64	121,7	213,2	14,1	24,7	167,4	19,4
5.	-15	0	D	7	0,25	21	2186	40,61	44,88	36,34	274,0	302,8	245,2	58,2	103,1	0,100	0,112	4,33	0,23	1,64	134,6	238,3	15,6	27,6	186,4	21,6
6.	0	15	D	7	0,25	21	2189	39,22	42,99	35,46	264,6	290,0	239,2	55,0	98,7	0,096	0,107	4,33	0,23	1,64	127,1	228,2	14,7	26,5	177,7	20,6
7.	15	30	D	7	0,25	21	2037	47,03	51,97	42,1	317,3	350,6	284,0	75,5	119,3	0,127	0,142	4,33	0,23	1,64	174,6	275,9	20,3	32,0	225,2	26,1
8.	15	30	D	7	0,25	21	2037	50,87	54,33	47,42	343,2	366,5	319,9	84,4	124,7	0,139	0,149	4,33	0,23	1,64	195,1	288,4	22,6	33,5	241,7	28,0
9.	0	15	L	7	0,4	21	3498	62,26	71,34	53,18	420,0	481,2	358,8	86,9	163,8	0,101	0,117	4,89	0,36	1,64	177,6	334,9	14,6	27,5	256,2	21,0
10.	-15	0	L	7	0,4	21	3498	67,94	79,6	56,29	458,3	537,0	379,7	100,0	182,8	0,111	0,132	4,89	0,36	1,64	204,4	373,7	16,8	30,7	289,1	23,7
11.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	60,43	69,01	51,85	407,7	465,6	349,8	86,5	158,5	0,105	0,121	4,89	0,36	1,64	176,9	324,0	14,5	26,6	250,4	20,5
12.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	39,21	42,52	35,9	264,5	286,8	242,2	37,5	97,6	0,064	0,071	4,89	0,36	1,64	76,6	199,5	6,3	16,4	138,1	11,3
13.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	38,04	40,63	35,46	256,6	274,1	239,2	30,9	93,3	0,058	0,062	4,89	0,36	1,64	63,2	190,6	5,2	15,6	126,9	10,4
14.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	47,95	52,91	42,99	323,5	356,9	290,0	53,8	121,5	0,076	0,084	4,89	0,36	1,64	110,0	248,3	9,0	20,4	179,2	14,7
15.	0	15	D	7	0,4	21	3498	56,51	64,72	48,31	381,2	436,6	325,9	73,6	148,7	0,091	0,105	4,89	0,36	1,64	150,4	303,8	12,3	24,9	227,1	18,6
16.	15	30	D	7	0,4	21	3259	65,08	77,52	52,65	439,1	522,9	355,2	97,3	178,1	0,114	0,138	4,89	0,36	1,64	198,8	364,0	16,3	29,9	281,4	23,1
17.	15	30	L	7	0,5	21	4074	65,06	72,96	57,17	438,9	492,2	385,7	84,0	167,6	0,091	0,103	5,27	0,45	1,64	159,3	317,9	11,3	22,5	238,6	16,9
18.	0	15	L	7	0,5	21	4372	64,23	70,39	58,06	433,3	474,9	391,7	77,2	161,6	0,084	0,092	5,27	0,45	1,64	146,4	306,7	10,3	21,7	226,5	16,0
19.	-15	0	L	7	0,5	21	4372	51,83	56,69	46,98	349,7	382,4	316,9	48,5	130,2	0,066	0,073	5,27	0,45	1,64	92,1	247,0	6,5	17,5	169,5	12,0
20.	-30	-15	L	7	0,5	21	4074	41,75	45,82	37,67	281,6	309,1	254,1	30,1	105,2	0,055	0,062	5,27	0,45	1,64	57,1	199,6	4,0	14,1	128,3	9,1
21.	-30	-15	D	7	0,5	21	4074	36,89	39,21	34,57	248,9	264,5	233,2	18,8	90,0	0,048	0,051	5,27	0,45	1,64	35,8	170,8	2,5	12,1	103,3	7,3
22.	-15	0	D	7	0,5	21	4372	51,08	53,86	48,31	344,6	363,3	325,9	46,8	123,6	0,065	0,069	5,27	0,45	1,64	88,8	234,6	6,3	16,6	161,7	11,4

Таблица 8.15. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 50 %, горњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	15	30	L	7	0,25	21	2037	42,51	45,14	39,89	286,8	304,5	269,1	65,1	103,6	0,113	0,121	4,33	0,23	1,64	150,4	239,6	17,4	27,8	195,0	22,6
2.	0	15	L	7	0,25	21	2186	40,81	44,4	37,23	275,3	299,5	251,1	58,7	101,9	0,100	0,111	4,33	0,23	1,64	135,7	235,7	15,7	27,3	185,7	21,5
3.	-15	0	L	7	0,25	21	2186	38,22	41,32	35,11	257,8	278,7	236,9	52,7	94,9	0,093	0,102	4,33	0,23	1,64	121,8	219,3	14,1	25,4	170,6	19,8
4.	-30	-15	L	7	0,25	21	2037	44,99	56,57	33,42	303,5	381,6	225,5	70,8	130,0	0,121	0,156	4,33	0,23	1,64	163,6	300,6	19,0	34,9	232,1	26,9
5.	-15	0	D	7	0,25	21	2186	36,26	38,68	33,84	244,6	260,9	228,3	48,2	88,8	0,087	0,094	4,33	0,23	1,64	111,4	205,3	12,9	23,8	158,4	18,4
6.	0	15	D	7	0,25	21	2186	39,27	41,32	37,23	264,9	278,7	251,1	55,1	94,9	0,096	0,102	4,33	0,23	1,64	127,5	219,3	14,8	25,4	173,4	20,1
7.	15	30	D	7	0,25	21	2037	43,14	44,4	41,88	291,0	299,5	282,5	66,5	101,9	0,115	0,119	4,33	0,23	1,64	153,7	235,6	17,8	27,3	194,7	22,6
8.	15	30	D	7	0,25	21	2037	46,83	49,67	44	315,9	335,1	296,8	75,0	114,0	0,126	0,135	4,33	0,23	1,64	173,5	263,6	20,1	30,6	218,6	25,4
9.	0	15	L	7	0,4	21	3498	65,52	76,04	55	442,0	513,0	371,0	94,4	174,7	0,107	0,126	4,89	0,36	1,64	193,0	357,0	15,8	29,3	275,0	22,6
10.	-15	0	L	7	0,4	21	3498	57	61,54	52,46	384,5	415,1	353,9	74,7	141,3	0,092	0,100	4,89	0,36	1,64	152,7	288,8	12,5	23,7	220,7	18,1
11.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	42,1	45,27	38,92	284,0	305,4	262,6	44,2	103,9	0,070	0,076	4,89	0,36	1,64	90,3	212,5	7,4	17,4	151,4	12,4
12.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	36,05	38,68	33,42	243,2	260,9	225,5	30,2	88,8	0,058	0,063	4,89	0,36	1,64	61,7	181,5	5,1	14,9	121,6	10,0
13.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	40,79	43,08	38,5	275,1	290,6	259,7	37,2	98,9	0,063	0,067	4,89	0,36	1,64	76,1	202,1	6,2	16,6	139,1	11,4
14.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	45,33	48,35	42,3	305,8	326,2	285,4	47,7	111,0	0,071	0,076	4,89	0,36	1,64	97,6	226,9	8,0	18,6	162,2	13,3
15.	0	15	D	7	0,4	21	3498	51,71	50,11	53,3	348,8	338,0	359,6	62,5	115,0	0,082	0,079	4,89	0,36	1,64	127,7	235,0	10,5	19,3	181,3	14,9
16.	15	30	D	7	0,4	21	3259	60,55	70,33	50,77	408,4	474,4	342,5	86,8	161,5	0,105	0,124	4,89	0,36	1,64	177,4	330,2	14,6	27,1	253,8	20,8
17.	15	30	L	7	0,5	21	4074	65,44	71,65	59,23	441,4	483,3	399,5	84,8	164,5	0,092	0,101	5,27	0,45	1,64	160,9	312,1	11,4	22,1	236,5	16,7
18.	0	15	L	7	0,5	21	4372	62	69,01	55	418,3	465,5	371,0	72,0	158,5	0,080	0,090	5,27	0,45	1,64	136,7	300,7	9,7	21,3	218,7	15,5
19.	-15	0	L	7	0,5	21	4372	50,97	55,82	46,11	343,8	376,6	311,1	46,5	128,2	0,065	0,072	5,27	0,45	1,64	88,3	243,2	6,2	17,2	165,7	11,7
20.	-30	-15	L	7	0,5	21	4074	50,76	55,82	45,69	342,4	376,6	308,2	50,9	128,2	0,069	0,077	5,27	0,45	1,64	96,6	243,2	6,8	17,2	169,9	12,0
21.	-30	-15	D	7	0,5	21	4074	42,35	47,47	37,23	285,7	320,2	251,1	31,5	109,0	0,056	0,064	5,27	0,45	1,64	59,7	206,8	4,2	14,6	133,3	9,4
22.	-15	0	D	7	0,5	21	4372	45,76	48,79	42,73	308,7	329,1	288,2	34,5	112,0	0,057	0,062	5,27	0,45	1,64	65,4	212,5	4,6	15,0	139,0	9,8

Таблица 8.16. Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 50 %

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	15	30	L	7	0,25	21	2037	85,83	91,44	80,22	579,0	616,8	541,1	165,2	209,9	0,246	0,263	4,33	0,23	1,64	381,8	485,4	44,3	56,3	433,6	50,3
2.	0	15	L	7	0,25	21	2186	83,92	91,16	76,67	566,1	615,0	517,2	158,3	209,3	0,224	0,244	4,33	0,23	1,64	366,0	484,0	42,5	56,1	425,0	49,3
3.	-15	0	L	7	0,25	21	2186	77,88	84,31	71,45	525,4	568,7	482,0	144,4	193,6	0,206	0,225	4,33	0,23	1,64	333,8	447,6	38,7	51,9	390,7	45,3
4.	-30	-15	L	7	0,25	21	2037	82,13	96,72	67,55	554,1	652,5	455,7	156,6	222,2	0,234	0,279	4,33	0,23	1,64	362,1	513,7	42,0	59,6	437,9	50,8
5.	-15	0	D	7	0,25	21	2186	76,87	83,56	70,19	518,6	563,7	473,5	142,0	191,9	0,203	0,223	4,33	0,23	1,64	328,4	443,6	38,1	51,5	386,0	44,8
6.	0	15	D	7	0,25	21	2186	78,5	84,31	72,68	529,5	568,7	490,3	145,8	193,6	0,208	0,225	4,33	0,23	1,64	337,1	447,5	39,1	51,9	392,3	45,5
7.	15	30	D	7	0,25	21	2037	90,17	96,36	83,98	608,3	650,0	566,6	175,2	221,2	0,259	0,278	4,33	0,23	1,64	405,1	511,5	47,0	59,3	458,3	53,2
8.	15	30	D	7	0,25	21	2037	97,71	104	91,42	659,1	701,6	616,7	192,6	238,8	0,282	0,301	4,33	0,23	1,64	445,3	552,0	51,7	64,0	498,7	57,9
9.	0	15	L	7	0,4	21	3498	127,8	147,4	108,2	862,0	994,2	729,8	238,3	338,5	0,218	0,253	4,89	0,36	1,64	487,1	691,9	39,9	56,8	589,5	48,4
10.	-15	0	L	7	0,4	21	3498	124,9	141,1	108,7	842,8	952,1	733,6	231,7	324,1	0,213	0,242	4,89	0,36	1,64	473,6	662,5	38,8	54,3	568,1	46,6
11.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	102,5	114,3	90,77	691,7	771,0	612,3	183,8	262,5	0,186	0,208	4,89	0,36	1,64	375,7	536,4	30,8	44,0	456,1	37,4
12.	-30	-15	L	7	0,4	21	3259	75,26	81,2	69,32	507,7	547,8	467,6	120,8	186,4	0,133	0,145	4,89	0,36	1,64	246,9	381,0	20,3	31,3	314,0	25,8
13.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	78,83	83,7	73,95	531,8	564,7	498,9	125,2	192,2	0,131	0,139	4,89	0,36	1,64	255,8	392,8	21,0	32,2	324,3	26,6
14.	-15	0	D	7	0,4	21	3498	93,28	101,3	85,29	629,2	683,1	575,4	158,6	232,5	0,156	0,171	4,89	0,36	1,64	324,1	475,2	26,6	39,0	399,7	32,8
15.	0	15	D	7	0,4	21	3498	108,2	114,8	101,6	730,0	774,6	685,5	193,1	263,6	0,183	0,195	4,89	0,36	1,64	394,7	538,8	32,4	44,2	466,7	38,3
16.	15	30	D	7	0,4	21	3259	125,6	147,8	103,4	847,5	997,4	697,6	237,2	339,6	0,230	0,272	4,89	0,36	1,64	484,9	694,2	39,8	56,9	589,5	48,4
17.	15	30	L	7	0,5	21	4074	130,5	144,6	116,4	880,4	975,5	785,2	235,2	332,1	0,191	0,213	5,27	0,45	1,64	446,2	630,0	31,5	44,5	538,1	38,0
18.	0	15	L	7	0,5	21	4372	126,2	139,4	113,1	851,5	940,4	762,6	220,5	320,1	0,172	0,191	5,27	0,45	1,64	418,3	607,3	29,6	42,9	512,8	36,3
19.	-15	0	L	7	0,5	21	4372	102,8	112,5	93,09	693,5	759,0	628,0	166,3	258,4	0,139	0,153	5,27	0,45	1,64	315,5	490,1	22,3	34,6	402,8	28,5
20.	-30	-15	L	7	0,5	21	4074	92,5	101,6	83,36	624,0	685,7	562,3	147,4	233,4	0,133	0,147	5,27	0,45	1,64	279,6	442,8	19,8	31,3	361,2	25,5
21.	-30	-15	D	7	0,5	21	4074	79,24	86,68	71,8	534,5	584,8	484,3	116,7	199,0	0,113	0,124	5,27	0,45	1,64	221,4	377,6	15,7	26,7	299,5	21,2
22.	-15	0	D	7	0,5	21	4372	96,84	102,6	91,04	653,3	692,4	614,1	152,5	235,6	0,130	0,138	5,27	0,45	1,64	289,4	447,1	20,5	31,6	368,2	26,0

8.1.4 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 75 %

Струја коју доњи погон повлачи из мреже



Слика 8.11. Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 75 %

Струја коју горњи погон повлачи из мреже



Слика 8.12. Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 75 %

Таблица 8.17. Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 75 %

		I	%	I_m	[A]			I	%	I_m	[A]			I	%	I_m	[A]
1L1	MIN	33,18		42		2L1	MIN	41,48		52,5		3L1	MIN	56,80		71,9	
	SREDNJA	35,234		44,6			SREDNJA	47,72		60,4			SREDNJA	62,09		78,6	
	MAX	38,71		49			MAX	53,01		67,1			MAX	70,55		89,3	
1L2	MIN	31,837		40,3		2L2	MIN	48,98		62		3L2	MIN	61,78		78,2	
	SREDNJA	35,866		45,4			SREDNJA	53,33		67,5			SREDNJA	66,44		84,1	
	MAX	39,342		49,8			MAX	56,80		71,9			MAX	75,21		95,2	
1L3	MIN	31,205		39,5		2L3	MIN	48,66		61,6		3L3	MIN	60,28		76,3	
	SREDNJA	40,527		51,3			SREDNJA	53,96		68,3			SREDNJA	65,57		83	
	MAX	36,182		45,8			MAX	60,20		76,2			MAX	72,68		92	
1L4	MIN	29,309		37,1		2L4	MIN	46,77		59,2		3L4	MIN	59,25		75	
	SREDNJA	32,785		41,5			SREDNJA	51,82		65,6			SREDNJA	63,36		80,2	
	MAX	36,182		45,8			MAX	61,15		77,4			MAX	68,97		87,3	
1D1	MIN	35,55		45		2D1	MIN	48,55		61,2		3D1	MIN	59,65		75,5	
	SREDNJA	38,078		48,2			SREDNJA	53,33		67,5			SREDNJA	63,36		80,2	
	MAX	41,475		52,5			MAX	61,15		77,4			MAX	70,55		89,3	
1D2	MIN	33,101		41,9		2D2	MIN	45,58		57,7		3D2	MIN	65,41		82,8	
	SREDNJA	39,026		49,4			SREDNJA	54,27		68,7			SREDNJA	68,45		86,65	
	MAX	43,371		54,9			MAX	61,15		77,4			MAX	71,50		90,5	
1D3	MIN	29,941		37,9		2D3	MIN	47,40		60		3D3	MIN	68,34		86,5	
	SREDNJA	34,918		44,2			SREDNJA	54,91		69,5			SREDNJA	71,61		90,65	
	MAX	40,527		51,3			MAX	59,57		75,4			MAX	74,89		94,8	
1D4	MIN	28,045		35,5		2D4	MIN	43,69		55,3		3D4	MIN	72,21		91,4	
	SREDNJA	32,785		41,5			SREDNJA	52,77		66,8			SREDNJA	75,29		95,3	
	MAX	35,866		45,4			MAX	59,25		75			MAX	78,37		99,2	

Таблица 8.18. Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 75 %

		I	%	I_m	[A]			I	%	I_m	[A]			I	%	I_m	[A]
1L1	MIN	28,677		36,3		2L1	MIN	37,13		47		3L1	MIN	43,69		55,3	
	SREDNJA	30,573		38,7			SREDNJA	40,53		51,3			SREDNJA	49,93		63,2	
	MAX	32,153		40,7			MAX	44,00		55,7			MAX	56,49		71,5	
1L2	MIN	28,44		36		2L2	MIN	36,81		46,6		3L2	MIN	46,85		59,3	
	SREDNJA	30,573		38,7			SREDNJA	42,42		53,7			SREDNJA	54,04		68,4	
	MAX	31,837		40,3			MAX	47,80		60,5			MAX	61,54		77,9	
1L3	MIN	28,44		36		2L3	MIN	37,45		47,4		3L3	MIN	46,22		58,5	
	SREDNJA	33,733		42,7			SREDNJA	42,74		54,1			SREDNJA	52,77		66,8	
	MAX	30,889		39,1			MAX	47,80		60,5			MAX	59,33		75,1	
1L4	MIN	28,045		35,5		2L4	MIN	38,08		48,2		3L4	MIN	44,32		56,1	
	SREDNJA	29,941		37,9			SREDNJA	40,53		51,3			SREDNJA	50,24		63,6	
	MAX	31,521		39,9			MAX	43,69		55,3			MAX	55,85		70,7	
1D1	MIN	28,44		36		2D1	MIN	37,45		47,4		3D1	MIN	42,42		53,7	
	SREDNJA	31,205		39,5			SREDNJA	40,92		51,8			SREDNJA	50,24		63,6	
	MAX	34,365		43,5			MAX	45,27		57,3			MAX	61,54		77,9	
1D2	MIN	28,045		35,5		2D2	MIN	36,58		46,3		3D2	MIN	46,14		58,4	
	SREDNJA	31,837		40,3			SREDNJA	41,16		52,1			SREDNJA	47,60		60,25	
	MAX	36,814		46,6			MAX	45,27		57,3			MAX	49,06		62,1	
1D3	MIN	26,228		33,2		2D3	MIN	37,45		47,4		3D3	MIN	50,32		63,7	
	SREDNJA	29,941		37,9			SREDNJA	40,29		51			SREDNJA	51,15		64,75	
	MAX	32,153		40,7			MAX	42,74		54,1			MAX	51,98		65,8	
1D4	MIN	26,544		33,6		2D4	MIN	37,76		47,8		3D4	MIN	54,67		69,2	
	SREDNJA	28,045		35,5			SREDNJA	39,66		50,2			SREDNJA	55,18		69,85	
	MAX	30,573		38,7			MAX	41,16		52,1			MAX	55,70		70,5	

Таблица 8.19. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 75 %, доњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	19	38	L	7	0,25	21	1938	44,60	49,00	42,00	300,9	330,5	283,3	71,5	112,5	0,126	0,140	4,33	0,23	1,64	165,3	260,1	19,2	30,2	212,7	24,7
2.	0	19	L	7	0,25	21	2175	45,40	49,80	40,30	306,3	335,9	271,9	69,5	114,4	0,114	0,127	4,33	0,23	1,64	160,6	264,4	18,6	30,7	212,5	24,7
3.	-23	0	L	7	0,25	21	2161	45,80	51,30	39,50	309,0	346,1	266,5	70,6	117,8	0,116	0,132	4,33	0,23	1,64	163,3	272,4	18,9	31,6	217,8	25,3
4.	-46	-23	L	7	0,25	21	1817	41,50	45,80	37,10	280,0	309,0	250,3	66,3	105,2	0,123	0,138	4,33	0,23	1,64	153,3	243,2	17,8	28,2	198,2	23,0
5.	-46	-23	D	7	0,25	21	1817	48,20	52,50	45,00	325,2	354,2	303,6	81,8	120,5	0,146	0,161	4,33	0,23	1,64	189,1	278,7	21,9	32,3	233,9	27,1
6.	-23	0	D	7	0,25	21	2161	49,40	54,90	41,90	333,2	370,3	282,7	78,9	126,1	0,126	0,142	4,33	0,23	1,64	182,5	291,5	21,2	33,8	237,0	27,5
7.	0	19	D	7	0,25	21	2175	44,20	51,30	37,90	298,2	346,1	255,7	66,7	117,8	0,111	0,131	4,33	0,23	1,64	154,2	272,5	17,9	31,6	213,3	24,7
8.	19	38	D	7	0,25	21	1938	41,50	45,40	35,50	280,0	306,3	239,5	64,3	104,2	0,116	0,128	4,33	0,23	1,64	148,7	241,0	17,3	28,0	194,9	22,6
9.	19	38	L	7	0,4	21	3100	60,40	67,10	52,50	407,5	452,6	354,2	89,1	154,1	0,110	0,124	4,89	0,36	1,64	182,0	314,9	14,9	25,8	248,5	20,4
10.	0	19	L	7	0,4	21	3480	67,50	71,90	62,00	455,3	485,0	418,2	99,3	165,1	0,111	0,119	4,89	0,36	1,64	202,9	337,4	16,6	27,7	270,2	22,2
11.	-23	0	L	7	0,4	21	3457	68,30	76,20	61,60	460,7	514,0	415,5	101,5	175,0	0,113	0,127	4,89	0,36	1,64	207,5	357,7	17,0	29,3	282,6	23,2
12.	-46	-23	L	7	0,4	21	2908	65,60	77,40	59,20	442,5	522,1	399,4	104,2	177,8	0,129	0,154	4,89	0,36	1,64	213,0	363,4	17,5	29,8	288,2	23,6
13.	-46	-23	D	7	0,4	21	2908	67,50	77,40	61,20	455,3	522,1	412,8	108,6	177,8	0,133	0,154	4,89	0,36	1,64	222,0	363,4	18,2	29,8	292,7	24,0
14.	-23	0	D	7	0,4	21	3457	68,70	77,40	57,70	463,4	522,1	389,2	102,4	177,8	0,114	0,130	4,89	0,36	1,64	209,3	363,3	17,2	29,8	286,3	23,5
15.	0	19	D	7	0,4	21	3480	69,50	75,40	60,00	468,8	508,6	404,8	103,9	173,1	0,115	0,125	4,89	0,36	1,64	212,4	353,8	17,4	29,0	283,1	23,2
16.	19	38	D	7	0,4	21	3100	66,80	75,00	55,30	450,6	505,9	373,0	103,8	172,2	0,123	0,140	4,89	0,36	1,64	212,2	352,0	17,4	28,9	282,1	23,1
17.	19	38	L	7	0,5	21	3876	78,60	89,30	71,90	530,2	602,4	485,0	118,5	205,1	0,118	0,135	5,27	0,45	1,64	224,8	389,1	15,9	27,5	306,9	21,7
18.	0	19	L	7	0,5	21	4350	84,10	95,20	78,20	567,3	642,2	527,5	123,5	218,6	0,113	0,129	5,27	0,45	1,64	234,2	414,8	16,6	29,3	324,5	22,9
19.	-23	0	L	7	0,5	21	4321	83,00	92,00	76,30	559,9	620,6	514,7	121,4	211,3	0,112	0,125	5,27	0,45	1,64	230,3	400,8	16,3	28,3	315,6	22,3
20.	-46	-23	L	7	0,5	21	3634	80,20	87,30	75,00	541,0	588,9	505,9	126,1	200,5	0,128	0,140	5,27	0,45	1,64	239,3	380,3	16,9	26,9	309,8	21,9
21.	-46	-23	D	7	0,5	21	3634	83,00	89,30	75,50	559,9	602,4	509,3	132,6	205,0	0,133	0,144	5,27	0,45	1,64	251,5	389,0	17,8	27,5	320,3	22,6
22.	-23	0	D	7	0,5	21	3634	107,50	115,80	102,50	770,2	890,5	720,5	240,2	310,2	0,169	0,275	5,27	0,45	1,64	275,5	398,2	18,2	28,1	325,5	24,1

Таблица 8.20. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 75 %, горњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{cf}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	19	38	L	7	0,25	21	1938	38,70	40,70	36,30	261,1	274,6	244,9	57,9	93,4	0,107	0,113	4,33	0,23	1,64	133,8	216,0	15,5	25,1	174,9	20,3
2.	0	19	L	7	0,25	21	2175	38,70	40,30	36,00	261,1	271,9	242,9	54,0	92,5	0,095	0,100	4,33	0,23	1,64	124,8	213,9	14,5	24,8	169,4	19,6
3.	-23	0	L	7	0,25	21	2161	39,10	42,70	36,00	263,8	288,0	242,9	55,1	98,0	0,097	0,107	4,33	0,23	1,64	127,5	226,7	14,8	26,3	177,1	20,5
4.	-46	-23	L	7	0,25	21	1817	37,90	39,90	35,50	255,7	269,2	239,5	58,0	91,6	0,111	0,118	4,33	0,23	1,64	134,0	211,8	15,5	24,6	172,9	20,1
5.	-46	-23	D	7	0,25	21	1817	39,50	43,50	36,00	266,5	293,4	242,9	61,7	99,9	0,116	0,130	4,33	0,23	1,64	142,6	231,0	16,5	26,8	186,8	21,7
6.	-23	0	D	7	0,25	21	2161	40,30	46,60	35,50	271,9	314,4	239,5	57,9	107,0	0,100	0,118	4,33	0,23	1,64	133,9	247,5	15,5	28,7	190,7	22,1
7.	0	19	D	7	0,25	21	2175	37,90	40,70	33,20	255,7	274,6	224,0	52,1	93,4	0,093	0,101	4,33	0,23	1,64	120,6	216,0	14,0	25,1	168,3	19,5
8.	19	38	D	7	0,25	21	1938	35,50	38,70	33,60	239,5	261,1	226,7	50,5	88,9	0,096	0,107	4,33	0,23	1,64	116,7	205,5	13,5	23,8	161,1	18,7
9.	19	38	L	7	0,4	21	3100	51,30	55,70	47,00	346,1	375,7	317,1	68,0	127,9	0,092	0,101	4,89	0,36	1,64	139,0	261,4	11,4	21,4	200,2	16,4
10.	0	19	L	7	0,4	21	3480	53,70	60,50	46,60	362,3	408,1	314,4	67,4	138,9	0,086	0,098	4,89	0,36	1,64	137,7	284,0	11,3	23,3	210,9	17,3
11.	-23	0	L	7	0,4	21	3457	54,10	60,50	47,40	365,0	408,1	319,8	68,7	138,9	0,088	0,099	4,89	0,36	1,64	140,4	284,0	11,5	23,3	212,2	17,4
12.	-46	-23	L	7	0,4	21	2908	51,30	55,30	48,20	346,1	373,0	325,2	71,2	127,0	0,098	0,107	4,89	0,36	1,64	145,5	259,5	11,9	21,3	202,5	16,6
13.	-46	-23	D	7	0,4	21	2908	51,80	57,30	47,40	349,4	386,5	319,8	72,3	131,6	0,099	0,111	4,89	0,36	1,64	147,8	268,9	12,1	22,1	208,4	17,1
14.	-23	0	D	7	0,4	21	3457	52,10	57,30	46,30	351,5	386,5	312,3	64,1	131,6	0,084	0,093	4,89	0,36	1,64	130,9	268,9	10,7	22,1	199,9	16,4
15.	0	19	D	7	0,4	21	3480	51,00	54,10	47,40	344,0	365,0	319,8	61,1	124,2	0,081	0,087	4,89	0,36	1,64	125,0	253,9	10,3	20,8	189,4	15,5
16.	19	38	D	7	0,4	21	3100	50,20	52,10	47,80	338,6	351,5	322,5	65,5	119,6	0,090	0,094	4,89	0,36	1,64	133,8	244,4	11,0	20,0	189,1	15,5
17.	19	38	L	7	0,5	21	3876	63,20	71,50	55,30	426,3	482,3	373,0	82,9	164,2	0,093	0,106	5,27	0,45	1,64	157,3	311,5	11,1	22,0	234,4	16,6
18.	0	19	L	7	0,5	21	4350	68,40	77,90	59,30	461,4	525,5	400,0	87,2	178,9	0,090	0,104	5,27	0,45	1,64	165,4	339,4	11,7	24,0	252,4	17,8
19.	-23	0	L	7	0,5	21	4321	66,80	75,10	58,50	450,6	506,6	394,6	83,9	172,5	0,088	0,100	5,27	0,45	1,64	159,3	327,2	11,3	23,1	243,2	17,2
20.	-46	-23	L	7	0,5	21	3634	63,60	70,70	56,10	429,0	476,9	378,4	87,7	162,4	0,100	0,112	5,27	0,45	1,64	166,5	308,0	11,8	21,8	237,2	16,8
21.	-46	-23	D	7	0,5	21	3634	66,00	77,90	53,70	445,2	525,5	362,3	93,3	179,0	0,104	0,124	5,27	0,45	1,64	177,0	339,5	12,5	24,0	258,3	18,3
22.	-23	0	D	7	0,5	21	3634	55,20	58,40	52,10	450,2	540,4	380,1	95,4	185,2	0,107	0,128	5,27	0,45	1,64	180,1	345,4	13,3	25,1	259,4	19,2

Таблица 8.21. Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 75 %

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{cf}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	P_{ksr}	P_{kmax}	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	K_{Lsr}	K_{Lmax}	K_{Fsr}	K_{Fmax}	K_L	K_F
1.	19	38	L	7	0,25	21	1938	84,50	91,60	75,50	570,0	617,9	509,3	163,7	210,3	0,254	0,277	4,33	0,23	1,64	378,5	486,3	43,9	56,4	432,4	50,2
2.	0	19	L	7	0,25	21	2175	80,60	88,50	73,10	543,7	597,0	493,1	150,8	203,2	0,215	0,238	4,33	0,23	1,64	348,7	469,9	40,5	54,5	409,3	47,5
3.	-23	0	L	7	0,25	21	2161	86,10	92,40	80,50	580,8	623,3	543,0	163,8	212,1	0,232	0,251	4,33	0,23	1,64	378,6	490,5	43,9	56,9	434,6	50,4
4.	-46	-23	L	7	0,25	21	1817	88,90	98,40	77,90	599,7	663,8	525,5	175,8	226,0	0,286	0,319	4,33	0,23	1,64	406,5	522,4	47,2	60,6	464,5	53,9
5.	-46	-23	D	7	0,25	21	1817	84,50	97,90	73,40	570,0	660,4	495,1	165,7	224,9	0,271	0,317	4,33	0,23	1,64	383,0	519,9	44,4	60,3	451,5	52,4
6.	-23	0	D	7	0,25	21	2161	79,40	86,10	68,70	535,6	580,8	463,4	148,3	197,7	0,213	0,232	4,33	0,23	1,64	342,8	457,1	39,8	53,0	400,0	46,4
7.	0	19	D	7	0,25	21	2175	95,90	105,80	86,10	646,9	713,7	580,8	186,2	243,0	0,259	0,287	4,33	0,23	1,64	430,5	561,7	49,9	65,2	496,1	57,6
8.	19	38	D	7	0,25	21	1938	118,80	127,60	109,00	801,4	860,8	735,3	243,0	293,0	0,364	0,393	4,33	0,23	1,64	561,8	677,3	65,2	78,6	619,6	71,9
9.	19	38	L	7	0,4	21	3100	122,00	136,70	108,20	823,0	922,2	729,9	231,4	313,9	0,234	0,264	4,89	0,36	1,64	473,0	641,7	38,8	52,6	557,3	45,7
10.	0	19	L	7	0,4	21	3480	119,70	137,90	106,60	807,5	930,3	719,1	219,9	316,7	0,205	0,237	4,89	0,36	1,64	449,5	647,4	36,9	53,1	548,5	45,0
11.	-23	0	L	7	0,4	21	3457	118,80	132,70	109,40	801,4	895,2	738,0	218,2	304,7	0,204	0,229	4,89	0,36	1,64	446,0	622,9	36,6	51,1	534,4	43,8
12.	-46	-23	L	7	0,4	21	2908	120,50	134,70	105,10	812,9	908,7	709,0	231,1	309,3	0,247	0,277	4,89	0,36	1,64	472,3	632,3	38,7	51,9	552,3	45,3
13.	-46	-23	D	7	0,4	21	2908	121,60	132,70	106,30	820,3	895,2	717,1	233,6	304,7	0,249	0,273	4,89	0,36	1,64	477,5	622,8	39,2	51,1	550,2	45,1
14.	-23	0	D	7	0,4	21	3457	117,80	129,10	102,70	794,7	870,9	692,8	215,9	296,4	0,202	0,223	4,89	0,36	1,64	441,3	605,9	36,2	49,7	523,6	42,9
15.	0	19	D	7	0,4	21	3480	128,80	141,40	119,70	868,9	953,9	807,5	241,0	324,7	0,221	0,244	4,89	0,36	1,64	492,5	663,6	40,4	54,4	578,1	47,4
16.	19	38	D	7	0,4	21	3100	147,30	166,70	133,50	993,7	1124,5	900,6	289,9	382,9	0,285	0,324	4,89	0,36	1,64	592,5	782,5	48,6	64,2	687,5	56,4
17.	19	38	L	7	0,5	21	3876	151,40	169,90	135,60	1021,3	1146,1	914,7	286,7	390,2	0,235	0,265	5,27	0,45	1,64	544,0	740,3	38,5	52,3	642,1	45,4
18.	0	19	L	7	0,5	21	4350	147,00	162,40	133,50	991,6	1095,5	900,6	268,8	372,9	0,203	0,225	5,27	0,45	1,64	510,0	707,5	36,1	50,0	608,8	43,0
19.	-23	0	L	7	0,5	21	4321	146,60	160,00	131,60	988,9	1079,3	887,8	268,4	367,4	0,204	0,223	5,27	0,45	1,64	509,1	697,0	36,0	49,3	603,1	42,6
20.	-46	-23	L	7	0,5	21	3634	66,00	169,10	53,70	445,2	1140,7	362,3	93,3	389,7	0,104	0,281	5,27	0,45	1,64	177,0	739,4	12,5	52,3	458,2	32,4
21.	-46	-23	D	7	0,5	21	3634	149,00	167,20	129,20	1005,1	1127,9	871,6	285,1	384,0	0,246	0,277	5,27	0,45	1,64	540,9	728,5	38,2	51,5	634,7	44,9
22.	-23	0	D	7	0,5	21	3634	168,50	174,20	159,40	1115,4	1175,1	1065,7	320,5	400,1	0,265	0,289	5,27	0,45	1,64	550,2	735,7	39,8	54,2	638,4	46,5

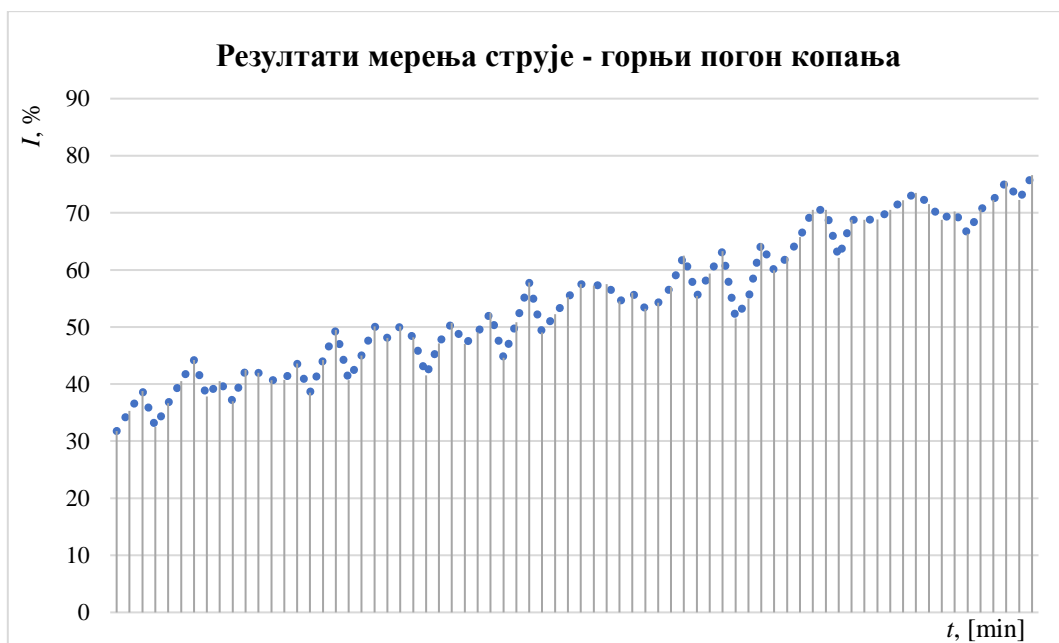
8.1.5 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 100 %

Струја коју доњи погон повлачи из мреже



Слика 8.13. Струја коју доњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 100 %

Струја коју горњи погон повлачи из мреже



Слика 8.14. Струја коју горњи погон копања повлачи из мреже – похабаност 100 %

Таблица 8.22. Очитане вредности пикова струје – доњи погон, похабаност 100 %

			<i>I</i>	%	<i>I_m</i>	[A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i>	[A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i>	[A]
1L1	MIN		43,924		55,6		2L1	MIN		57,99		73,4		3L1	MIN		69,84		88,4	
	SREDNJA		46,136		58,4			SREDNJA		60,91		77,1			SREDNJA		72,52		91,8	
	MAX		48,348		61,2			MAX		63,83		80,8			MAX		75,21		95,2	
1L2	MIN		42,186		53,4		2L2	MIN		59,33		75,1		3L2	MIN		71,18		90,1	
	SREDNJA		46,531		58,9			SREDNJA		62,53		79,15			SREDNJA		73,67		93,25	
	MAX		50,876		64,4			MAX		65,73		83,2			MAX		76,16		96,4	
1L3	MIN		45,978		58,2		2L3	MIN		61,07		77,3		3L3	MIN		72,05		91,2	
	SREDNJA		50,165		63,5			SREDNJA		64,19		81,25			SREDNJA		74,93		94,85	
	MAX		54,352		68,8			MAX		67,31		85,2			MAX		77,82		98,5	
1L4	MIN		47,558		60,2		2L4	MIN		62,57		79,2		3L4	MIN		73,79		93,4	
	SREDNJA		51,469		65,15			SREDNJA		65,81		83,3			SREDNJA		76,31		96,6	
	MAX		55,379		70,1			MAX		69,05		87,4			MAX		78,84		99,8	
1D1	MIN		50,086		63,4		2D1	MIN		63,28		80,1		3D1	MIN		75,21		95,2	
	SREDNJA		53,799		68,1			SREDNJA		66,48		84,15			SREDNJA		78,05		98,8	
	MAX		57,512		72,8			MAX		69,68		88,2			MAX		80,90		102,4	
1D2	MIN		52,693		66,7		2D2	MIN		65,10		82,4		3D2	MIN		76,95		97,4	
	SREDNJA		56,051		70,95			SREDNJA		68,14		86,25			SREDNJA		79,63		100,8	
	MAX		59,408		75,2			MAX		71,18		90,1			MAX		82,32		104,2	
1D3	MIN		54,747		69,3		2D3	MIN		66,68		84,4		3D3	MIN		78,45		99,3	
	SREDNJA		58,223		73,7			SREDNJA		69,99		88,6			SREDNJA		81,25		102,85	
	MAX		61,699		78,1			MAX		73,31		92,8			MAX		84,06		106,4	
1D4	MIN		55,458		70,2		2D4	MIN		68,49		86,7		3D4	MIN		79,63		100,8	
	SREDNJA		58,065		73,5			SREDNJA		71,46		90,45			SREDNJA		82,71		104,7	
	MAX		60,672		76,8			MAX		74,42		94,2			MAX		85,79		108,6	

Таблица 8.23. Очитане вредности пикова струје – горњи погон, похабаност 100 %

			<i>I</i>	%	<i>I_m</i>	[A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i>	[A]				<i>I</i>	%	<i>I_m</i>	[A]
1L1	MIN		31,758		40,2		2L1	MIN		43,53		55,1		3L1	MIN		57,20		72,4	
	SREDNJA		35,274		44,65			SREDNJA		47,12		59,65			SREDNJA		60,95		77,15	
	MAX		38,789		49,1			MAX		50,72		64,2			MAX		64,70		81,9	
1L2	MIN		33,338		42,2		2L2	MIN		45,66		57,8		3L2	MIN		58,70		74,3	
	SREDNJA		36,656		46,4			SREDNJA		49,06		62,1			SREDNJA		62,21		78,75	
	MAX		39,974		50,6			MAX		52,46		66,4			MAX		65,73		83,2	
1L3	MIN		35,076		44,4		2L3	MIN		47,24		59,8		3L3	MIN		60,59		76,7	
	SREDNJA		37,802		47,85			SREDNJA		50,84		64,35			SREDNJA		64,11		81,15	
	MAX		40,527		51,3			MAX		54,43		68,9			MAX		67,62		85,6	
1L4	MIN		36,972		46,8		2L4	MIN		49,06		62,1		3L4	MIN		61,78		78,2	
	SREDNJA		39,461		49,95			SREDNJA		52,26		66,15			SREDNJA		65,29		82,65	
	MAX		41,949		53,1			MAX		55,46		70,2			MAX		68,81		87,1	
1D1	MIN		37,841		47,9		2D1	MIN		50,88		64,4		3D1	MIN		63,12		79,9	
	SREDNJA		40,725		51,55			SREDNJA		54,19		68,6			SREDNJA		66,68		84,4	
	MAX		43,608		55,2			MAX		57,51		72,8			MAX		70,23		88,9	
1D2	MIN		38,868		49,2		2D2	MIN		52,85		66,9		3D2	MIN		64,62		81,8	
	SREDNJA		42,502		53,8			SREDNJA		55,97		70,85			SREDNJA		67,94		86	
	MAX		46,136		58,4			MAX		59,09		74,8			MAX		71,26		90,2	
1D3	MIN		40,685		51,5		2D3	MIN		54,27		68,7		3D3	MIN		65,89		83,4	
	SREDNJA		44,28		56,05			SREDNJA		57,63		72,95			SREDNJA		69,60		88,1	
	MAX		47,874		60,6			MAX		60,99		77,2			MAX		73,31		92,8	
1D4	MIN		42,107		53,3		2D4	MIN		55,46		70,2		3D4	MIN		68,41		86,6	
	SREDNJA		45,82		58			SREDNJA		59,37		75,15			SREDNJA		71,61		90,65	
	MAX		49,533		62,7			MAX		63,28		80,1			MAX		74,81		94,7	

Таблица 8.24. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 100 %, доњи погон

