УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

МИНИМИЗАЦИЈА РИЗИКА У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ И ОДРЖАВАЊУ РОТОРНИХ БАГЕРА

– ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ (КАТЕГОРИЈА М82) –

БЕОГРАД, новембар 2019.

САДРЖАЈ

1. АУТОРИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

проф. др Срђан Бошњак, Универзитет у Београду-Машински факултет
доц. др Милорад Пантелић, Универзитет у Крагујевцу-Факултет техничких наука у Чачку
проф. др Мирјана Мисита, Универзитет у Београду-Машински факултет
доц. др Небојша Гњатовић, Универзитет у Београду-Машински факултет
истраживач-сарадник, Александар Стефановић, Универзитет у Београду-Машински факултет

2. НАЗИВ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА И ПРИЈАВЉЕНА КАТЕГОРИЈА

„Минимизација ризика у експлоатацији и одржавању роторних багера“

Категорија: М82

3. КЉУЧНЕ РЕЧИ

ризик, роторни багер, FMECA, машински откази, електро-откази

4. ИНВЕСТИТОР

Техничко решење настало је током израде студије под називом „Минимизација ризика у процесу одржавања багерских јединица на површинским коповима“ која је урађена за потребе Јавног предузећа „ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ“, Огранак РБ „КОЛУБАРА“-Лазаревац. Уговор о изради студије дат је у Прилогу 1.

5. ГОДИНА ИЗРАДЕ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

2018.

6. ГОДИНА ПОЧЕТКА ПРИМЕНЕ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

2018. (Прилог 2: Потврда корисника)

7. НАУЧНА И УЖА НАУЧНА ОБЛАСТ КОЈОЈ ПРИПАДА ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

Научна област: машинство

Ужа научна област: механизација, индустријско инжењерство

8. ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ РЕШАВА ПРИМЕНОМ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Окосницу производње угља на површинским коповима чине врло сложени системи:

- багер - тракасти транспортер - одлагач (БТО систем);
- багер - тракасти транспортер - дробилана (БТД систем);
- багер - тракасти транспортер - утоварно место (БТУ систем).

Редна веза подсистема, односно чињеница да отказ једног елемента система значи и застој целокупног система, подвлачи изузетан значај одржавања захтеваног нивоа поузданости. Због сложености структуре и специфичности задатака њиховог одржавања, багери за континуални ископ (роторни багери и багери ведричари) и одлагачи, слика 1, као фундаментални елементи основне технолошке опреме на површинским коповима, уобичајено се називају заједничким именом: багерске јединице, табеле 1 и 2.

(а)

(б)

(в)

Слика 1. (а) Роторни багер SchRs 1600; (б) багер ведричар ERs 1000/20; (в) одлагач A2Rs B.8500.60.1 + BRs

Табела 1. Багери за континуални ископ у РБ „Колубара“

Редни број	Погонски број	Тип	Фабрички број	Произвођач	Локација	Година пуштања у рад	Старост (год.)	Теоријски капацитет (m^3/h)
1	G - I	SRs 1200x22/2x0 (630kW) + VR	361	Takraf	Поље C	1967	51	4100
2	G - V	SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR	03111/03112	Takraf	Поље D	1975	43	3465
3	G - VI	SRs 1200x24/4x0 (400kW) + VR	03113/03114	Takraf	Поље C	1976	42	3465
4	G - IV мали	SchRs 350/5x12	224/1153	O&K	Поље C	1961	57	1000/1260/1510
5	G - III	C-700s	1526	Krupp	Поље C	1987	31	3024
6	G-II	SchRs 1400x28/3	3193	Krupp	Поље C	2016	2	6600
7	G - 1	SchRs 900/6x25	1349	O&K	Тамнава Исток	1977	41	4100
8	G - 2	SchRs 630/6x25	1350	O&K	Тамнава Исток	1980	38	4800
9	G - 1	SchRs 630/6x25	2.1397	O&K	Тамнава Запад	1994	24	4800
10	G - 2	SRs 2000x32/5 (2x670kW) + VR	331/332 068	Takraf	Тамнава Запад	1995	23	6600
11	G - 3	SchRs 1600/3x25	3092	Krupp	Тамнава Запад	2010	8	6600
12	G - 4	SchRs 630/6x25	2.1398	O&K	Тамнава Запад	2000	18	4800
13	G - 5	SchRs 740/6x25	3162	Krupp	Тамнава Запад	2014	4	4800
14	G - II	SRs 1201x22/4 (630kW) + VR	362 (362/2)	Takraf/FAM	Поље D	1968 (2003)	15	4100
15	G - III	SRs 1200x24/4 (400kW) + VR	767	Takraf	Поље D	1969	49	3465
16	G - IV	SRs 1200x24/4 (400kW) + VR	03109/03110	Takraf	Поље D	1975	43	3465
17	G - VII	SchRs 630x25/6 (2x375kW)	1345	O&K	Поље D	1977	41	4800
18	G - VIII	SRs 1300x26/5 (900kW) + VR	19022/60014	Takraf	Поље D	1987	31	4500
19	G - IX	SchRs 1760x32/5 (2x550kW) + VR	1550/1552	Krupp	Поље D	1990	28	6100
20	G - X	SRs 1301x24/2,5 (400kW)	19016	Takraf	Поље D	1982	36	2600/3500
21	V - 1	ERs 1000/20	1348	O&K	Тамнава Запад	1979	39	1800

Табела 2. Одлагачи и самоходни транспортери у РБ „Колубара“

Редни број	Погонски број	Тип	Фабрички број	Произвођач	Локација	Година пуштања у рад	Старост (год.)	Теоријски капацитет (m^3/h)
1	O-I	PA 200 2200/2000		Sandvik	Поље C	2016	2	8800
2	O - III	A2Rs B.3500.60 + BRs	13002/13003	Takraf	Поље C	1975	43	3500
3	O - IV	BRs(ARs) 1600/(28+50)x17	425	O&K	Поље D	1986/7	31	4800
4	O - V	ARs 1600/(37+60)x18	1412	Krupp	Поље C	1981	37	4800
5	O - III мали	ARs 1200/(18+30)x11	1415	Krupp	Поље C	1980	38	2600
6	O - I	A2Rs B.3500.60 + BRs	450/451	Takraf	Поље D	1967	51	3500
7	O - II	A2Rs B.3500.60 + BRs	452/453	Takraf	Поље D	1969	49	3500
8	O - IV	A2Rs B.3500.60 + BRs	13006/13007	Takraf	Поље D	1975	43	3500
9	O - VI	ARs 1800/(14+33+60)x20	1553	Krupp	Поље D	1989	29	6500
10	Одл - 4	ARs 1400/(22+60)x21	336	O&K	Тамнава Исток	1977	41	4500
11	Одл - 1	A2Rs B.8500.60.1 + BRs	18402/18403	Takraf	Тамнава Запад	1994	24	8500
12	Одл - 2	A2Rs B.8500.60.1 + BRs	18404/18405	Takraf	Тамнава Запад	2009	9	8500
13	BW-IV	BRs 1200x29/32	20032	Takraf	Поље C	1968	50	1800
14	BW-III	BRs 1600/(17,5+32,5)x15	1527	Krupp	Поље C	1987	31	4500
15	STT	Rudis		Trbovlje	Поље C	1976	42	3050
16	BW - I	BRs(ARs) 1600/(28+50)x15	399	O&K	Поље D	1984/85	33	4500
17	BW - II	BRs(ARs) 1600/(28+50)x17	3099	Krupp	Поље D	2010	8	4800
18	BW - 1i	BRs 1600/(28+50)x9	337	O&K	Тамнава Исток	1977	41	4100
19	BW - 4	BRs 1400x37/50.1	22073	FAM	Тамнава Запад	2005	13	4200
20	BW - 2	BRs(ARs) 1600/(28+50)x15	365	O&K	Тамнава Исток	1980	38	4500
21	Одл - 3	BRs/ARs 1600/(28+50)x17	426	O&K	Тамнава Запад	1994	24	4800
22	BW - 1	BRs/ARs 1600/(28+50)x17	3091	Krupp	Тамнава Запад	2011	7	4800

Подаци о укупном броју, теоријском капацитету и просечној старости багера за континуални ископ (20 роторних багера и један ведричар), одлагача (10) и самоходних транспортера (12) у РБ „Колубара“, дати су у табели 3, док је старосна структура поменутих класа машина презентирана у табелама 4 и 5.

Табела 3. Укупни теоријски капацитет и просечна старост багера за континуални ископ, одлагача и самоходних транспортера у РБ „Колубара“

Врста машине	Укупни број	Укупни теоријски капацитет (m^3/h)	Просечна старост јединица (год.)	Просечна старост теоријског капацитета (год.)
Багери (роторни и ведричари)	21	90394	31,6	28,3
Одлагачи и самоходни транспортери	22	104050	31,1	27,2

Табела 4. Старосна структура теоријских капацитета багера за континуални ископ, одлагача и самоходних транспортера у РБ „Колубара“

Врста машине	Старост машине (год.)									
	0-10		10-20		20-30		30-40		>40	
	$Q^{1)}$	$p^{2)}$	$Q^{1)}$	$p^{2)}$	$Q^{1)}$	$p^{2)}$	$Q^{1)}$	$p^{2)}$	$Q^{1)}$	$p^{2)}$
Багери (роторни и ведричари)	18000	19,9	8900	9,9	17500	19,4	17624	19,5	28370	31,4
Одлагачи и самоходни транспортери	26900	25,9	4200	4,0	19800	19,0	25700	24,7	27450	26,4