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	-33	-11	L	7	0,25	21	2044	58,4	61,2	55,6	394,0	412,8	375,1	101,6	140,5	0,161	0,170	4,33	0,23	1,64	235,0	324,8	27,3	37,7	279,9	32,5
2.	-11	13	L	7	0,25	21	2157	58,9	64,4	53,4	397,3	434,4	360,2	101,0	147,9	0,154	0,170	4,33	0,23	1,64	233,4	341,9	27,1	39,7	287,7	33,4
3.	13	37	L	7	0,25	21	1998	63,5	68,8	58,2	428,4	464,1	392,6	114,2	158,0	0,181	0,197	4,33	0,23	1,64	264,0	365,2	30,6	42,4	314,6	36,5
4.	37	62	L	7	0,25	21	1432	65,15	70,1	60,2	439,5	472,9	406,1	127,2	160,9	0,259	0,281	4,33	0,23	1,64	294,2	372,1	34,1	43,2	333,1	38,6
5.	62	37	D	7	0,25	21	1432	68,1	72,8	63,4	459,4	491,1	427,7	134,0	167,1	0,272	0,293	4,33	0,23	1,64	309,9	386,4	36,0	44,8	348,2	40,4
6.	37	13	D	7	0,25	21	1998	70,95	75,2	66,7	478,6	507,3	450,0	131,4	172,6	0,204	0,217	4,33	0,23	1,64	303,8	399,2	35,2	46,3	351,5	40,8
7.	13	-11	D	7	0,25	21	2157	73,7	78,1	69,3	497,2	526,9	467,5	135,2	179,3	0,197	0,210	4,33	0,23	1,64	312,5	414,5	36,3	48,1	363,5	42,2
8.	-11	-33	D	7	0,25	21	2044	73,5	76,8	70,2	495,8	518,1	473,6	136,5	176,3	0,207	0,217	4,33	0,23	1,64	315,7	407,6	36,6	47,3	361,7	42,0
9.	-33	-11	L	7	0,4	21	3271	77,1	80,8	73,4	520,1	545,1	495,1	124,9	185,5	0,136	0,143	4,89	0,36	1,64	255,2	379,1	20,9	31,1	317,2	26,0
10.	-11	13	L	7	0,4	21	3451	79,15	83,2	75,1	533,9	561,3	506,6	126,7	191,0	0,133	0,140	4,89	0,36	1,64	258,9	390,4	21,2	32,0	324,6	26,6
11.	13	37	L	7	0,4	21	3197	81,25	85,2	77,3	548,1	574,8	521,5	135,7	195,6	0,148	0,155	4,89	0,36	1,64	277,3	399,7	22,7	32,8	338,5	27,8
12.	37	62	L	7	0,4	21	2291	83,3	87,4	79,2	561,9	589,6	534,3	155,2	200,6	0,212	0,223	4,89	0,36	1,64	317,1	410,1	26,0	33,6	363,6	29,8
13.	62	37	D	7	0,4	21	2291	84,15	88,2	80,1	567,7	595,0	540,3	157,1	202,5	0,214	0,225	4,89	0,36	1,64	321,2	413,8	26,3	33,9	367,5	30,1
14.	37	13	D	7	0,4	21	3197	86,25	90,1	82,4	581,8	607,8	555,9	147,2	206,8	0,157	0,165	4,89	0,36	1,64	300,9	422,7	24,7	34,7	361,8	29,7
15.	13	-11	D	7	0,4	21	3451	88,6	92,8	84,4	597,7	626,0	569,4	148,5	213,0	0,150	0,158	4,89	0,36	1,64	303,5	435,4	24,9	35,7	369,5	30,3
16.	-11	-33	D	7	0,4	21	3271	90,45	94,2	86,7	610,2	635,5	584,9	155,7	216,2	0,162	0,169	4,89	0,36	1,64	318,3	442,0	26,1	36,2	380,1	31,2
17.	-33	-11	L	7	0,5	21	4089	91,8	95,2	88,4	619,3	642,2	596,3	145,5	218,5	0,132	0,137	5,27	0,45	1,64	276,1	414,6	19,5	29,3	345,3	24,4
18.	-11	13	L	7	0,5	21	4314	93,25	96,4	90,1	629,1	650,3	607,8	145,2	221,3	0,127	0,131	5,27	0,45	1,64	275,5	419,8	19,5	29,7	347,6	24,6
19.	13	37	L	7	0,5	21	3997	94,85	98,5	91,2	639,8	664,5	615,2	154,1	226,1	0,139	0,145	5,27	0,45	1,64	292,3	428,9	20,7	30,3	360,6	25,5
20.	37	62	L	7	0,5	21	2864	96,6	99,8	93,4	651,7	673,2	630,1	176,6	229,1	0,198	0,205	5,27	0,45	1,64	335,0	434,6	23,7	30,7	384,8	27,2
21.	62	37	D	7	0,5	21	2864	98,8	102,4	95,2	666,5	690,8	642,2	181,7	235,0	0,203	0,211	5,27	0,45	1,64	344,6	445,9	24,4	31,5	395,3	27,9
22.	37	13	D	7	0,5	21	3997	100,8	104,2	97,4	680,0	702,9	657,1	167,8	239,2	0,149	0,154	5,27	0,45	1,64	318,4	453,8	22,5	32,1	386,1	27,3

Таблица 8.25. Специфични отпор материјала на копање за случај похабаних резних елемената 100 %, горњи погон

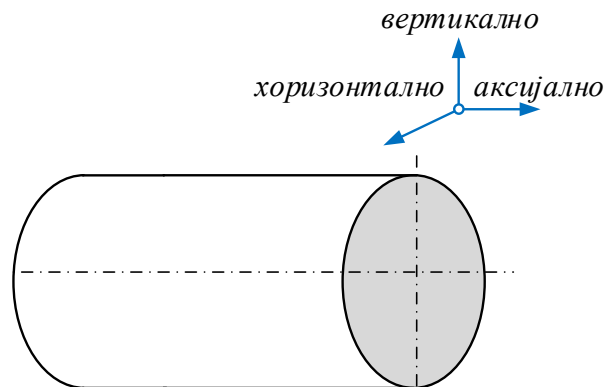
Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	-33	-11	L	7	0,25	21	2044	44,65	49,1	40,2	301,2	331,2	271,2	69,9	112,7	0,119	0,133	4,33	0,23	1,64	161,5	260,7	18,7	30,2	211,1	24,5
2.	-11	13	L	7	0,25	21	2157	46,4	50,6	42,2	313,0	341,3	284,7	72,1	116,2	0,118	0,130	4,33	0,23	1,64	166,7	268,6	19,3	31,2	217,6	25,2
3.	13	37	L	7	0,25	21	1998	47,85	51,3	44,4	322,8	346,1	299,5	78,0	117,8	0,132	0,143	4,33	0,23	1,64	180,4	272,3	20,9	31,6	226,3	26,3
4.	37	62	L	7	0,25	21	1432	49,95	53,1	46,8	337,0	358,2	315,7	92,1	121,9	0,193	0,207	4,33	0,23	1,64	212,9	281,9	24,7	32,7	247,4	28,7
5.	62	37	D	7	0,25	21	1432	51,55	55,2	47,9	347,8	372,4	323,1	95,8	126,7	0,200	0,216	4,33	0,23	1,64	221,5	293,0	25,7	34,0	257,3	29,8
6.	37	13	D	7	0,25	21	1998	53,8	58,4	49,2	362,9	394,0	331,9	91,8	134,1	0,150	0,165	4,33	0,23	1,64	212,2	310,0	24,6	36,0	261,1	30,3
7.	13	-11	D	7	0,25	21	2157	56,05	60,6	51,5	378,1	408,8	347,4	94,4	139,1	0,146	0,159	4,33	0,23	1,64	218,2	321,7	25,3	37,3	270,0	31,3
8.	-11	-33	D	7	0,25	21	2044	58	62,7	53,3	391,3	423,0	359,6	100,7	144,0	0,160	0,174	4,33	0,23	1,64	232,9	332,8	27,0	38,6	282,9	32,8
9.	-33	-11	L	7	0,4	21	3271	59,65	64,2	55,1	402,4	433,1	371,7	84,5	147,4	0,103	0,112	4,89	0,36	1,64	172,8	301,3	14,2	24,7	237,0	19,4
10.	-11	13	L	7	0,4	21	3451	62,1	66,4	57,8	418,9	447,9	389,9	87,3	152,4	0,102	0,110	4,89	0,36	1,64	178,4	311,6	14,6	25,6	245,0	20,1
11.	13	37	L	7	0,4	21	3197	64,35	68,9	59,8	434,1	464,8	403,4	96,6	158,2	0,115	0,124	4,89	0,36	1,64	197,4	323,3	16,2	26,5	260,4	21,4
12.	37	62	L	7	0,4	21	2291	66,15	70,2	62,1	446,2	473,6	418,9	115,5	161,2	0,165	0,176	4,89	0,36	1,64	236,1	329,4	19,4	27,0	282,8	23,2
13.	62	37	D	7	0,4	21	2291	68,6	72,8	64,4	462,8	491,1	434,4	121,2	167,1	0,172	0,183	4,89	0,36	1,64	247,7	341,6	20,3	28,0	294,7	24,2
14.	37	13	D	7	0,4	21	3197	70,85	74,8	66,9	477,9	504,6	451,3	111,6	171,7	0,127	0,135	4,89	0,36	1,64	228,1	351,0	18,7	28,8	289,6	23,8
15.	13	-11	D	7	0,4	21	3451	72,95	77,2	68,7	492,1	520,8	463,4	112,3	177,2	0,122	0,129	4,89	0,36	1,64	229,6	362,2	18,8	29,7	295,9	24,3
16.	-11	-33	D	7	0,4	21	3271	75,15	80,1	70,2	507,0	540,3	473,6	120,4	183,9	0,133	0,142	4,89	0,36	1,64	246,0	375,9	20,2	30,8	310,9	25,5
17.	-33	-11	L	7	0,5	21	4089	77,15	81,9	72,4	520,4	552,5	488,4	111,7	188,0	0,109	0,116	5,27	0,45	1,64	211,8	356,7	15,0	25,2	284,3	20,1
18.	-11	13	L	7	0,5	21	4314	78,75	83,2	74,3	531,2	561,3	501,2	111,7	191,0	0,106	0,112	5,27	0,45	1,64	211,9	362,4	15,0	25,6	287,1	20,3
19.	13	37	L	7	0,5	21	3997	81,15	85,6	76,7	547,4	577,4	517,4	122,4	196,5	0,118	0,125	5,27	0,45	1,64	232,2	372,8	16,4	26,4	302,5	21,4
20.	37	62	L	7	0,5	21	2864	82,65	87,1	78,2	557,5	587,6	527,5	144,3	199,9	0,168	0,178	5,27	0,45	1,64	273,8	379,3	19,4	26,8	326,6	23,1
21.	62	37	D	7	0,5	21	2864	84,4	88,9	79,9	569,4	599,7	539,0	148,4	204,1	0,172	0,181	5,27	0,45	1,64	281,5	387,2	19,9	27,4	334,3	23,6
22.	37	13	D	7	0,5	21	3997	86	90,2	81,8	580,1	608,5	551,8	133,6	207,1	0,126	0,132	5,27	0,45	1,64	253,5	392,8	17,9	27,8	323,2	22,8

Таблица 8.26. Збирна вредност специфичног отпора материјала на копање за цео погон, случај похабаних резних елемената 100 %

Р.бр.	φ_L	φ_D	правац	h	s	v_b	Q_{ef}	I_{sr}	I_{max}	I_{min}	N_{sr}	N_{max}	N_{min}	$P_{k,sr}$	$P_{k,max}$	E_{sr}	E_{max}	L	F_{sr}	k_w	$K_{L,sr}$	$K_{L,max}$	$K_{F,sr}$	$K_{F,max}$	K_L	K_F
1.	-33	-11	L	7	0,25	21	2044	103,1	110,3	95,8	695,2	744,1	646,3	204,8	253,2	0,297	0,320	4,33	0,23	1,64	473,6	585,5	54,9	67,9	529,5	61,4
2.	-11	13	L	7	0,25	21	2157	105,3	115	95,6	710,3	775,8	644,9	208,2	264,1	0,288	0,316	4,33	0,23	1,64	481,4	610,5	55,8	70,8	546,0	63,3
3.	13	37	L	7	0,25	21	1998	111,4	120,1	102,6	751,2	810,2	692,1	224,8	275,7	0,330	0,357	4,33	0,23	1,64	519,7	637,5	60,3	74,0	578,6	67,1
4.	37	62	L	7	0,25	21	1432	115,1	123,2	107	776,5	831,1	721,8	242,7	282,9	0,477	0,512	4,33	0,23	1,64	561,1	654,0	65,1	75,9	607,5	70,5
5.	62	37	D	7	0,25	21	1432	119,7	128	111,3	807,1	863,5	750,8	253,2	293,9	0,497	0,533	4,33	0,23	1,64	585,4	679,4	67,9	78,8	632,4	73,4
6.	37	13	D	7	0,25	21	1998	124,8	133,6	115,9	841,6	901,3	781,8	255,7	306,7	0,372	0,400	4,33	0,23	1,64	591,3	709,2	68,6	82,3	650,2	75,4
7.	13	-11	D	7	0,25	21	2157	129,8	138,7	120,8	875,3	935,7	814,9	264,7	318,4	0,359	0,385	4,33	0,23	1,64	612,0	736,2	71,0	85,4	674,1	78,2
8.	-11	-11	13	7	0,25	21	2044	131,5	139,5	123,5	887,1	941,1	833,1	270,6	320,3	0,384	0,409	4,33	0,23	1,64	625,6	740,5	72,6	85,9	683,0	79,2
9.	-33	-11	L	7	0,4	21	3271	136,8	145	128,5	922,5	978,2	866,8	262,7	332,9	0,250	0,266	4,89	0,36	1,64	537,0	680,4	44,0	55,8	608,7	49,9
10.	-11	13	L	7	0,4	21	3451	141,3	149,6	132,9	952,9	1009,2	896,5	270,2	343,4	0,245	0,260	4,89	0,36	1,64	552,2	702,0	45,3	57,6	627,1	51,4
11.	13	37	L	7	0,4	21	3197	145,6	154,1	137,1	982,2	1039,5	924,9	284,4	353,8	0,273	0,290	4,89	0,36	1,64	581,2	723,1	47,7	59,3	652,2	53,5
12.	37	62	L	7	0,4	21	2291	149,5	157,6	141,3	1008,2	1063,2	953,2	308,0	361,8	0,392	0,414	4,89	0,36	1,64	629,6	739,5	51,6	60,7	684,5	56,1
13.	62	37	D	7	0,4	21	2291	152,8	161	144,5	1030,4	1086,1	974,8	315,7	369,6	0,401	0,423	4,89	0,36	1,64	645,2	755,4	52,9	62,0	700,3	57,4
14.	37	13	D	7	0,4	21	3197	157,1	164,9	149,3	1059,8	1112,4	1007,2	311,0	378,5	0,296	0,311	4,89	0,36	1,64	635,6	773,7	52,1	63,5	704,6	57,8
15.	13	-11	D	7	0,4	21	3451	161,6	170	153,1	1089,8	1146,8	1032,8	317,1	390,3	0,282	0,297	4,89	0,36	1,64	648,1	797,6	53,2	65,4	722,9	59,3
16.	-11	-33	D	7	0,4	21	3271	165,6	174,3	156,9	1117,1	1175,8	1058,4	329,4	400,1	0,305	0,322	4,89	0,36	1,64	673,3	817,8	55,2	67,1	745,5	61,2
17.	-33	-11	L	7	0,5	21	4089	169	177,1	160,8	1139,7	1194,7	1084,7	323,8	406,5	0,249	0,262	5,27	0,45	1,64	614,3	771,3	43,4	54,5	692,8	49,0
18.	-11	13	L	7	0,5	21	4314	172	179,6	164,4	1160,3	1211,6	1109,0	327,2	412,3	0,241	0,252	5,27	0,45	1,64	620,8	782,2	43,9	55,3	701,5	49,6
19.	13	37	L	7	0,5	21	3997	176	184,1	167,9	1187,3	1241,9	1132,6	341,6	422,6	0,266	0,279	5,27	0,45	1,64	648,1	801,8	45,8	56,7	724,9	51,2
20.	37	62	L	7	0,5	21	2864	179,3	186,9	171,6	1209,2	1260,8	1157,6	367,6	429,0	0,378	0,395	5,27	0,45	1,64	697,4	813,9	49,3	57,5	755,7	53,4
21.	62	37	D	7	0,5	21	2864	183,2	191,3	175,1	1235,8	1290,5	1181,2	376,7	439,1	0,387	0,405	5,27	0,45	1,64	714,7	833,1	50,5	58,9	773,9	54,7
22.	37	13	D	7	0,5	21	3997	186,8	194,4	179,2	1260,1	1311,4	1208,9	366,6	446,2	0,283	0,295	5,27	0,45	1,64	695,4	846,6	49,2	59,8	771,0	54,5

8.2 Резултати мерења вибрација

Упоредно са мерењем ангазоване струје у радном технолошком процесу, мерене су и вибрације на месту улазног пара вратила редуктора погона за копање роторног багера SRs2000.32/5+VR [92]. Мерења су вршена у три референтна правца: вертикалном (управно на улазни пар), хоризонталном (попречно на улазни пар) и аксијалном (уздужно на улазни пар) [92]. Мерење вибрација изводило се SKF Microlog CMXA80 уређајем, док су анализе спроводене у наменски пројектованом софтверу SKF @plitude Analyst for Microlog [92]. На слици 8.15 приказани су правци у којима су извођена мерења.



Слика 8.15. Референтни правци за мерење вибрација [92]

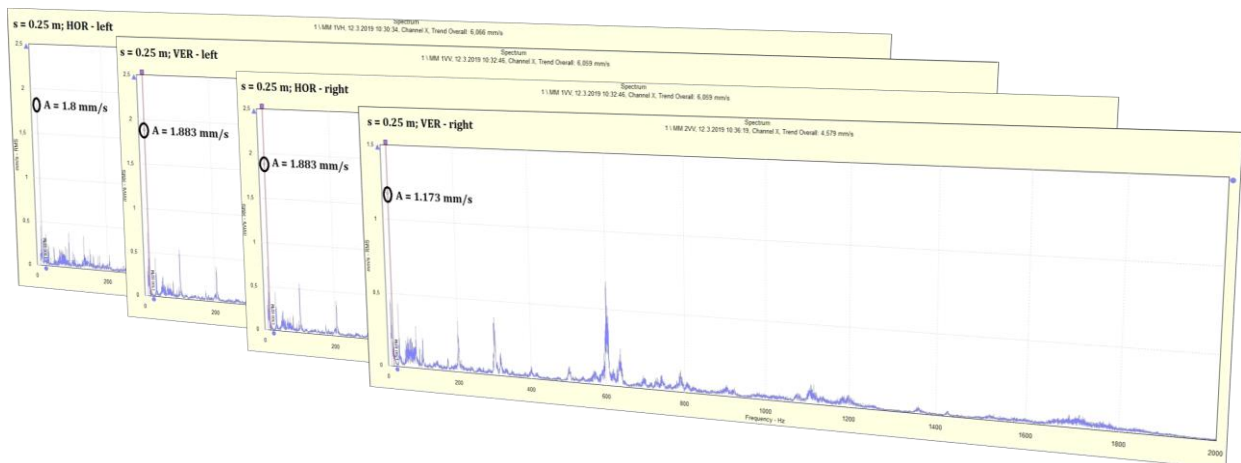
Вибрација су мерене за дебљине реза: 0,25 [m], 0,4 [m] и 0,5 [m]. Са преузетих извештаја из диспечерског центра површинског копа Тамнава–Западно поље очитане су амплитуде на карактеристичној фреквенцији поремећајне силе за вертикални, хоризонтални и аксијални правац [92]. Карактеристична фреквенција је фреквенција побуде обртања вратила електромотора ($1000 \text{ [min}^{-1}] = 16,67 \text{ [Hz]}$) и иста је за свако мерење (како би се омогућила компаративна анализа резултата) [92]. Вибрације у аксијалном правцу немају утицај на резултате анализе.

Вибрације су бележене у тренутку када се стрела багера налазила у обртној оси, са максималним одступањем до $5 \text{ [}^\circ\text{]}$. Разлог томе је чињеница да се највеће вредности амплитуде вибрација очекују када се стрела налази у оси напредовања багера (максимална дебљина реза). Са циљем утврђивања утицаја похабаности резних елемената на вибрације погона за копање роторног багера, изведено је и нулто мерење, тзв. *мерење на празно*, како би се одредила вредност амплитуде у стању мировања, када се окреће роторни точак, без директног откопавања материјала. Формулар коришћен при мерењу вибрација дат је у прилогу 2.

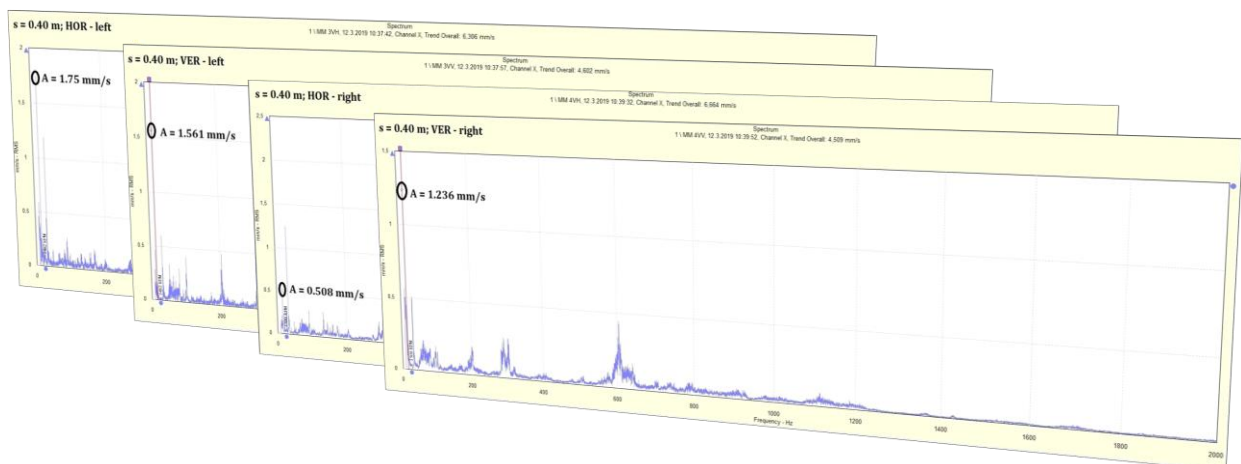
Формулар садржи очитане вредности амплитуде брзине вибрација у аксијалном, хоризонталном и вертикалном правцу на фреквенцији обртања вратила електромотора. Резултати се бележе у односу на кретање стреле роторног точка (лево/десно) и промену дебљине реза. Дебљина реза је, као и код мерења струје, имала три варијације: 0,25 [m], 0,4 [m] и 0,5 [m].

Резултати мерења вибрација биће приказани на исти начин као резултати мерења струје, од стања новог зуба до стања потпуне похабаности, са кораком похабаности од 25 %.

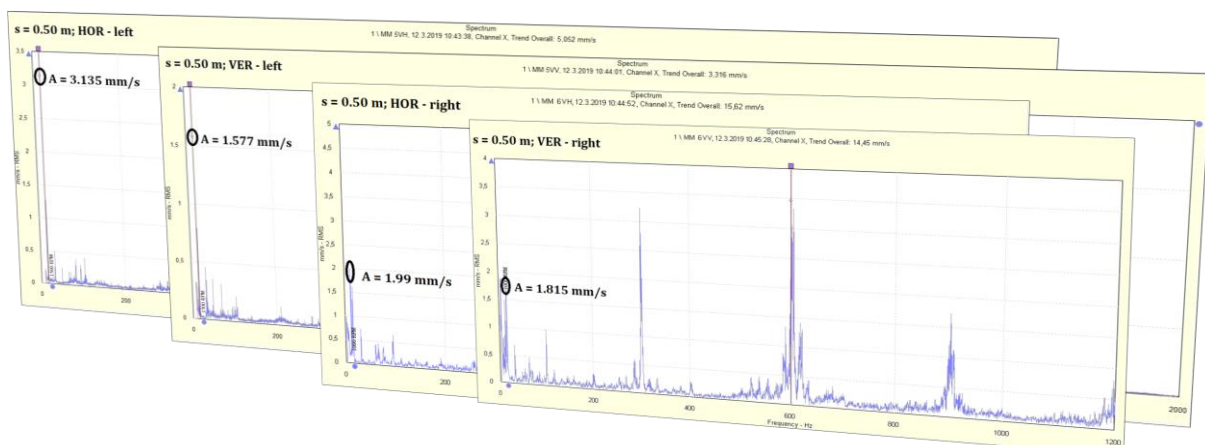
8.2.1 Резултати мерења за случај нових резних елемената



Слика 8.16. Измерене вибрације са новим зубима (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}]) [92]

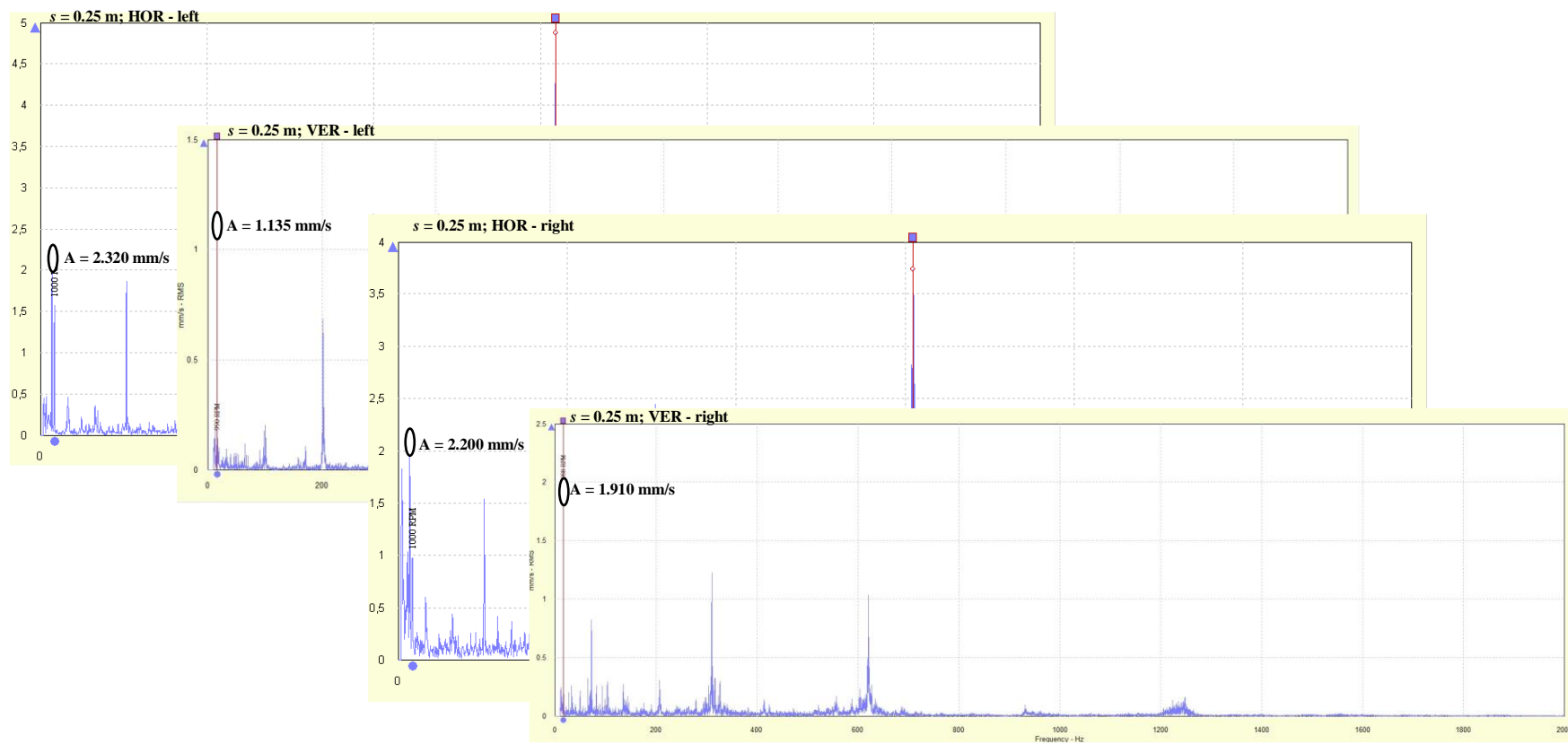


Слика 8.17. Измерене вибрације са новим зубима (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}]) [92]

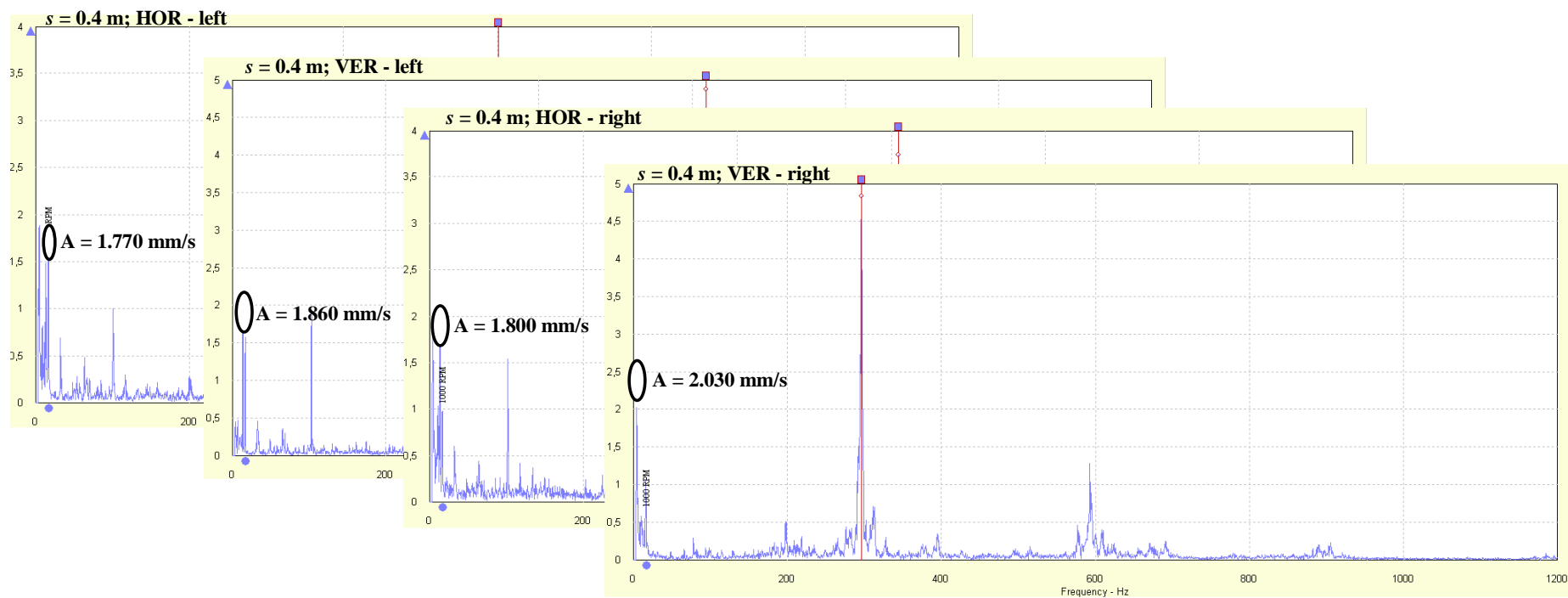


Слика 8.18. Измерене вибрације са новим зубима (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}]) [92]

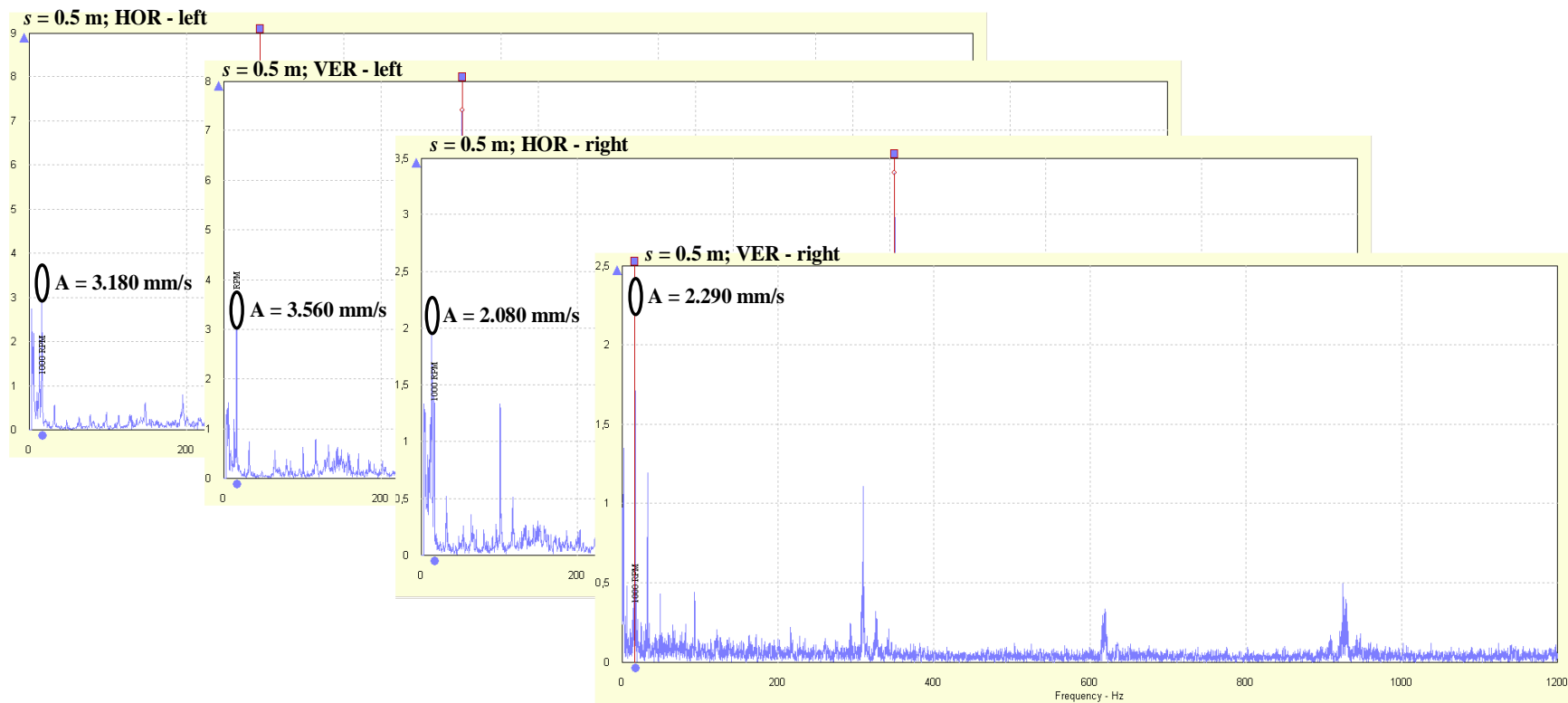
8.2.2 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 25 %



Слика 8.19. Измерене вибрације за похабаност зуба 25 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у H и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}])

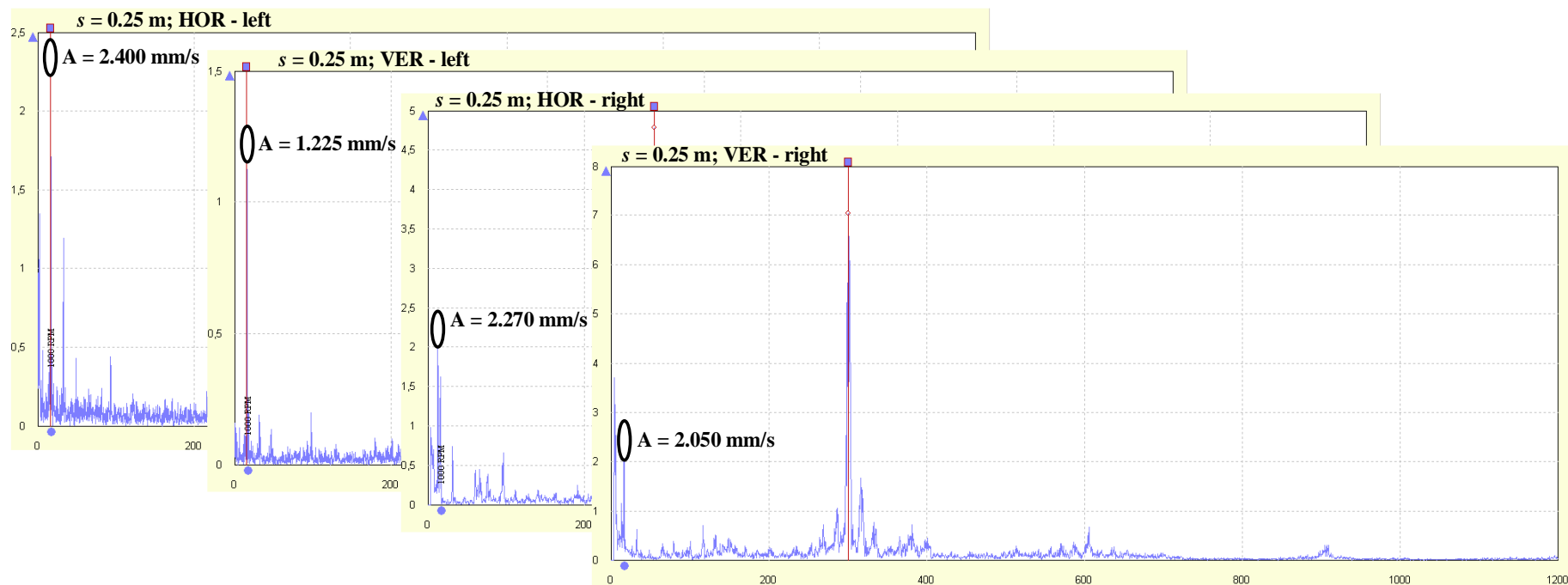


Слика 8.20. Измерене вибрације за похабаност зуба 25 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min⁻¹])

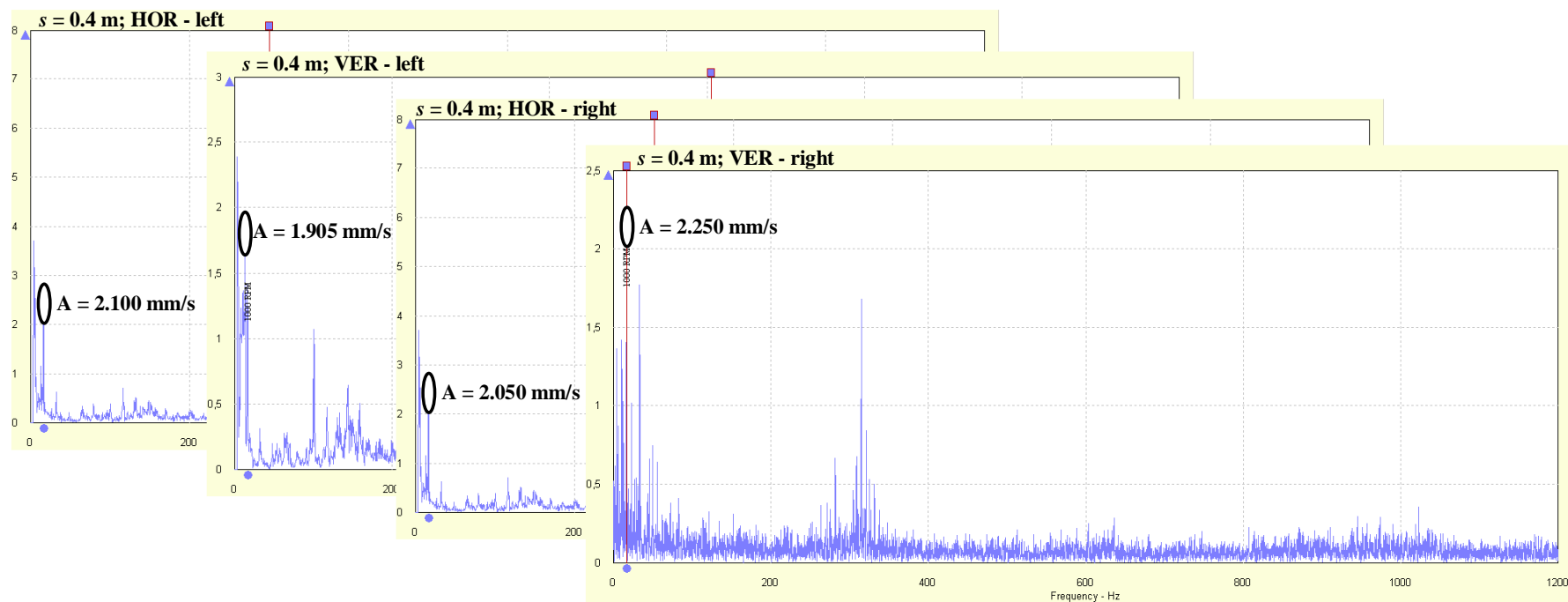


Слика 8.21. Измерене вибрације за похабаност зуба 25 % (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}])

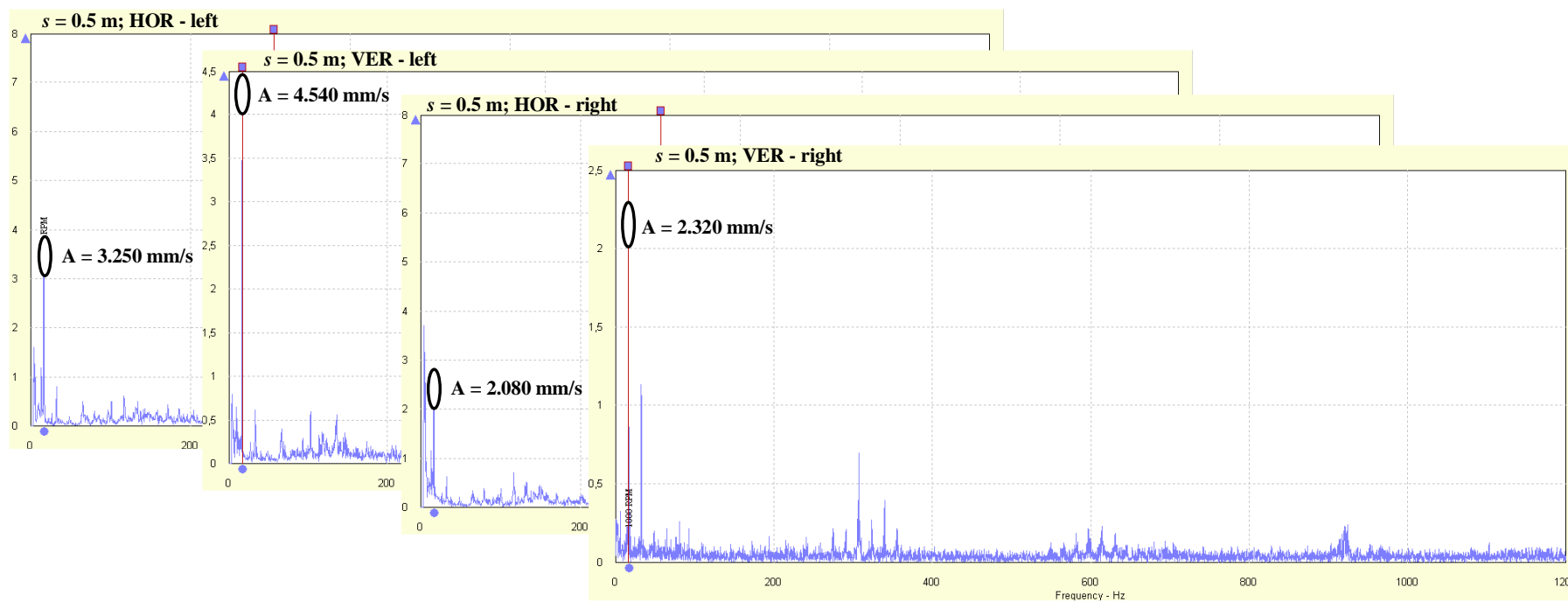
8.2.3 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 50 %



Слика 8.22. Измерене вибрације за похабаност зуба 50 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min⁻¹])

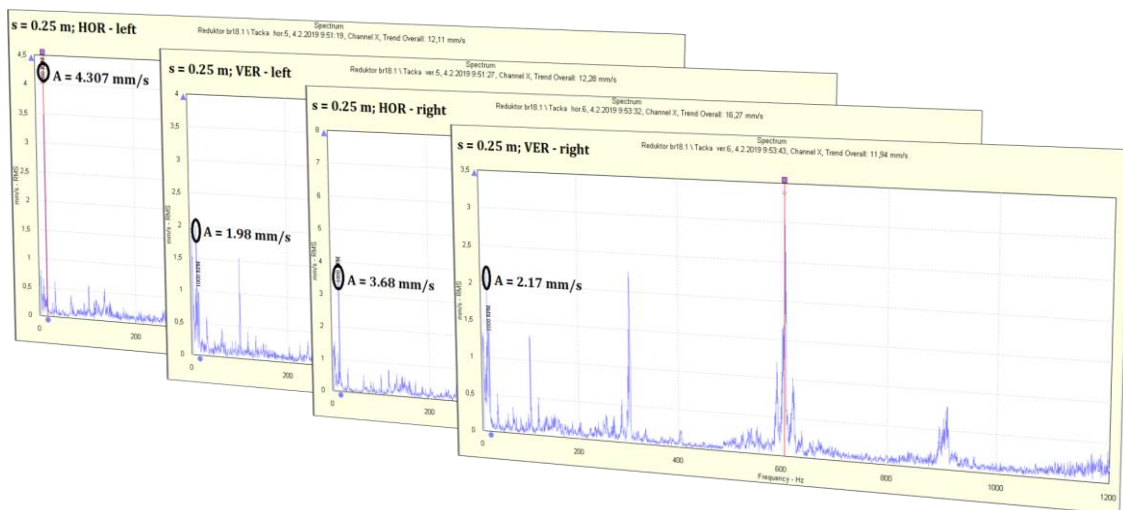


Слика 8.23. Измерене вибрације за похабаност зуба 50 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у H и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}])