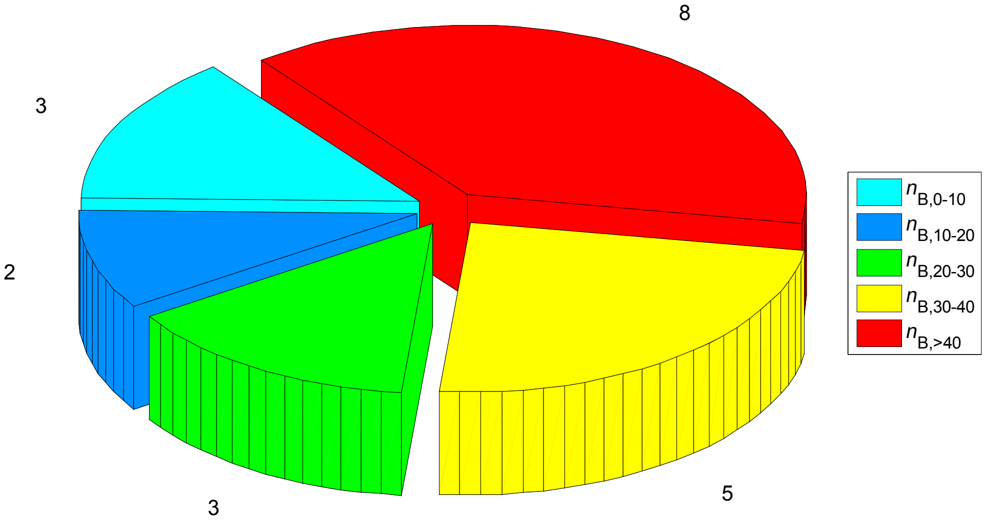
$^{1)}$ укупни теоријски капацитет (m^3/h); $^{2)}$процентуално учешће у укупном теоријском капацитету (%)

Табела 5. Старосна структура багера за континуални ископ, одлагача и самоходних транспортера у РБ „Колубара“

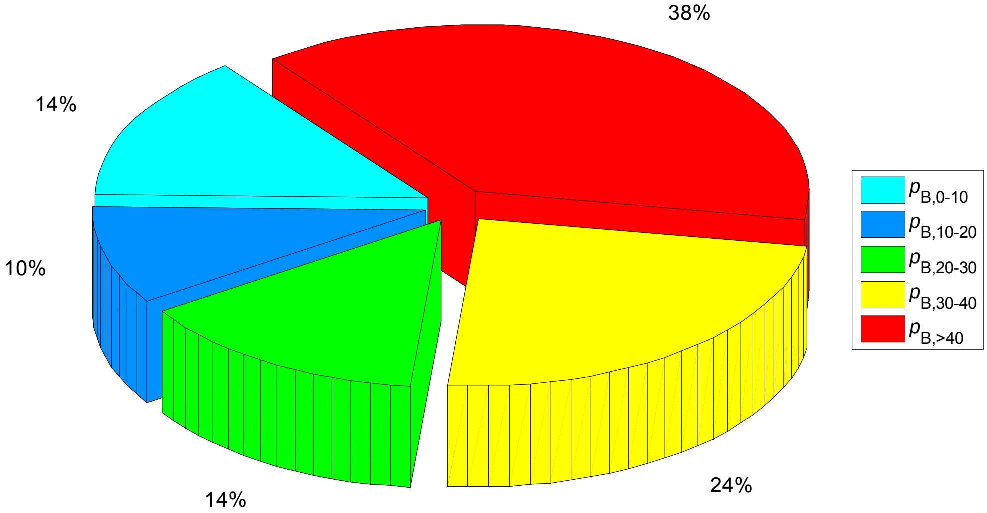
Врста машине	Старост машине (год.)									
	0-10		10-20		20-30		30-40		>40	
	$n^{1)}$	$p^{2)}$	$n^{1)}$	$p^{2)}$	$n^{1)}$	$p^{2)}$	$n^{1)}$	$p^{2)}$	$n^{1)}$	$p^{2)}$
Багери (роторни и ведричари)	3	14,3	2	9,5	3	14,3	5	23,8	8	38,1
Одлагачи и самоходни транспортери	4	18,2	1	4,6	3	13,6	6	27,3	8	36,4

$^{1)}$ укупни број; $^{2)}$процентуално учешће у укупном броју (%)

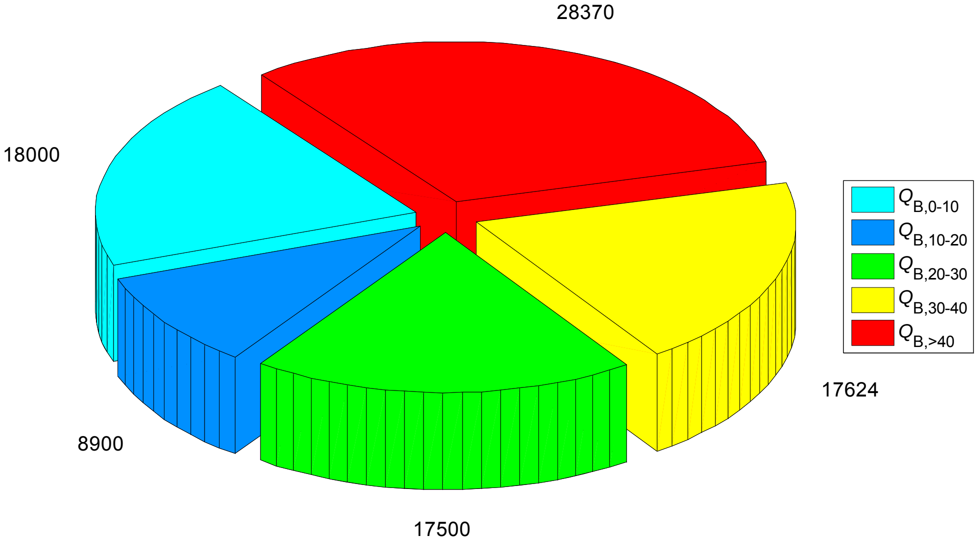
Старосна структура багера за континуални ископ, одлагача и самоходних транспортера, као и њихових капацитета приказана је на сликама 2-9.



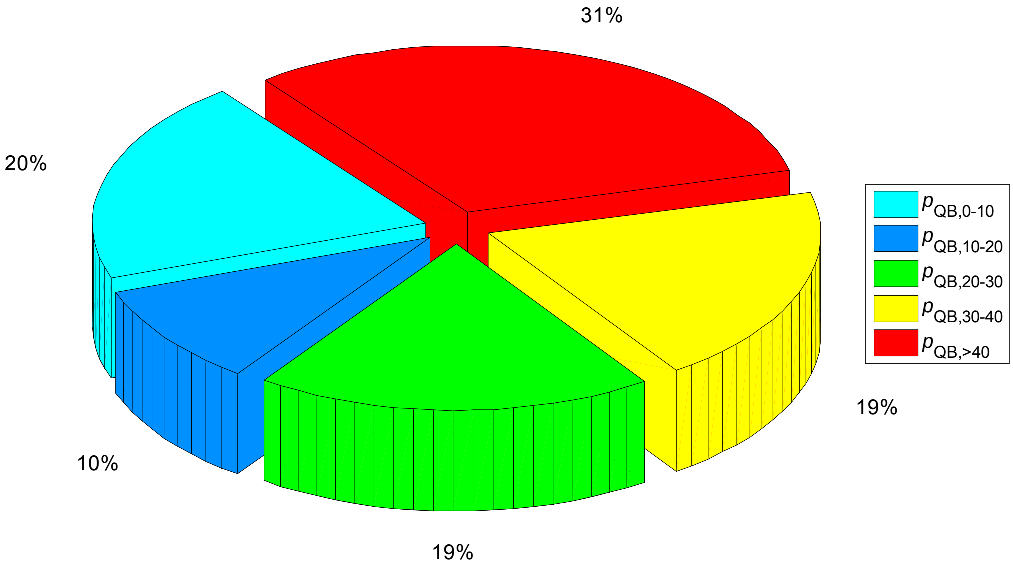
Слика 2. Старосна структура багера: укупни бројеви багера старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година



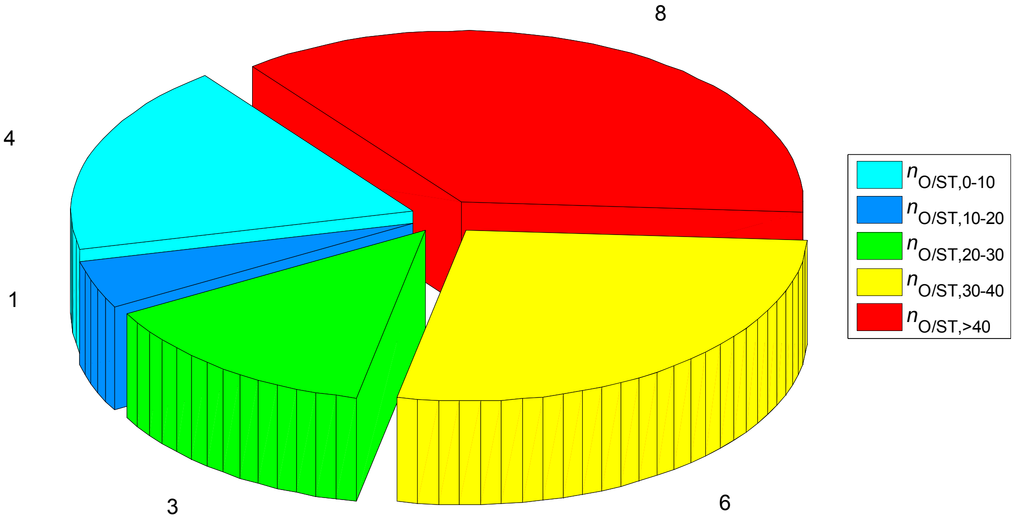
Слика 3. Старосна структура багера: процентуално учешће багера старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година у укупном броју багера