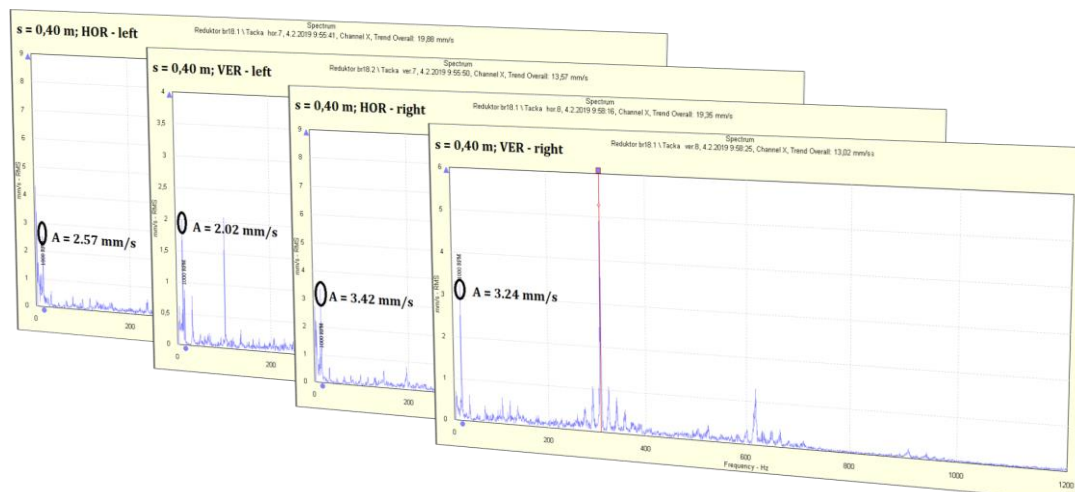


Слика 8.24. Измерене вибрације за похабаност зуба 50 % (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}])

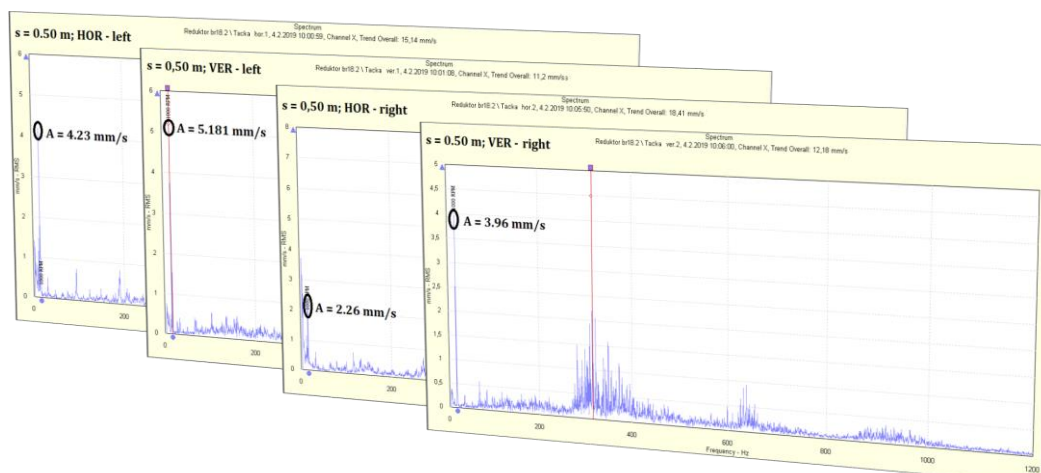
8.2.4 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 75 %



Слика 8.25. Измерене вибрације за похабаност зуба 75 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}]) [92]

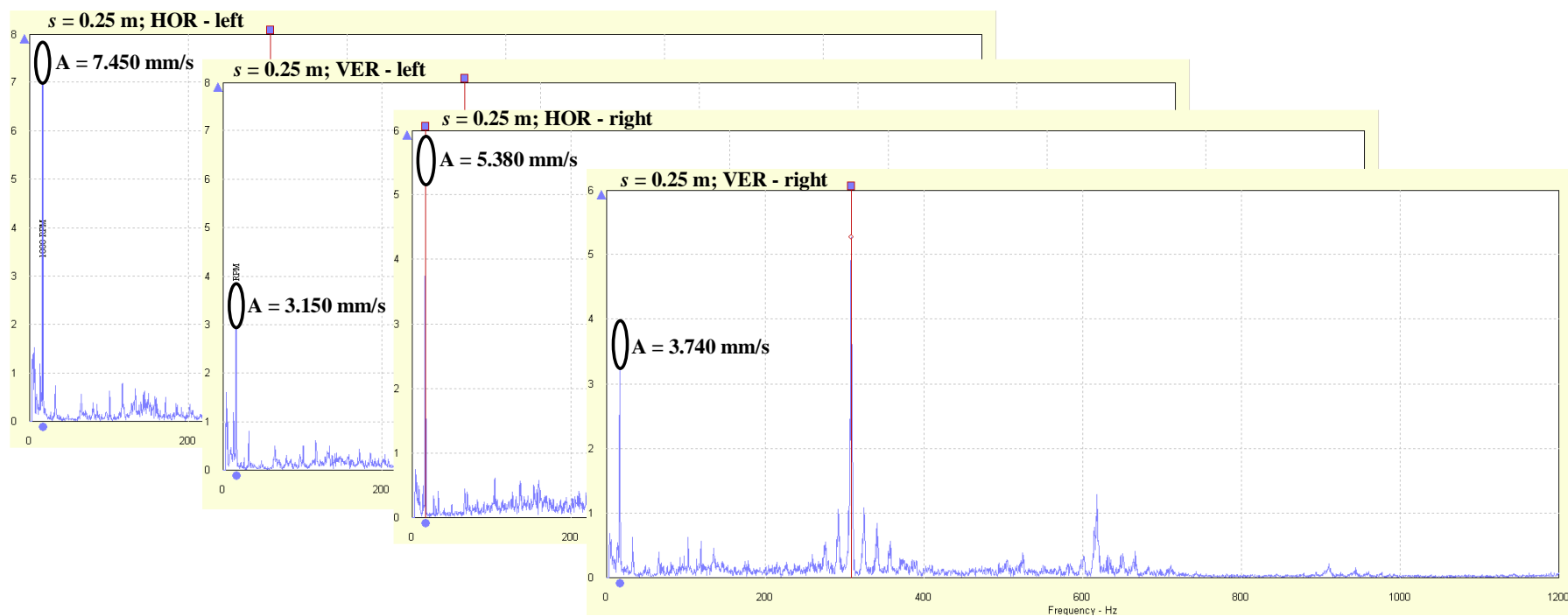


Слика 8.26. Измерене вибрације за похабаност зуба 75 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}]) [92]

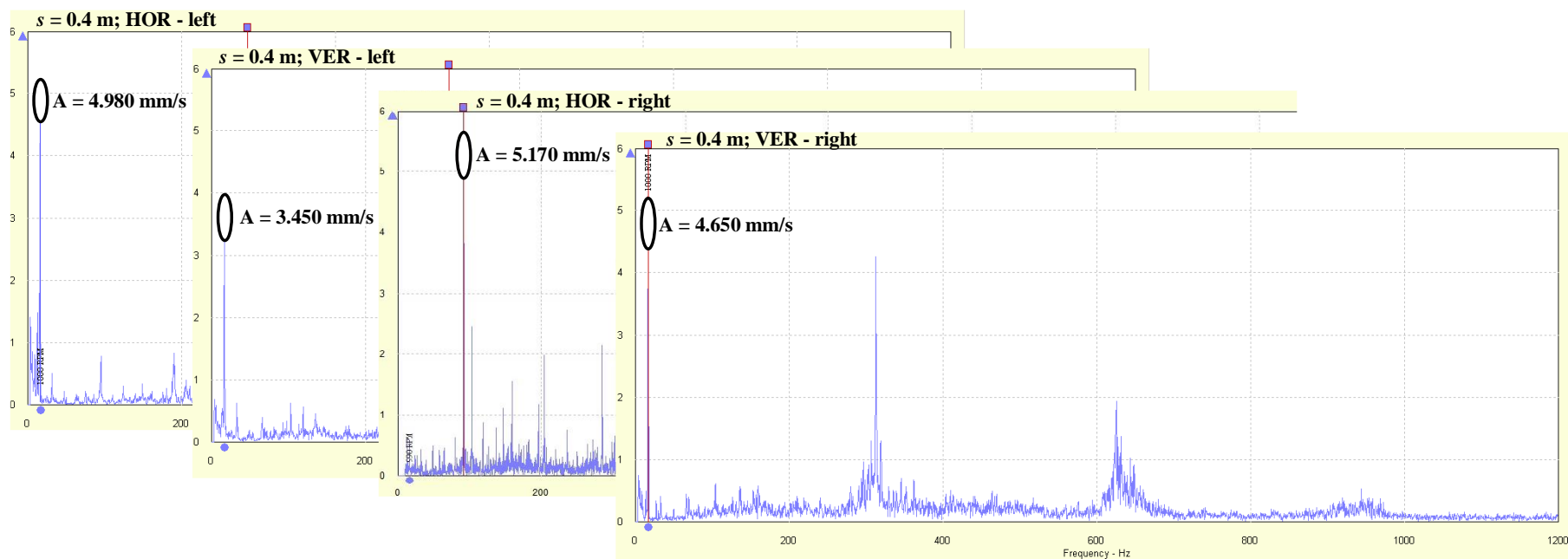


Слика 8.27. Измерене вибрације за похабаност зуба 75 % (мерење у лево и десно 0,5 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}]) [92]

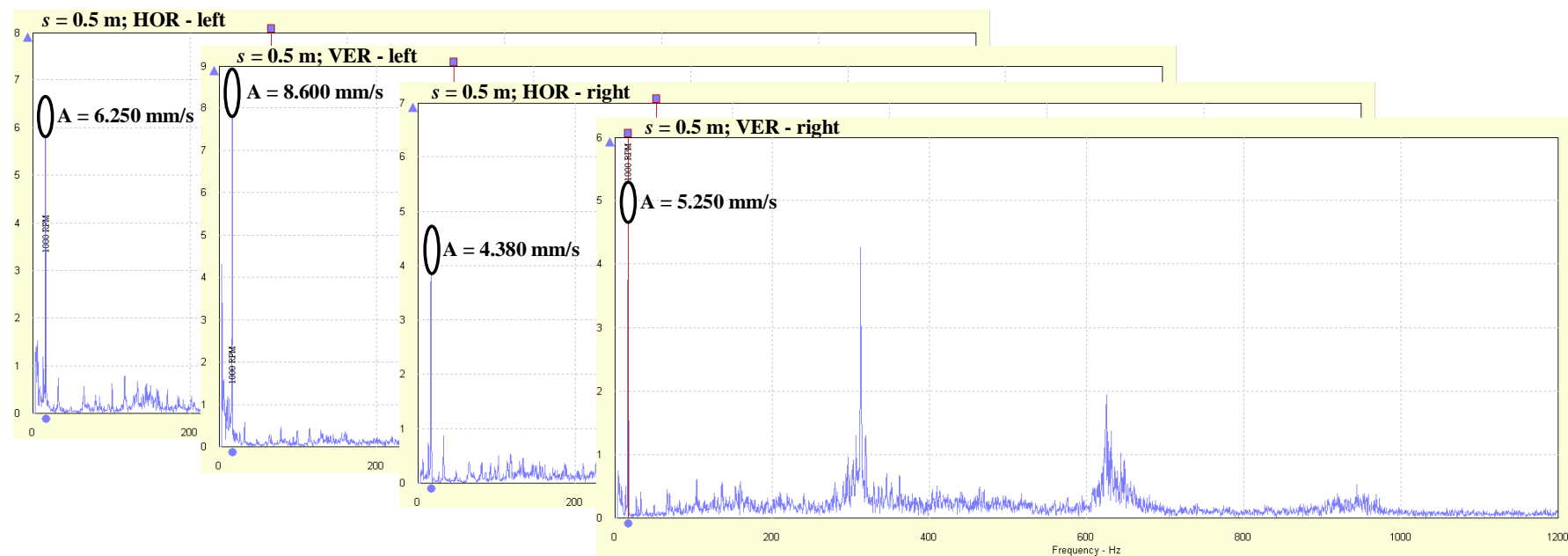
8.2.5 Резултати мерења за случај похабаних резних елемената 100 %



Слика 8.28. Измерене вибрације за похабаност зуба 100 % (мерење у лево и десно 0,25 [m] у H и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на $1000 \text{ [min}^{-1}\text{])}$



Слика 8.29. Измерене вибрације за похабаност зуба 100 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у H и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}])



Слика 8.30. Измерене вибрације за похабаност зуба 100 % (мерење у лево и десно 0,4 [m] у Н и V правцу – вредност амплитуде карактеристичне фреквенције на 1000 [min^{-1}])

9. ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА ЗАВИСНОСТИ СПЕЦИФИЧНЕ ПОТРОШЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ И НИВОА ВИБРАЦИЈА ПОГОНА ЗА КОПАЊЕ

Верификација модела зависности похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије у процесу копања и нивоа амплитуде вибрација биће извршена на основу улазних података добијених *in situ* мерењима на објекту истраживања – роторном багеру SRs2000.32/5+VR.

Процес верификације подразумева компаративну анализу тренда специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација за однос похабаности резних елемената 25 %, 50 %, 75 % и 100 % према резултатима мерења са новим резним елементима. На тај начин је могуће доказати почетну хипотезу да стање зуба, као јединог елемента на роторном багеру у директном контакту са материјалом који се откопава, има утицај на рад погона за копање, са аспекта оба облика енергије.

Улазни подаци о мерењима струје и вибрација у радном технолошком процесу представљени су у поглављу 8. Да би се применио модел, за различите промене дебљине реза и кретање стреле у леву (Л) и десну (Д) страну, узима се средња вредност максималне потрошње електричне енергије E_{max} која се, као таква, пореди са нивоом амплитуде брзине вибрација. Релевантни подаци са којима се ушло у верификацију модела приказани су у наставку.

На основу тренутне јачине струје која се троши у процесу копања I_m и применом Ватметарске методе [1]; једначине (7.1), (7.2), (7.3), (7.4) израчуната је специфична потрошња електричне енергије. За даље анализе референтне су максималне вредности за сва мерења и као такве представљене у табелици 9.1 [92].

Таблица 9.1. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min]) [92]

Бр.	φ_L	φ_D	φ_L	φ_D	h	Правац	Q_{ost}		I_{max}		N_{p-max}		F_{max}		E_{max}	
	Пох.	25 %	Нови	Нови			Исти параметри	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.
	[°]				[m]	Л/Д	[m ³ /h]		[A]		[kW]		[kN]		[kWh/m ³]	
1.	15	30	-33	-11	0,25	лево	2037	2044	88,80	77,82	599	524,9	203,8	178,6	0,255	0,220
2.	0	15	-11	13			2186	2157	88,50	79,0	597	532,9	203,2	181,4	0,237	0,212
3.	-15	0	13	37			2186	1998	81,91	73,08	552,6	493,0	188,1	167,8	0,218	0,211
4.	-30	-15	37	62			2037	1432	95,25	65,57	642,6	442,3	218,8	150,5	0,275	0,261
5.	-15	0	62	37	0,25	десно	2186	1432	82,10	72,29	553,8	487,6	188,5	165,9	0,218	0,291
6.	0	15	37	13			2186	1998	82,82	73,08	558,7	493,0	190,1	167,7	0,220	0,211
7.	15	30	13	-11			2037	2157	94,41	83,35	636,9	562,2	216,7	191,3	0,272	0,225
8.	15	30	-11	-33			2037	2044	101,75	90,06	686,4	607,5	233,6	206,7	0,294	0,258
9.	0	15	-33	-11	0,4	лево	3497	3271	143,46	127,98	967,8	863,3	329,5	293,9	0,246	0,233
10.	-15	0	-11	13			3497	3451	137,44	123,64	927,1	834,0	315,6	283,9	0,235	0,213
11.	-30	-15	13	37			3259	3197	112,51	99,94	759	674,2	258,3	229,5	0,205	0,184
12.	-30	-15	37	62			3259	2291	79,83	70,31	538,5	474,3	183,3	161,4	0,142	0,176
13.	-15	0	62	37	0,4	десно	3497	2291	82,24	72,68	554,8	490,3	188,8	166,8	0,137	0,183
14.	-15	0	37	13			3497	3197	99,12	87,69	668,7	591,5	227,6	201,3	0,167	0,160
15.	0	15	13	-11			3497	3451	112,17	99,15	756,7	668,8	257,5	227,6	0,190	0,169
16.	15	30	-11	-33			3259	3271	143,88	130,35	970,6	879,3	330,5	299,4	0,265	0,238
17.	15	30	-33	-11	0,5	лево	4074	4089	140,77	127,59	949,6	860,7	323,2	293	0,207	0,186
18.	0	15	-11	13			4372	4314	135,77	122,45	915,9	826,0	311,8	281,2	0,186	0,169
19.	-15	0	13	37			4371	3997	109,94	97,57	714,6	658,2	252,4	224	0,149	0,144
20.	-30	-15	37	62			4074	2864	99,49	88,48	671,2	596,9	228,4	203,1	0,144	0,181
21.	-30	-15	62	37	0,5	десно	4074	2864	85,10	75,45	574,1	508,9	195,4	173,2	0,122	0,152
22.	-15	0	37	13			4372	2864	100,45	110,8	677,6	747,4	230,6	254,4	0,135	0,229

У табlici 9.2 приказане су очитане вредности амплитуде брзине вибрација према сликама 8.19–8.21 за случај похабаних резних елемената 25 %, односно 8.16–8.18 за случај нових резних елемената. По истом принципу узети су и други улазни подаци [92].

Таблица 9.2. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min⁻¹])

Итерације Кретање стреле Фреквенција, [Hz]	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
16,67 Hz ±1% (1000 [min ⁻¹])						
Случај похабаних резних елемената – похабаност 25 %						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	2,320	2,200	1,770	1,800	3,180	2,080
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,135	1,910	1,860	2,030	3,560	2,290
Случај нових резних елемената						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	1,8	1,883	1,750	0,508	3,135	1,990
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,883	1,173	1,561	1,236	1,577	1,815

Стављањем у релацију *средњих вредности специфичне потрошње електричне енергије* (таблица 9.1.) и *средњих вредности амплитуде* на карактеристичној фреквенцији (таблица 9.2.) добија се утицај стања резног елемента на рад погона за копање [92]. У табlici 9.3 дат је упоредни однос анализираних феномена. Слагање међусобно нормалних амплитуда изводи се на основу једначине (7.8); [92], [108].

Таблица 9.3. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E

Итерације Кретање стреле	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Случај похабаних резних елемената – похабаност 25 %						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	2,583	2,913	2,568	2,713	4,773	3,094
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m ³]	0,246	0,251	0,207	0,190	0,171	0,129
Однос A/E	10,50	11,59	12,41	14,31	27,86	24,07
Случај нових резних елемената						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	2,605	2,218	2,345	1,336	3,509	2,693
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m ³]	0,226	0,246	0,202	0,187	0,170	0,191
Однос A/E	11,53	9,02	11,61	7,14	20,64	14,10

Релација A/E дефинише однос између похабаних и нових резних елемената у вредности 73,50 %. Поменута релација представљена је изразом:

$$A/E = \frac{\sum A/E_{(novi)}}{\sum A/E_{(pohabani)}} \cdot 100\% \quad (9.1)$$

Други методолошки приступ према једначинама (7.6) и (7.7) и подацима за роторни багер SRs2000.32/5+VR ($v = 2,7$ [m/s], $\gamma = 1,6$ [t/m³], $h_d = 8$ [m]) даје резултате приказане у таблицама 9.4–9.10. Резултати су представљени за различите дебљине реза и кретање стреле у леву и десну страну. Из интервала се усваја *средња вредност амплитуде брзине*.

Таблица 9.4. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево

Похабани резни елементи – 25 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
593,1	71,056	193,36	524,9	71,295	168,01
591,3	76,252	190,77	532,9	75,236	169,51
546,9	76,252	174,30	493,0	69,690	156,78
627,4	71,056	206,05	442,3	49,949	145,32

Таблица 9.5. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно

Похабани резни елементи – 25 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
542,0	76,252	172,50	487,6	49,949	162,09
546,9	76,252	174,30	493,0	69,690	156,78
625,0	71,056	205,18	562,2	75,236	180,36
674,6	71,056	223,53	607,5	71,295	198,60

Таблица 9.6. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево

Похабани резни елементи – 25 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
956,0	122,004	308,87	863,3	114,093	277,48
915,5	122,004	293,87	834,0	120,371	264,31
741,3	113,690	232,46	674,2	111,511	208,40
526,7	113,690	152,96	474,3	79,9100	146,07

Таблица 9.7. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно

Похабани резни елементи – 25 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
542,9	122,004	155,90	490,3	79,911	151,99
656,8	122,004	198,08	591,5	111,511	177,77
744,8	122,004	230,68	668,8	120,371	203,12
959,0	142,112	302,55	879,3	114,093	283,41

Таблица 9.8. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево

Похабани резни елементи – 25 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
938,0	142,112	294,76	860,7	142,624	265,95
904,2	152,505	278,42	826,0	150,472	250,12
729,8	152,487	213,83	658,2	139,415	192,14
659,3	142,112	191,56	596,9	99,896	184,08

Таблица 9.9. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно

Похабани резни елементи – 25 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
562,3	142,112	155,61	508,9	99,896	151,48
665,8	152,505	190,11	747,4	99,896	239,82

Таблица 9.10. Збирни однос похабаног 25 % и новог резног елемента

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
Кретање стреле	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Однос (7.6) и (7.7) за похабане зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	191,1	193,9	247,0	221,8	244,6	172,9
Однос (7.6) и (7.7) за нове зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	159,9	174,5	224,1	204,1	223,1	195,7

Резиме I: Однос похабани/нови резни елементи, коришћењем израза (7.6) и (7.7) износи 92,93 %. Оваква зависност је добијена поређењем амплитуда применом израза (9.2):

$$A = \frac{\sum A_{sr(novi)}}{\sum A_{sr(pohabani)}} \cdot 100\% \quad (9.2)$$

Поређењем оба приступа (први, на основу израза (9.1) и података из таблице 9.3 даје зависност 73,50 %), долази се до закључка да је за случај похабаних резних елемената 25 %, степен сагласности оба приступа низак.

СЛУЧАЈ ПОХАБАНИХ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА – 50 %

Таблица 9.11. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min])

Бр.	φ_L	φ_D	φ_L	φ_D	h [m]	Правац Л/Д	Q_{ost}		I_{max}		N_{p-max}		F_{max}		E_{max}	
	Пох.	50 %	Нови	Нови			Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови
	[°]						[m ³ /h]	[A]	[kW]	[kN]	[kWh/m ³]					
1.	15	30	-33	-11	0,25	лево	2037	2044	91,44	77,82	616,8	524,9	209,9	178,6	0,263	0,220
2.	0	15	-11	13			2186	2157	91,16	79,0	615,0	532,9	209,3	181,4	0,244	0,212
3.	-15	0	13	37			2186	1998	84,31	73,08	568,7	493,0	193,6	167,8	0,225	0,211
4.	-30	-15	37	62			2037	1432	96,72	65,57	652,5	442,3	222,2	150,5	0,279	0,261
5.	-15	0	62	37	0,25	десно	2186	1432	83,56	72,29	563,7	487,6	191,9	165,9	0,223	0,291
6.	0	15	37	13			2186	1998	84,31	73,08	568,7	493,0	193,6	167,7	0,225	0,211
7.	15	30	13	-11			2037	2157	96,36	83,35	650,0	562,2	221,2	191,3	0,278	0,225
8.	15	30	-11	-33			2037	2044	104	90,06	701,6	607,5	238,8	206,7	0,301	0,258
9.	0	15	-33	-11	0,4	лево	3497	3271	147,38	127,98	994,2	863,3	338,5	293,9	0,253	0,233
10.	-15	0	-11	13			3497	3451	141,13	123,64	952,1	834,0	324,1	283,9	0,242	0,213
11.	-30	-15	13	37			3259	3197	114,29	99,94	771,0	674,2	262,5	229,5	0,208	0,184
12.	-30	-15	37	62			3259	2291	81,20	70,31	547,8	474,3	186,4	161,4	0,145	0,176
13.	-15	0	62	37	0,4	десно	3497	2291	83,70	72,68	564,7	490,3	192,2	166,8	0,139	0,183
14.	-15	0	37	13			3497	3197	101,26	87,69	683,1	591,5	232,5	201,3	0,171	0,160
15.	0	15	13	-11			3497	3451	114,83	99,15	774,6	668,8	263,6	227,6	0,195	0,169
16.	15	30	-11	-33			3259	3271	147,85	130,35	997,4	879,3	339,6	299,4	0,272	0,238
17.	15	30	-33	-11	0,5	лево	4074	4089	144,61	127,59	975,5	860,7	332,1	293	0,213	0,186
18.	0	15	-11	13			4372	4314	139,41	122,45	940,4	826,0	320,1	281,2	0,191	0,169
19.	-15	0	13	37			4371	3997	112,51	97,57	759,0	658,2	258,4	224	0,153	0,144
20.	-30	-15	37	62			4074	2864	101,65	88,48	685,7	596,9	233,4	203,1	0,147	0,181
21.	-30	-15	62	37	0,5	десно	4074	2864	86,68	75,45	584,8	508,9	199,0	173,2	0,124	0,152
22.	-15	0	37	13			4372	2864	102,65	110,8	692,4	747,4	235,6	254,4	0,138	0,229

Таблица 9.12. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min⁻¹])

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
Кретање стреле	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Фреквенција, [Hz]	16,67 Hz ±1% (1000 [min ⁻¹])					
Случај похабаних резних елемената – похабаност 50 %						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	2,400	2,270	2,100	2,050	3,250	2,080
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,225	2,050	1,905	2,250	4,540	2,320
Случај нових резних елемената						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	1,8	1,883	1,750	0,508	3,135	1,990
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,883	1,173	1,561	1,236	1,577	1,815

Таблица 9.13. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
Кретање стреле	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Случај похабаних резних елемената – похабаност 50 %						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	2,695	3,059	2,835	3,044	5,583	3,116
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m ³]	0,253	0,257	0,212	0,194	0,176	0,131
Однос A/E	10,66	11,92	13,38	15,67	31,75	23,73
Случај нових резних елемената						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	2,605	2,218	2,345	1,336	3,509	2,693
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m ³]	0,226	0,246	0,202	0,187	0,170	0,191
Однос A/E	11,53	9,02	11,61	7,14	20,64	14,10

Таблица 9.14. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево

Похабани резни елементи – 50 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,25 L	N_p	N_d	A	0,25 L
616,8	71,06	202,14		524,9	71,29	168,01	
615,0	76,25	199,53		532,9	75,24	169,51	
568,7	76,25	182,40		493,0	69,69	156,78	
652,5	71,06	215,34		442,3	49,95	145,32	

Таблица 9.15. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно

Похабани резни елементи – 50 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,25 D	N_p	N_d	A	0,25 D
563,7	76,25	180,53		487,6	49,95	162,09	
568,7	76,25	182,40		493,0	69,69	156,78	
650,0	71,06	214,44		562,2	75,24	180,36	
701,6	71,06	233,52		607,5	71,30	198,60	

Таблица 9.16. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево

Похабани резни елементи – 50 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,4 L	N_p	N_d	A	0,4 L
994,2	122,0	323,04		863,3	114,10	277,48	
952,1	122,0	307,44		834,0	120,38	264,31	
771,0	113,69	243,44		674,2	111,51	208,40	
547,8	113,69	160,77		474,3	79,91	146,07	

Таблица 9.17. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно

Похабани резни елементи – 50 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,4 D	N_p	N_d	A	0,4 D
564,7	122,0	163,95		490,3	79,92	151,99	
683,1	122,0	207,82		591,5	111,51	177,77	
774,6	122,0	241,72		668,8	120,37	203,13	
997,4	113,69	327,29		879,3	114,10	283,41	

Таблица 9.18. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево

Похабани резни елементи – 50 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,5 L	N_p	N_d	A	0,5 L
975,5	142,11	308,66		860,7	142,62	265,96	
940,4	152,50	291,82		826,0	150,47	250,20	
759,0	152,50	224,63		658,2	139,42	192,15	
685,7	142,11	201,33		596,9	99,90	184,08	

Таблица 9.19. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно

Похабани резни елементи – 50 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,5 D	N_p	N_d	A	0,5 D
584,8	142,11	163,94		508,9	99,90	151,49	
692,4	152,50	199,98		747,4	99,90	239,82	

Таблица 9.20. Збирни однос похабаног 50 % и новог резног елемента

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
Кретање стреле	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Однос (7.6) и (7.7) за похабане зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	199,9	202,7	258,7	235,2	256,6	182
Однос (7.6) и (7.7) за нове зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	159,9	174,5	224,1	204,1	223,1	195,7

Резиме II: Зависност похабани/нови резни елементи према релацији A/E износи 69,13 %. Други методолошки приступ даје зависност од 88,5 %. Као и за случај похабаних резних елемената од 25 % сагласност оба приступа ја ниска, али је разлика мање изражена.

СЛУЧАЈ ПОХАБАНИХ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА – 75 %

Таблица 9.21. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min]) [92]

Бр.	φ_L		φ_D		h [m]	Pравас Л/Д	Q_{ost} [m ³ /h]		I_{max} [A]		N_{p-max} [kW]		F_{max} [kN]		E_{max} [kWh/m ³]	
	Пох.	75 %	Нови	Нови			Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови
1.	19	38	-33	-11	0,25	лево	1938	2044	89,7	77,82	605,1	524,9	205,9	178,6	0,271	0,220
2.	0	19	-11	13			2175	2157	90,1	79,0	607,8	532,9	206,9	181,4	0,242	0,212
3.	-23	0	13	37			2161	1998	94	73,08	634,1	493,0	215,9	167,8	0,255	0,211
4.	-46	-23	37	62			1817	1432	85,7	65,57	578,1	442,3	196,8	150,5	0,275	0,261
5.	-46	-23	62	37	0,25	десно	1817	1432	96	72,29	647,6	487,6	220,4	165,9	0,310	0,291
6.	-23	0	37	13			2161	1998	101,5	73,08	684,7	493,0	233,1	167,7	0,277	0,211
7.	0	19	13	-11			2175	2157	92	83,35	620,6	562,2	211,3	191,3	0,248	0,225
8.	19	38	-11	-33			1938	2044	84,1	90,06	567,3	607,5	193,1	206,7	0,253	0,258
9.	19	38	-33	-11	0,4	лево	3100	3271	122,8	127,98	828,4	863,3	282	293,9	0,236	0,233
10.	0	19	-11	13			3480	3451	132,4	123,64	893,2	834,0	304	283,9	0,227	0,213
11.	-23	0	13	37			3457	3197	136,7	99,94	922,2	674,2	313,9	229,5	0,237	0,184
12.	-46	-23	37	62			2908	2291	132,7	70,31	895,2	474,3	304,8	161,4	0,273	0,176
13.	-46	-23	62	37	0,4	десно	2908	2291	134,7	72,68	908,7	490,3	309,4	166,8	0,277	0,183
14.	-23	0	37	13			3457	3197	134,7	87,69	908,7	591,5	309,3	201,3	0,233	0,160
15.	0	19	13	-11			3480	3451	129,5	99,15	873,6	668,8	297,3	227,6	0,222	0,169
16.	19	38	-11	-33			3100	3271	127,1	130,35	857,4	879,3	291,8	299,4	0,245	0,238
17.	19	38	-33	-11	0,5	лево	3876	4089	160,8	127,59	1084,7	860,7	369,3	293	0,250	0,186
18.	0	19	-11	13			4350	4314	173,1	122,45	1167,7	826,0	397,6	281,2	0,240	0,169
19.	-23	0	13	37			4321	3997	167,1	97,57	1127,2	658,2	383,7	224	0,233	0,144
20.	-46	-23	37	62			3634	2864	158	88,48	1065,9	596,9	362,8	203,1	0,262	0,181
21.	-46	-23	62	37	0,5	десно	3634	2864	167,2	75,45	1127,9	508,9	384	173,2	0,277	0,152
22.	-23	0	37	13			3634	2864	174,2	110,8	1175,1	747,4	400,1	254,4	0,289	0,229

Таблица 9.22. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min⁻¹])

Итерације Кретање стреле Фреквенција, [Hz]	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
16,67 Hz ±1% (1000 [min ⁻¹])						
Случај похабаних резних елемената – похабаност 75 %						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	4,307	3,680	2,570	3,420	4,230	2,260
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,980	2,170	2,020	3,240	5,181	3,960
Случај нових резних елемената						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	1,8	1,883	1,750	0,508	3,135	1,990
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,883	1,173	1,561	1,236	1,577	1,815

Таблица 9.23. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E

Итерације Кретање стреле	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Случај похабаних резних елемената – похабаност 75 %						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	4,740	4,272	3,269	4,711	6,688	4,560
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m ³]	0,261	0,272	0,243	0,244	0,246	0,283
Однос A/E	18,16	15,71	13,45	19,31	27,19	16,11
Случај нових резних елемената						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	2,605	2,218	2,345	1,336	3,509	2,693
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m ³]	0,226	0,246	0,202	0,187	0,170	0,191
Однос A/E	11,53	9,02	11,61	7,14	20,64	14,10

Таблица 9.24. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево

Похабани резни елементи – 75 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
605,1	67,60	199,08	524,9	71,30	168,01
607,8	75,86	197,01	532,9	75,24	169,51
634,1	75,38	206,94	493,0	69,69	156,78
578,1	63,38	190,64	442,3	49,95	145,32

Таблица 9.25. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно

Похабани резни елементи – 75 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
647,6	63,38	216,38	487,6	49,95	162,09
684,7	75,38	225,68	493,0	69,69	156,78
620,6	75,86	201,75	562,2	75,24	180,36
567,3	67,60	185,08	607,5	71,30	198,59

Таблица 9.26. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево

Похабани резни елементи – 75 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
828,4	108,13	266,77	863,3	114,10	277,48
893,2	121,38	285,86	834,0	120,38	264,31
922,2	120,58	296,90	674,2	111,51	208,40
895,2	101,43	293,99	474,3	79,91	146,07

Таблица 9.27. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно

Похабани резни елементи – 75 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
908,7	101,43	298,99	490,3	79,92	151,99
908,7	120,58	291,90	591,5	111,51	177,78
873,6	121,38	278,60	668,8	120,38	203,13
857,4	108,13	277,51	879,3	114,10	283,41

Таблица 9.28. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево

Похабани резни елементи – 75 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
1084,7	135,20	351,67	860,7	142,62	265,95
1167,7	151,73	376,29	826,0	150,47	250,20
1127,2	150,72	361,66	658,2	139,42	192,15
1065,9	126,76	347,84	596,9	99,90	184,08

Таблица 9.29. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно

Похабани резни елементи – 75 %			Нови резни елементи		
N_p	N_d	A	N_p	N_d	A
1127,9	126,76	370,80	508,9	99,90	151,49
1175,1	126,76	388,28	747,4	99,90	239,82

Таблица 9.30. Збирни однос похабаног 75 % и новог резног елемента

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
Кретање стреле	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Однос (7.6) и (7.7) за похабане зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	198,4	207,2	285,9	286,7	359,4	379,5
Однос (7.6) и (7.7) за нове зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	159,9	174,5	224,1	204,1	223,1	195,7

Резиме III: Релација A/E за резултат даје зависност похабани/нови резни елементи у вредности 67,36 %. Према изразима (7.6) и (7.7) та зависност износи 68,8 %. У односу на претходне резултате, модел има знатно већи степен сагласности за оба методолошка приступа.

СЛУЧАЈ ПОХАБАНИХ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА – 100 %

Таблица 9.31. Резултати мерења потрошње енергије ($h = 7$ [m]; $v_b = 21$ [m/min])

Бр.	φ_L		φ_D		h Исти параметри [m]	Правца Л/Д	$Q_{ост}$		I_{max}		N_{p-max}		F_{max}		E_{max}	
	100 %	Нови	Нови	Нови			Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови	Пох.	Нови
	[°]						[m³/h]		[A]		[kW]		[kN]		[kWh/m³]	
1.	-33	-11	-33	-11	0,25	лево	2044	2044	110,3	77,82	744,1	524,9	253,2	178,6	0,320	0,220
2.	-11	13	-11	13			2157	2157	115,0	79,0	775,8	532,9	264,1	181,4	0,316	0,212
3.	13	37	13	37			1998	1998	120,1	73,08	810,2	493,0	275,7	167,8	0,357	0,211
4.	37	62	37	62			1432	1432	123,2	65,57	831,1	442,3	282,9	150,5	0,512	0,261
5.	62	37	62	37	0,25	десно	1432	1432	128,0	72,29	863,5	487,6	293,9	165,9	0,533	0,291
6.	37	13	37	13			1998	1998	133,6	73,08	901,3	493,0	306,7	167,7	0,400	0,211
7.	13	-11	13	-11			2157	2157	138,7	83,35	935,7	562,2	318,4	191,3	0,385	0,225
8.	-11	-33	-11	-33			2044	2044	139,5	90,06	941,1	607,5	320,3	206,7	0,409	0,258
9.	-33	-11	-33	-11	0,4	лево	3271	3271	145,0	127,98	978,2	863,3	332,9	293,9	0,266	0,233
10.	-11	13	-11	13			3451	3451	149,6	123,64	1009,2	834,0	343,4	283,9	0,260	0,213
11.	13	37	13	37			3197	3197	154,1	99,94	1039,5	674,2	353,8	229,5	0,290	0,184
12.	37	62	37	62			2291	2291	157,6	70,31	1063,2	474,3	361,8	161,4	0,414	0,176
13.	62	37	62	37	0,4	десно	2291	2291	161,0	72,68	1086,1	490,3	369,6	166,8	0,423	0,183
14.	37	13	37	13			3197	3197	164,9	87,69	1112,4	591,5	378,5	201,3	0,311	0,160
15.	13	-11	13	-11			3451	3451	170,0	99,15	1146,8	668,8	390,3	227,6	0,297	0,169
16.	-11	-33	-11	-33			3271	3271	174,3	130,35	1175,8	879,3	400,1	299,4	0,322	0,238
17.	-33	-11	-33	-11	0,5	лево	4089	4089	177,1	127,59	1194,7	860,7	406,5	293	0,262	0,186
18.	-11	13	-11	13			4314	4314	179,6	122,45	1211,6	826,0	412,3	281,2	0,252	0,169
19.	13	37	13	37			3997	3997	184,1	97,57	1241,9	658,2	422,6	224,0	0,279	0,144
20.	37	62	37	62			2864	2864	186,9	88,48	1260,8	596,9	429,0	203,1	0,395	0,181
21.	62	37	62	37	0,5	десно	2864	2864	191,3	75,45	1290,5	508,9	439,1	173,2	0,405	0,152
22.	37	13	37	13			3997	2864	194,4	110,8	1311,4	747,4	446,2	254,4	0,295	0,229

Таблица 9.32. Упоредне вредности амплитуда на фреквенцији 16,67 [Hz] (1000 [min⁻¹])

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Кретање стреле	16,67 Hz ±1% (1000 [min ⁻¹])					
Фреквенција, [Hz]	16,67 Hz ±1% (1000 [min ⁻¹])					
Случај похабаних резних елемената – похабаност 100 %						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	7,450	5,380	4,980	5,170	6,250	4,380
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	3,150	3,740	3,450	4,650	8,600	5,250
Случај нових резних елемената						
Хоризонтално, A_{HOR} [mm/s]	1,8	1,883	1,750	0,508	3,135	1,990
Вертикално, A_{VER} [mm/s]	1,883	1,173	1,561	1,236	1,577	1,815

Таблица 9.33. Упоредни приказ односа амплитуде A и потрошње електричне енергије E

Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Кретање стреле	16,67 Hz ±1% (1000 [min ⁻¹])					
Случај похабаних резних елемената – похабаност 100 %						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	8,089	6,660	6,125	6,954	10,631	7,175
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m³]	0,376	0,432	0,307	0,338	0,297	0,350
Однос A/E	21,48	15,43	19,92	20,56	35,82	20,52
Случај нових резних елемената						
Амплитуда, A [mm/s], израз (7.8)	2,605	2,218	2,345	1,336	3,509	2,693
Средња вредност потрошње енергије, E [kWh/m³]	0,226	0,246	0,202	0,187	0,170	0,191
Однос A/E	11,53	9,02	11,61	7,14	20,64	14,10

Таблица 9.34. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], лево

Похабани резни елементи – 100 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,25 L	N_p	N_d	A	0,25 L
744,1	71,31	249,17		524,9	71,30	168,02	
775,8	75,23	259,46		532,9	75,24	169,51	
810,2	69,70	274,25		493,0	69,69	156,78	
831,1	49,95	289,31		442,3	49,95	145,32	

Таблица 9.35. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,25$ [m], десно

Похабани резни елементи – 100 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,25 D	N_p	N_d	A	0,25 D
863,5	49,95	301,31		487,6	49,95	162,09	
901,3	69,70	307,98		493,0	69,69	156,78	
935,7	75,23	318,68		562,2	75,24	180,36	
941,1	71,31	322,13		607,5	71,30	198,60	

Таблица 9.36. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], лево

Похабани резни елементи – 100 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,4 L	N_p	N_d	A	0,4 L
978,2	114,09	320,02		863,3	114,10	277,48	
1009,2	120,37	329,19		834,0	120,38	264,31	
1039,5	111,53	343,71		674,2	111,51	208,40	
1063,2	79,92	364,16		474,3	79,92	146,07	

Таблица 9.37. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,4$ [m], десно

Похабани резни елементи – 100 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,4 D	N_p	N_d	A	0,4 D
1086,1	79,92	372,66		490,3	79,92	151,99	
1112,4	111,53	370,69		591,5	111,51	177,78	
1146,8	120,37	380,16		668,8	120,38	203,13	
1175,8	114,09	393,23		879,3	114,10	283,41	

Таблица 9.38. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], лево

Похабани резни елементи – 100 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,5 L	N_p	N_d	A	0,5 L
1194,7	142,62	389,66		860,7	142,62	265,95	
1211,6	150,46	393,01		826,0	150,47	250,20	
1241,9	139,41	408,34		658,2	139,42	192,14	
1260,8	99,90	429,97		596,9	99,90	184,08	

Таблица 9.39. Амплитуда брзине вибрација, изрази (7.6) и (7.7), $s = 0,5$ [m], десно

Похабани резни елементи – 100 %				Нови резни елементи			
N_p	N_d	A	0,5 D	N_p	N_d	A	0,5 D
1290,49	99,90	440,96		508,9	99,90	151,49	
1311,40	139,41	434,07		747,4	99,90	239,82	

Таблица 9.40. Збирни однос похабаног 100 % и новог резног елемента

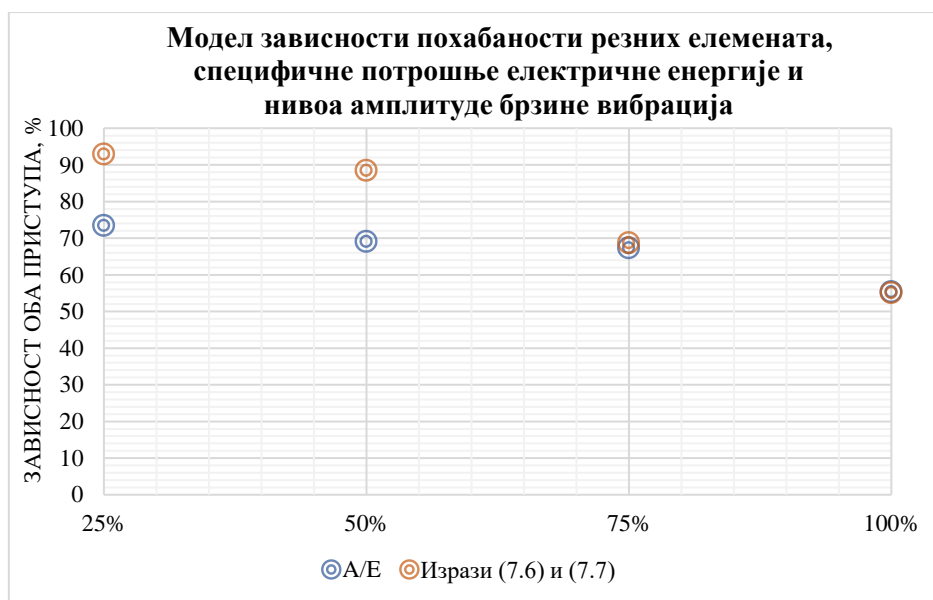
Итерације	Дебљина реза, [m]					
	0,25		0,4		0,5	
	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Однос (7.6) и (7.7) за похабане зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	268,0	312,5	339,3	379,2	405,2	437,5
Однос (7.6) и (7.7) за нове зубе, $A \cdot c = F$ [kN]	159,9	174,5	224,1	204,1	223,1	195,7

Резиме IV: Однос A/E за мерење са потпуно похабаним резним елементима је 55,37 %. Други приступ, на основу израза (7.6) и (7.7) даје зависност од 55,2 %. Применом оба модела, добијени су блиски резултати, што показује да са повећањем похабаности резних елемената, оба приступа генеришу сагласне резултате. Из свега наведеног, следи закључак да је могуће искористити или један или други приступ ради утврђивања утицаја похабаности резних елемената на рад погона за копање.