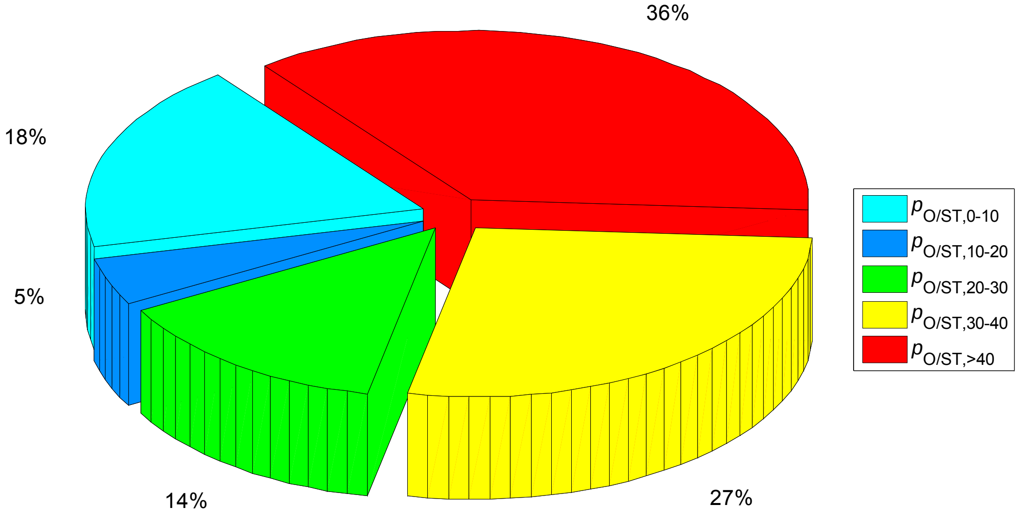
Слика 4. Старосна структура теоријског капацитета багера: капацитети (m^3/h) старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година



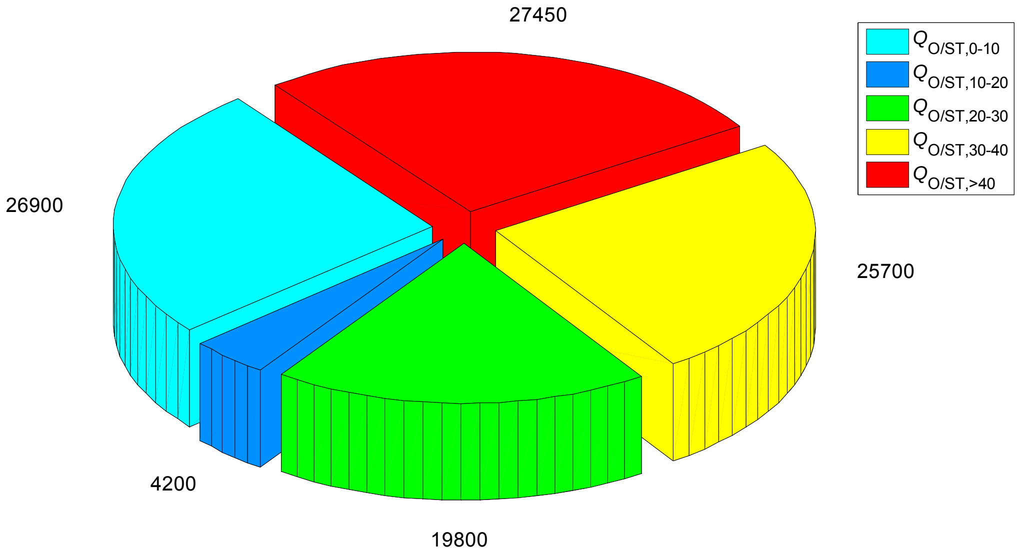
Слика 5. Старосна структура теоријског капацитета багера: процентуално учешће капацитета старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година у укупном капацитету багера