Закључни резиме:

Развијени модел представља нов методолошки приступ, креиран синтезом специфичне потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација. На тај начин се дефинише њихов утицај на рад погона за копање, узимајући у обзир похабаност резних елемената.

Приметно је да модел има боље резултате са порастом похабаности, односно, утицај стања резних елемената на рад погона за копање је више изражен. Већа похабаност резних елемената индукује већу потрошњу електричне енергије и више нивое амплитуде. На основу наведеног, недвосмислено се потврђује почетна хипотеза дисертације и доказ модела. На слици 9.1 дат је графички приказ развијеног модела зависности степена похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација.



Слика 9.1. Доказ креираног модела зависности похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација

Предности модела:

- иновативан приступ креиран синтезом похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација; и
- модел даје боље резултате за више степене похабаности резних елемената, чиме се може превентивно утицати на рад погона за копање, заменом резних елемената.

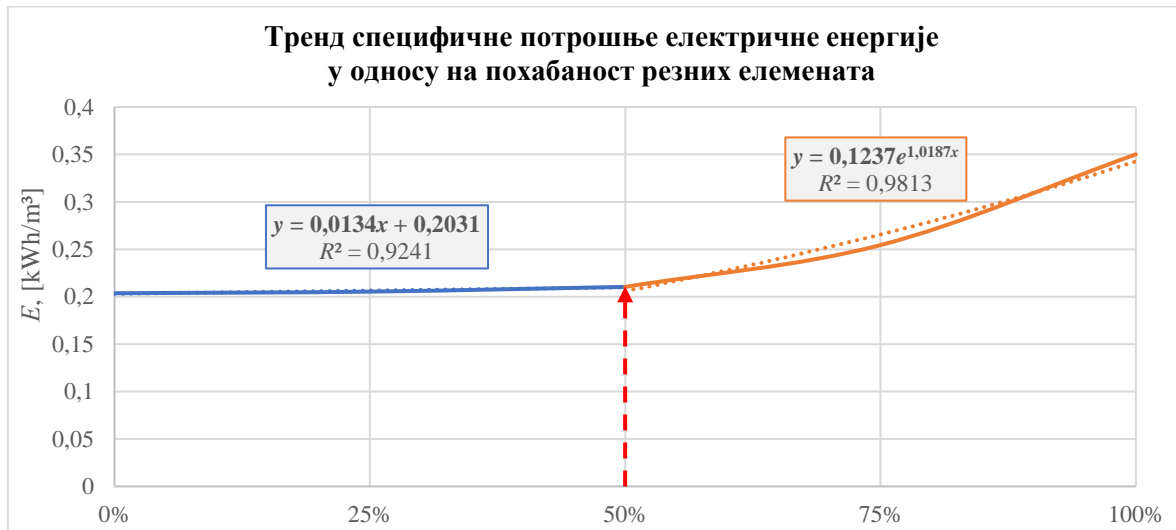
Недостаци модела:

- модел је осетљив на промену улазних података за нижи степен похабаности зуба.

Напомена: Утицај геомеханичких својстава материјала који се откопава узет је на бази запреминске тежине. Анализом литолошког стуба бушотине установљено је да у правцу напредовања багера нема изражених промена.

9.1 Компаративна анализа резултата мерења специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација погона за копање

Компаративна анализа резултата мерења изводи се са циљем утврђивања утицаја похабаности резних елемената на рад погона за копање. Дефинисан је тренд специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде брзине вибрација у односу на похабаност резних елемената. На основу утврђеног тренда, могуће је предвидети међурезултате, за стања резних елемената за која нису вршена мерења. На слици 9.2 приказан је тренд специфичне потрошње електричне енергије код мерења са новим резним елементима и за похабаност од 25 %, 50 %, 75 % и 100 % од стања новог зуба.



Слика 9.2. Тренд специфичне потрошње електричне енергије у односу на стање зуба

На основу дијаграма, долази се до закључка да у интервалу похабаности од 0–50 % скок специфичне потрошње електричне енергије има *линеаран тренд*, са коефицијентом корелације $R^2 = 0,9241$. Једначина линеарне регресије (очитано са дијаграма) има облик:

$$y = 0,134 \cdot x + 0,2031$$

Применом једначине линеарне регресије, могуће је предвидети међурезултате мерења, за било који степен похабаности у опсегу од 0–50 %. Резултати су у таблици 9.41.

Таблица 9.41. Потрошња електричне енергије – линеарни тренд

Похабаност зуба, %	Специфична потрошња електричне енергије, [kWh/m³]
0	измерено 0,2036; предикција 0,2031
5	0,2037
10	0,2044
15	0,2051
20	0,2052
25	измерено 0,2054; предикција 0,2065
30	0,2071
35	0,2079
40	0,2085
45	0,2091
50	измерено 0,2104; предикција 0,2098

Са порастом похабаности, специфична потрошња електричне енергије мења тренд из линеарног у експоненцијални. Промена тренда се дешава у тренутку похабаности резних елемената 50 %. Овај тренутак представља критичну тачку, где би нагли скок вредности јачине струје требао да укаже да у наредном периоду треба извршити замену резних елемената или дефинисати нову геометрију и положај на кашици. Ова претпоставка није занемарљива, имајући у виду милионску производњу коју остварују роторни багери. Правовременом заменом резних елемената могуће је створити простор за велике уштеде енергије, са становишта струје коју погон повлачи из мреже. Једначина експоненцијалне регресије има облик:

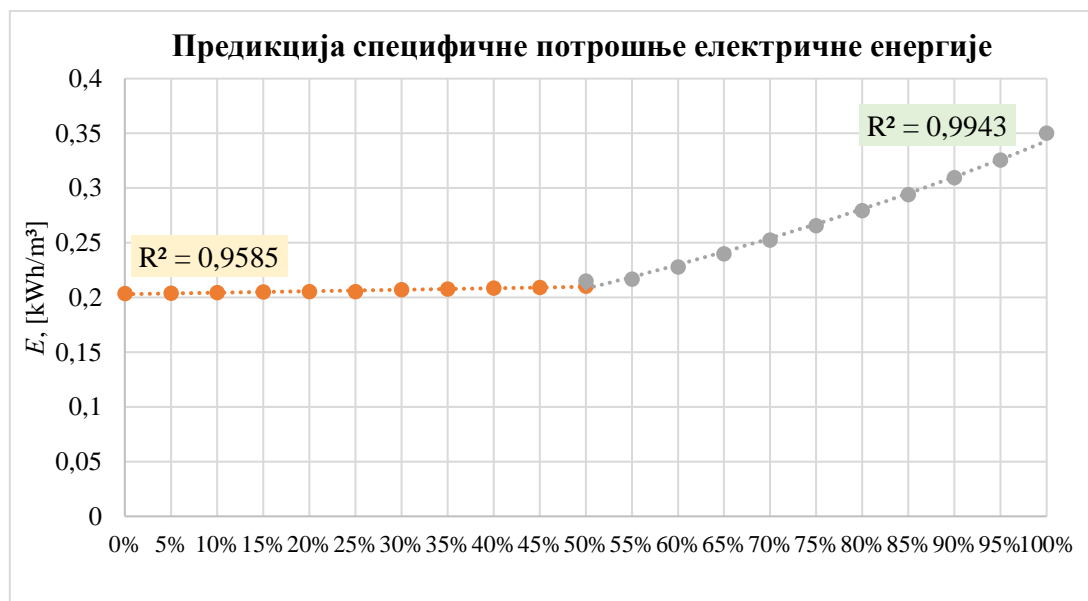
$$y = 0,1237 \cdot e^{1,0187 \cdot x}$$

Применом једначине експоненцијалне регресије, могуће је предвидети међурезултате. У табlici 9.42 дата је предикција, за степене похабаности из оспега 50–100 %.

Таблица 9.42. Потрошња електричне енергије – експоненцијални тренд

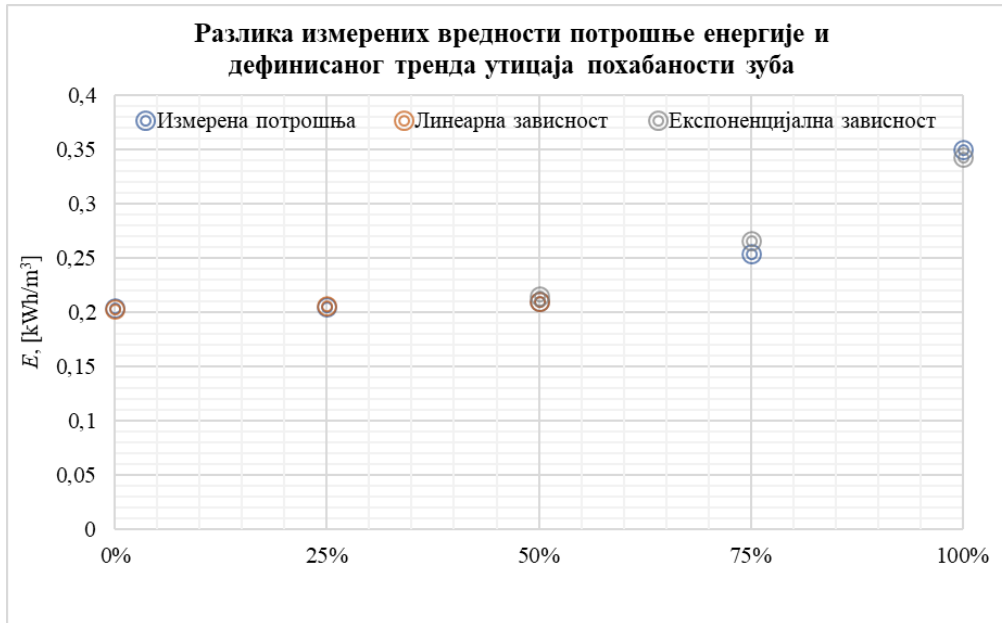
Похабаност зуба, %	Специфична потрошња електричне енергије, [kWh/m ³]
50	измерено 0,2104; предикција 0,2149
55	0,2166
60	0,2279
65	0,2399
70	0,2524
75	измерено 0,2544; предикција 0,2656
80	0,2794
85	0,2941
90	0,3094
95	0,3256
100	измерено 0,3500; предикција 0,3426

На слици 9.3 је графички приказана предикција специфичне потрошње електричне енергије (средње вредности максималне потрошње E_{max}).



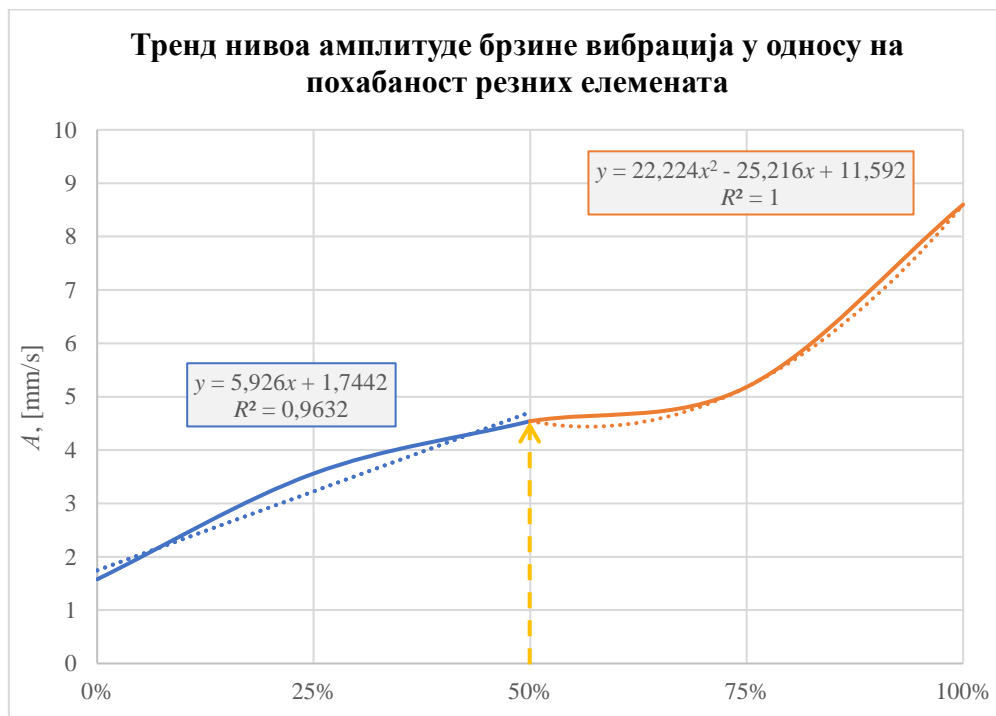
Слика 9.3. Предикција специфичне потрошње електричне енергије

На основу измерених вредности специфичне потрошње електричне енергије и предикције резултата применом једначина линеарне и експоненцијалне регресије, могуће је одредити за који степен похабаности резних елемената је највеће одступање измерене и предвиђене вредности потрошње. На слици 9.4 примећује се да је највеће одступање за случај похабаности резних елемената од 75 %.



Слика 9.4. Разлика измерених и предвиђених вредности потрошње електричне енергије

На слици 9.5 приказан је тренд нивоа амплитуде брзине вибрација у вертикалном правцу у односу на стање резних елемената. Измерене вибрације у вертикалном правцу имају највећи утицај на рад погона за копање. Ниво амплитуде у аксијалном правцу нема утицај, док је хоризонтални правац мање изражен у односу на вертикални.



Слика 9.5. Тренд нивоа амплитуде брзине вибрација у вертикалном правцу

На основу дијаграма следи закључак да је за похабаност резних елемената у опсегу од стања новог зуба до стања похабаности од 50 % приметан *линеаран тренд* раста нивоа амплитуде. Једначина линеарне регресије има облик:

$$y = 5,296 \cdot x + 1,7442$$

Применом наведене једначине, могуће је извршити предикцију међурезултата. Добијени резултати представљени су у таблици 9.43.

Таблица 9.43. Амплитуда вибрација на основу дефинисаног линеарног тренда

Похабаност зуба, %	Амплитуда брзине вибрација, [mm/s]
0	измерено 1,577; предикција 1,74
5	2,04
10	2,34
15	2,63
20	2,93
25	измерено 3,56; предикција 3,23
30	3,52
35	3,82
40	4,11
45	4,41
50	измерено 4,54; предикција 4,71

У опсегу похабаности од 50–100 % тренд амплитуде вибрација се мења и прелази из линеарног облика у облик *полиномне регресије*, са једначином регресије полинома:

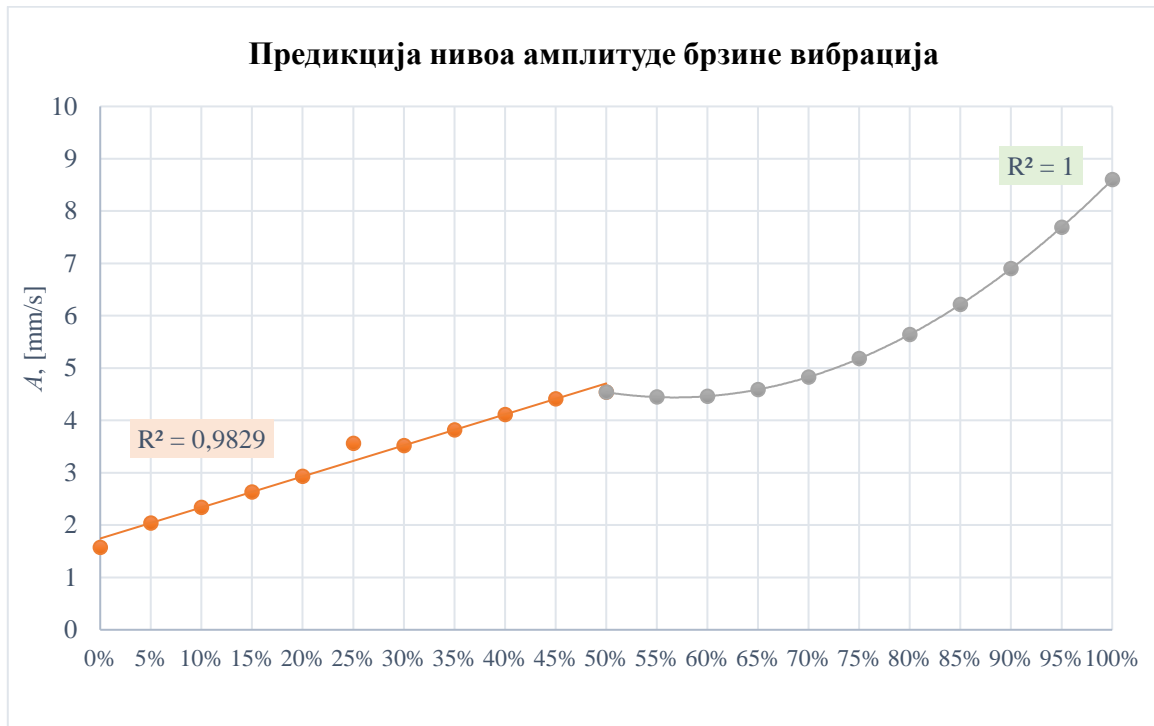
$$y = 22,224 \cdot x^2 + 25,21 \cdot x + 11,592$$

Предикција се изводи применом једначине полиномне регресије. Резултати су приказани у таблици 9.44.

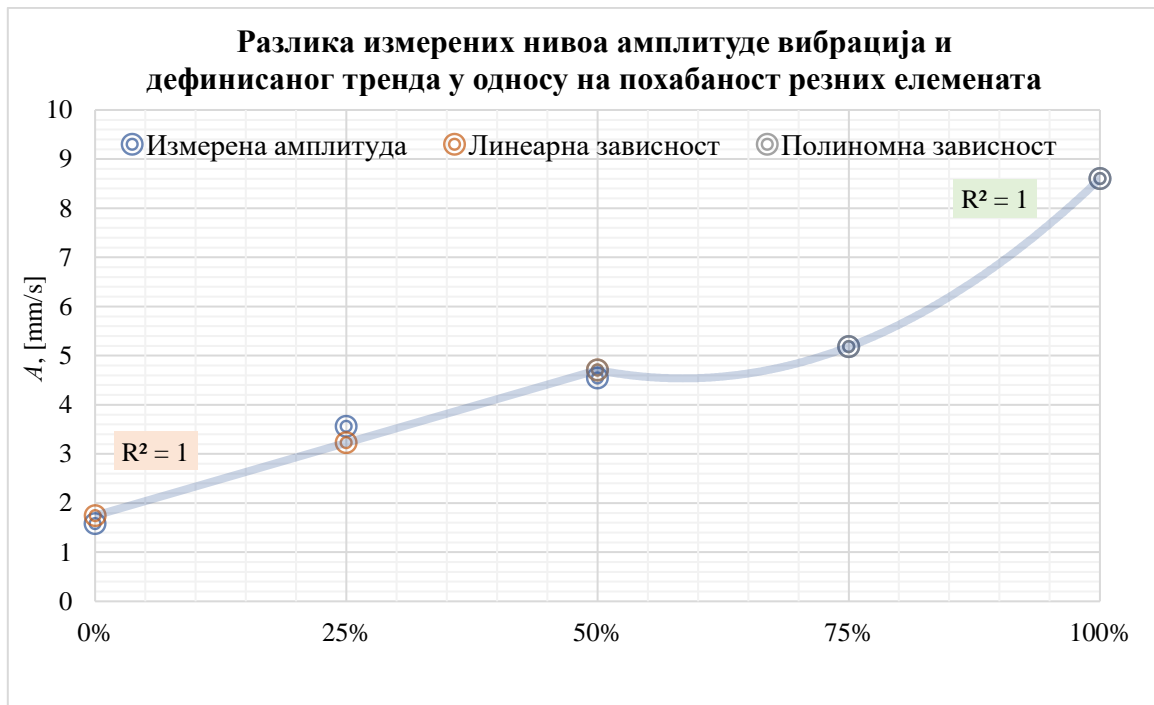
Таблица 9.44. Амплитуда вибрација на основу дефинисане полиномне регресије

Похабаност зуба, %	Амплитуда брзине вибрација, [mm/s]
50	измерено 4,54; предикција 4,54
55	4,45
60	4,46
65	4,59
70	4,83
75	измерено 5,181; предикција 5,181
80	5,64
85	6,22
90	6,90
95	7,69
100	измерено 8,6; предикција 8,6

На сликама 9.6 и 9.7 графички је приказана предикција нивоа амплитуде вибрација и одступање измерених и предвиђених вредности у односу на похабаност резних елемената. Највеће одступање је за случај похабаности 25 %.



Слика 9.6. Предикција нивоа амплитуде брзине вибрација



Слика 9.7. Разлика измерених и предвиђених нивоа амплитуде брзине вибрација

9.2 Препорука за коришћење DIN ISO 10 816-3 стандарда за мерење вибрација

Утицај похабаности резних елемената на рад погона за копање биће доказан и са аспекта примене DIN ISO 10 816–3 [2] стандарда за мерење вибрација. За анализу су меродавни измерени нивои амплитуде у *вертикалном правцу* (више амплитуде у односу на аксијални и хоризонтални правац). Код мерења са новим резним елементима, измерена вредност износи: $A_{VER} = 1,577$ [mm/s]. Ствара се простор за дефинисање разлике измерених вредности амплитуде вибрација за више промена степена похабаности у односу на почетно стање. Овакав начин зависности рада погона и похабаности резних елемената може довести до другачијег тумачења стандарда DIN ISO 10 816–3 [2].

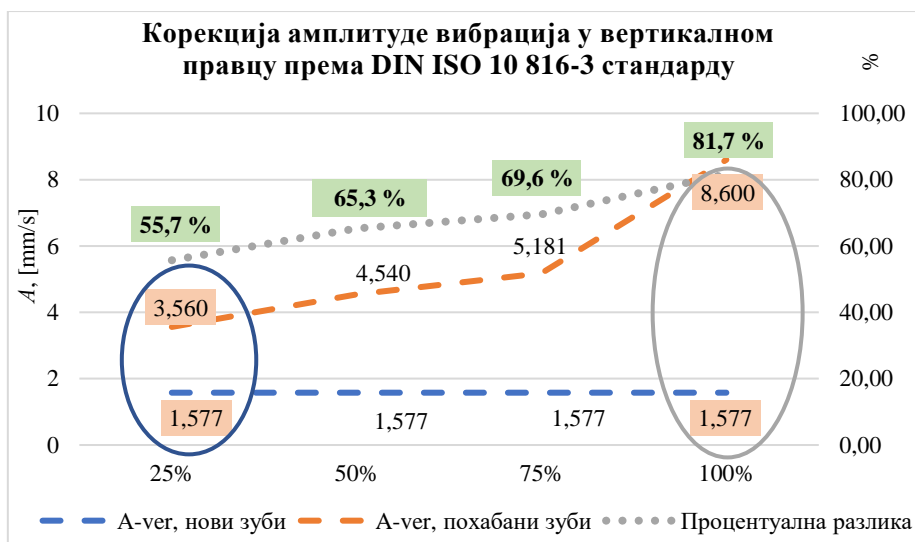
Мерењем вибрација се углавном дефинише стање електромотора и елемената редуктора. Указује се на значај поремећајне силе (силе побуде) од процеса копања, односно од похабаности зуба на стање и понашање погона за копање. Измерена вредност амплитуде употребљава се за оцењивање стања машине [86]. Стандард је применљив за погонске групе и дели машине у различите категорије на основу којих се оне даље класификују. Подела се добија из односа еластичности машине и постоља на којој се налази [2]. За оцењивање се дефинишу 4 зоне [2]:

- Зона А: вибрације машине која је нова, налазе се углавном у овој зони;
- Зона В: вибрације које су у овој зони обично се сматрају прихватљивим, да без ограничења трају у континуитету;
- Зона С: вибрације које су у овој зони обично се сматрају неприхватљивим да трају у континуалном раду (дозвољено је да машина ради ограничено време); и
- Зона D: вибрације које се налазе у овој зони сматрају се опасним у мери да могу да проузрокују штете на машини.

Ниво амплитуде вибрација дефинише *граничне вредности аларма* када треба спровести одређене активности на машини. Вредности амплитуде погона за копање багера могу се кориговати у зависности од похабаности резних елемената [86].

Знајући да се на багеру зуби мењају од 4 до 6 пута годишње, није очекивано да се тако кратким интервалом замене, трајно мења и стање елемената електромотора и редуктора. На основу свега, могуће је дати препоруку за коришћење стандарда за већ дефинисане услове (мерења за различите степене похабаности). Према добијеним резултатима може се утврдити како похабаност резних елемената утиче на рад погона за копање.

На слици 9.8 дата је корекција амплитуде брзине вибрација за различита стања резних елемената (похабаност 25 %, 50 %, 75 % и 100 %, у односу на стање новог зуба). Са порастом похабаности, процентуално смањење амплитуде је веће. Виши степен похабаности индукује веће амплитуде вибрација и неповољан утицај на стање погона. На тај начин је у потпуности доказан утицај похабаности резних елемената на рад погона за копање. Заменом резних елемената у тренутку мање похабаности, може се превентивно деловати на ефикасност рада погона, са аспекта амплитуде брзине вибрација. Препорука истраживачима, надзорно–техничком особљу и оператерима дијагностике је да се приликом оваквих мерења на погону за копање не сме занемарити стање резних елемената. У односу на степен похабаности, може се оквирно предвидети у којим ће се границама наћи амплитуда.



Слика 9.8. Корекција амплитуде вибрација за различита стања резних елемената

Кориговањем вредности брзине вибрација, стање погона се може померити из виших група у ниже, са аспекта дозвољених амплитуда, чиме се позитивно утиче на опште стање машине. Висина вратила погона за копање је $h \geq 315$ [mm], постоље је еластично [2].

Погонска група се за случај мерења са новим резним елементима налази у **групи А**, према DIN ISO 10 816–3 [2] стандарду, са дозвољеним амплитудама брзине у опсегу од 1,40–2,30 [mm/s]. Измерена вредност у вертикалном правцу је: $A_{VER} = 1,577$ [mm/s]. Могуће је констатовати да не постоји опасност за рад погона у дужем временском периоду.

За мерење са похабаним резним елементима 25 % у односу на стање новог зуба, погонска група се налази у **групи В**, за коју су дозвољене вредности амплитуде брзине у опсегу 3,5–4,5 [mm/s], односно 4,5–7,10 [mm/s], када се погон приближава С групи. Измерена вредност амплитуде износи 3,560 [mm/s] и налази се у нижем опсегу дозвољених вредности у групи В. Према DIN ISO 10 816–3 [2], за измерену вредност амплитуде, погон може несметано да ради у континуитету. Вибрације се сматрају прихватљивим. Похабаност резних елемената од 25 % има утицај на промену групе у којој се машина налази, али је генерални утицај на рад погона за копање незнатан.

Дефиниција	ВЕЛИКЕ МАШИНЕ $P = 300 \text{ kW} \dots 500 \text{ MW}$ Електро машине са висином вратила $h \geq 315 \text{ mm}$	
	Постоље	Круто / Еластично
Брзина вибрација v [mm/s] 10-1000 Hz, $n > 800 \text{ min}^{-1}$ 10-1000 Hz, $n > 120 \text{ min}^{-1}$	11,00 ... ∞	D / D
	7,10 ... 11,00	D / C
	4,50 ... 7,10	C / B
	3,50 ... 4,50	B / B
	2,80 ... 3,50	B / A
	2,30 ... 2,80	B / A
	1,40 ... 2,30	A / A

3,560 mm/s – измерено

↓ Смањење 55,7 %

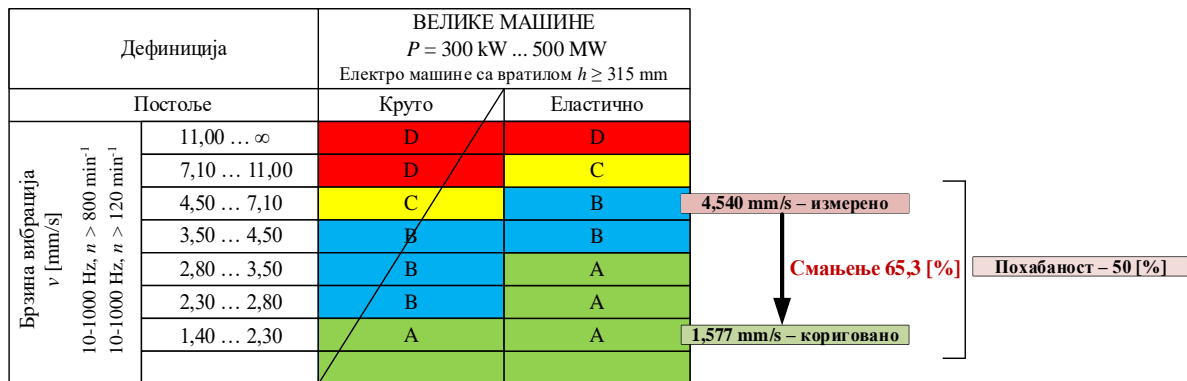
1,577 mm/s – кориговано

Похабаност – 25 %

Слика 9.9. Корекција амплитуде за похабаност 25 % у односу на нове зубе

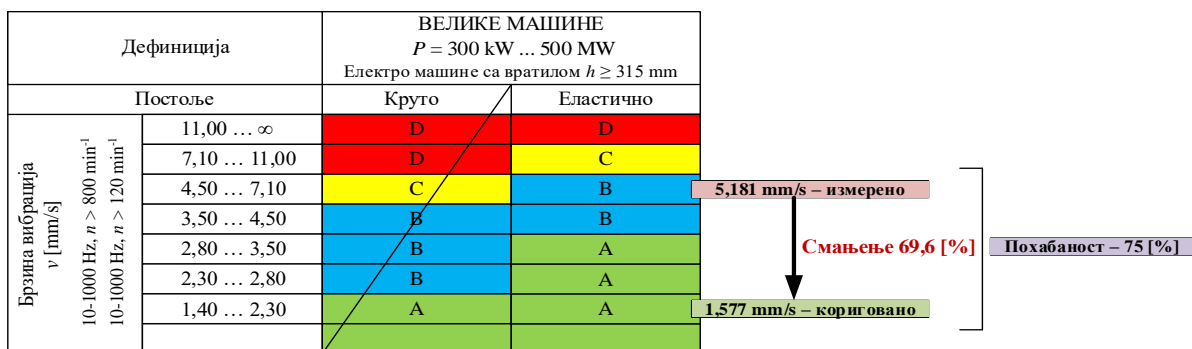
У случају мерења са похабаним резним елементима 50 %, погон се поново налази у **групи В**, с том разликом што је измерена вредност амплитуде у односу на претходни случај виша и износи 4,540 [mm/s]. На основу измерене вредности, погон се сврстава у виши опсег дозвољених амплитуда из ове групе.

Закључак је да машина за случај похабаности 50 %, теоријски може несметано да ради у дужем интервалу. Међутим, поузданост је знатно мања у односу на мерење са резним елементима похабаност 25 %. У односу на дефинисани тренд амплитуде брзине вибрација, очекивано је да се са даљим скоком похабаности, мења и група у коју ће се погон према општем стању класификовати.



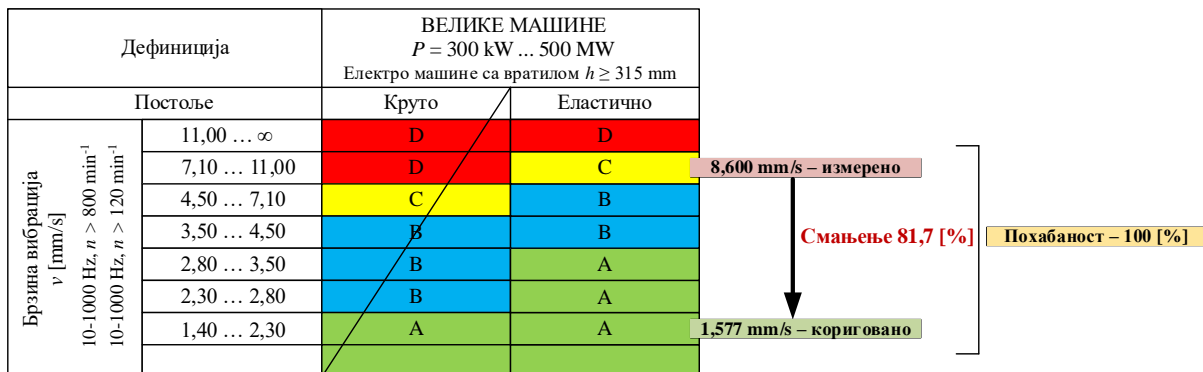
Слика 9.10. Корекција амплитуде за похабаност 50 % у односу на нове зубе

За похабаност резних елемената 75 %, измерена вредност амплитуде брзине вибрација износи 5,181 [mm/s]. Погон се још једном класификује у **групу В**. Међутим, приметан је знатан скок амплитуде и приближавање С групе.



Слика 9.11. Корекција амплитуде за похабаност 75 % у односу на нове зубе

За случај похабаности 100 % измерена вредност амплитуде брзине вибрација износи 8,600 [mm/s]. Погон се класификује у **групу С**. Тумачењем стандарда, закључак је да се вибрације не могу сматрати прихватљивим и да машина не може да обавља своју функцију у дужем временском периоду. Наставак рада са амплитудом брзине из С групе, повећава ризик да стање погона пређе из С у D групу дозвољених амплитуда, уколико се не изврши замена резних елемената.



Слика 9.12. Корекција амплитуде за похабаност 100 % у односу на нове зубе

10. ANFIS МОДЕЛ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ ПОТРОШЊЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ПРОЦЕСУ КОПАЊА

10.1 Дефинисање улазних и излазних скупова података

Улазни подаци за ANFIS [7] модел узимају у обзир:

- остварени капацитет багера Q_{ost} у тренутку мерења;
- очитане максималне пикове струје I_{max} (мерења за стања резних елемената од нових до потпуно похабаних); за доњи погон копања, горњи и збирно; и
- максималну снагу за процес копања N_{max} .

Излаз из модела представљен је преко:

- максималне специфичне потрошње електричне енергије E_{max} .

Скупови улазних и излазних података дати су у прилогу 3.

10.2 Развој ANFIS модела

ANFIS [7] представља хибридни модел који се заснива на примени техника неуронских мрежа и фази логике за моделирање и предикцију [96]. Омогућава да се на основу познатих улазно/излазних скупова података генерише фази систем закључивања код кога се конфигурација параметара функција припадности изводи применом алгорита повратног распрострања грешке или комбиновано, методом најмањих квадрата – тзв. хибридни метод [105]. Сви модели формирану су у програмском пакету MATLAB [7] који је погодан за развој алгорита, моделирање, симулације, обраду и анализу података, визуелизацију модела, итд [105].

За креирање хибридног модела примењен је интерфејс *Anfis Editor* у оквиру *Fuzzy Logic Toolbox* модула који користи методолошки приступ неуронских мрежа за генерисање, тренирање и тестирање Sugeno фази система закључивања [105].

У процесу обуке ANFISA подаци се деле на две групе: подаци за тренирање и подаци за тестирање. Током обуке, ANFIS [7] се прилагођава скупу података за тренирање тако да грешку предвиђања своди на минимум. Након што је модел обучен, приступа се његовом тестирању на издвојеном скупу података. Поменути скуп не сме да буде исти као скуп за тренирање, да не би дошло до појаве *overfittinga*, односно прекомерног прилагођавања модела само тренинг скупу. Идеално је да тест подаци буду насумично одабрани из укупне расподеле, али да нису коришћени за обуку. Скуп података за тестирање не би требало да садржи екстремне вредности или податке који се у великој мери разликују од тренинг скупа. Најчешћа је подела 70/30, 80/20, где 70 % или 80 % података представља податке за обуку, док је остатак за тестирање модела.

За тренирање неуронске мреже изабрани су подаци добијени мерењем, који се односе на доњи погон копања и збирно за цео погон. За тестирање модела узети су подаци за горњи погон копања. Подаци за тренинг и тест налазе се у прилогу 3. Због специфичности базе података, из укупне расподеле 50 % података представља тест скуп.

За учење се користи алгорита повратног распрострања грешке, док се излаз модела боље описује линеарним у односу на константне функције, број епоха (итерација) износи 100. Већи број епоха утиче на време потребно за учење модела.

Фазификација улазних променљивих може се извршити применом различитих функција припадности. За развој модела коришћене су *Bellova*, троугласта и трапезна функција, како би се омогућила компаративна анализа резултата предвиђања и утврдио оптималан модел. Укупан број функција припадности зависи од сложености проблема.

Код једноставнијих проблема у примени су једна до три функција припадности по атрибуту, код средње сложених четири до шест, односно седам и више код сложених. Њихов број се може мењати током процеса тренирања, да би се извршила оптимизација модела. Превелики број функција припадности доводи до преоптерећења модела и смањења његове генерализацијске способности. За развој модела, за сваку од функција припадности, усвојено је *три*, *шест* и *осам* функција по атрибуту. У наставку је дат аналитички и графички облик (слика 10.1.) примењених функција припадности.

Bellova функција припадности [109], [107]:

$$\mu(x) = bell(x; a_i, b_i, c_i) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (10.1)$$

Троугласта функција припадности [99]:

$$\mu(x) = trimf(x; a_i, b_i, c_i) = \begin{cases} 0, x \leq a_i \\ (x - a_i) / (b_i - a_i), a_i \leq x \leq b_i \\ (c_i - x) / (c_i - b_i), b_i \leq x \leq c_i \\ 0, c_i \leq x \end{cases} \quad (10.2)$$

Трапезна функција припадности [99]:

$$\mu(x) = trapmf(x; a_i, b_i, c_i, d_i) = \begin{cases} 0, x \leq a_i \\ (x - a_i) / (b_i - a_i), a_i \leq x \leq b_i \\ 1, b_i \leq c_i \\ (d_i - x) / (d_i - c_i), c_i \leq x \leq d_i \\ 0, d_i \leq x \end{cases} \quad (10.3)$$

где су:

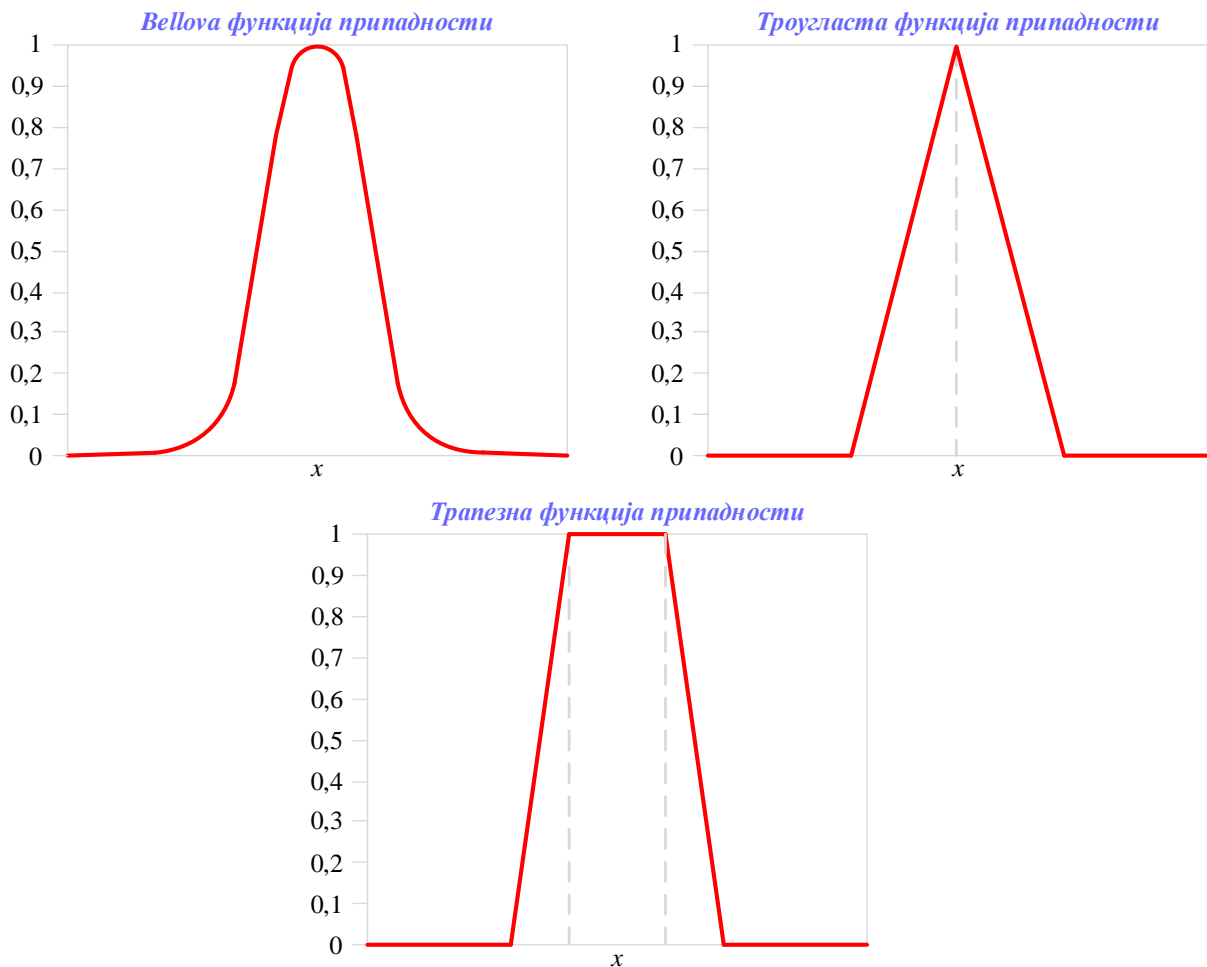
$\{a_i, b_i, c_i, d_i\}$ – постављени параметри; и

x – улазна величина.

ANFIS [7] модел се састоји од пет слојева (*eng. Layer*). Први слој чине лингвистичке категорије улазних променљивих, које се идентификују фази скуповима [110]. Сваки чвор првог слоја је адаптиван и описује се функцијом припадности [110]. Фази правила су изражена у облику „АКО–услов ОНДА–последича“ [110].

Чворови у другом слоју рачунају минималну вредност сваке улазне вредности адаптивне неуронске мреже [110]. Излазне вредности чворова другог слоја представљају значајности правила [100]:

$$O_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y)$$



Слика 10.1. Графички приказ коришћених функција припадности [111]

У трећем слоју, сваки i -ти чвор рачуна укупну тежину i -тог правила из базе правила, према једначини [110], [100]:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

У четвртном слоју рачуна се допринос креираних правила излазу система [100]. Сваки чвор слоја рачуна пресек одговарајућег фази скупа са максималном вредношћу улазних значајности правила [110], [100].

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i \cdot (p_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i)$$

Пети слој има само један чвор који је фиксан. У њему се рачуна излазни резултат адаптивне неуронске мреже [110]. То је фази скуп са одређеним степенима припадности могућих вредности критеријумске функције разматране алтернативе [110]. Поступак дефазификације изводи се у чвору петог слоја. Излазна вредност је реалан број [110], [100].

$$O_{5,i} = \sum_{i=1}^n \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

У наставку су анализирани креирани ANFIS [7] модели. У основи, постоје три модела. У првом је коришћена *Bellova* функција за фазификацију улазних променљивих. Фазификација се код другог модела изводи троугластом, односно трапезном функцијом припадности код трећег.

Модели се даље диференцирају на подмоделе. Модел заснован на примени *Bellove* функције чине три одвојена модела, који се разликују по броју функција припадности. Сходно теоријској поставци ANFISA, зависно од сложености проблема, усвојено је 3, 6 и 8 функција. На тај начин је интегрално анализиран проблем према скали једноставан, средње сложен и сложен. По истој аналогiji, остала два основна модела мултипликују се на по три подмодела са истим бројем функција, како би се омогућила компаративна анализа излазних резултата.

Број чворова мреже, линеарних, нелинеарних и укупан број параметара читава се у процесу обуке ANFIS [7] модела. База фази правила (IF–THEN) зависи од броја функција припадности сваког од подмодела. Креира се у оквиру FIS properties [105] картице. У таблицама 10.1, 10.2 и 10.3 дате су основне карактеристике ANFIS [7] модела.