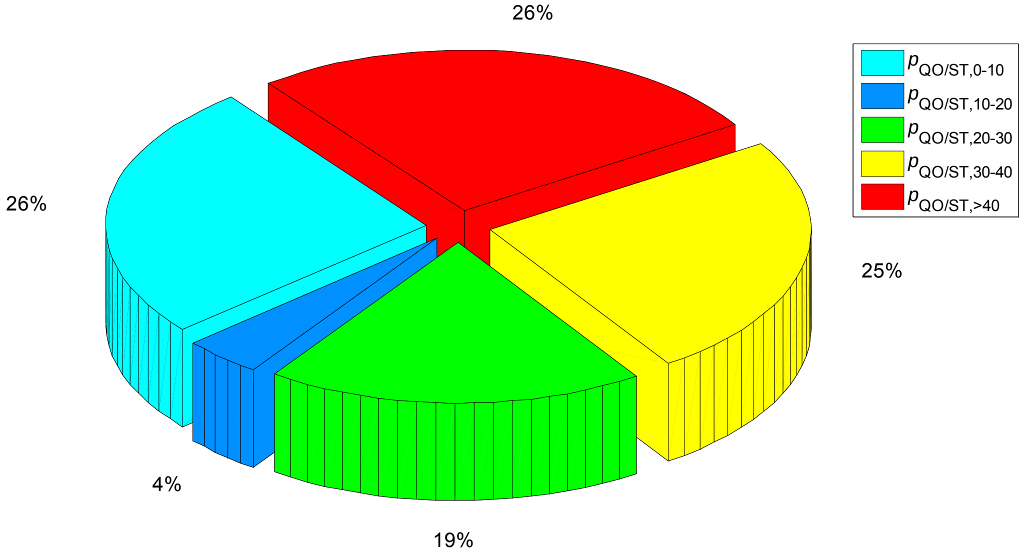
Слика 6. Старосна структура одлагача и самоходних транспортера: укупни бројеви машина старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година



Слика 7. Старосна структура одлагача и самоходних транспортера: процентуално учешће машина старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година у укупном броју машина



Слика 8. Старосна структура теоријског капацитета одлагача и самоходних транспортера: капацитети (m^3/h) старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година



Слика 9. Старосна структура теоријског капацитета одлагача и самоходних транспортера: процентуално учешће капацитета старости 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и >40 година у укупном капацитету машина

Последице отказа свих висококапацитетних машина јесу врло велики финансијски губици и озбиљни ризици по сигурност и здравље. Када је реч о багерским јединицама, финансијски губици изазвани застојем производње због отказа основне машине у систему површинске експлоатације, односно складиштења и отпреме угља, најчешће знатно превазилазе финансијске губитке изазване директном материјалном штетом, зависно од њиховог капацитета и врсте материјала који се откопава (угаљ или јаловина) [1-5]. О величини негативних економских ефеката изазваних отказима/хаваријама упечатљиво говори податак да у САД и Европској унији укупни трошак изазван отказима машина и система износи приближно 4% од БНП [6].

Примена техничког решења омогућава решавање следећих проблема:

- подизање нивоа одржавања, ефективности, поузданости и сигурности роторних багера, односно БТО/Д/У система;
- подизање нивоа економичности експлоатације БТО/Д/У система;

чиме се вишетрукуко смањују ризици током експлоатације и одржавања багерских јединица. Осим тога, применом техничког решења стварају се основе за:

- управљање поузданошћу и сигурношћу БТО/Д/У система;
- испуњавање критеријума ригорозне регулативе везане за заштиту животне средине и сигурност руковалаца и одржавалаца.

На значај примене техничког решења у термоенергетици Србије упућују следеће чињенице:

- највећи произвођачи елекричне енергије у Србији су термоелектране. Према [7], 2014. године 65,1% електричне енергије у Србији произведено је из лигнита, док је у 2015. години 70,3 % електричне енергије добијено из поменутог извора;
- РБ „Колубара“ даје ≈75% производње лигнита у Србији [7];
- у цени електричне енергије угаљ учествује са ≈60%;
- одржавање механизације на површинским коповима учествује са 35-40% у цени угља;
- у односу на пројектовани номинални век (35-40 година), просечне старости машина (31,6 год. багера за континуални ископ, 31,1 год. одлагача и самоходних транспортера) и њихових капацитета (28,3 год. багера за континуални ископ, 27,2 год. одлагача и самоходних транспортера) у РБ „Колубара“, врло су високе;
- сат застоја БТО/Д/У у РБ „Колубара“ нормира се као индиректна материјална штета у износу од 5000-15000 €, зависно од капацитета машине, односно материјала који се откопава/транспортује.

9. СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

Системи за површинску експлоатацију (СПЕ: БТО/Д/У) представљају једно од најзначајнијих достигнућа у рударству двадесетог века. Њихов значај и утицај може се мерити са значајем који је за рударе деветнаестог века имало откриће и употреба динамита [8]. Захваљујући вишеструким техничко-технолошким и економским предностима, као и предностима са аспекта сигурности машина и особља које их опслужује, површинска експлоатација угља стекла је примат у односу на подземну експлоатацију [7,9,10].

Површинска експлоатација минерала, пре свега угља, захтева висококапацитетне машине, са релативно ниском специфичном енергијом откопавања. Роторни багер, као машина-копач и прва у ланцу СПЕ, доминантно утиче на перформансе поменутог система. Захваљујући интензивном развоју у протеклих 100 година (први роторни багер уведен је у експлоатацију 1916. године на површинском копу ''Bergwitz'', Немачка [11]) роторни багери стекли су значајне предности у односу на багере ведричаре и готово потпуно их потиснули из употребе у СПЕ.

Роторни багери, највеће самоходне машине (маса до 14200 t, дужина до 225 m, висина до 96 m) [12] намењени су за вишедеценијску експлоатацију, што указује на значај њихове поузданости, сигурности, одржавања, као и модернизације [13]. Изузетно тешки режими експлоатације (24/7), праћени оптерећењима израженог динамичког и стохастичког карактера [13], представљају плодно тло за појаву различитих врста отказа [5] који, у екстремним случајевима, могу да изазову катастрофалне последице i.e. потпуни колапс машине [2,5,14-16].

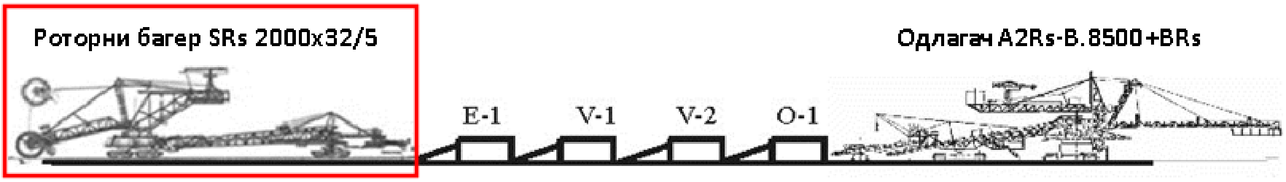
Осим озбиљних ризика по сигурност и здравље [17,18], последице отказа машина које чине СПЕ јесу врло велики финансијски губици. Када је реч о роторним багерима, финансијски губици изазвани застојем производње због отказа основне машине СПЕ, најчешће знатно превазилазе финансијске губитке изазване директном материјалном штетом, зависно од њиховог капацитета и врсте материјала који се откопава (угаљ или јаловина) [2,19]. На пример, сат застоја II јаловинског (БТО) система (теоријски капацитет роторног багера Q_{SchRs630}=4100 m^3/h) на копу ''Тамнава-Источно поље'' (РБ „Колубара“) изазива индиректни финансијски губитак од DTC_{TE}=9232 € [1]. С обзиром на чињеницу да су услови експлоатације I БТО система на копу „Тамнава-Западно поље“ (РБ „Колубара“), који је био предмет истраживања у оквиру студије, и БТО система разматраног у раду [1] (коп ''Тамнава-Источно поље'') врло слични (оба система припадају копу „Тамнава“ који је део РБ „Колубара“'), у првом приближењу може се претпоставити да су индиректни финансијски губици изазвани застојима поменутих система пропорционални теоријским капацитетима основних машина-роторних багера. У том случају, сат застоја I БТО система на копу „Тамнава-Западно поље“ генерише индиректни финансијски губитак од: $DTC_{TW}=DTC_{TE}\times Q_{SRs2000}/Q_{SchRs630}=9232\times6600/4100\approx14861$ €.

Са аспекта поузданости, машине које чине СПЕ редно су спрегнуте, што значи да отказ једне изазива застој целог система. Осим тога, предвиђени век употребе роторних багера износи 40 година (просечна старост роторних багера у РБ „Колубара“ износи 31,6 година), са тенденцијом да се ревитализацијом и модернизацијом машина продужи за још 20 година. Изложене чињенице указују на изузетан значај одржања погонске спремности машина за површинску експлоатацију. Међутим, и поред интензивног развоја метода за анализу поузданости техничких постројења и система since 1950s [20], поступака анализе њихових отказа и сигурности [21], као и концепција одржавања [22], референтну литературу карактерише готово потпуно одсуство проблема оцене ризика код роторних багера, као и осталих подсистема СПЕ. Аутори техничког решења успели су да пронађу свега три рада [23-25] у којима се разматра поменути проблем, међутим, само начелно. Осим тога, иако се у насловима радова [23,24] помиње ''mining excavator'' („рударски багер“), предмет истраживања у наведеним радовима нису роторни багери (машине за континуални ископ), већ багери са једном кашиком, који представљају помоћну механизацију на површинским коповима, а не окосницу СПЕ. Коначно, важно је уочити да још увек не постоје технички прописи (препоруке, стандарди) која се односи на оцену ризика машина за површинску експлоатацију. Наведене чињенице представљале су мотив за развој техничког решења, односно постављање конзистентног приступа квантификацији ризика код роторних багера, уз уважавање свих њихових структурних и експлоатационих специфичности, као и специфичности њиховог одржавања на површинским коповима РБ „Колубара“. Истраживања су обављена применом технике Service Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (S-FMECA) која, поред осталог, представља и један од основних аналитичких алата за формирање оптималне концепције одржавања [26,27]. Изложени приступ risk assessment код роторних багера може успешно да се примени и за остале подсистеме СПЕ, одлагаче, пре свега.