Таблица 10.1. ANFIS модел 1 – *Bellova* функција припадности

ANFIS модел	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
Број улазних скупова података		3	
Тип функције припадности	<i>Bell</i>	<i>Bell</i>	<i>Bell</i>
Број функција припадности	3 • 3 • 3	6 • 6 • 6	8 • 8 • 8
Број чворова	78	474	1078
Број линеарних параметара	27	216	512
Број нелинеарних параметара	27	72	96
Укупан број параметара	54	288	608
Број епоха (итерација)	100	100	100
Број фази правила	27	216	512

Таблица 10.2. ANFIS модел 2 – Троугласта функција припадности

ANFIS модел	ANFIS 4	ANFIS 5	ANFIS 6
Број улазних скупова података		3	
Тип функције припадности	<i>Троугласта</i>	<i>Троугласта</i>	<i>Троугласта</i>
Број функција припадности	3 • 3 • 3	6 • 6 • 6	8 • 8 • 8
Број чворова	78	474	1078
Број линеарних параметара	27	216	512
Број нелинеарних параметара	36	72	96
Укупан број параметара	63	288	608
Број епоха (итерација)	100	100	100
Број фази правила	27	216	512

Таблица 10.3. ANFIS модел 3 – Трапезна функција припадности

ANFIS модел	ANFIS 7	ANFIS 8	ANFIS 9
Број улазних скупова података		3	
Тип функције припадности	<i>Трапезна</i>	<i>Трапезна</i>	<i>Трапезна</i>
Број функција припадности	3 • 3 • 3	6 • 6 • 6	8 • 8 • 8
Број чворова	78	474	1078
Број линеарних параметара	27	216	512
Број нелинеарних параметара	36	72	96
Укупан број параметара	63	288	608
Број епоха (итерација)	100	100	100
Број фази правила	27	216	512

На слици 10.2 приказан је дијаграм тока ANFIS [7] модела у оквиру програмског пакета MATLAB [7]. Тренинг и тест подаци се учитавају у радни простор. Опцијом „anfisedit“ се покреће прозор у коме се учитавају тренинг и тест подаци. Да би се применио ANFIS [7] потребно је креирати фази систем закључивања. То се постиже одабиром функције припадности и њеног броја по променљивој и типа излазне функције. Након подешавања процеса тренинга (број епоха, толеранција грешке и алгорита учења) и завршеног тренинга, преузима се грешка тренирања. Уколико вредност грешке није задовољавајућа, тренинг се понавља, све док се грешка не сведе на минимум. Даље се подешавају правила која дефинишу везу улазних са излазном променљивом и пореди излаз ANFIS [7] модела са актуелним резултатима. Пожељно је да се креирани модел тестира на издвојеном тест скупу, који није коришћен за учење ANFISA, како би се провериле његове перформансе на новим подацима.



Слика 10.2. Дијаграм тока ANFIS модела [112], [3]

10.3 Индекс тачности

Индекс тачности је представљен следећим индикаторима [107]:

- средња квадратна грешка $RMSE$ [9] (eng. *Root Means Square Error*);
- средња апсолутна грешка MAE [9] (eng. *Mean Absolute Error*);
- Пирсонов (eng. *Pearson' Linear Correlation Coefficient*) линеарни коефицијент корелације (R); и
- средња апсолутна процентуална грешка $MAPE$ (eng. *Mean Absolute Percentage Error*) [106].

Средња квадратна грешка $RMSE$ [9], [102], [107]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}$$

Средња апсолутна грешка MAE [9], [107]:

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

Пирсонов коефицијент R [107]:

$$R = \frac{N \cdot \left(\sum_{i=1}^N O_i \cdot P_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)}{\sqrt{\left(N \cdot \sum_{i=1}^N O_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right) \cdot \left(N \cdot \sum_{i=1}^N P_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)^2 \right)}}$$

Средња апсолутна процентуална грешка $MAPE$ [106]:

$$MAPE = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{P_i} \right|$$

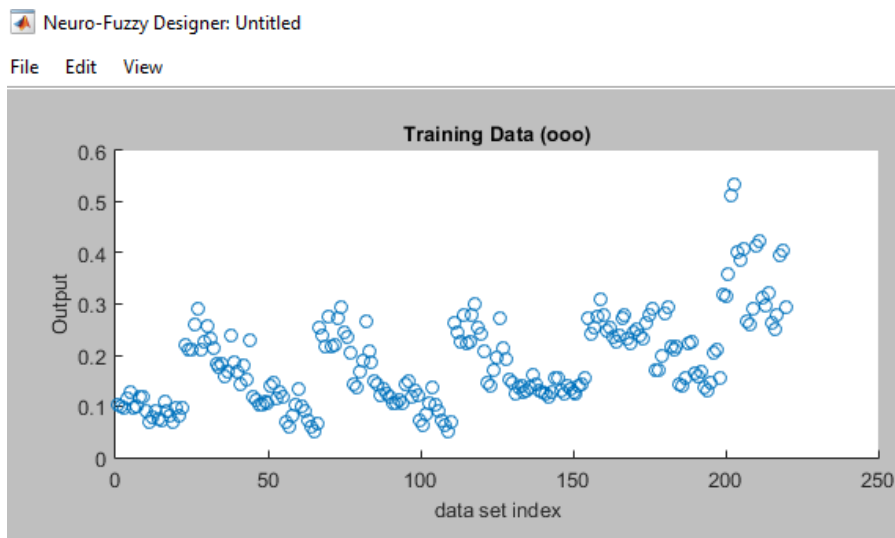
Наведени индикатори указују на тачност креираног ANFIS [7] модела. Императив је да разлика измерене и предвиђене вредности буде што мања. Прве две грешке $RMSE$ и MAE [9] зависе од скале у којој су подаци изражени [113]. За примену индикатора $MAPE$ не постоји горње ограничење података. Што је вредност ових показатеља ближа нули, модел је квалитетнији [113]. Вредност Пирсоновог коефицијента корелације је скалирана од нула до један. Суштина је да буде што ближа јединици.

10.4 Резултати примене ANFIS модела

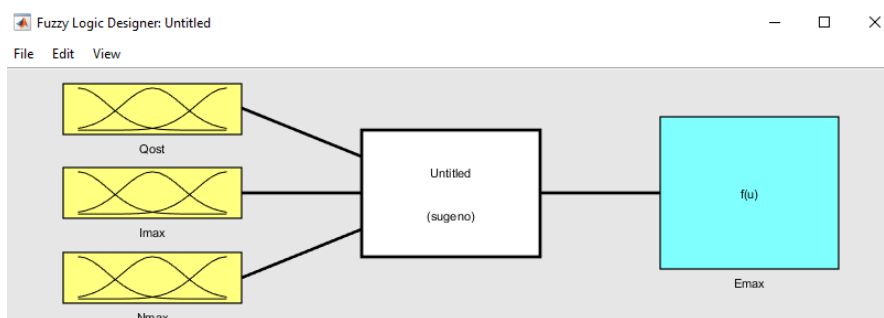
Резултати примене ANFIS [7] модела биће приказани интегрално. Укупан број модела износи девет. Модели су креирани на бази три основна модела (фазификација *Bellovom*, троугластом и трапезном функцијом). Битни сегметни модела ANF1–ANF3 су следећи:

- фазификација улазних променљивих је извршена *Bellovom* функцијом;
- број функција припадности по атрибуту износи три, шест и осам;
- број епоха (итерација) је 100; и
- за учење модела је коришћен алгоритам повратног распрострањања грешке.

Модели ANF4–ANF6 за фазификацију улазних променљивих користе троугласту функцију припадности, ANF7–ANF9 трапезну. У наставку су приказани основни кораци у развоју хибридних модела. На слици 10.3 представљени су подаци за обуку. Тренинг подаци су исти за све моделе. На слици 10.4 приказан је фази систем закључивања са три улазне и једном излазном променљивом. Разлика између модела ANF1–ANF3, ANF4–ANF6 и ANF7–ANF9 је у типу функције припадности.

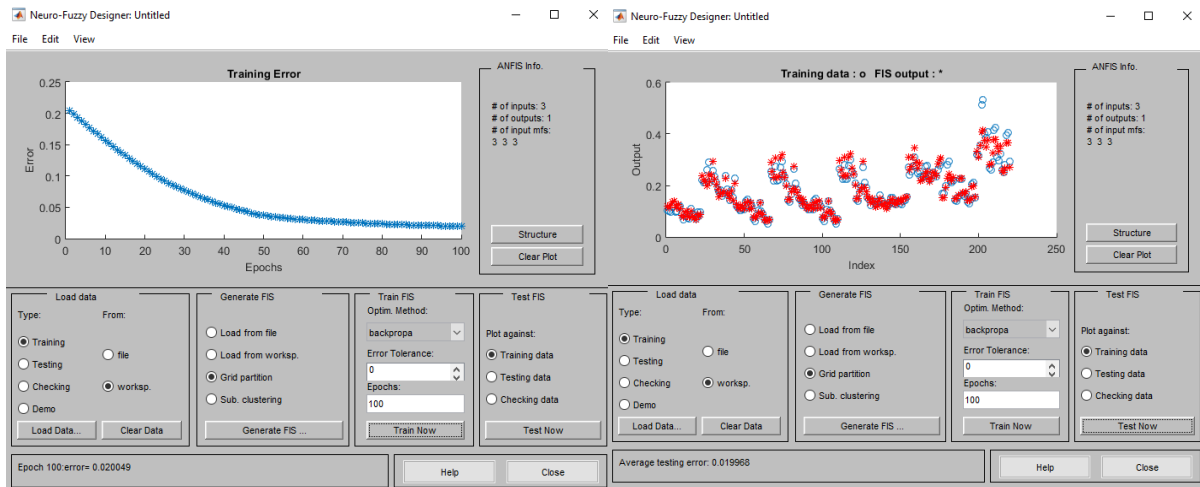


Слика 10.3. Подаци за тренинг – Q_{ost} , I_{max} , N_{max} , E_{max}

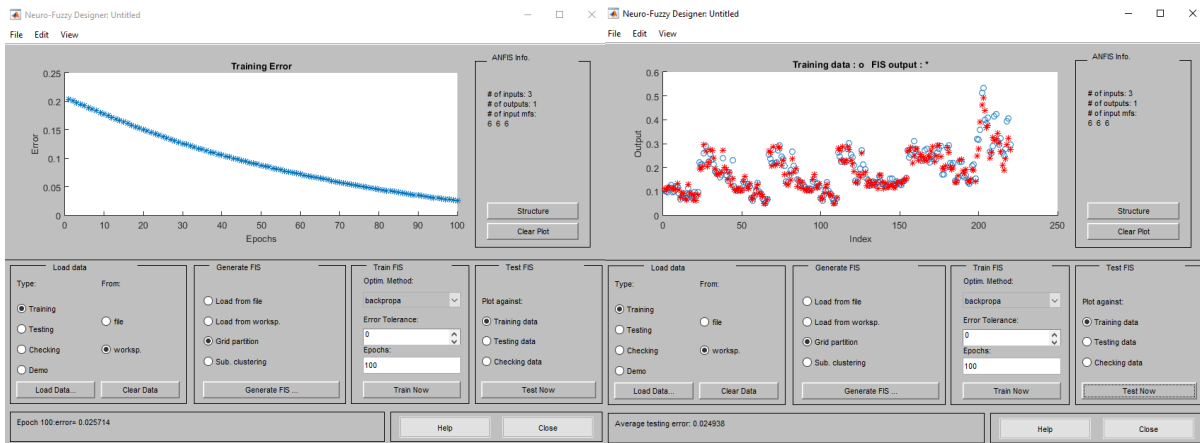


Слика 10.4. Фази систем закључивања

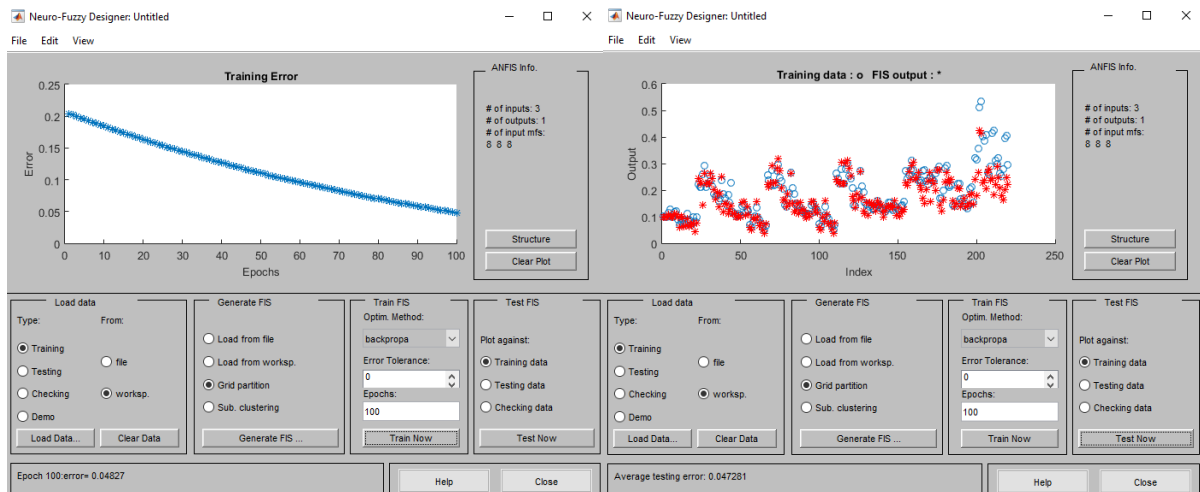
На сликама 10.5–10.13 дат је графички приказ грешке процеса тренирања са протоком епоха учења и средње грешке за моделе ANF1–ANF9. У случају да је грешка процеса тренирања велика, модел је недовољно научен. Када је грешка мала, али се на тест скупу драстично повећа, указује се на проблем претренирања модела. Проблем се решава променом броја епоха учења, фази правила и броја функција припадности.



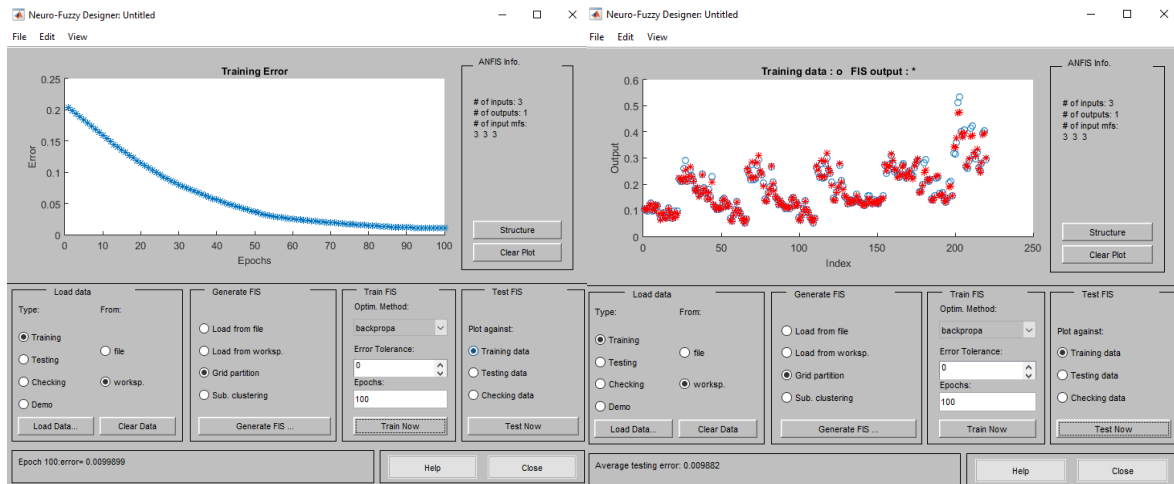
Слика 10.5. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF1 модела



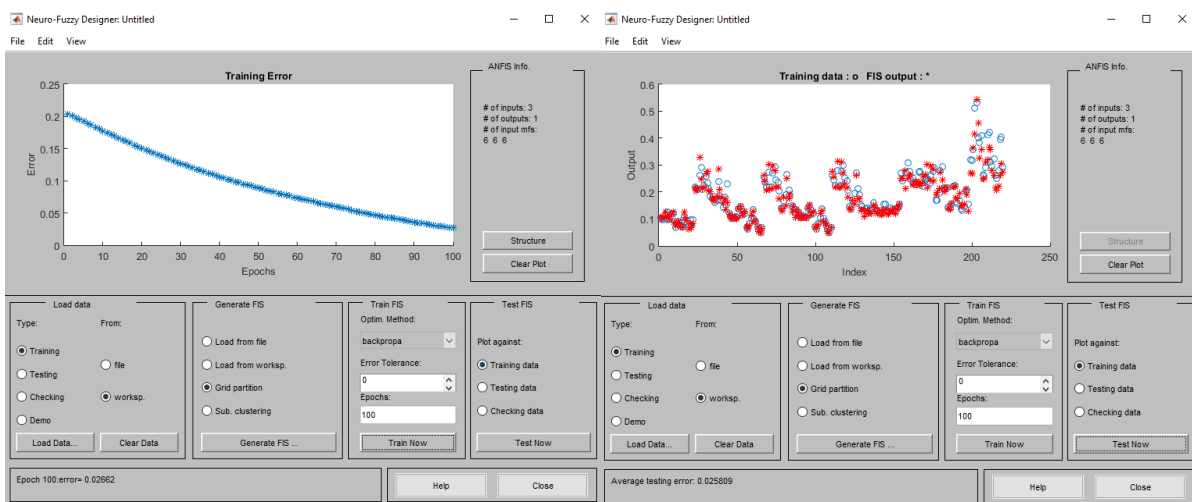
Слика 10.6. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF2 модела



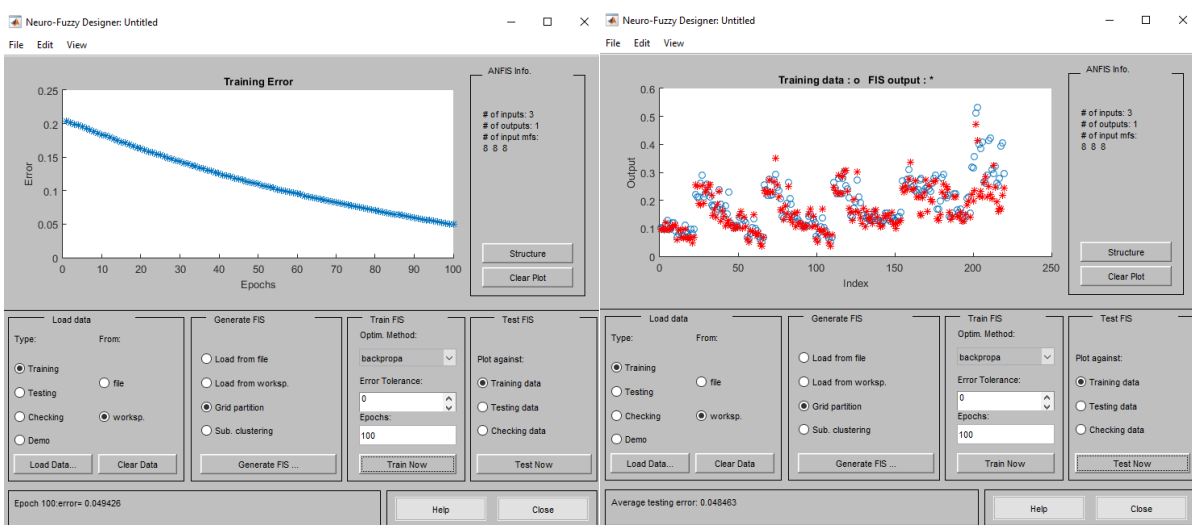
Слика 10.7. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF3 модела



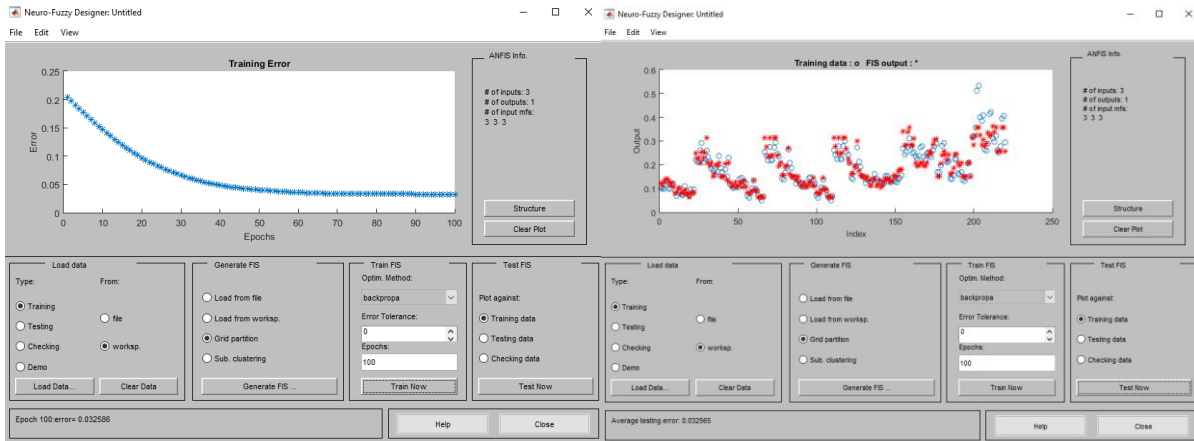
Слика 10.8. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF4 модела



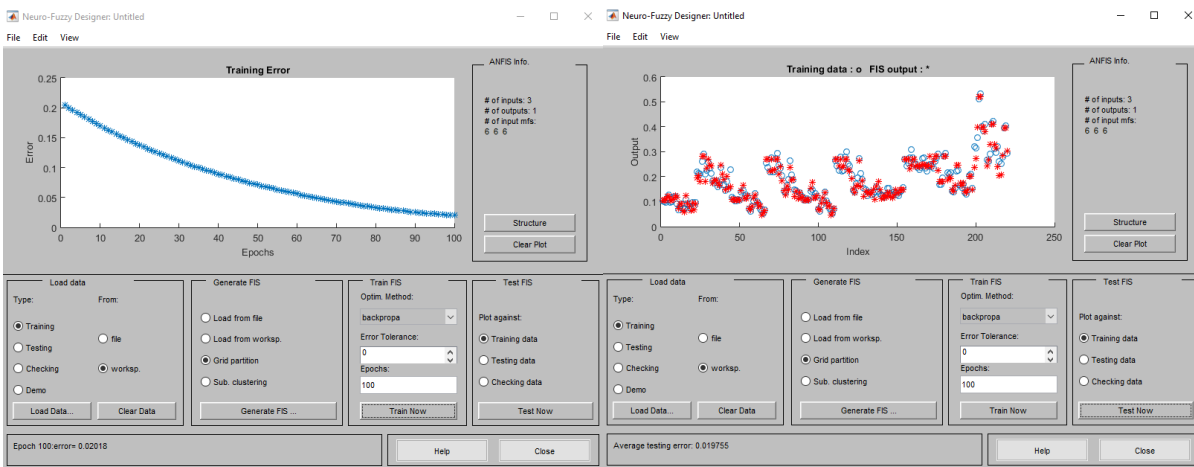
Слика 10.9. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF5 модела



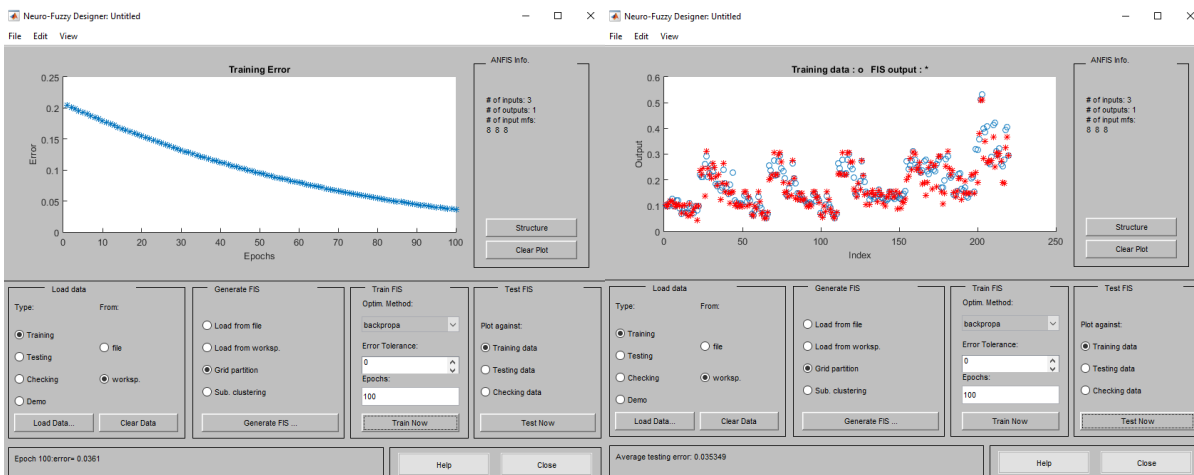
Слика 10.10. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF6 модела



Слика 10.11. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF7 модела



Слика 10.12. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF8 модела



Слика 10.13. Грешка процеса тренирања и средња грешка ANF9 модела

У таблицама 10.4 и 10.5 приказане су вредности грешака тренирања и средњих грешака очитаних са дијаграма. Најмања грешка тренирања је за модел ANF4 који је заснован на примени троугласте функције припадности са три функције по атрибуту. Иста аналогија важи и за средњу грешку.

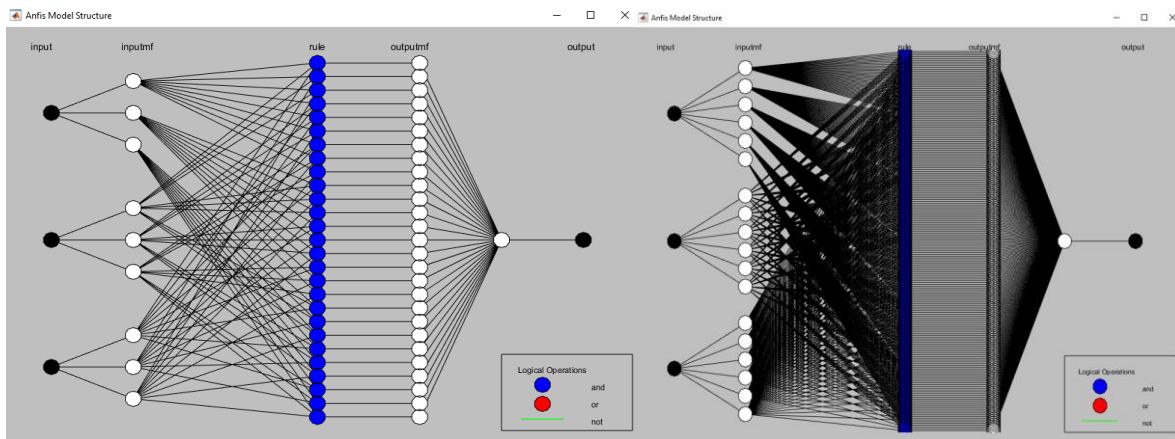
Таблица 10.4. Вредности грешака тренирања и средњих грешака (ANF1–ANF6)

Модел	ANF1	ANF2	ANF3	ANF4	ANF5
Грешка тренирања	0,020049	0,025714	0,04827	0,009989	0,02662
Средња грешка	0,019968	0,024938	0,04728	0,009882	0,02580

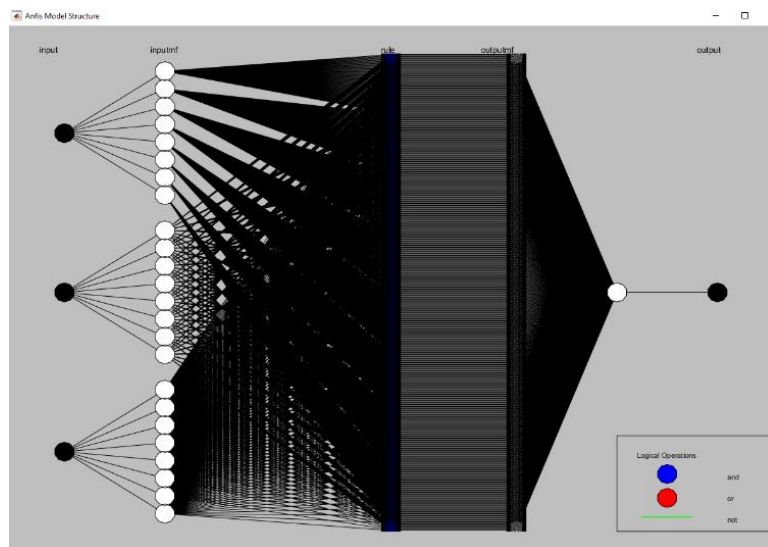
Таблица 10.5. Вредности грешака тренирања и средњих грешака (ANF7–ANF9)

Модел	ANF6	ANF7	ANF8	ANF9
Грешка тренирања	0,049426	0,032586	0,02018	0,0361
Средња грешка	0,047281	0,032565	0,01975	0,0353

На сликама 10.14 и 10.15 дата је структура ANFIS модела. Број чворова у првом скривеном слоју неуронске мреже одговара броју функција припадности за сваку од улазних променљивих [105]. За три функције припадности по атрибуту, број чворова износи 9. Код шест функција, број чворова је 18, односно 27 код осам функција припадности. Број чворова у другом скривеном слоју одговара броју фази правила [105] и износи 27, 216 и 512, на основу таблица 10.1–10.3.

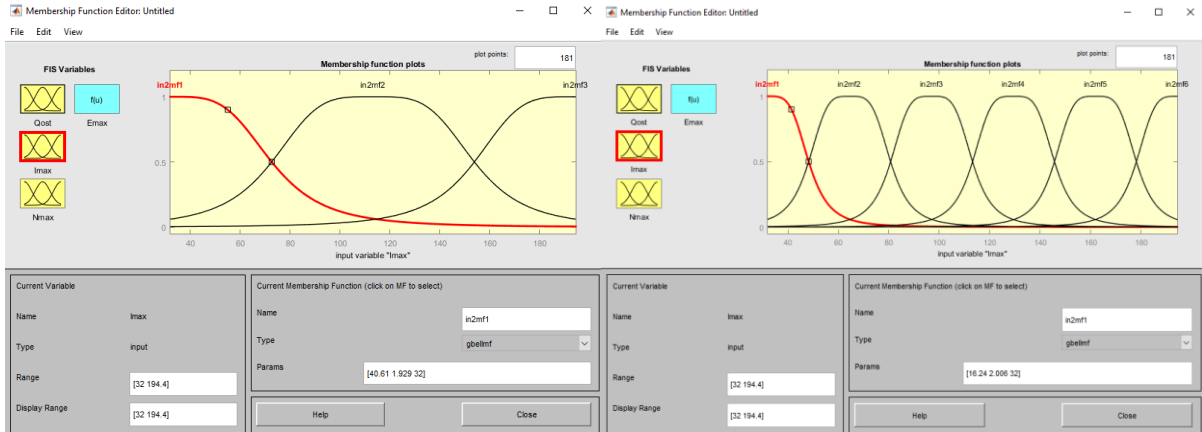


Слика 10.14. ANFIS структура – варијанта са три и шест функција припадности по атрибуту

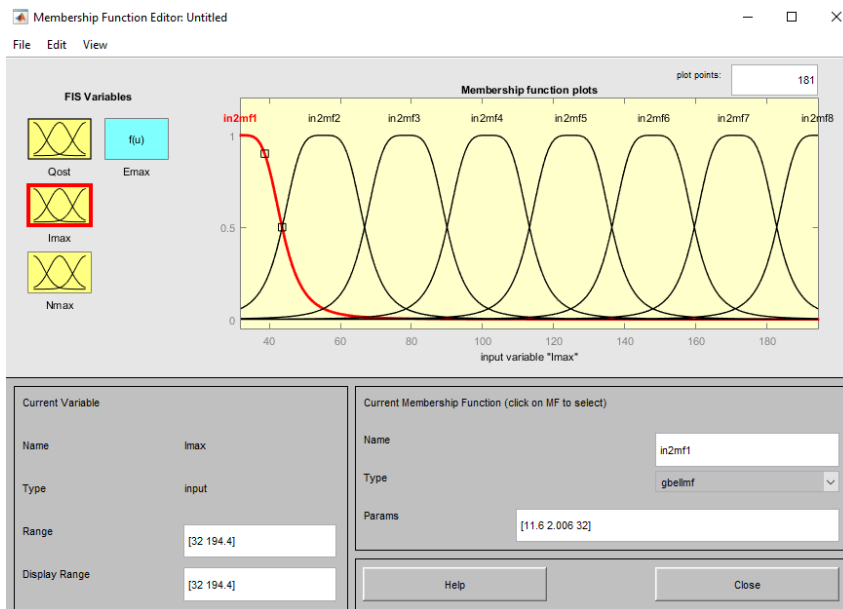


Слика 10.15. ANFIS структура – варијанта са осам функција припадности по атрибуту

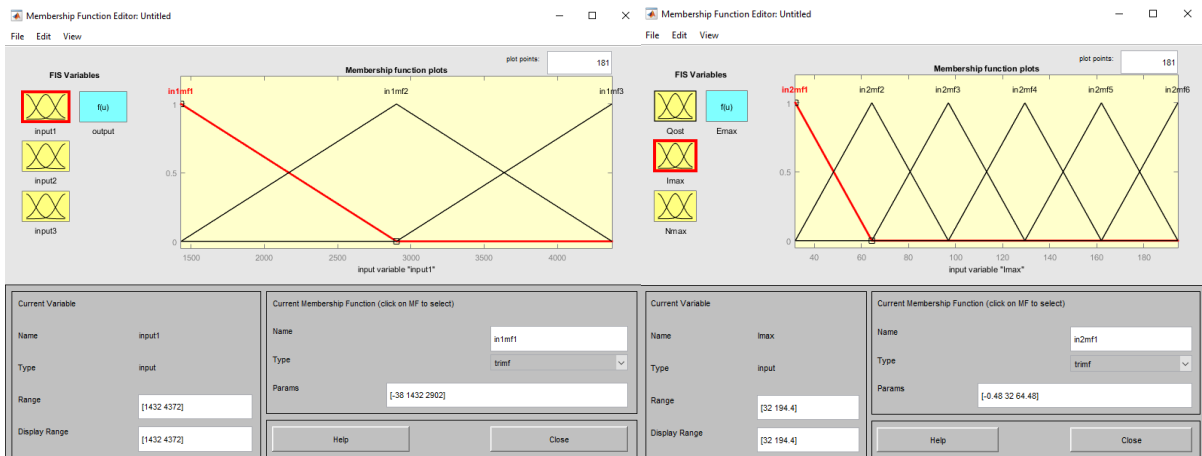
На сликама 10.16–10.21 дат је приказ функција припадности улазне променљиве, максимални пикови јачине струје очитани при мерењу I_{max} за моделе ANF1–ANF9. Исти је принцип и за остале две улазне променљиве. Већим бројем функција припадности по атрибуту обухвата се ужи опсег података и креира прецизнији модел.



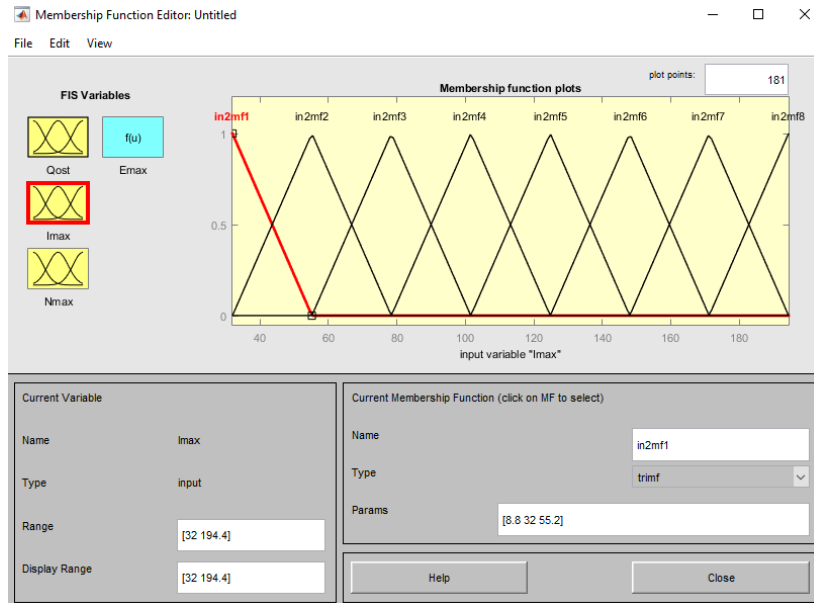
Слика 10.16. Функције припадности улазне променљиве I_{max} за моделе ANF1 и ANF2



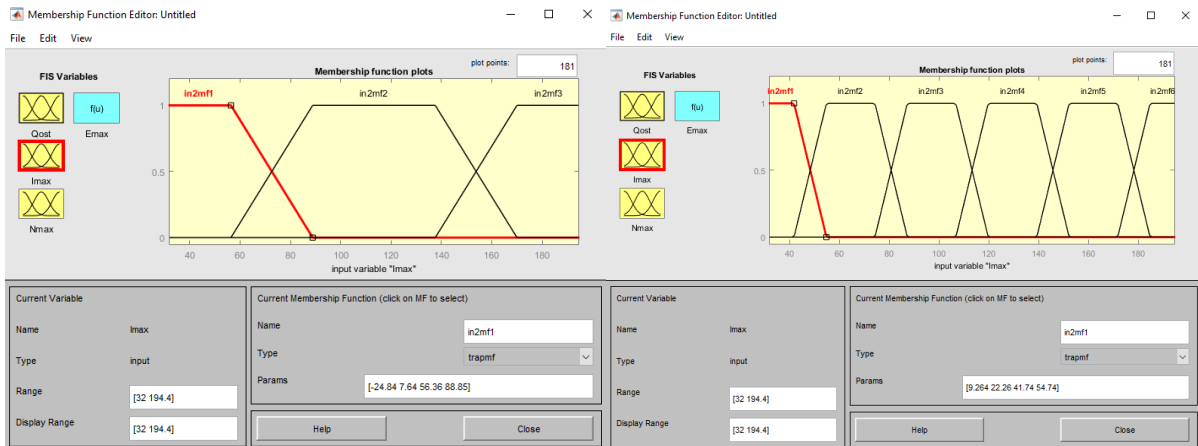
Слика 10.17. Функције припадности улазне променљиве I_{max} за модел ANF3



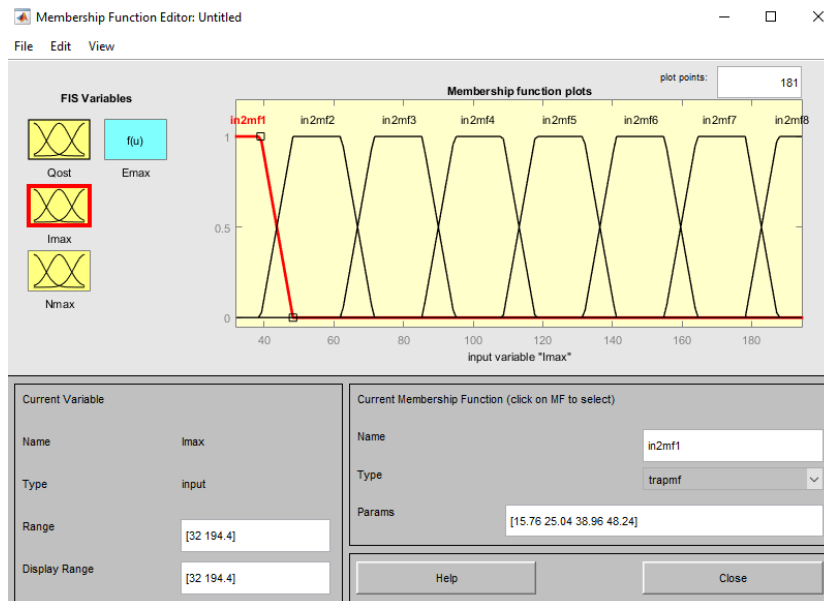
Слика 10.18. Функције припадности улазне променљиве I_{max} за моделе ANF4 и ANF5



Слика 10.19. Функције припадности улазне променљиве I_{max} за модел ANF6

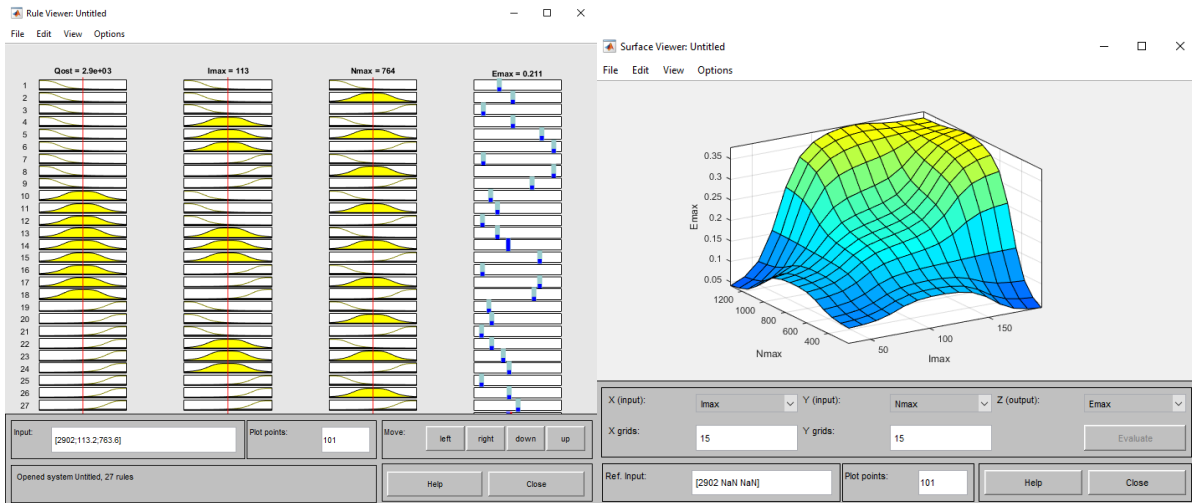


Слика 10.20. Функције припадности улазне променљиве I_{max} за моделе ANF7 и ANF8

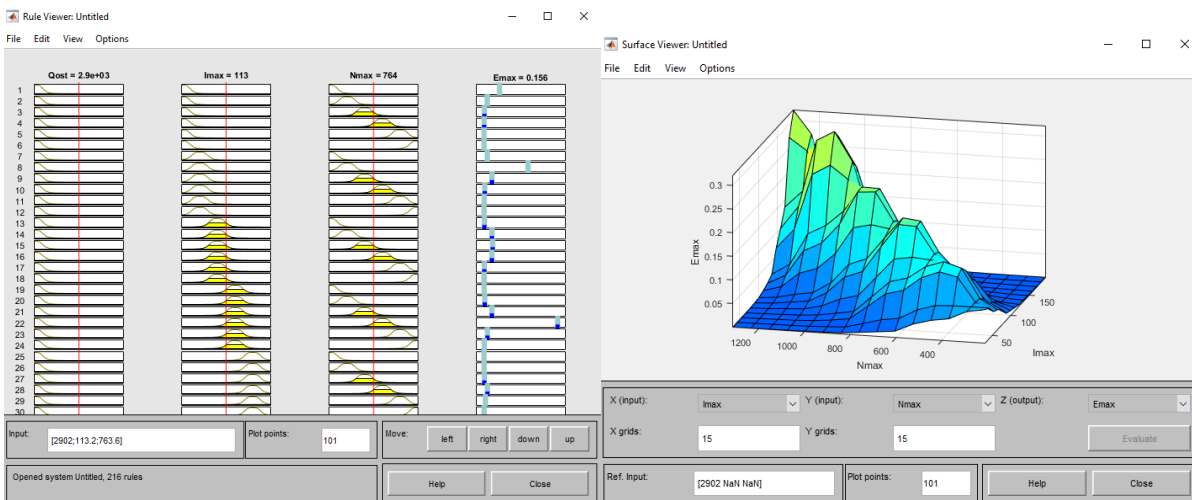


Слика 10.21. Функције припадности улазне променљиве I_{max} за модел ANF9

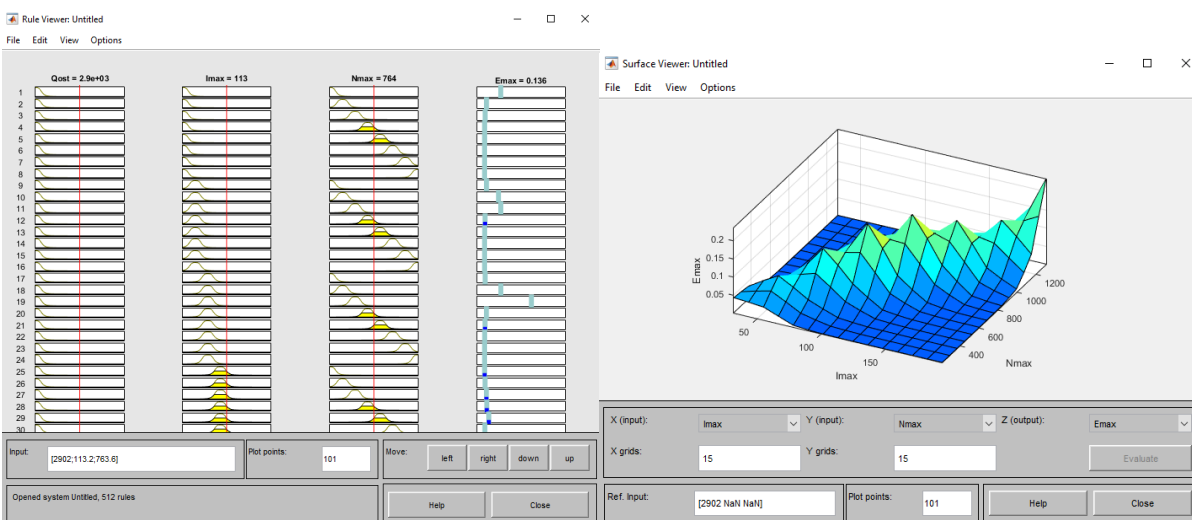
На основу базе фази правила учоава се тренд излазне променљиве са променом улаза. На сликама 10.22–10.30 приказане су вредности максималне специфичне потрошње електричне енергије E_{max} за исте вредности улаза; модели ANF1–ANF9. За цео скуп података, излаз се на најбољи начин приказује површинским (*eng. Surface*) дијаграмом.



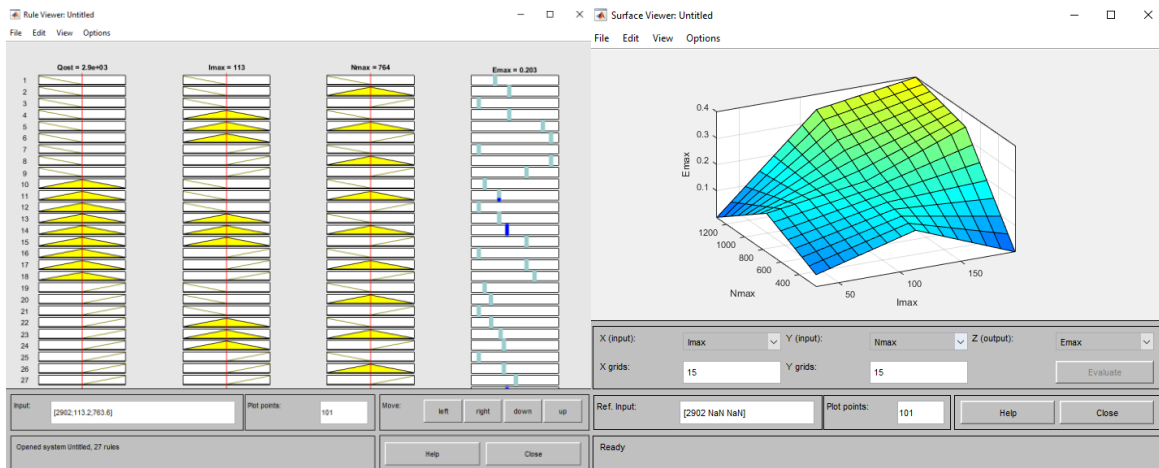
Слика 10.22. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF1 модел



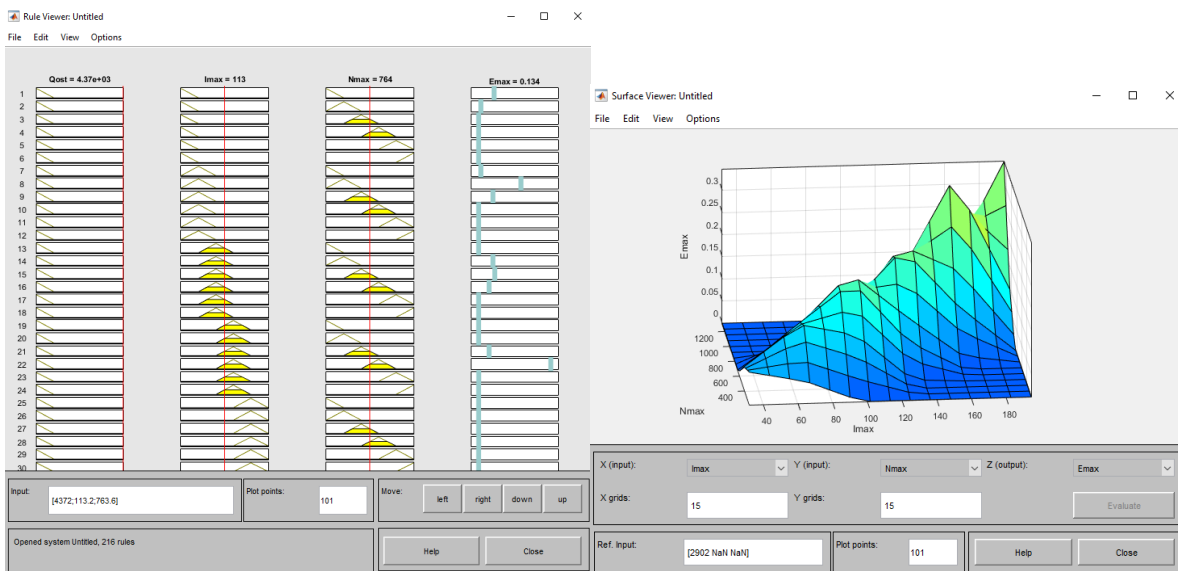
Слика 10.23. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF2 модел



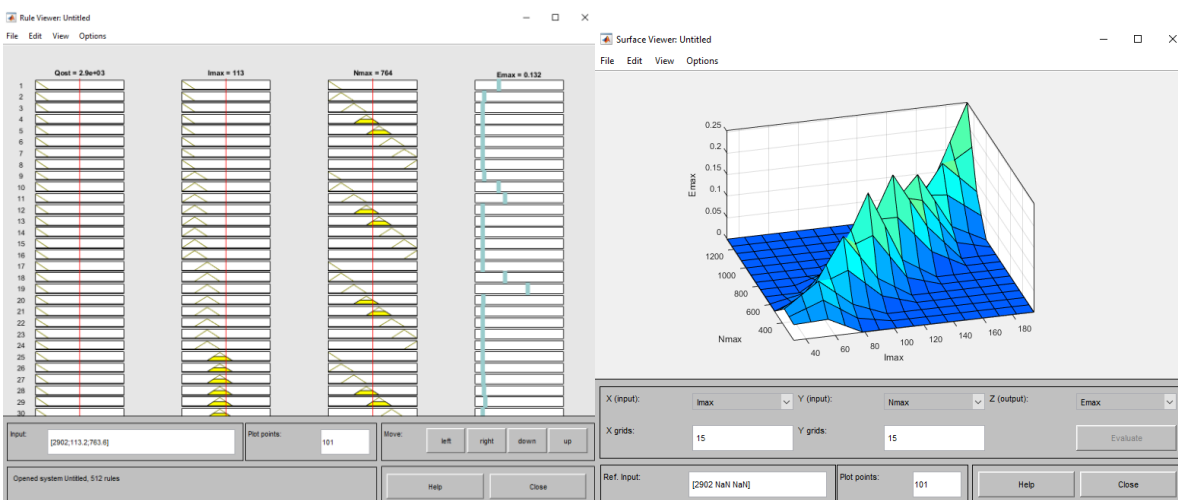
Слика 10.24. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF3 модел



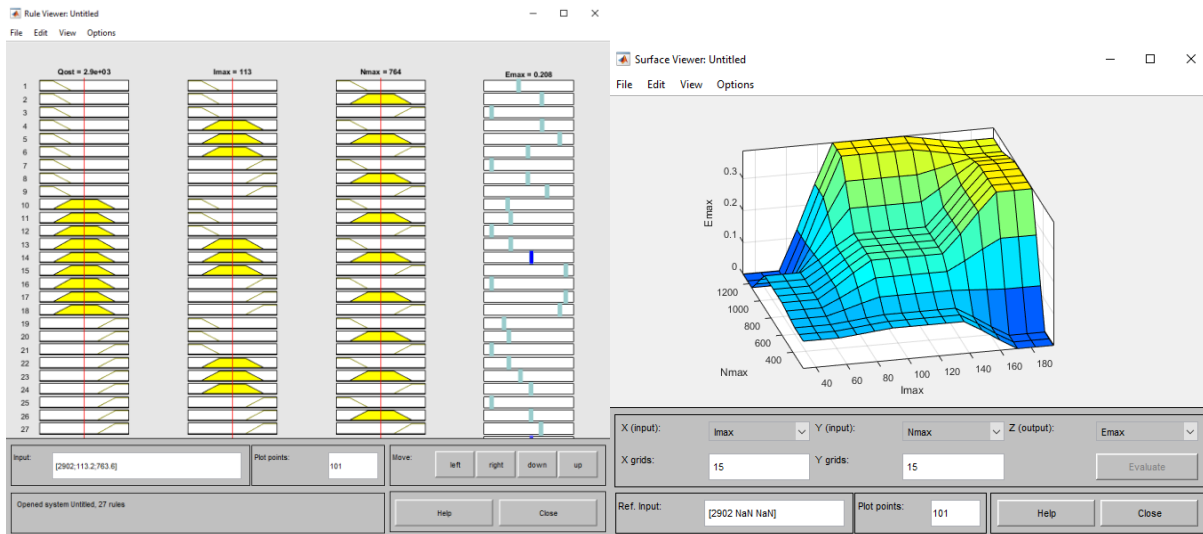
Слика 10.25. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF4 модел



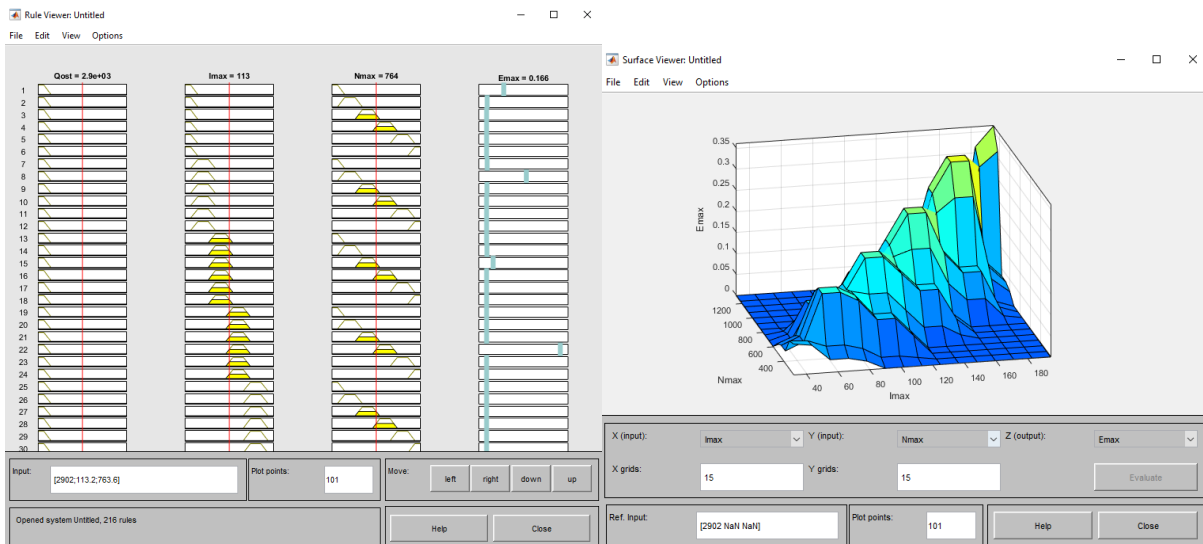
Слика 10.26. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF5 модел



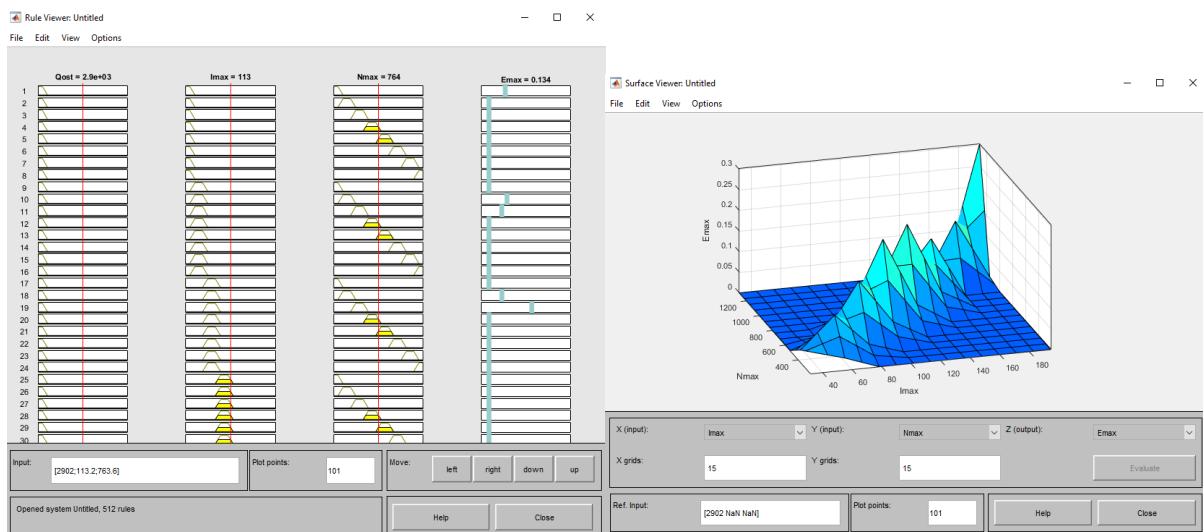
Слика 10.27. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF6 модел



Слика 10.28. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF7 модел



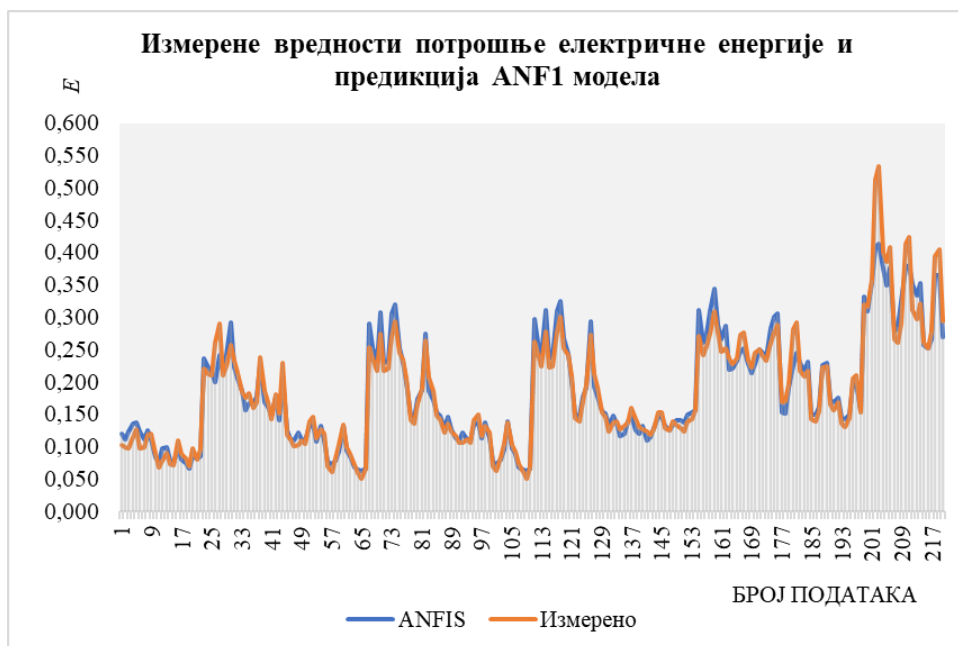
Слика 10.29. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF8 модел



Слика 10.30. Максимална специфична потрошња електричне енергије E_{max} – ANF9 модел

На сликама 10.31–10.48 приказана је предикција максималне специфичне потрошње електричне енергије E_{max} добијена применом ANFISA у односу на измерене вредности. ANFIS [7] модели су тестирани на засебном тест скупу података. Тест скуп је насумично одабран из укупне расподеле, али није коришћен у процесу учења. Излазни резултати тренинг и тест скупа дати су у прилогу 4.

Резултати су представљени за оба скупа података. На основу графичког приказа, приметно је да ANFIS [7] модел даје прецизније резултате за тренинг у односу на тест скуп података. Да би се са сигурношћу донели закључци о квалитету предикције креираних модела, потребно је израчунати индексе тачности – $RMSE$, MAE [9], R и $MAPE$.



Слика 10.31. Предикција потрошње електричне енергије ANF1 модела – тренинг скуп



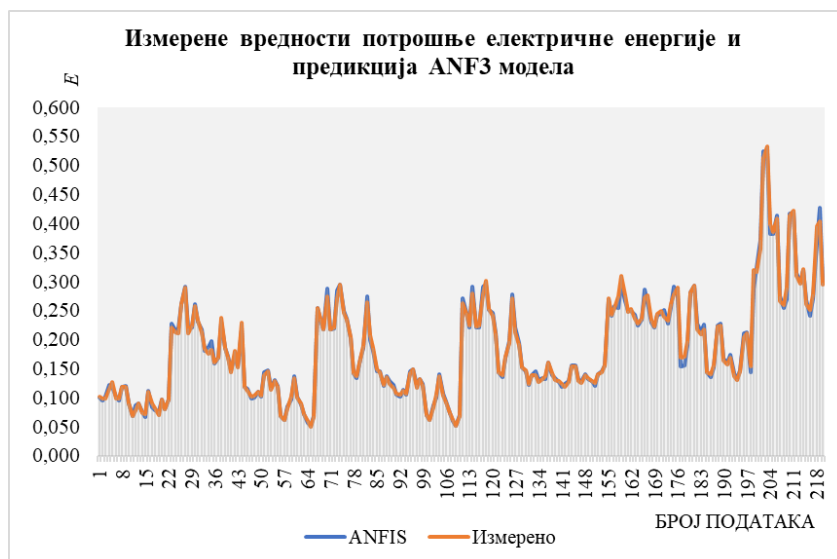
Слика 10.32. Предикција потрошње електричне енергије ANF1 модела – тест скуп



Слика 10.33. Предикција потрошње електричне енергије ANF2 модела – тренинг скуп



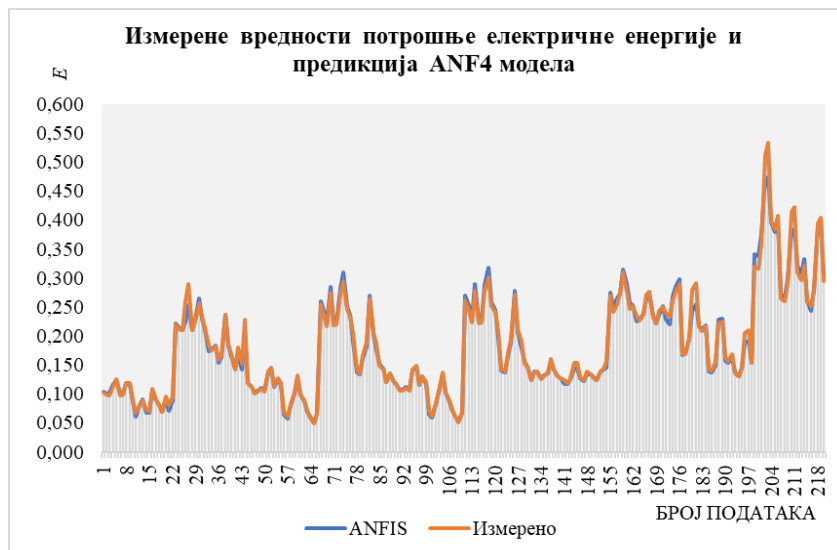
Слика 10.34. Предикција потрошње електричне енергије ANF2 модела – тест скуп



Слика 10.35. Предикција потрошње електричне енергије ANF3 модела – тренинг скуп



Слика 10.36. Предикција потрошње електричне енергије ANF3 модела – тест скуп



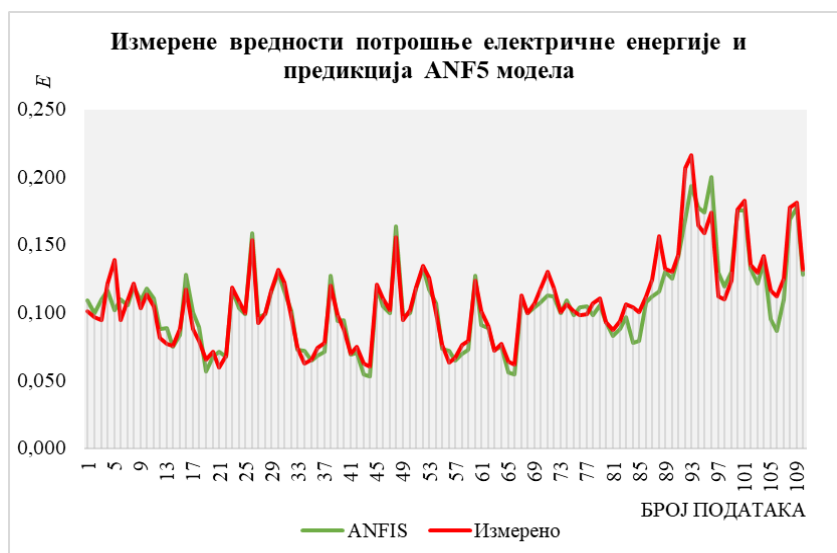
Слика 10.37. Предикција потрошње електричне енергије ANF4 модела – тренинг скуп



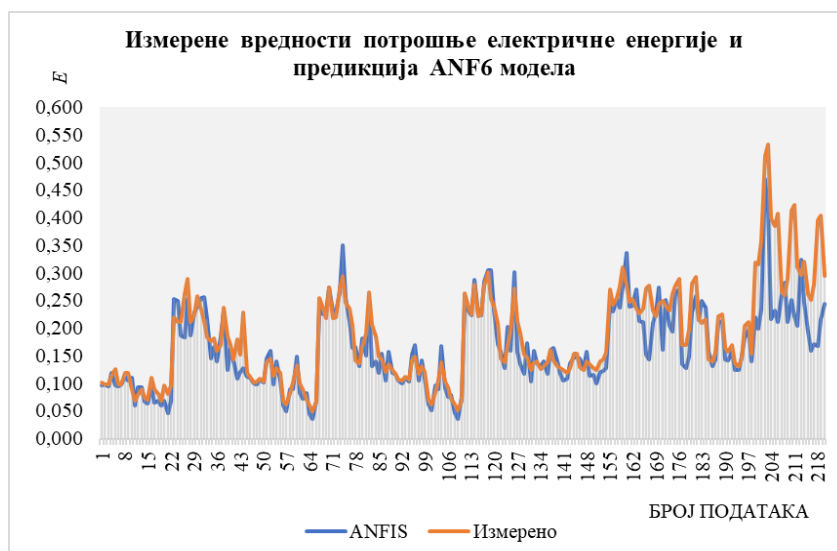
Слика 10.38. Предикција потрошње електричне енергије ANF4 модела – тест скуп



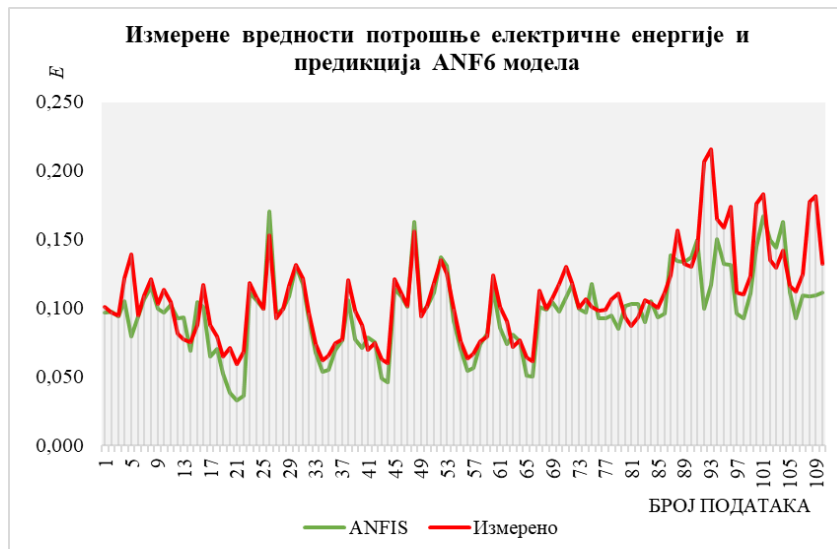
Слика 10.39. Предикција потрошње електричне енергије ANF5 модела – тренинг скуп



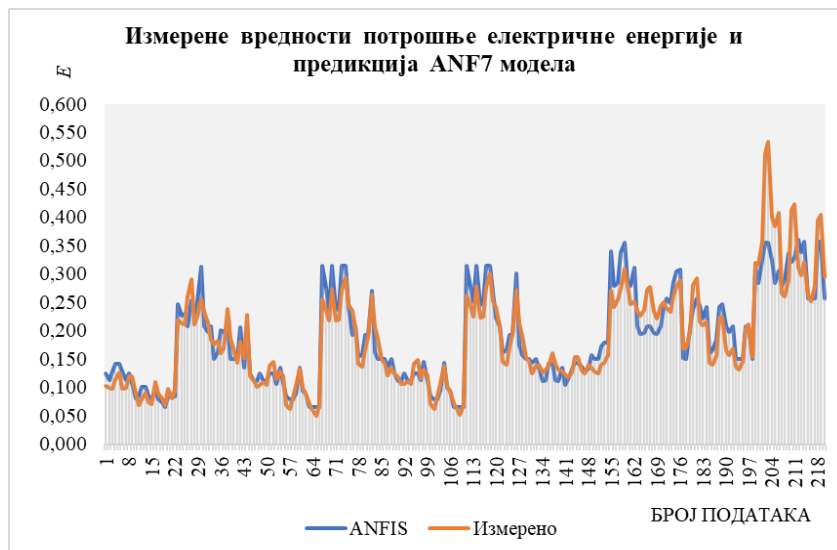
Слика 10.40. Предикција потрошње електричне енергије ANF5 модела – тест скуп



Слика 10.41. Предикција потрошње електричне енергије ANF6 модела – тренинг скуп



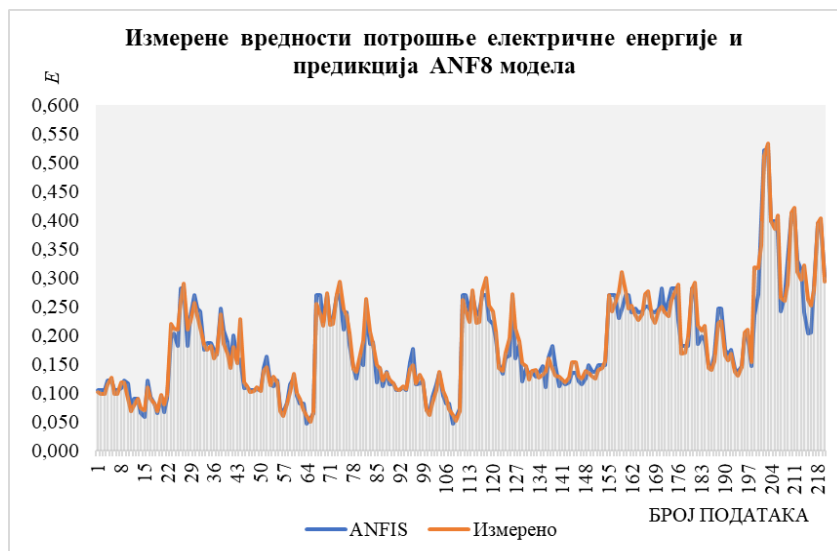
Слика 10.42. Предикција потрошње електричне енергије ANF6 модела – тест скуп



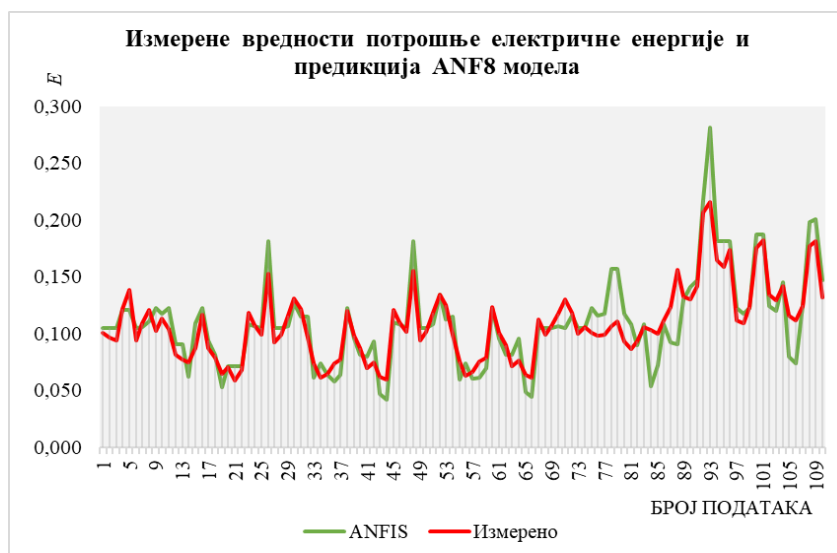
Слика 10.43. Предикција потрошње електричне енергије ANF7 модела – тренинг скуп



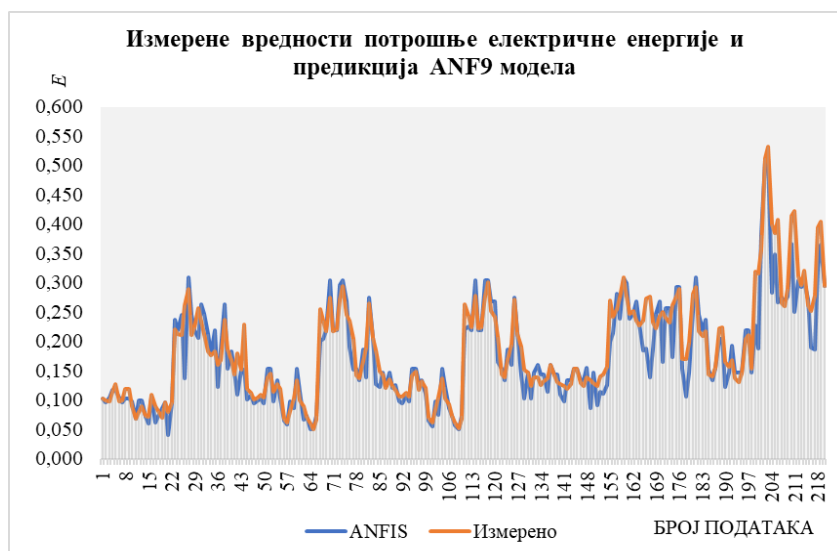
Слика 10.44. Предикција потрошње електричне енергије ANF7 модела – тест скуп



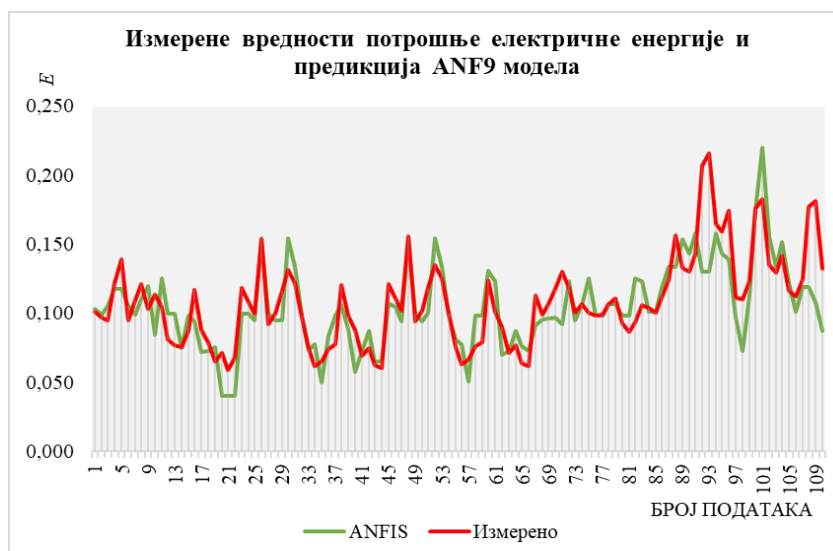
Слика 10.45. Предикција потрошње електричне енергије ANF8 модела – тренинг скуп



Слика 10.46. Предикција потрошње електричне енергије ANF8 модела – тесг скуп



Слика 10.47. Предикција потрошње електричне енергије ANF9 модела – тренинг скуп



Слика 10.48. Предикција потрошње електричне енергије ANF9 модела – тест скуп

У табелици 10.6 приказани су *индекси тачности* модела ANF1–ANF9 за тренинг и тест скуп података. Подаци из табелице биће приказани графички.

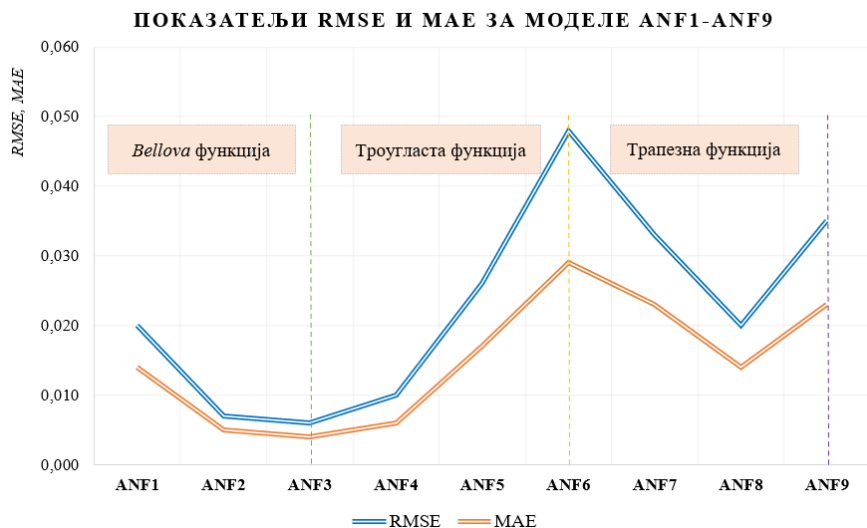
Табелица 10.6. Индекси тачности модела ANF1–ANF9

ANF	Индекс тачности	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>R</i>	<i>MAPE</i> , %
1	Тренинг подаци	0,020	0,014	0,973	7,152
	Тест подаци	0,013	0,009	0,922	8,717
2	Тренинг подаци	0,007	0,005	0,996	3,138
	Тест подаци	0,008	0,006	0,967	6,306
3	Тренинг подаци	0,006	0,004	0,997	2,429
	Тест подаци	0,010	0,005	0,960	5,155
4	Тренинг подаци	0,010	0,006	0,994	2,779
	Тест подаци	0,006	0,003	0,986	2,851
5	Тренинг подаци	0,026	0,017	0,958	8,048
	Тест подаци	0,011	0,008	0,944	6,991
6	Тренинг подаци	0,048	0,029	0,859	14,002
	Тест подаци	0,022	0,014	0,785	12,172
7	Тренинг подаци	0,033	0,023	0,927	11,954
	Тест подаци	0,017	0,013	0,842	12,184
8	Тренинг подаци	0,020	0,014	0,974	7,595
	Тест подаци	0,018	0,013	0,894	12,591
9	Тренинг подаци	0,035	0,023	0,921	11,682
	Тест подаци	0,021	0,015	0,769	13,736

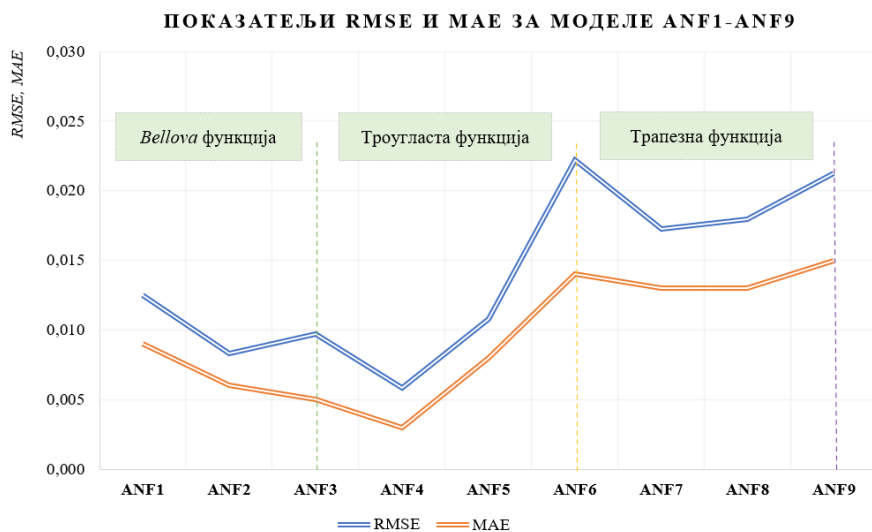
На сликама 10.49–10.53 представљен је:

- однос *RMSE* и *MAE* [9] одвојено за тренинг и тест скуп;
- упоредни приказ *RMSE* [9] тренинг и тест скуп;
- упоредни приказ *R* тренинг и тест скуп; и
- упоредни приказ *MAPE* тренинг и *MAPE* тест скуп.

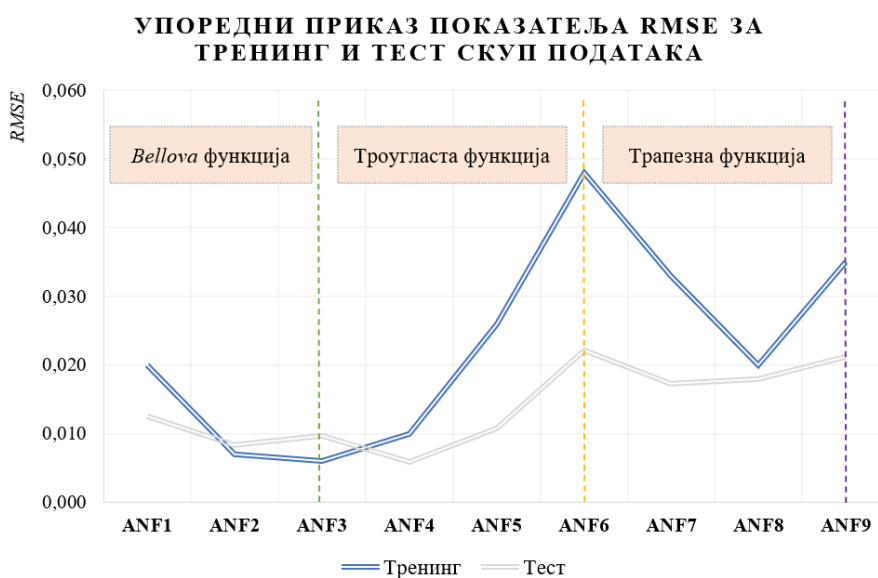
На дијаграмима су означени модели у којима су примењене *Bellova*, троугласта и трапезна функција припадности, на основу чега се дефинише оптималан ANFIS [7] модел.



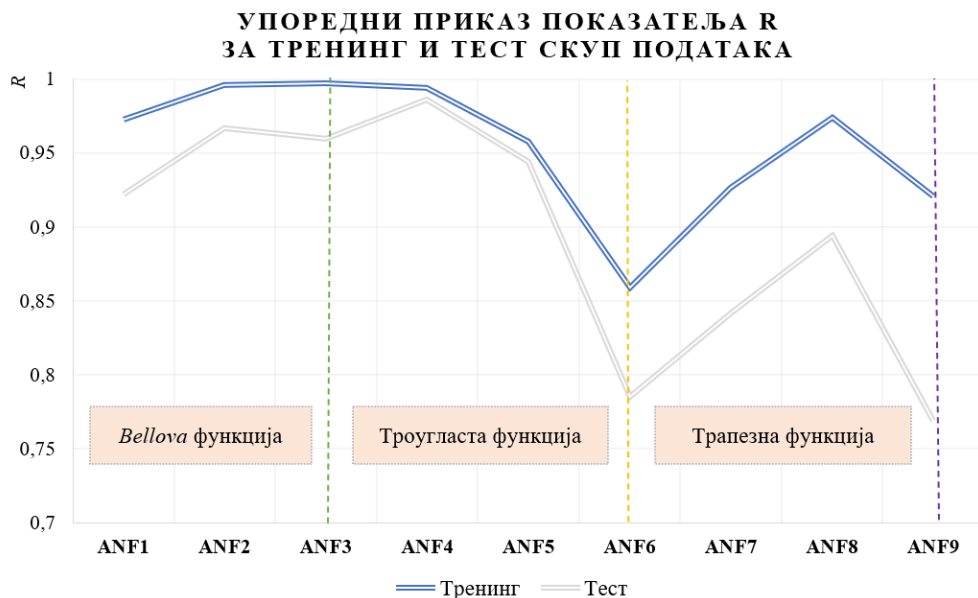
Слика 10.49. Показатељи $RMSE$ и MAE – тренинг скуп



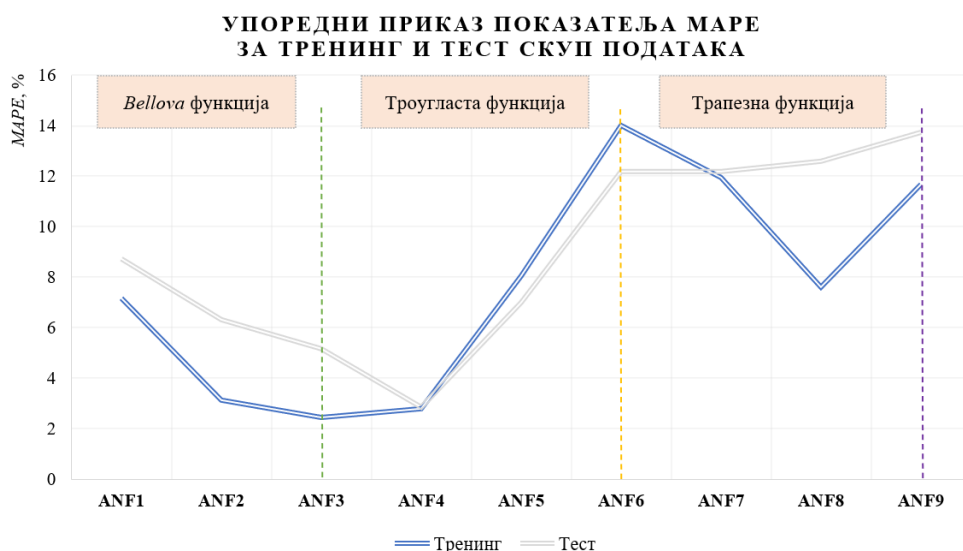
Слика 10.50. Показатељи $RMSE$ и MAE – тест скуп



Слика 10.51. Упоредни приказ показатеља $RMSE$ за тренинг и тест скуп



Слика 10.52. Упоредни приказ показатеља R за тренинг и тест скуп



Слика 10.53. Упоредни приказ показатеља $MAPE$ за тренинг и тест скуп

Теоријском анализом примењених индекса тачности, ANFIS [7] модел је квалитетнији, ако су вредности показатеља следећи:

- $RMSE$, MAE [9] и $MAPE$ морају бити ближи нули; и
- коефицијент R мора бити ближи броју један.

На основу наведеног, следи закључак:

- ANFIS [7] модели у општем смислу боље предвиђају на тренинг скупу;
- $RMSE$ и MAE [9] указују да оптималан ANFIS [7] модел користи *Bellovi* функцију; и
- $RMSE$ се повећава код модела заснованих на троугластој и трапезној функцији, слично је и за показатеље MAE [9] и $MAPE$.

Оптималан ANFIS [7] модел се пореди са средњим вредностима максималне потрошње енергије E_{max} који представљају први улаз у модел зависности похабаности резних елемената, потрошње енергије и нивоа амплитуде вибрација.

10.5 Компаративна анализа измерене потрошње електричне енергије и предикције ANFIS модела

Модел који дефинише зависност похабаности резних елемената, специфичне потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација (у даљем тексту *основни модел*), као сегмент улазних података садржи вредности потрошње енергије добијене мерењем на објекту истраживања – роторном багеру SRs2000.32/5+VR.

ANFIS [7] је предвидео нове улазне податке. Потребно је одредити степен сагласности ове две групе података. Код основног модела, као улаз су коришћене средње вредности максималне потрошње енергије E_{max} .

Индекси тачности ANFIS [7] модела показали су да је најмање одступање измерених и предвиђених вредности потрошње електричне енергије у варијанти ANF3 – *Bellova* функција припадности, осам функција по атрибуту.

У наставку су анализирани улазни подаци у основни модел за стање зуба од новог до потпуно похабаног, дебљину реза 0,25 [m], 0,40 [m] и 0,50 [m] и кретање стреле у лево и десну страну.

Таблица 10.7. Улазни подаци у основни модел – измерено/ANFIS

Степен похабаности	Нови резни елементи					
	0,25 [m]		0,4 [m]		0,5 [m]	
Итерације	Лево	Десно	Лево	Десно	Лево	Десно
Кретање стреле						
Измерена потрошња	0,226	0,246	0,202	0,188	0,170	0,191
ANFIS предикција	0,231	0,249	0,189	0,189	0,170	0,187
Степен похабаности	25 %					
Измерена потрошња	0,246	0,251	0,207	0,190	0,171	0,129
ANFIS предикција	0,249	0,255	0,208	0,191	0,168	0,128
Степен похабаности	50 %					
Измерена потрошња	0,253	0,257	0,212	0,194	0,176	0,131
ANFIS предикција	0,258	0,257	0,214	0,195	0,178	0,130
Степен похабаности	75 %					
Измерена потрошња	0,261	0,272	0,243	0,246	0,283	0,376
ANFIS предикција	0,256	0,266	0,247	0,245	0,284	0,377
Степен похабаности	100 %					
Измерена потрошња	0,376	0,432	0,307	0,338	0,297	0,350
ANFIS предикција	0,377	0,424	0,304	0,338	0,287	0,363

Статистичким показатељем *MAPE* извршена је анализа измерених улазних података у основни модел и ANFIS [7] предикције. Резултатом теста (таблица 10.8.) добија се потврда које од изведених мерења није требало радити, сходно вредности одступања.

Таблица 10.8. Резултати *MAPE* – улаз у основни модел (измерена потрошња/ANFIS)

Степен похабаности	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Показатељ <i>MAPE</i> , %	1,325	0,841	0,825	1,448	1,673

Тест дефинише највећу сагласност улазних података у основни модел, за случај похабаних резних елемената 50 %. Општи закључак је да постоји мало одступање измерене потрошње и ANFIS [7] предикције за сва стања резних елемената. На тај начин се у потпуности потврђује почетна хипотеза о утицају похабаности резних елемената на индикатор потрошње електричне енергије погона за копање.

11. ЗАКЉУЧАК

Роторни багери представљају машине велике инвестиционе вредности. Количине откопане отквивке и корисне минералне сировине могу износити више хиљада метара кубних или тона по радном часу. У току технолошког процеса, резни елементи багера су изложени хабању. Интензитет хабања зависи од структуре материјала који се откопава.

У докторској дисертацији је анализиран утицај похабаности резних елемената на понашање погона за копање, са аспекта потрошње електричне енергије и нивоа амплитуде вибрација.

На бази изложених теоријских поставки из домена вибродијагностике, системских наука и инжењерских принципа рада роторних багера, формиран је синтетички модел који даје зависност похабаности резних елемената, потрошње енергије и амплитуде вибрација.

Верификација модела извршена је студијом случаја – експерименталним мерењима на роторном багеру SRs2000.32/5+VR. Мерења су рађена у тренуцима када су резни елементи били нови, похабани 25 %, похабани 50 %, похабани 75 % и потпуно похабани.

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

Зависност оба приступа дефинисана је односом A/E и амплитуде приказане преко силе копања F . У односу на похабаност резних елемената, добијени су следећи односи:

- за похабан зуб 25 % према стању новог зуба: однос A/E износи 73,50 %, другим приступом зависност је 92,93 %;
- за похабан зуб 50 % према стању новог зуба: однос A/E је 69,13 %, други приступ даје зависност 88,5 %;
- за похабан зуб 75 % према стању новог зуба: однос A/E је 67,36 %, други приступ има зависност 68,8 %; и
- за похабан зуб 100 % према стању новог зуба: однос A/E је 55,37 %, други приступ даје зависност 55,2 %.

Резултати показују да модел у областима мање похабаности има нижи степен сагласности (за случај похабаности 25 % и 50 % добијени су односи 73,50 % према 92,93 %, односно, 69,13 % према 88,5 %). Даљим растом похабаности, разлика оба приступа је мања.

Амплитуда вибрација је посматрана кроз референтни DIN ISO 10 816–3 [2] стандард за мерење вибрација. Опште стање погона се класификује у групе А–D зависно од нивоа амплитуде. За поређење је меродаван ниво амплитуде измерен у вертикалном правцу (у хоризонталном и аксијалном правцу вредности амплитуде су мање).

- случај нових резних елемената, измерена амплитуда: $A_{VER} = 1,577$ [mm/s] – погон се класификује у групу А. Према стандарду закључак је да не постоји опасност по рад машине;
- случај похабаних резних елемената 25 %, измерена амплитуда: $A_{VER} = 3,560$ [mm/s] – погон се класификује у нижи опсег дозвољених амплитуда групе В. Закључак је исти као за мерење са новим резним елементима;
- случај похабаних резних елемената 50 %, измерена амплитуда: $A_{VER} = 4,540$ [mm/s] – погон се класификује у виши опсег дозвољених амплитуда групе В;

- случај похабаних резних елемената 75 %, измерена амплитуда: $A_{VER} = 5,181$ [mm/s] – погон се класификује у групу В. Приметан је знатан скок амплитуде и приближавање С групи; и
- случај похабаних резних елемената 100 %, измерена амплитуда: $A_{VER} = 8,600$ [mm/s] – погон се класификује у групу С. Рад машине у дужем периоду представља ризик по прелазак амплитуде у групу D и настанак хаварија.

Корекцијом амплитуде брзине вибрација према степену похабаности резних елемената даје се препорука да се зависно од стања зуба може предвидети ниво амплитуде и дефинисати стање погона. Овакав концепт управљања опремом представља оптималан вибродијагностички приступ, где се на основу степена похабаности може пратити ниво амплитуде вибрација.

Развијени модел је хибридног карактера чему доприноси пропозиција улазних параметара у ANFIS. ANFIS [7] је коришћен за предикцију потрошње електричне енергије. Улазне променљиве које утичу на потрошњу анализирани су кроз:

- остварени капацитет багера у датом тренутку, Q_{ost} ;
- максималне пикове струје очитане при мерењима, I_{max} ; и
- максималну снагу за процес копања, N_{max} .

Креирана су три базна ANFIS [7] 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; и
- трећим се фазификација улаза 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* [9], *R* и *MAPE*. Установљено је да модел ANF3 заснован на *Bellovoj* 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 %. Измерена средња вредност потрошње електричне енергије код овог мерења износи 0,204 [kWh/m³], а предикција ANFIS [7] модела 0,205 [kWh/m³]. Не постоје већа одступања ни код осталих мерења.

Предложени модел је у потпуности иновативан. Синтеза потрошње електричне енергије, амплитуде вибрација и похабаности резних елемената представља јединствен приступ при мерењима на роторним багерима.

На основу свега наведеног, закључна раматрања могу да се сведу на следећи начин:

- код погона великих снага радних машина значајан је утицај стања радних делова на погонске параметре;
- постоји јасно изражена и експлицитна корелација између нивоа похабаности радних делова, потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација;
- математичка и концепцијска међузависност улазних и излазних параметара на најбољи начин се дефинише регресивним методама, уз примену фази логике због хибридног карактера, док се предиктивни карактер добија применом вештачких неуронских мрежа;
- квалитетна анализа утицајних параметара мора да садржи њихову адекватну пропозицију и мерење; и
- развијени модел има алгоритамску структуру и даје препоруке за дефинисање утицаја хабања резних елемената на рад погона за копање.

Препоруке за даља истраживања се односе на примену ANFIS [7] модела за предикцију нивоа амплитуде вибрација, чиме се у потпуности омогућава верификација основног модела (зависност похабаности резних елемената, потрошње електричне енергије и амплитуде вибрација) и компаративну анализу основног модела на роторним багерима истих или сличних техничких карактеристика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Z. Yan, F. Qiping, H. Jinlan, B. He, Z. Lin, “Considerations and guides of the wattmeter method for measuring output acoustical power of Langevin-type transducer systems - II: Experiment” *Ultrasonics*, vol. 35, no. 7, pp. 543–546, 1997, doi: 10.1016/S0041-624X(97)00027-9.
- [2] ISO Organization for Standardization, “BS ISO 10816-3:2009 Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts” 2009.
- [3] M. Gomilanović, M. Tanasijević, S. Stepanović, F. 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” 2023.
- [4] 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” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 146, 2020.
- [5] D. Ignjatović, *Rudarske mašine*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2012.
- [6] Stevan Đenadić, Razvoj sinteznog modela upravljanja rizikom kod rotornih bagera, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2022.
- [7] M. Gaber, S. El-Banna, M. El-Dabah, M. Hamad, “Designing and Implementation of an Intelligent Energy Management System for Electric Ship power system based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)” *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 195–203, 2021, doi: 10.25046/aj060223.
- [8] G. Yanan, C. Xiaoqun, L. Bainian, K. Peng, “Chaotic Time Series Prediction Using LSTM with CEEMDAN” *Journal of Physics Conference Series.*, vol. 1617, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1617/1/012094.
- [9] T. Chai & R. R. Draxler, “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature” *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250, 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- [10] S. Đenadic, D. Ignjatović, M. Tanasijević, U. Bugarić, I. Janković, T. Šubaranović, “Development of the availability concept by using fuzzy theory with AHP correction, a case study: Bulldozers in the open-pit lignite mine” *Energies*, vol. 12, no. 21, 2019, doi: 10.3390/en12214044.
- [11] T. Atanasova-Pachemska, M. Lapevski, R. Timovski, “Analytical Hierarchical Process (AHP) Method Application in the process of selection and evaluation” *International Scientific Conference*, pp. 373–380, 2014.
- [12] S. Đenadic, M. Tanasijević, P. Jovančić, D. Ignjatović, D. Petrović, U. Bugarić, “Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM” *Mathematics*, vol. 10, no. 5, 2022, doi: 10.3390/math10050811.
- [13] Z. Chen, P. Zhong, M. Liu, Q. Ma, G. Si, “A novel integrated MADM method for design concept evaluation” *Scientific Reports.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–19, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-20044-7.
- [14] Miloš Tanasijević, “Sigurnost funkcionisanja mehaničkih komponenti rotornog bagera” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2007.

- [15] Tanasijević M., Ivezić D., Jovančić P., Čatić D., Zlatanović D. “Study of Dependability Evaluation for Multi-hierarchical Systems Based on Max–Min Composition” *Qual. Reliab. Eng.*, 2013, doi: 10.1002/qre.1383.
- [16] Miloš Tanasijević, Dejan Ivezić, Slobodan Ivković “Model analize i sinteze performansi sigurnosti funkcionisanja” pp. 15–24, 2007.
- [17] M. Gomilanović, M. Tanasijević, S. Stepanović, “Determining the Availability of Continuous Systems at Open Pits Applying Fuzzy Logic” *Energies*, vol. 15, no. 18, 2022, doi: 10.3390/en15186786.
- [18] Dejan Petrović; Miloš Tanasijević; Saša Stojadinović; Jelena Ivaz; Pavle Stojković, “Fuzzy Model for Risk Assessment of Machinery Failures” *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 4, 2020.
- [19] N. Sellappan, D. Nagarajan, K. Palanikumar, “Evaluation of risk priority number (RPN) in design failure modes and effects analysis (DFMEA) using factor analysis” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 14, pp. 34194–34198, 2015.
- [20] J. Wang, J.; Yang, J.B.; Sen P. “Safety analysis and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 47, no. 2, pp. 103–118, 1995.
- [21] J.B. Bowles, Pelaez C.E. “Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 50, no. 2, pp. 203–213, 1995.
- [22] R. Onofrio, F. Piccagli, F. Segato, “Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) for Medical Devices: Does Standardization Foster Improvements in the Practice” *Procedia Manuf.*, vol. 3, no. November, pp. 43–50, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.106.
- [23] Bevilacqua, M., Braglia, M., Gabbrielli M. “Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant” *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 16, no. 4, pp. 313–324, 2000.
- [24] P. L. Bonate, “A brief introduction to Monte Carlo simulation” *Clin. Pharmacokinet.*, vol. 40, no. 1, pp. 15–22, 2001, doi: 10.2165/00003088-200140010-00002.
- [25] Y. M. Wang, K. S. Chin, G. K. K. Poon, J. B. Yang, “Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean” *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2 PART 1, pp. 1195–1207, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.028.
- [26] P.S. Damanab, S.S. Alizadeh, Y. Rasoulzadeh, P. Moshashaie, S. Varmazyar, “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Technique: A Literature Review” *Sci. J. Rev.*, no. August, 2015, doi: 10.14196/sjr.v4i1.1805.
- [27] J. Balaraju, M. Govinda Raj, C. S. Murthy, “Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine-A case study” *J. Sustain. Min.*, vol. 18, no. 4, pp. 257–268, 2019, doi: 10.1016/j.jsm.2019.08.002.
- [28] Z. Virág & S. Szirbik, “Analysis of a Replaceable Cutting Tooth of Bucket Chain Excavator” *Min. Rev.*, vol. 27, no. 4, pp. 28–32, 2022, doi: 10.2478/minrv-2021-0032.
- [29] Z. Golubović, Z. Lekić, S. Jović, “Influence of Bucket Wheel Vertical Vibration on Bucket-Wheel Excavator (BWE) Digging Force” *Tech. Gaz.*, vol. 4, no. 19, pp. 807–812, 2012.

- [30] V. Gursky, P. Krot, V. Korendiy, R. Zimroz, “Dynamic Analysis of an Enhanced Multi-Frequency Inertial Exciter for Industrial Vibrating Machines” *Machines*, vol. 10, no. 2, 2022, doi: 10.3390/machines10020130.
- [31] X. Chuangwen, D. Jianming, C. Yuzhen, L. Huaiyuan, S. Zhicheng, X. Jing, “The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1177/1687814017750434.
- [32] I. Kertesz Brinas, N. I. Rebedea, I. L. Oltean, “Bucket wheel excavator cutting tooth stress and deformation analysis during operation using Finite Elements Method (FEM)” *Min. Informatics, Autom. Electr. Eng.*, vol. 4 (536), no. 1, p. 9, 2018, doi: 10.7494/miag.2018.4.536.9.
- [33] Z. Shi, X. Li, N. Duan, Q. Yang, “Evaluation of tool wear and cutting performance considering effects of dynamic nodes movement based on FEM simulation” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 4, pp. 140–152, 2021, doi: 10.1016/j.cja.2020.08.003.
- [34] D. U. Kritskii, M. Pantelik, Petr A. Pobegailo, Irina V. Gadolina, L. Papić “Refinement of the formula for assessing the wear rate of the excavator teeth” *Inżynieria Powierzchni*, 2019.
- [35] H.S. Yoon, J.Y. Lee, M.S. Kim, S.H. Ahn, “Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling” *J. Clean. Prod.*, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.061.
- [36] A. Meena & M. El Mansori, “Specific cutting force, tool wear and chip morphology characteristics during dry drilling of austempered ductile iron (ADI)” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, 2013.
- [37] Filip Miletić; Stevan Đenadić; Predrag Jovančić; Dragan Novaković; Bojana Vasiljević, “Utvrđivanje uticaja reznih elemenata rotornog bagera na rad pogona rotora” *OMC* 2018, pp. 175–186.
- [38] I. Jakovljević, S. Stepanović, T. Šubaranović, “Logistic Approach To Investigation of Slice Thickness Height Ratio Effects on Excavation Resistance of Bucket Wheel Excavator” *The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS*.
- [39] Saša Bošković, “Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom” *Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*, 2016.
- [40] I. Brînaş *et al.*, “Determination of the bucket wheel drive power by computer modeling based on specific energy consumption and cutting geometry” *Energies*, vol. 14, no. 13, 2021, doi: 10.3390/en14133892.
- [41] J. András, J. Kovács, E. András, I. Kertész, O. B. Tomus, “A New Method for the Calculation of Energy and Power Requirements of Bucket Wheel Excavators” *Műszaki Tudományok Közlemények*, vol. 10, no. 1, pp. 15–20, 2019, doi: 10.33894/mtk-2019.10.01.
- [42] T. Li & C. Yuan, “Numerical Modeling of Specific Energy Consumption in Machining Process” 2013. doi: <https://doi.org/10.1115/MSEC2013-1247>.
- [43] L. Zhou, J. Li, F. Li, Q. Meng, J. Li, X. Xu, “Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, no. 2014, pp. 3721–3734, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093.

- [44] H. De Carvalho, J. De Oliveira Gomes, M. A. Schmidt, V. L. C. Brandão, “Vibration analysis and energy efficiency in interrupted face milling Processes” *Procedia CIRP*, vol. 29, no. March, pp. 245–250, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.165.
- [45] F. D. Popescu, S. M. Radu, A. Andraş, I. Kertész, “A grafo-numeric method of determination of the operation power of the rotor of EsRc-1400 bucket wheel excavator using computer simulation in SolidWorks” *MATEC Web Conf.*, vol. 290, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201929004007.
- [46] D. Wu, Z. Zhang, Z. Wang, “Application research of solidworks in modeling of straw carbonization preparation plant” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1303, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1303/1/012048.
- [47] G. Ladányi & I. Sümegi, “Bucket and Cutting Tooth Developments for the Bucket Wheel Excavators of Mátra Power Station Llc” *Ann. Univ. Petrosani Mech. Eng.*, vol. 12, pp. 151–162, 2010.
- [48] K. He, R. Tang, Z. Zhang, W. Sun, “Energy Consumption Prediction System of Mechanical Processes Based on Empirical Models and Computer-Aided Manufacturing” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 16, no. 4, 2016, doi: 10.1115/1.4033921.
- [49] T. Feldhausen *et al.*, “Review of Computer-Aided Manufacturing (CAM) strategies for hybrid directed energy deposition” *Addit. Manuf.*, vol. 56, no. June, p. 102900, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102900.
- [50] Y. He, F. Liu, T. Wu, F. P. Zhong, B. Peng, “Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no. 2, pp. 255–266, 2012, doi: 10.1177/0954405411417673.
- [51] Y. Koren, J. Ben-Uri, T. J. Higgins, “Numerical Control of Machine Tools” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 10, no. 3, pp. 175–175, 2008, doi: 10.1109/tsmc.1980.4308460.
- [52] A. Pannawan, “Investigation of Relationship between Mechanical Vibration and Energy Consumption of an Induction Motor” no. June, pp. 2–3, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.16707.45600.
- [53] A. Atmaca & N. Atmaca, “Determination of correlation between specific energy consumption and vibration of a raw mill in cement industry” no. December, 2017, doi: 10.18038/btda.11251.
- [54] A. Elkhatib, “Energy consumption and machinery vibrations” 2007.
- [55] N. Zuber, H. Ličen, A. Klačnja-Miličević, “Remote online condition monitoring of the bucket wheel excavator SR1300 – a case study” vol. 5, pp. 25–37, 2008.
- [56] Jerzy Czmochoowski, Przemyslaw Moczko, Maciej Olejnik, Damina Pietrusiak “Vibration Analysis of an Exhaust Fan in the Exhaust Gas Duct of a Power Plant Unit” in *Proceedings of the 14th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering*, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-04975-1_14.
- [57] A. Sreikha & K. Bashetty, “Infinite to finite: An overview of finite element analysis” *Indian J. Dent. Res.*, vol. 21, no. 3, pp. 425–432, 2010, doi: 10.4103/0970-9290.70813.
- [58] J. Więckowski, W. Rafajłowicz, P. Moczko, E. Rafajłowicz, “Data from vibration measurement in a bucket wheel excavator operator’s cabin with the aim of vibrations damping” *Data Br.*, vol. 35, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1016/j.dib.2021.106836.

- [59] G. Betta, M. D'Apuzzo, C. Liguori, A. Pietrosanto, "An intelligent FFT-Analyzer" *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 5, pp. 1173–1179, 1998, doi: 10.1109/19.746578.
- [60] J. S. Więckowski, D. Pietrusiak, W. Rafajłowicz, "Low frequency vibration in Heavy Machinery - Preliminary identification and control" *Proc. ISMA 2020 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. USD 2020 - Int. Conf. Uncertain. Struct. Dyn.*, pp. 3261–3270, 2020.
- [61] M. Norrlof, *Iterative Learning Control - Analysis, Design, and Experiments*, August. 2015.
- [62] M. H. Mohd Ghazali & W. Rahiman, "Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review" *Shock Vib.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9469318.
- [63] F. Bin Zahid, O. Z. Chao, S. Y. Khoo, "A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification" *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 8, 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02470-8.
- [64] O. Graja, K. Dziedziech, A. Jablonski, A. Ghorbel, F. Chaari M. Haddar, "Time Domain Identification of Multi-stage Planetary Gearbox Characteristic Frequencies Using Piezoelectric Strain Sensor" in *Modelling and Simulation of Complex Systems for Sustainable Energy Efficiency*, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-85584-0_12.
- [65] K. Dziedziech, K. Mendrok, P. Kurowski, T. Barszcz, "Multi-Variant Modal Analysis Approach for Large Industrial Machine" *Energies*, vol. 15, no. 5, 2022, doi: 10.3390/en15051871.
- [66] J. Gottvald, "The calculation and measurement of the natural frequencies of the bucket wheel excavator SchRs 1320/4x30" *Transport*, vol. 25, no. 3, pp. 269–277, 2010, doi: 10.3846/transport.2010.33.
- [67] S. N. Wang, "Static analysis and size optimization for the bed of gantry milling machine based on ANSYS workbench" *Curr. Trends Comput. Sci. Mech. Autom.*, vol. 2, pp. 298–304, 2018, doi: 10.1515/9783110584998-033.
- [68] V. Gursky, P. Krot, V. Korendiy, R. Zimroz "Dynamic Analysis of an Enhanced Multi-Frequency Inertial Exciter for Industrial Vibrating Machines" pp. 1–17, 2022.
- [69] Miloš Milovančević, Vlastimir Nikolić, Dalibor Petković, Ljubomir Vračar, Emil Veg, Natalija Tomić, Srđan Jović "Vibration analyzing in horizontal pumping aggregate by soft computing" *Measurement*, vol. 125, pp. 454–462, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.100>.
- [70] Nebojša Gnjatović, Srđan Bošnjak, Ivan Milenović, Aleksandar Stefanović "Bucket wheel excavators: Dynamic response as a criterion for validation of the total number of buckets" *Eng. Struct.*, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111313.
- [71] D. Arsić, N. Gnjatović, S. Sedmak, A. Arsić, M. Uhrić, "Integrity assessment and determination of residual fatigue life of vital parts of bucket-wheel excavator operating under dynamic loads" *Eng. Fail. Anal.*, vol. 105, no. June, pp. 182–195, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.072.
- [72] F. D. Popescu, S. M. Radu, A. Andraș, I. Kertesz Brînaș, "Simulation of the frequency response of the ERC 1400 Bucket Wheel Excavator boom, during the excavation process" *New Trends Prod. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 153–167, 2019, doi: 10.2478/ntp-2019-0016.

- [73] Jakub Andruszko, Przemysław Moczko, Damian Pietrusiak, Grzegorz Przybyłek, Eugeniusz Rusiński “Analysis of the Causes of Fatigue Cracks in the Carrying Structure of the Bucket Wheel in the SchRs4600 Excavator Using Experimental-Numerical Techniques” 2019.
- [74] B. Petrović, A. Petrović, D. Ignjatović, I. Grozdanović, D. Kozak, M. Katinić, “Assessment of the maximum possible extension of bucket wheel SchRs740 boom based on static and dynamic calculation” *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 23, no. 4, 2016, doi: 10.17559/tv-20151123152659.
- [75] K. S. Deore & M. A. Khandekar, “Design Machine Condition Monitoring System for ISO 10816-3 Standard using Fuzzy Logic” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 726–729, 2015, [Online]. Available: www.ijert.org
- [76] J. Robichaud & P. Eng, “Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis,” *Bretech Eng. Ltd.*, pp. 1–10, 2009, [Online]. Available: [http://www.hdutil.com.br/site/arquivos/manutencao/analise de vibracoes/ReferenceStandardsforVibrationMonitoringandAnalysis.pdf](http://www.hdutil.com.br/site/arquivos/manutencao/analise%20de%20vibracoes/ReferenceStandardsforVibrationMonitoringandAnalysis.pdf)
- [77] J. Tomaszewski & J. Rysinski, “Diagnostics of gears and compressors by means of advanced automatic system” *Acta Mech. Autom.*, vol. 9, no. 1, p. 19, 2015, doi: 10.1515/ama-2015-0004.
- [78] Y. Osada, T. Kawakami, T. Yokoi, Y. Tsujimoto, “Field Study on Pump Vibration and ISO’s New Criteria” *J. Fluids Eng.*, vol. 121, no. 4, pp. 798–803, 1999.
- [79] *Studija Optimizacija konstrukcije vedrica bagera u cilju povećanja kapaciteta*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2003.
- [80] M. Popović *et al.*, “ABRAZIVNO HABANJE REZNIH ZUBA I POUZDANOST ROTORNOG BAGERA” pp. 1–2, 2009, UDK/UDC 621.879.48-192.
- [81] M. Popović, Z. Jugović, R. Slavković, INTEGRISANI PRISTUP KONSTRUISANJA HABAJUĆIH REZNIH ELEMENATA KOD ROTORNIH BAGERA, International Conference on Tribology and WORKSHOP 07” pp. 259–262.
- [82] Dragan Novaković, “Optimizacija reznih elemenata rotornog bagera SchRs630” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2007.
- [83] B. Nedić & M. Lazić, *Obrada metala rezanjem*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2007.
- [84] R. Slavković, S. Dragičević, I. Milićević, A. Jovičić, N. Dučić, M. Popović, “Integrisan proces proizvodnje abrazivnih reznih elemenata bagera u rudarskoj industriji” *IMK-14, Istraživanje i razvoj*, vol. 24, 2018.
- [85] Vojin Vukotić, Dragan Čabrilo, “Povećanje pouzdanosti podsistema kopanja rotornog bagera podešavanjem triboloških kar reznih elemenata” 2013.
- [86] Predrag Jovančić, *Tehnička dijagnostika*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2020.
- [87] D. Cvetković & M. Prašćević, *Buka i vibracije*, 2005.
- [88] Miloš Milovančević, “IZBOR OPTIMALNE KONFIGURACIJE VIBRODIJAGNOSTIČKOG SISTEMA ZASNOVANOG NA PIC TEHNOLOGIJI,” Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, 2010.
- [89] Oscilacije, link: https://aggf.unibl.org/uploads/attachment/attachment_data/file/2289/Oscilacije2016.pdf”
- [90] D. Šaravanja & D. Petković, *Vibracijska dijagnostika - teorija i praksa*. Fakultet strojarstva i računarstva Sveučilišta u Mostaru i Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, 2010.

- [91] Ivica Jakovljević, Određivanje optimalnih parametara odreska rotornih bagera u funkciji otpora na kopanje, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2008.
- [92] Miletić Filip, Jovančić Predrag, Milovančević Miloš, Tanasijević Miloš, Đenadić Stevan “Determining the Impact of Cutting Elements State on the Bucket–Wheel Excavator Vibration and Energy Consumption” *J. Vib. Eng. Technol.*, 2022.
- [93] L. Farah, A. Haddouche, A. Haddouche, “Comparison between proposed fuzzy logic and anfis for MPPT control for photovoltaic system” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1065–1073, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1065-1073.
- [94] S. O. Sada & S. C. Ikpeseni, “Evaluation of ANN and ANFIS modeling ability in the prediction of AISI 1050 steel machining performance” *Heliyon*, vol. 7, no. 2, p. e06136, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06136.
- [95] A. F. Mashaly & A. A. Alazba, “ANFIS modeling and sensitivity analysis for estimating solar still productivity using measured operational and meteorological parameters,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 18, no. 4, pp. 1437–1448, 2018, doi: 10.2166/ws.2017.208.
- [96] J.-S. R. Jang, “ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993, doi: 10.1109/21.256541.
- [97] Мирослав Црногорац, “Оптимизација избора механичке методе експлоатације нафтних бушотина применом фази логике” Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, 2020.
- [98] Александар Мацаревић, “Методологија интегралне анализе сценарија енергетског развоја” Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, 2020.
- [99] Seyed Ali S. Razeghi, “Razvoj modela upravljanja cirkulacijom u postupku bušenja korišćenjem neuro fazi sistema” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2022.
- [100] Bojan Jovanović, “Upravljanje performansama redova čekanja u poštanskom saobraćaju” Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2015.
- [101] Ch. Sekhar & P. S. Meghana, “A Study on Backpropagation in Artificial Neural Networks” *Asia-Pacific J. Neural Networks Its Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–28, 2020, doi: 10.21742/ajnnia.2020.4.1.03.
- [102] A. Al-Hmouz, J. Shen, R. Al-Hmouz, J. Yan, “Modeling and simulation of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for mobile learning” *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 226–237, 2012, doi: 10.1109/TLT.2011.36.
- [103] K. Kumari & S. Yadav, “Linear regression analysis study” *J. Pract. Cardiovasc. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 33-36, 2018.
- [104] A. Toghroli, M. Mohammadhassani, M. Suhatri, M. Shariati, Z. Ibrahim, N.H.R. Sulong “Prediction of shear capacity of channel shear connectors using the ANFIS model” *Steel Compos. Struct.*, vol. 17, no. 5, pp. 623–639, 2014, doi: 10.12989/scs.2014.17.5.623.
- [105] Jovanović Ivana, “Model inteligentnog sistema adaptivnog upravljanja procesom prerade rude” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2015.
- [106] Kovačević Miljan, “Model za prognozu i procenu troškova izgradnje armiranobetonskih drumskih mostova” Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2018.

- [107] Miloš Milovančević, Dalibor Petković, Adaptive neuro-fuzzy estimation of compressive strength of hollow concrete masonry prisms, IRMES 2022, pp. 264–268.
- [108] D. Rašković, *Teorija Oscilacija*. Naučna knjiga, Beograd, 1965.
- [109] Milovančević, Miloš, Petković Dalibor, Optimal predictors by adaptive neuro fuzzy logic for ablation depth in micromachining by excimer laser, IRMES 2022, pp. 259–263.
- [110] D. Pamučar, Primena fuzzy logike i veštačkih neuronskih mreža u procesu donošenja odluke organa saobraćajne podrške, VOJNOTEHNIČKI GLASNIK, str. 125-145.
- [111] Fazi logika, *online materijal*, link: <http://tfzr.rs/Content/files/0/MR2020.pdf>
- [112] P. Keikhosrokiani, A. B. Naidu Anathan, S. I. Fadilah, S. Manickam, Z. Li, “Heartbeat sound classification using a hybrid adaptive neuro-fuzzy inferences system (ANFIS) and artificial bee colony” *Digit. Heal.*, vol. 9, 2023, doi: 10.1177/20552076221150741.
- [113] Tijana Trninić, Predikcije i korelacije berzanskog indeksa FTSE 100, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, 2018.

СПИСАК ПРИЛОГА

Докторска дисертација садржи 4 прилога:

Прилог 1 – Формулар коришћен при мерењу струје на роторном багеру

Прилог 2 – Формулар коришћен при мерењу вибрација на роторном багеру

Прилог 3 – Улазни подаци за ANFIS модел

Прилог 4 – Резултати ANFIS модела

Прилог 2 – Формулар коришћен при мерењу вибрација на роторном багеру

Параметар	Дебљина реза, [m]								
Итерација	0,25			0,4			0,5		
Кретање стреле	ЛЕВО	ДЕСНО		ЛЕВО	ДЕСНО		ЛЕВО	ДЕСНО	
ОЧИТАНЕ ВРЕДНОСТИ	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац
Фреквенција, [Hz]									
Амплитуда, [mm/s]									
Параметар	Дебљина реза, [m]								
Итерација	0,25			0,4			0,5		
Кретање стреле	ЛЕВО	ДЕСНО		ЛЕВО	ДЕСНО		ЛЕВО	ДЕСНО	
ОЧИТАНЕ ВРЕДНОСТИ	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац
Фреквенција, [Hz]									
Амплитуда, [mm/s]									
Параметар	Дебљина реза, [m]								
Итерација	0,25			0,4			0,5		
Кретање стреле	ЛЕВО	ДЕСНО		ЛЕВО	ДЕСНО		ЛЕВО	ДЕСНО	
ОЧИТАНЕ ВРЕДНОСТИ	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац	Аксијални правац	Хоризонтални правац	Вертикални правац
Фреквенција, [Hz]									
Амплитуда, [mm/s]									

Прилог 3 – Улазни подаци за ANFIS модел

Дефинисање улазних и излазних скупова података

Улазни скупови података			Излазни скуп података	Степен похабаности	
Q_{ost} , [m ³ /h]	I_{max} , [A]	N_{max} , [kW]	E_{max} , [kWh/m ³]		
2044	39,1	263,8	0,102	Доњи погон копања, Нови резни елементи	
2157	39,9	269,1	0,099		
1998	37,1	250,5	0,098		
1432	32,0	215,8	0,115		
1432	34,8	234,5	0,127		
1998	37,1	250,5	0,098		
2157	39,9	269,1	0,099		
2044	44,6	301,1	0,119		
3271	68,3	461,0	0,120		
3451	55,3	373,0	0,090		
3197	40,7	274,5	0,068		
2291	34,8	234,5	0,079		
2291	38,7	261,1	0,090		
3197	43,5	293,1	0,074		
3451	45,0	303,8	0,071		
3271	63,2	426,3	0,110		
4089	64,4	434,3	0,090		
4314	62,0	418,3	0,082		
3997	50,2	338,4	0,070		
2864	50,2	338,4	0,097		
2864	42,7	287,8	0,081		
2864	50,0	337,3	0,097		
2044	38,7	261,1	0,101		Горњи погон копања, Нови резни елементи
2157	39,1	263,8	0,097		
1998	35,9	242,5	0,095		
1432	33,6	226,5	0,122		
1432	37,5	253,1	0,139		
1998	35,9	242,5	0,095		
2157	43,5	293,1	0,109		
2044	45,4	306,4	0,122		
3271	59,6	402,4	0,103		
3451	68,3	461,0	0,113		
3197	59,3	399,7	0,105		
2291	35,6	239,8	0,082		
2291	34,0	229,2	0,077		
3197	44,2	298,4	0,075		
3451	54,1	365,1	0,088		
3271	67,2	453,0	0,117		
4089	63,2	426,3	0,088		
4314	60,4	407,7	0,079		
3997	47,4	319,8	0,065		
2864	38,3	258,5	0,071		
2864	32,8	221,2	0,059		
2864	37,0	249,6	0,068		

СПИСАК ПРИЛОГА

2044	77,8	524,9	0,220	Збирно – цео погон копања, Нови резни елементи	
2157	79,0	532,9	0,212		
1998	73,1	493,0	0,211		
1432	65,6	442,3	0,261		
1432	72,3	487,6	0,291		
1998	73,1	493,0	0,211		
2157	83,3	562,2	0,225		
2044	90,1	607,5	0,258		
3271	128,0	863,3	0,233		
3451	123,6	834,0	0,213		
3197	99,9	674,2	0,184		
2291	70,3	474,3	0,176		
2291	72,7	490,3	0,183		
3197	87,7	591,5	0,160		
3451	99,1	668,8	0,169		
3271	130,4	879,3	0,238		
4089	127,6	860,7	0,186		
4314	122,5	826,0	0,169		
3997	97,6	658,2	0,144		
2864	88,5	596,9	0,181		
2864	75,4	508,9	0,152		
2864	110,8	747,4	0,229		
2037	44,5	300,3	0,119		Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 25 %
2186	45,0	303,4	0,112		
2186	41,3	278,9	0,102		
2037	39,5	266,6	0,104		
2186	44,1	297,2	0,110		
2186	42,2	285,0	0,105		
2037	50,9	343,2	0,139		
2037	53,1	358,5	0,146		
3498	69,5	468,8	0,114		
3498	77,4	522,3	0,128		
3259	68,1	459,6	0,120		
3259	41,8	281,9	0,069		
3498	40,0	269,7	0,061		
3498	51,8	349,3	0,082		
3498	63,1	425,9	0,103		
3259	75,4	508,7	0,134		
4074	71,0	479,2	0,100		
4372	68,6	462,6	0,090		
4372	55,4	373,8	0,071		
4074	45,0	303,4	0,060		
4074	38,6	260,5	0,051		
4372	52,7	355,5	0,067		

СПИСАК ПРИЛОГА

2037	44,3	298,7	0,118	Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 25 %
2186	43,5	293,7	0,108	
2186	40,6	273,7	0,100	
2037	55,7	376,0	0,154	
2186	38,0	256,6	0,093	
2186	40,6	273,7	0,100	
2037	43,5	293,7	0,116	
2037	48,6	327,9	0,132	
3498	74,0	499,0	0,122	
3498	60,0	404,9	0,097	
3259	44,4	299,4	0,074	
3259	38,0	256,6	0,062	
3498	42,3	285,1	0,065	
3498	47,3	319,3	0,074	
3498	49,0	330,7	0,077	
3259	68,5	461,9	0,120	
4074	69,7	470,4	0,098	
4372	67,2	453,3	0,088	
4372	54,5	367,8	0,070	
4074	54,5	367,8	0,075	
4074	46,5	313,6	0,063	
4372	47,8	322,2	0,060	
2037	88,8	599,0	0,255	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 25 %
2186	88,5	597,0	0,237	
2186	81,9	552,6	0,218	
2037	95,3	642,6	0,275	
2186	82,1	553,8	0,218	
2186	82,8	558,7	0,220	
2037	94,4	636,9	0,272	
2037	101,8	686,4	0,294	
3498	143,5	967,8	0,246	
3498	137,4	927,1	0,235	
3259	112,5	759,0	0,205	
3259	79,8	538,5	0,142	
3498	82,2	554,8	0,137	
3498	99,1	668,7	0,167	
3498	112,2	756,7	0,190	
3259	143,9	970,6	0,265	
4074	140,8	949,6	0,207	
4372	135,8	915,9	0,186	
4372	109,9	741,6	0,149	
4074	99,5	671,2	0,144	
4074	85,1	574,1	0,122	
4372	100,5	677,6	0,135	

СПИСАК ПРИЛОГА

2037	46,3	312,3	0,125	Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 50 %
2186	46,8	315,5	0,117	
2186	43,0	290,0	0,107	
2037	40,2	270,9	0,106	
2186	44,9	302,8	0,112	
2189	43,0	290,0	0,107	
2037	52,0	350,6	0,142	
2037	54,3	366,5	0,149	
3498	71,3	481,2	0,117	
3498	79,6	537,0	0,132	
3259	69,0	465,6	0,121	
3259	42,5	286,8	0,071	
3498	40,6	274,1	0,062	
3498	52,9	356,9	0,084	
3498	64,7	436,6	0,105	
3259	77,5	522,9	0,138	
4074	73,0	492,2	0,103	
4372	70,4	474,9	0,092	
4372	56,7	382,4	0,073	
4074	45,8	309,1	0,062	
4074	39,2	264,5	0,051	
4372	53,9	363,3	0,069	
2037	45,1	304,5	0,121	Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 50 %
2186	44,4	299,5	0,111	
2186	41,3	278,7	0,102	
2037	56,6	381,6	0,156	
2186	38,7	260,9	0,094	
2186	41,3	278,7	0,102	
2037	44,4	299,5	0,119	
2037	49,7	335,1	0,135	
3498	76,0	513,0	0,126	
3498	61,5	415,1	0,100	
3259	45,3	305,4	0,076	
3259	38,7	260,9	0,063	
3498	43,1	290,6	0,067	
3498	48,4	326,2	0,076	
3498	50,1	338,0	0,079	
3259	70,3	474,4	0,124	
4074	71,6	483,3	0,101	
4372	69,0	465,5	0,090	
4372	55,8	376,6	0,072	
4074	55,8	376,6	0,077	
4074	47,5	320,2	0,064	
4372	48,8	329,1	0,062	

СПИСАК ПРИЛОГА

2037	91,4	616,8	0,263	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 50 %
2186	91,2	615,0	0,244	
2186	84,3	568,7	0,225	
2037	96,7	652,5	0,279	
2186	83,6	563,7	0,223	
2186	84,3	568,7	0,225	
2037	96,4	650,0	0,278	
2037	104,0	701,6	0,301	
3498	147,4	994,2	0,253	
3498	141,1	952,1	0,242	
3259	114,3	771,0	0,208	
3259	81,2	547,8	0,145	
3498	83,7	564,7	0,139	
3498	101,3	683,1	0,171	
3498	114,8	774,6	0,195	
3259	147,8	997,4	0,272	
4074	144,6	975,5	0,213	
4372	139,4	940,4	0,191	
4372	112,5	759,0	0,153	
4074	101,6	685,7	0,147	
4074	86,7	584,8	0,124	
4372	102,6	692,4	0,138	
1938	49,0	330,5	0,140	
2175	49,8	335,9	0,127	
2161	51,3	346,1	0,132	
1817	45,8	309,0	0,138	
1817	52,5	354,2	0,161	
2161	54,9	370,3	0,142	
2175	51,3	346,1	0,131	
1938	45,4	306,3	0,128	
3100	67,1	452,6	0,124	
3480	71,9	485,0	0,119	
3457	76,2	514,0	0,127	
2908	77,4	522,1	0,154	
2908	77,4	522,1	0,154	
3457	77,4	522,1	0,130	
3480	75,4	508,6	0,125	
3100	75,0	505,9	0,140	
3876	89,3	602,4	0,135	
4350	95,2	642,2	0,129	
4321	92,0	620,6	0,125	
3634	87,3	588,9	0,140	
3634	89,3	602,4	0,144	
3634	92,5	608,5	0,156	

СПИСАК ПРИЛОГА

1938	40,7	274,6	0,113	Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 75 %
2175	40,3	271,9	0,100	
2161	42,7	288,0	0,107	
1817	39,9	269,2	0,118	
1817	43,5	293,4	0,130	
2161	46,6	314,4	0,118	
2175	40,7	274,6	0,101	
1938	38,7	261,1	0,107	
3100	55,7	375,7	0,101	
3480	60,5	408,1	0,098	
3457	60,5	408,1	0,099	
2908	55,3	373,0	0,107	
2908	57,3	386,5	0,111	
3457	57,3	386,5	0,093	
3480	54,1	365,0	0,087	
3100	52,1	351,5	0,094	
3876	71,5	482,3	0,106	
4350	77,9	525,5	0,104	
4321	75,1	506,6	0,100	
3634	70,7	476,9	0,112	
3634	77,9	525,5	0,124	
3634	81,5	528,6	0,157	
1938	89,7	605,1	0,271	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 75 %
2175	90,1	607,8	0,242	
2161	94,0	634,1	0,255	
1817	85,7	578,1	0,275	
1817	96,0	647,6	0,310	
2161	101,5	684,7	0,277	
2175	92,0	620,6	0,248	
1938	84,1	567,3	0,253	
3100	122,8	828,4	0,236	
3480	132,4	893,2	0,227	
3457	136,7	922,2	0,237	
2908	132,7	895,2	0,273	
2908	134,7	908,7	0,277	
3457	134,7	908,7	0,233	
3480	129,5	873,6	0,222	
3100	127,1	857,4	0,245	
3876	160,8	1084,7	0,250	
4350	173,1	1167,7	0,240	
4321	167,1	1127,2	0,233	
3634	158,0	1065,9	0,262	
3634	167,2	1127,9	0,277	
3634	174,2	1175,1	0,290	

СПИСАК ПРИЛОГА

2044	61,2	412,8	0,170	Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 100 %
2157	64,4	434,4	0,170	
1998	68,8	464,1	0,197	
1432	70,1	472,9	0,281	
1432	72,8	491,1	0,293	
1998	75,2	507,3	0,217	
2157	78,1	526,9	0,210	
2044	76,8	518,1	0,217	
3271	80,8	545,1	0,143	
3451	83,2	561,3	0,140	
3197	85,2	574,8	0,155	
2291	87,4	589,6	0,223	
2291	88,2	595,0	0,225	
3197	90,1	607,8	0,165	
3451	92,8	626,0	0,158	
3271	94,2	635,5	0,169	
4089	95,2	642,2	0,137	
4314	96,4	650,3	0,131	
3997	98,5	664,5	0,145	
2864	99,8	673,2	0,205	
2864	102,4	690,8	0,211	
3997	104,2	702,9	0,154	
2044	49,1	331,2	0,133	
2157	50,6	341,3	0,130	
1998	51,3	346,1	0,143	
1432	53,1	358,2	0,207	
1432	55,2	372,4	0,216	
1998	58,4	394,0	0,165	
2157	60,6	408,8	0,159	
2044	62,7	423,0	0,174	
3271	64,2	433,1	0,112	
3451	66,4	447,9	0,110	
3197	68,9	464,8	0,124	
2291	70,2	473,6	0,176	
2291	72,8	491,1	0,183	
3197	74,8	504,6	0,135	
3451	77,2	520,8	0,129	
3271	80,1	540,3	0,142	
4089	81,9	552,5	0,116	
4314	83,2	561,3	0,112	
3997	85,6	577,4	0,125	
2864	87,1	587,6	0,178	
2864	88,9	599,7	0,181	
3997	90,2	608,5	0,132	

СПИСАК ПРИЛОГА

2044	110,3	744,1	0,320	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 100 %
2157	115,0	775,8	0,316	
1998	120,1	810,2	0,357	
1432	123,2	831,1	0,512	
1432	128,0	863,5	0,533	
1998	133,6	901,3	0,400	
2157	138,7	935,7	0,385	
2044	139,5	941,1	0,409	
3271	145,0	978,2	0,266	
3451	149,6	1009,2	0,260	
3197	154,1	1039,5	0,290	
2291	157,6	1063,2	0,414	
2291	161,0	1086,1	0,423	
3197	164,9	1112,4	0,311	
3451	170,0	1146,8	0,297	
3271	174,3	1175,8	0,322	
4089	177,1	1194,7	0,262	
4314	179,6	1211,6	0,252	
3997	184,1	1241,9	0,279	
2864	186,9	1260,8	0,395	
2864	191,3	1290,5	0,405	
3997	194,4	1311,4	0,295	

Подаци за тренирање ANFIS модела

Улазни скупови података			Излазни скуп података	Степен похабаности
Q_{ost} , [m ³ /h]	I_{max} , [A]	N_{max} , [kW]	E_{max} , [kWh/m ³]	
2044	39,1	263,8	0,102	Доњи погон копања, Нови резни елементи
2157	39,9	269,1	0,099	
1998	37,1	250,5	0,098	
1432	32,0	215,8	0,115	
1432	34,8	234,5	0,127	
1998	37,1	250,5	0,098	
2157	39,9	269,1	0,099	
2044	44,6	301,1	0,119	
3271	68,3	461,0	0,120	
3451	55,3	373,0	0,090	
3197	40,7	274,5	0,068	
2291	34,8	234,5	0,079	
2291	38,7	261,1	0,090	
3197	43,5	293,1	0,074	
3451	45,0	303,8	0,071	
3271	63,2	426,3	0,110	
4089	64,4	434,3	0,090	
4314	62,0	418,3	0,082	
3997	50,2	338,4	0,070	
2864	50,2	338,4	0,097	
2864	42,7	287,8	0,081	
2864	50,0	337,3	0,097	
2044	77,8	524,9	0,220	Збирно – цео погон копања, Нови резни елементи
2157	79,0	532,9	0,212	
1998	73,1	493,0	0,211	
1432	65,6	442,3	0,261	
1432	72,3	487,6	0,291	
1998	73,1	493,0	0,211	
2157	83,3	562,2	0,225	
2044	90,1	607,5	0,258	
3271	128,0	863,3	0,233	
3451	123,6	834,0	0,213	
3197	99,9	674,2	0,184	
2291	70,3	474,3	0,176	
2291	72,7	490,3	0,183	
3197	87,7	591,5	0,160	
3451	99,1	668,8	0,169	
3271	130,4	879,3	0,238	
4089	127,6	860,7	0,186	
4314	122,5	826,0	0,169	
3997	97,6	658,2	0,144	
2864	88,5	596,9	0,181	
2864	75,4	508,9	0,152	
2864	110,8	747,4	0,229	

СПИСАК ПРИЛОГА

2037	44,5	300,3	0,119	Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 25 %
2186	45,0	303,4	0,112	
2186	41,3	278,9	0,102	
2037	39,5	266,6	0,104	
2186	44,1	297,2	0,110	
2186	42,2	285,0	0,105	
2037	50,9	343,2	0,139	
2037	53,1	358,5	0,146	
3498	69,5	468,8	0,114	
3498	77,4	522,3	0,128	
3259	68,1	459,6	0,120	
3259	41,8	281,9	0,069	
3498	40,0	269,7	0,061	
3498	51,8	349,3	0,082	
3498	63,1	425,9	0,103	
3259	75,4	508,7	0,134	
4074	71,0	479,2	0,100	
4372	68,6	462,6	0,090	
4372	55,4	373,8	0,071	
4074	45,0	303,4	0,060	
4074	38,6	260,5	0,051	
4372	52,7	355,5	0,067	
2037	88,8	599,0	0,255	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 25 %
2186	88,5	597,0	0,237	
2186	81,9	552,6	0,218	
2037	95,3	642,6	0,275	
2186	82,1	553,8	0,218	
2186	82,8	558,7	0,220	
2037	94,4	636,9	0,272	
2037	101,8	686,4	0,294	
3498	143,5	967,8	0,246	
3498	137,4	927,1	0,235	
3259	112,5	759,0	0,205	
3259	79,8	538,5	0,142	
3498	82,2	554,8	0,137	
3498	99,1	668,7	0,167	
3498	112,2	756,7	0,190	
3259	143,9	970,6	0,265	
4074	140,8	949,6	0,207	
4372	135,8	915,9	0,186	
4372	109,9	741,6	0,149	
4074	99,5	671,2	0,144	
4074	85,1	574,1	0,122	
4372	100,5	677,6	0,135	

СПИСАК ПРИЛОГА

2037	46,3	312,3	0,125	Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 50 %
2186	46,8	315,5	0,117	
2186	43,0	290,0	0,107	
2037	40,2	270,9	0,106	
2186	44,9	302,8	0,112	
2189	43,0	290,0	0,107	
2037	52,0	350,6	0,142	
2037	54,3	366,5	0,149	
3498	71,3	481,2	0,117	
3498	79,6	537,0	0,132	
3259	69,0	465,6	0,121	
3259	42,5	286,8	0,071	
3498	40,6	274,1	0,062	
3498	52,9	356,9	0,084	
3498	64,7	436,6	0,105	
3259	77,5	522,9	0,138	
4074	73,0	492,2	0,103	
4372	70,4	474,9	0,092	
4372	56,7	382,4	0,073	
4074	45,8	309,1	0,062	
4074	39,2	264,5	0,051	
4372	53,9	363,3	0,069	
2037	91,4	616,8	0,263	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 50 %
2186	91,2	615,0	0,244	
2186	84,3	568,7	0,225	
2037	96,7	652,5	0,279	
2186	83,6	563,7	0,223	
2186	84,3	568,7	0,225	
2037	96,4	650,0	0,278	
2037	104,0	701,6	0,301	
3498	147,4	994,2	0,253	
3498	141,1	952,1	0,242	
3259	114,3	771,0	0,208	
3259	81,2	547,8	0,145	
3498	83,7	564,7	0,139	
3498	101,3	683,1	0,171	
3498	114,8	774,6	0,195	
3259	147,8	997,4	0,272	
4074	144,6	975,5	0,213	
4372	139,4	940,4	0,191	
4372	112,5	759,0	0,153	
4074	101,6	685,7	0,147	
4074	86,7	584,8	0,124	
4372	102,6	692,4	0,138	

СПИСАК ПРИЛОГА

1938	49,0	330,5	0,140	Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 75 %
2175	49,8	335,9	0,127	
2161	51,3	346,1	0,132	
1817	45,8	309,0	0,138	
1817	52,5	354,2	0,161	
2161	54,9	370,3	0,142	
2175	51,3	346,1	0,131	
1938	45,4	306,3	0,128	
3100	67,1	452,6	0,124	
3480	71,9	485,0	0,119	
3457	76,2	514,0	0,127	
2908	77,4	522,1	0,154	
2908	77,4	522,1	0,154	
3457	77,4	522,1	0,130	
3480	75,4	508,6	0,125	
3100	75,0	505,9	0,140	
3876	89,3	602,4	0,135	
4350	95,2	642,2	0,129	
4321	92,0	620,6	0,125	
3634	87,3	588,9	0,140	
3634	89,3	602,4	0,144	
3634	92,5	608,5	0,156	
1938	89,7	605,1	0,271	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 75 %
2175	90,1	607,8	0,242	
2161	94,0	634,1	0,255	
1817	85,7	578,1	0,275	
1817	96,0	647,6	0,310	
2161	101,5	684,7	0,277	
2175	92,0	620,6	0,248	
1938	84,1	567,3	0,253	
3100	122,8	828,4	0,236	
3480	132,4	893,2	0,227	
3457	136,7	922,2	0,237	
2908	132,7	895,2	0,273	
2908	134,7	908,7	0,277	
3457	134,7	908,7	0,233	
3480	129,5	873,6	0,222	
3100	127,1	857,4	0,245	
3876	160,8	1084,7	0,250	
4350	173,1	1167,7	0,240	
4321	167,1	1127,2	0,233	
3634	158,0	1065,9	0,262	
3634	167,2	1127,9	0,277	
3634	174,2	1175,1	0,290	

СПИСАК ПРИЛОГА

2044	61,2	412,8	0,170	Доњи погон копања, Похабаност резних елемената 100 %
2157	64,4	434,4	0,170	
1998	68,8	464,1	0,197	
1432	70,1	472,9	0,281	
1432	72,8	491,1	0,293	
1998	75,2	507,3	0,217	
2157	78,1	526,9	0,210	
2044	76,8	518,1	0,217	
3271	80,8	545,1	0,143	
3451	83,2	561,3	0,140	
3197	85,2	574,8	0,155	
2291	87,4	589,6	0,223	
2291	88,2	595,0	0,225	
3197	90,1	607,8	0,165	
3451	92,8	626,0	0,158	
3271	94,2	635,5	0,169	
4089	95,2	642,2	0,137	
4314	96,4	650,3	0,131	
3997	98,5	664,5	0,145	
2864	99,8	673,2	0,205	
2864	102,4	690,8	0,211	
3997	104,2	702,9	0,154	
2044	110,3	744,1	0,320	Збирно – цео погон копања, Похабаност резних елемената 100 %
2157	115,0	775,8	0,316	
1998	120,1	810,2	0,357	
1432	123,2	831,1	0,512	
1432	128,0	863,5	0,533	
1998	133,6	901,3	0,400	
2157	138,7	935,7	0,385	
2044	139,5	941,1	0,409	
3271	145,0	978,2	0,266	
3451	149,6	1009,2	0,260	
3197	154,1	1039,5	0,290	
2291	157,6	1063,2	0,414	
2291	161,0	1086,1	0,423	
3197	164,9	1112,4	0,311	
3451	170,0	1146,8	0,297	
3271	174,3	1175,8	0,322	
4089	177,1	1194,7	0,262	
4314	179,6	1211,6	0,252	
3997	184,1	1241,9	0,279	
2864	186,9	1260,8	0,395	
2864	191,3	1290,5	0,405	
3997	194,4	1311,4	0,295	

Подаци за тестирање ANFIS модела

2044	38,7	261,1	0,101	Горњи погон копања, Нови резни елементи	
2157	39,1	263,8	0,097		
1998	35,9	242,5	0,095		
1432	33,6	226,5	0,122		
1432	37,5	253,1	0,139		
1998	35,9	242,5	0,095		
2157	43,5	293,1	0,109		
2044	45,4	306,4	0,122		
3271	59,6	402,4	0,103		
3451	68,3	461,0	0,113		
3197	59,3	399,7	0,105		
2291	35,6	239,8	0,082		
2291	34,0	229,2	0,077		
3197	44,2	298,4	0,075		
3451	54,1	365,1	0,088		
3271	67,2	453,0	0,117		
4089	63,2	426,3	0,088		
4314	60,4	407,7	0,079		
3997	47,4	319,8	0,065		
2864	38,3	258,5	0,071		
2864	32,8	221,2	0,059		
2864	37,0	249,6	0,068		
2037	44,3	298,7	0,118		Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 25 %
2186	43,5	293,7	0,108		
2186	40,6	273,7	0,100		
2037	55,7	376,0	0,154		
2186	38,0	256,6	0,093		
2186	40,6	273,7	0,100		
2037	43,5	293,7	0,116		
2037	48,6	327,9	0,132		
3498	74,0	499,0	0,122		
3498	60,0	404,9	0,097		
3259	44,4	299,4	0,074		
3259	38,0	256,6	0,062		
3498	42,3	285,1	0,065		
3498	47,3	319,3	0,074		
3498	49,0	330,7	0,077		
3259	68,5	461,9	0,120		
4074	69,7	470,4	0,098		
4372	67,2	453,3	0,088		
4372	54,5	367,8	0,070		
4074	54,5	367,8	0,075		
4074	46,5	313,6	0,063		
4372	47,8	322,2	0,060		

СПИСАК ПРИЛОГА

2037	45,1	304,5	0,121	Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 50 %
2186	44,4	299,5	0,111	
2186	41,3	278,7	0,102	
2037	56,6	381,6	0,156	
2186	38,7	260,9	0,094	
2186	41,3	278,7	0,102	
2037	44,4	299,5	0,119	
2037	49,7	335,1	0,135	
3498	76,0	513,0	0,126	
3498	61,5	415,1	0,100	
3259	45,3	305,4	0,076	
3259	38,7	260,9	0,063	
3498	43,1	290,6	0,067	
3498	48,4	326,2	0,076	
3498	50,1	338,0	0,079	
3259	70,3	474,4	0,124	
4074	71,6	483,3	0,101	
4372	69,0	465,5	0,090	
4372	55,8	376,6	0,072	
4074	55,8	376,6	0,077	
4074	47,5	320,2	0,064	
4372	48,8	329,1	0,062	
1938	40,7	274,6	0,113	Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 75 %
2175	40,3	271,9	0,100	
2161	42,7	288,0	0,107	
1817	39,9	269,2	0,118	
1817	43,5	293,4	0,130	
2161	46,6	314,4	0,118	
2175	40,7	274,6	0,101	
1938	38,7	261,1	0,107	
3100	55,7	375,7	0,101	
3480	60,5	408,1	0,098	
3457	60,5	408,1	0,099	
2908	55,3	373,0	0,107	
2908	57,3	386,5	0,111	
3457	57,3	386,5	0,093	
3480	54,1	365,0	0,087	
3100	52,1	351,5	0,094	
3876	71,5	482,3	0,106	
4350	77,9	525,5	0,104	
4321	75,1	506,6	0,100	
3634	70,7	476,9	0,112	
3634	77,9	525,5	0,124	
3634	81,5	528,6	0,157	

СПИСАК ПРИЛОГА

2044	49,1	331,2	0,133	Горњи погон копања, Похабаност резних елемената 100 %
2157	50,6	341,3	0,130	
1998	51,3	346,1	0,143	
1432	53,1	358,2	0,207	
1432	55,2	372,4	0,216	
1998	58,4	394,0	0,165	
2157	60,6	408,8	0,159	
2044	62,7	423,0	0,174	
3271	64,2	433,1	0,112	
3451	66,4	447,9	0,110	
3197	68,9	464,8	0,124	
2291	70,2	473,6	0,176	
2291	72,8	491,1	0,183	
3197	74,8	504,6	0,135	
3451	77,2	520,8	0,129	
3271	80,1	540,3	0,142	
4089	81,9	552,5	0,116	
4314	83,2	561,3	0,112	
3997	85,6	577,4	0,125	
2864	87,1	587,6	0,178	
2864	88,9	599,7	0,181	
3997	90,2	608,5	0,132	

Прилог 4 – Резултати ANFIS модела

Тренинг скуп података

ANF1	ANF2	ANF3	ANF4	ANF5	ANF6	ANF7	ANF8	ANF9
Предикција специфичне потрошње електричне енергије E_{max} , [kWh/m ³]								
0,121	0,106	0,100	0,105	0,109	0,098	0,125	0,105	0,102
0,112	0,103	0,095	0,102	0,101	0,099	0,114	0,105	0,096
0,123	0,106	0,102	0,102	0,110	0,095	0,129	0,105	0,105
0,136	0,123	0,123	0,118	0,126	0,119	0,141	0,122	0,118
0,138	0,121	0,119	0,125	0,111	0,096	0,141	0,122	0,118
0,123	0,106	0,102	0,102	0,110	0,095	0,129	0,105	0,105
0,112	0,103	0,095	0,102	0,101	0,099	0,114	0,105	0,096
0,125	0,113	0,119	0,120	0,118	0,113	0,125	0,109	0,103
0,111	0,121	0,121	0,117	0,127	0,105	0,108	0,123	0,103
0,083	0,095	0,091	0,088	0,087	0,111	0,081	0,118	0,098
0,078	0,074	0,069	0,062	0,073	0,060	0,084	0,075	0,069
0,098	0,090	0,087	0,081	0,088	0,093	0,101	0,091	0,100
0,099	0,091	0,091	0,091	0,089	0,094	0,101	0,091	0,100
0,079	0,070	0,075	0,068	0,074	0,067	0,084	0,065	0,071
0,076	0,065	0,068	0,069	0,068	0,064	0,081	0,058	0,060
0,099	0,115	0,113	0,107	0,125	0,096	0,095	0,123	0,106
0,080	0,094	0,083	0,090	0,106	0,066	0,080	0,094	0,062
0,075	0,085	0,078	0,081	0,096	0,069	0,075	0,082	0,073
0,067	0,071	0,077	0,070	0,061	0,060	0,065	0,065	0,087
0,086	0,099	0,097	0,089	0,082	0,069	0,084	0,095	0,097
0,082	0,071	0,080	0,072	0,069	0,047	0,084	0,067	0,042
0,086	0,097	0,097	0,089	0,082	0,068	0,084	0,092	0,097
0,237	0,211	0,228	0,222	0,217	0,254	0,248	0,197	0,237
0,222	0,210	0,216	0,216	0,204	0,250	0,227	0,203	0,220
0,216	0,198	0,220	0,210	0,214	0,188	0,231	0,182	0,245
0,200	0,281	0,261	0,226	0,329	0,184	0,208	0,282	0,138
0,241	0,281	0,292	0,253	0,249	0,253	0,254	0,282	0,310
0,216	0,198	0,220	0,210	0,214	0,188	0,231	0,182	0,245
0,242	0,234	0,222	0,230	0,218	0,229	0,251	0,234	0,220
0,292	0,267	0,261	0,265	0,268	0,239	0,313	0,271	0,206
0,223	0,234	0,232	0,231	0,277	0,255	0,208	0,247	0,264
0,206	0,223	0,218	0,211	0,208	0,257	0,198	0,243	0,247
0,187	0,177	0,181	0,174	0,201	0,217	0,208	0,176	0,212
0,157	0,183	0,188	0,178	0,175	0,146	0,151	0,188	0,178
0,168	0,183	0,198	0,185	0,175	0,166	0,162	0,188	0,220
0,168	0,165	0,160	0,154	0,167	0,140	0,201	0,176	0,123
0,177	0,167	0,169	0,164	0,184	0,185	0,198	0,167	0,186
0,228	0,236	0,231	0,237	0,287	0,232	0,208	0,247	0,264
0,170	0,194	0,186	0,184	0,210	0,125	0,151	0,209	0,154
0,162	0,176	0,171	0,166	0,180	0,164	0,151	0,188	0,183
0,149	0,147	0,148	0,144	0,161	0,142	0,151	0,147	0,147
0,178	0,181	0,174	0,169	0,176	0,109	0,206	0,201	0,109
0,141	0,150	0,155	0,144	0,133	0,121	0,135	0,155	0,152
0,210	0,222	0,220	0,206	0,162	0,129	0,208	0,159	0,153

СПИСАК ПРИЛОГА

0,125	0,113	0,119	0,120	0,118	0,112	0,125	0,109	0,102
0,112	0,109	0,115	0,114	0,106	0,111	0,111	0,110	0,109
0,110	0,103	0,099	0,104	0,100	0,101	0,111	0,105	0,095
0,122	0,106	0,101	0,107	0,110	0,098	0,125	0,105	0,099
0,112	0,107	0,110	0,111	0,104	0,108	0,111	0,108	0,103
0,110	0,104	0,102	0,106	0,101	0,103	0,111	0,105	0,095
0,132	0,143	0,145	0,138	0,137	0,145	0,125	0,144	0,154
0,136	0,155	0,148	0,145	0,147	0,160	0,125	0,164	0,154
0,108	0,114	0,117	0,113	0,115	0,098	0,107	0,115	0,099
0,132	0,124	0,130	0,127	0,119	0,141	0,135	0,113	0,134
0,111	0,121	0,121	0,117	0,128	0,105	0,108	0,123	0,102
0,077	0,072	0,069	0,064	0,072	0,061	0,084	0,074	0,065
0,073	0,063	0,062	0,058	0,064	0,051	0,079	0,067	0,059
0,079	0,082	0,085	0,081	0,076	0,090	0,079	0,083	0,098
0,093	0,108	0,097	0,102	0,114	0,089	0,090	0,115	0,086
0,133	0,132	0,138	0,130	0,130	0,149	0,135	0,127	0,153
0,094	0,097	0,102	0,100	0,092	0,083	0,095	0,096	0,114
0,086	0,087	0,090	0,088	0,090	0,073	0,089	0,082	0,067
0,068	0,074	0,072	0,071	0,072	0,082	0,065	0,082	0,073
0,065	0,054	0,057	0,061	0,053	0,045	0,065	0,047	0,051
0,063	0,054	0,052	0,052	0,049	0,035	0,065	0,056	0,052
0,066	0,066	0,068	0,067	0,064	0,069	0,065	0,065	0,073
0,290	0,265	0,255	0,261	0,262	0,235	0,315	0,271	0,201
0,254	0,252	0,234	0,244	0,239	0,225	0,275	0,271	0,205
0,230	0,222	0,218	0,222	0,209	0,232	0,236	0,223	0,220
0,308	0,275	0,288	0,285	0,304	0,274	0,315	0,271	0,305
0,230	0,223	0,218	0,223	0,209	0,231	0,237	0,224	0,220
0,233	0,227	0,219	0,225	0,212	0,228	0,241	0,230	0,220
0,306	0,274	0,286	0,282	0,298	0,266	0,315	0,271	0,297
0,321	0,281	0,295	0,310	0,279	0,351	0,315	0,271	0,305
0,253	0,242	0,249	0,251	0,220	0,255	0,241	0,211	0,269
0,232	0,231	0,237	0,238	0,220	0,213	0,193	0,241	0,189
0,200	0,207	0,203	0,191	0,177	0,165	0,208	0,184	0,152
0,147	0,144	0,143	0,138	0,138	0,167	0,155	0,144	0,153
0,145	0,138	0,134	0,135	0,129	0,132	0,157	0,126	0,134
0,175	0,163	0,168	0,163	0,181	0,181	0,193	0,162	0,186
0,189	0,184	0,186	0,183	0,150	0,151	0,193	0,149	0,139
0,275	0,258	0,274	0,270	0,250	0,250	0,270	0,238	0,276
0,186	0,205	0,199	0,203	0,175	0,131	0,162	0,185	0,206
0,173	0,183	0,181	0,175	0,193	0,140	0,151	0,188	0,127
0,154	0,146	0,146	0,152	0,127	0,120	0,151	0,120	0,122
0,149	0,143	0,146	0,145	0,147	0,155	0,151	0,143	0,147
0,129	0,120	0,120	0,122	0,105	0,105	0,137	0,112	0,123
0,147	0,135	0,137	0,136	0,136	0,158	0,151	0,137	0,147
0,127	0,118	0,129	0,125	0,122	0,120	0,125	0,115	0,122
0,114	0,116	0,123	0,118	0,111	0,117	0,111	0,117	0,125
0,111	0,105	0,105	0,108	0,102	0,105	0,111	0,106	0,098
0,122	0,106	0,102	0,108	0,111	0,100	0,125	0,105	0,095
0,112	0,109	0,114	0,113	0,106	0,110	0,111	0,110	0,108
0,111	0,105	0,105	0,108	0,102	0,105	0,111	0,106	0,098
0,134	0,149	0,146	0,141	0,142	0,152	0,125	0,153	0,154
0,138	0,160	0,149	0,148	0,152	0,169	0,125	0,177	0,154
0,113	0,115	0,122	0,116	0,115	0,105	0,112	0,115	0,131
0,138	0,129	0,132	0,130	0,123	0,142	0,145	0,116	0,134

СПИСАК ПРИЛОГА

0,113	0,122	0,123	0,118	0,127	0,108	0,111	0,123	0,112
0,078	0,071	0,070	0,066	0,072	0,062	0,084	0,070	0,066
0,074	0,063	0,062	0,060	0,064	0,052	0,079	0,067	0,055
0,080	0,087	0,087	0,083	0,079	0,096	0,079	0,094	0,098
0,097	0,110	0,101	0,104	0,120	0,089	0,094	0,115	0,075
0,140	0,137	0,140	0,134	0,133	0,169	0,144	0,135	0,153
0,099	0,097	0,107	0,103	0,090	0,092	0,100	0,096	0,123
0,090	0,087	0,094	0,091	0,085	0,077	0,094	0,082	0,086
0,069	0,077	0,074	0,072	0,076	0,079	0,066	0,082	0,073
0,065	0,055	0,060	0,062	0,054	0,047	0,065	0,047	0,058
0,063	0,054	0,051	0,053	0,049	0,036	0,065	0,056	0,050
0,067	0,070	0,070	0,069	0,067	0,075	0,065	0,074	0,073
0,298	0,270	0,271	0,271	0,277	0,245	0,315	0,271	0,222
0,261	0,258	0,246	0,253	0,255	0,234	0,277	0,271	0,226
0,239	0,235	0,222	0,230	0,218	0,224	0,250	0,242	0,220
0,311	0,276	0,292	0,291	0,316	0,289	0,315	0,271	0,305
0,237	0,232	0,220	0,228	0,215	0,226	0,246	0,236	0,220
0,239	0,235	0,222	0,230	0,218	0,224	0,250	0,242	0,220
0,310	0,276	0,291	0,289	0,313	0,285	0,315	0,271	0,305
0,325	0,283	0,295	0,318	0,270	0,305	0,315	0,271	0,305
0,269	0,256	0,252	0,259	0,232	0,306	0,268	0,228	0,269
0,244	0,236	0,246	0,246	0,217	0,233	0,223	0,221	0,269
0,202	0,215	0,212	0,195	0,182	0,171	0,208	0,194	0,165
0,151	0,149	0,144	0,140	0,141	0,157	0,162	0,150	0,153
0,149	0,142	0,136	0,137	0,134	0,128	0,165	0,134	0,134
0,177	0,165	0,169	0,166	0,169	0,202	0,193	0,162	0,186
0,192	0,194	0,198	0,188	0,156	0,160	0,193	0,166	0,161
0,293	0,276	0,278	0,279	0,263	0,301	0,301	0,265	0,276
0,193	0,212	0,221	0,208	0,177	0,157	0,175	0,160	0,217
0,177	0,185	0,194	0,179	0,175	0,136	0,157	0,183	0,142
0,155	0,152	0,152	0,156	0,132	0,118	0,151	0,120	0,103
0,151	0,145	0,145	0,148	0,138	0,173	0,151	0,143	0,147
0,132	0,125	0,122	0,124	0,110	0,104	0,143	0,135	0,103
0,148	0,137	0,139	0,140	0,130	0,160	0,151	0,137	0,147
0,137	0,133	0,146	0,138	0,132	0,138	0,135	0,130	0,160
0,118	0,133	0,131	0,127	0,121	0,132	0,112	0,135	0,144
0,121	0,142	0,134	0,132	0,127	0,141	0,113	0,147	0,144
0,139	0,119	0,133	0,136	0,119	0,118	0,141	0,110	0,115
0,148	0,162	0,161	0,156	0,152	0,161	0,141	0,163	0,160
0,126	0,160	0,139	0,142	0,143	0,165	0,113	0,182	0,144
0,120	0,142	0,134	0,131	0,126	0,140	0,112	0,147	0,144
0,133	0,116	0,128	0,128	0,120	0,118	0,135	0,112	0,110
0,111	0,125	0,119	0,119	0,133	0,106	0,105	0,123	0,098
0,116	0,117	0,123	0,118	0,116	0,109	0,115	0,116	0,134
0,130	0,125	0,129	0,126	0,120	0,136	0,132	0,118	0,134
0,147	0,145	0,155	0,144	0,136	0,147	0,143	0,136	0,153
0,147	0,145	0,155	0,144	0,136	0,147	0,143	0,136	0,153
0,133	0,127	0,131	0,128	0,122	0,145	0,137	0,120	0,134
0,126	0,122	0,128	0,124	0,118	0,128	0,128	0,115	0,134
0,135	0,134	0,141	0,134	0,133	0,157	0,133	0,126	0,156
0,141	0,142	0,132	0,135	0,130	0,115	0,156	0,149	0,086
0,141	0,130	0,129	0,129	0,139	0,116	0,151	0,137	0,147
0,138	0,126	0,120	0,125	0,121	0,101	0,151	0,137	0,091
0,150	0,143	0,140	0,139	0,137	0,121	0,172	0,149	0,114

СПИСАК ПРИЛОГА

0,153	0,147	0,147	0,142	0,145	0,123	0,180	0,149	0,111
0,156	0,150	0,156	0,146	0,154	0,128	0,180	0,149	0,126
0,311	0,274	0,270	0,276	0,251	0,244	0,340	0,271	0,199
0,261	0,257	0,242	0,250	0,250	0,230	0,280	0,271	0,214
0,275	0,265	0,258	0,265	0,278	0,253	0,284	0,271	0,282
0,309	0,276	0,254	0,273	0,214	0,237	0,338	0,231	0,240
0,344	0,303	0,297	0,316	0,249	0,275	0,356	0,245	0,308
0,289	0,273	0,267	0,291	0,263	0,336	0,284	0,271	0,299
0,266	0,261	0,250	0,257	0,262	0,239	0,280	0,271	0,239
0,288	0,253	0,249	0,255	0,229	0,241	0,312	0,241	0,249
0,219	0,239	0,243	0,226	0,226	0,271	0,208	0,247	0,268
0,220	0,228	0,225	0,229	0,240	0,213	0,195	0,241	0,229
0,233	0,233	0,235	0,239	0,227	0,211	0,197	0,243	0,184
0,247	0,278	0,286	0,266	0,237	0,153	0,208	0,251	0,189
0,253	0,275	0,263	0,272	0,226	0,145	0,208	0,251	0,139
0,228	0,231	0,229	0,235	0,234	0,209	0,197	0,243	0,189
0,214	0,226	0,222	0,222	0,258	0,228	0,195	0,241	0,247
0,227	0,242	0,243	0,238	0,266	0,274	0,208	0,247	0,268
0,251	0,257	0,245	0,251	0,302	0,161	0,240	0,282	0,165
0,246	0,238	0,251	0,228	0,217	0,252	0,258	0,241	0,257
0,239	0,235	0,228	0,221	0,244	0,204	0,248	0,260	0,257
0,284	0,263	0,256	0,268	0,297	0,195	0,286	0,282	0,174
0,301	0,271	0,292	0,285	0,287	0,266	0,305	0,282	0,292
0,307	0,282	0,276	0,298	0,242	0,271	0,308	0,226	0,292
0,154	0,178	0,154	0,168	0,190	0,135	0,152	0,182	0,154
0,152	0,181	0,156	0,170	0,199	0,128	0,150	0,182	0,106
0,192	0,190	0,191	0,196	0,214	0,149	0,205	0,182	0,147
0,226	0,283	0,281	0,244	0,273	0,228	0,239	0,282	0,253
0,245	0,281	0,294	0,255	0,244	0,259	0,257	0,282	0,310
0,229	0,203	0,228	0,217	0,215	0,216	0,243	0,185	0,245
0,218	0,206	0,214	0,213	0,202	0,250	0,222	0,198	0,220
0,232	0,206	0,226	0,219	0,215	0,237	0,242	0,192	0,237
0,149	0,147	0,143	0,139	0,139	0,158	0,160	0,148	0,152
0,150	0,146	0,136	0,138	0,135	0,132	0,166	0,142	0,134
0,162	0,161	0,153	0,149	0,157	0,144	0,185	0,167	0,156
0,227	0,228	0,225	0,229	0,218	0,211	0,242	0,248	0,205
0,229	0,231	0,228	0,231	0,222	0,212	0,247	0,248	0,205
0,172	0,168	0,168	0,158	0,178	0,143	0,208	0,176	0,122
0,169	0,162	0,161	0,154	0,174	0,141	0,198	0,167	0,147
0,177	0,171	0,174	0,162	0,195	0,158	0,208	0,176	0,194
0,144	0,139	0,143	0,137	0,150	0,125	0,151	0,142	0,147
0,143	0,132	0,132	0,132	0,149	0,125	0,151	0,137	0,147
0,150	0,147	0,148	0,146	0,155	0,149	0,151	0,147	0,147
0,196	0,202	0,211	0,188	0,209	0,185	0,208	0,201	0,220
0,199	0,205	0,213	0,193	0,191	0,197	0,208	0,201	0,220
0,155	0,150	0,143	0,155	0,130	0,141	0,151	0,147	0,147
0,332	0,300	0,288	0,342	0,270	0,221	0,313	0,236	0,228
0,309	0,333	0,323	0,339	0,268	0,199	0,285	0,272	0,189
0,355	0,384	0,372	0,376	0,364	0,234	0,325	0,399	0,381
0,408	0,509	0,526	0,472	0,415	0,471	0,356	0,522	0,510
0,414	0,535	0,519	0,475	0,544	0,413	0,356	0,522	0,510
0,375	0,404	0,382	0,396	0,456	0,216	0,325	0,399	0,284
0,350	0,377	0,383	0,381	0,327	0,232	0,285	0,399	0,349
0,377	0,382	0,414	0,396	0,359	0,212	0,306	0,380	0,267

СПИСАК ПРИЛОГА

0,279	0,263	0,275	0,272	0,251	0,263	0,279	0,243	0,275
0,284	0,271	0,254	0,267	0,249	0,283	0,290	0,267	0,269
0,325	0,298	0,269	0,298	0,311	0,212	0,336	0,330	0,276
0,377	0,418	0,418	0,383	0,321	0,251	0,321	0,412	0,367
0,380	0,421	0,419	0,385	0,368	0,221	0,328	0,412	0,251
0,352	0,308	0,316	0,321	0,357	0,205	0,361	0,330	0,305
0,334	0,296	0,298	0,308	0,279	0,325	0,339	0,314	0,292
0,352	0,313	0,319	0,333	0,264	0,246	0,357	0,241	0,302
0,257	0,262	0,269	0,260	0,216	0,194	0,258	0,204	0,271
0,252	0,252	0,241	0,243	0,206	0,160	0,258	0,206	0,190
0,266	0,287	0,272	0,282	0,221	0,171	0,258	0,286	0,187
0,366	0,387	0,366	0,390	0,263	0,168	0,357	0,396	0,326
0,365	0,414	0,428	0,396	0,307	0,217	0,357	0,396	0,366
0,270	0,291	0,298	0,302	0,273	0,244	0,258	0,302	0,295

Тест скуп података

ANF1	ANF2	ANF3	ANF4	ANF5	ANF6	ANF7	ANF8	ANF9
Предикција специфичне потрошње електричне енергије E_{max} , [kWh/m ³]								
0,121	0,105	0,100	0,104	0,109	0,097	0,125	0,105	0,104
0,111	0,103	0,094	0,099	0,100	0,097	0,114	0,105	0,099
0,123	0,105	0,101	0,099	0,110	0,094	0,129	0,105	0,105
0,137	0,122	0,121	0,122	0,116	0,105	0,141	0,122	0,118
0,139	0,118	0,113	0,132	0,102	0,080	0,141	0,122	0,118
0,123	0,105	0,101	0,099	0,110	0,094	0,129	0,105	0,105
0,114	0,107	0,108	0,111	0,106	0,107	0,114	0,107	0,100
0,126	0,115	0,123	0,122	0,120	0,116	0,125	0,112	0,111
0,092	0,109	0,113	0,100	0,109	0,100	0,088	0,123	0,120
0,107	0,116	0,113	0,112	0,118	0,097	0,105	0,118	0,085
0,093	0,110	0,117	0,101	0,111	0,103	0,088	0,123	0,125
0,098	0,090	0,088	0,083	0,088	0,093	0,101	0,091	0,100
0,098	0,090	0,087	0,079	0,089	0,094	0,101	0,091	0,100
0,079	0,069	0,079	0,070	0,075	0,069	0,084	0,062	0,075
0,082	0,091	0,090	0,086	0,084	0,104	0,081	0,110	0,098
0,108	0,120	0,117	0,115	0,128	0,101	0,105	0,123	0,094
0,078	0,093	0,083	0,088	0,101	0,065	0,077	0,094	0,073
0,073	0,084	0,077	0,079	0,089	0,071	0,072	0,082	0,073
0,066	0,062	0,069	0,066	0,057	0,053	0,065	0,053	0,076
0,080	0,072	0,078	0,061	0,068	0,038	0,084	0,072	0,040
0,078	0,075	0,080	0,047	0,071	0,033	0,084	0,072	0,040
0,080	0,073	0,079	0,058	0,068	0,037	0,084	0,072	0,040
0,125	0,112	0,118	0,120	0,118	0,111	0,125	0,108	0,100
0,111	0,106	0,108	0,110	0,103	0,106	0,111	0,107	0,100
0,109	0,102	0,096	0,102	0,099	0,099	0,111	0,105	0,095
0,140	0,166	0,151	0,152	0,159	0,171	0,125	0,182	0,154
0,108	0,101	0,092	0,095	0,097	0,096	0,111	0,105	0,100
0,109	0,102	0,096	0,102	0,099	0,099	0,111	0,105	0,095
0,124	0,110	0,113	0,117	0,116	0,109	0,125	0,107	0,095
0,129	0,130	0,139	0,132	0,129	0,131	0,125	0,127	0,154
0,121	0,118	0,126	0,121	0,116	0,118	0,122	0,115	0,134
0,088	0,104	0,094	0,096	0,101	0,093	0,084	0,115	0,098
0,079	0,068	0,077	0,070	0,073	0,068	0,084	0,062	0,074
0,076	0,077	0,068	0,056	0,072	0,054	0,084	0,075	0,078
0,074	0,063	0,061	0,063	0,064	0,055	0,079	0,065	0,050
0,076	0,067	0,075	0,072	0,069	0,070	0,079	0,058	0,084
0,077	0,071	0,080	0,076	0,071	0,077	0,079	0,064	0,098
0,112	0,122	0,122	0,117	0,128	0,106	0,109	0,123	0,106
0,091	0,097	0,098	0,098	0,094	0,078	0,092	0,096	0,089
0,083	0,087	0,086	0,087	0,095	0,071	0,086	0,082	0,058
0,068	0,072	0,071	0,069	0,069	0,079	0,065	0,080	0,073
0,069	0,081	0,081	0,075	0,071	0,076	0,065	0,094	0,087
0,065	0,056	0,063	0,063	0,054	0,049	0,065	0,048	0,065
0,064	0,051	0,053	0,061	0,053	0,046	0,065	0,043	0,066

СПИСАК ПРИЛОГА

0,126	0,114	0,122	0,122	0,119	0,115	0,125	0,111	0,107
0,112	0,108	0,112	0,112	0,105	0,109	0,111	0,109	0,105
0,110	0,103	0,099	0,104	0,100	0,101	0,111	0,105	0,095
0,142	0,168	0,151	0,155	0,164	0,163	0,127	0,182	0,154
0,108	0,101	0,092	0,097	0,097	0,097	0,111	0,105	0,100
0,110	0,103	0,099	0,104	0,100	0,101	0,111	0,105	0,095
0,125	0,112	0,118	0,120	0,118	0,112	0,125	0,109	0,101
0,131	0,136	0,142	0,135	0,133	0,137	0,125	0,134	0,154
0,128	0,121	0,129	0,124	0,117	0,131	0,130	0,113	0,134
0,091	0,106	0,095	0,099	0,107	0,090	0,087	0,115	0,098
0,079	0,068	0,082	0,071	0,074	0,070	0,084	0,060	0,081
0,076	0,076	0,068	0,058	0,072	0,055	0,084	0,075	0,078
0,074	0,063	0,062	0,064	0,065	0,057	0,079	0,061	0,051
0,077	0,069	0,078	0,074	0,070	0,074	0,079	0,061	0,098
0,078	0,076	0,082	0,078	0,073	0,082	0,079	0,070	0,098
0,117	0,124	0,128	0,121	0,127	0,114	0,115	0,123	0,131
0,095	0,097	0,104	0,101	0,091	0,086	0,097	0,096	0,123
0,087	0,087	0,091	0,089	0,089	0,074	0,090	0,082	0,070
0,068	0,075	0,073	0,071	0,073	0,081	0,065	0,082	0,073
0,070	0,085	0,082	0,077	0,075	0,076	0,065	0,096	0,087
0,066	0,058	0,067	0,065	0,056	0,051	0,065	0,049	0,077
0,065	0,053	0,057	0,062	0,055	0,050	0,065	0,045	0,073
0,129	0,108	0,107	0,115	0,111	0,101	0,135	0,105	0,092
0,110	0,102	0,096	0,102	0,100	0,099	0,112	0,105	0,095
0,113	0,106	0,104	0,109	0,104	0,104	0,113	0,106	0,097
0,134	0,110	0,107	0,119	0,107	0,098	0,141	0,107	0,097
0,137	0,113	0,118	0,129	0,113	0,108	0,141	0,106	0,093
0,116	0,116	0,123	0,119	0,112	0,117	0,113	0,116	0,123
0,110	0,103	0,097	0,103	0,100	0,100	0,112	0,105	0,095
0,128	0,107	0,104	0,110	0,109	0,097	0,135	0,105	0,106
0,089	0,103	0,117	0,096	0,098	0,118	0,084	0,123	0,125
0,089	0,106	0,095	0,097	0,104	0,093	0,086	0,116	0,098
0,090	0,106	0,095	0,098	0,105	0,093	0,086	0,118	0,098
0,091	0,125	0,105	0,099	0,098	0,095	0,084	0,158	0,107
0,093	0,133	0,105	0,103	0,106	0,085	0,085	0,158	0,107
0,085	0,100	0,093	0,092	0,093	0,102	0,082	0,118	0,098
0,082	0,091	0,089	0,085	0,083	0,103	0,080	0,108	0,098
0,085	0,088	0,113	0,088	0,088	0,103	0,084	0,091	0,125
0,099	0,105	0,107	0,106	0,097	0,090	0,098	0,109	0,123
0,109	0,085	0,102	0,102	0,078	0,105	0,114	0,054	0,101
0,102	0,086	0,101	0,099	0,079	0,094	0,106	0,072	0,101
0,106	0,109	0,118	0,111	0,108	0,096	0,105	0,109	0,119
0,127	0,115	0,128	0,124	0,112	0,139	0,130	0,093	0,134
0,132	0,120	0,130	0,127	0,116	0,134	0,138	0,091	0,134
0,129	0,132	0,140	0,133	0,130	0,134	0,125	0,130	0,154
0,121	0,138	0,133	0,131	0,125	0,137	0,114	0,141	0,144
0,136	0,146	0,149	0,142	0,141	0,150	0,129	0,147	0,158
0,157	0,208	0,257	0,180	0,169	0,100	0,141	0,218	0,130
0,162	0,233	0,265	0,187	0,194	0,117	0,141	0,282	0,130
0,150	0,174	0,156	0,163	0,178	0,151	0,142	0,182	0,158
0,140	0,175	0,145	0,159	0,174	0,132	0,133	0,182	0,144
0,159	0,180	0,156	0,173	0,200	0,132	0,160	0,182	0,140
0,101	0,116	0,113	0,109	0,130	0,096	0,097	0,123	0,097
0,102	0,114	0,107	0,109	0,120	0,093	0,099	0,118	0,073

СПИСАК ПРИЛОГА

0,114	0,123	0,124	0,120	0,131	0,111	0,110	0,123	0,113
0,157	0,183	0,188	0,178	0,175	0,145	0,151	0,188	0,174
0,168	0,183	0,198	0,185	0,175	0,167	0,162	0,188	0,220
0,132	0,132	0,139	0,131	0,133	0,150	0,132	0,125	0,156
0,133	0,128	0,130	0,128	0,122	0,144	0,137	0,121	0,134
0,147	0,145	0,142	0,138	0,137	0,163	0,157	0,145	0,152
0,121	0,106	0,117	0,116	0,096	0,112	0,127	0,080	0,122
0,122	0,099	0,104	0,111	0,087	0,093	0,131	0,075	0,101
0,131	0,128	0,123	0,125	0,110	0,110	0,139	0,126	0,119
0,175	0,175	0,171	0,166	0,169	0,109	0,197	0,199	0,120
0,179	0,182	0,175	0,169	0,178	0,110	0,208	0,201	0,108
0,139	0,139	0,132	0,132	0,128	0,111	0,151	0,147	0,087

БИОГРАФИЈА

Филип Милетић, мастер инжењер рударства и мастер инжењер машинства, рођен је 30.10.1994. године у Београду. Техничку школу у Лазаревцу завршио је 2013. године, одличним успехом.

Основне академске студије на Рударско–геолошком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина завршио је 2017. године, просечном оценом 9,66. Мастер академске студије на модулу Механизација у рударству завршио је 2018. године, просечном оценом 10.

Носилац је награде најбољег студента Мастер академских студија.

Мастер академске студије на Машинском факултету, Универзитета у Нишу, студијски програм Машинско инжењерство, модул Машинске конструкције, развој и инжењеринг завршио је 2021. године, просечном оценом 9,33.

Докторске академске студије на Рударско–геолошком факултету, Универзитета у Београду уписао је 2018. године. Положио је све испите просечном оценом 10.

Током студија био је добитник стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја за просечну оцену изнад 9,0, градске општине Лазаревац за просечну оцену изнад 9,50 и стипендије Доситеја која се додељује из Фонда за младе таленте Републике Србије за 800 најбољих студената у држави.

У звање Асистента за ужу научну област Елементи машинских и енергетских система на Катедри за опште машинство и термодинамику Рударско–геолошког факултета изабран је 2020. године.

Коаутор је помоћног уџбеника „Машински елементи – приручник“.

Објавио је 36 радова, међу којима 5 у часописима са SCI листе. Учествовао је у изради више стручних и научно–истраживачких пројеката. У оквиру програма *Erasmus*, одржао је предавање на Универзитету у Леобену. Члан је Савеза инжењера рударства и геологије Србије и DIVK.

Ожењен супругом Маријаном Милетић. Живи у Београду.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Филип М. Милетић

Број индекса P701/18

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени; и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Филип М. Милетић

Број индекса P701/18

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање

Ментор др Милош Танасијевић, редовни професор

др Предраг Јованчић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај похабаности резних елемената роторног багера на ниво вибрација погона за копање

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. Ауторство. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прерада. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.