Коначно, суштину техничког решења аутори су публиковали у часопису Engineering Failure Analysis (категорија M22) као рад под називом „Service FMECA of a bucket wheel excavator“ (https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104289), Прилог 3. Поменути рад представља први рад из области оцене ризика код роторних багера објављен у часопису са SCI листе.

10. ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Први корак у постављању конзистентног приступа квантификацији ризика код роторног багера, уз уважавање свих његових структурних и експлоатационих специфичности, односно први корак у спровођењу техничког решења, јесте структурно разлагање система површинске експлоатације, слике 10 и 11, табела 6, као и самог роторног багера као комплексног техничког система, слике 12-22.

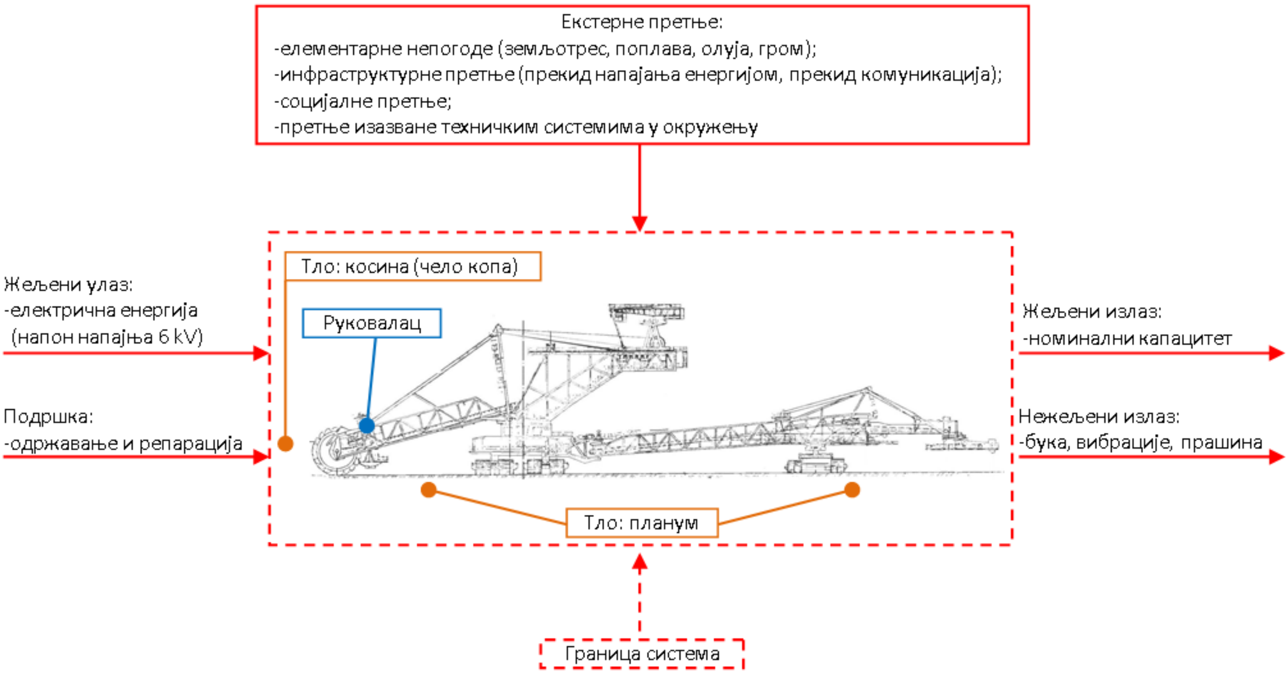


Слика 10. Технолошка схема I БТО система ПК „Тамнава-Западно поље“: E-1 - етажни транспортер број 1; V-1, V-2 – везни транспортери број 1 и 2; O-1 – одлагалишни транспортер број 1

Табела 6. Основне техничке карактеристике машина I БТО система ПК „Тамнава-Западно поље“

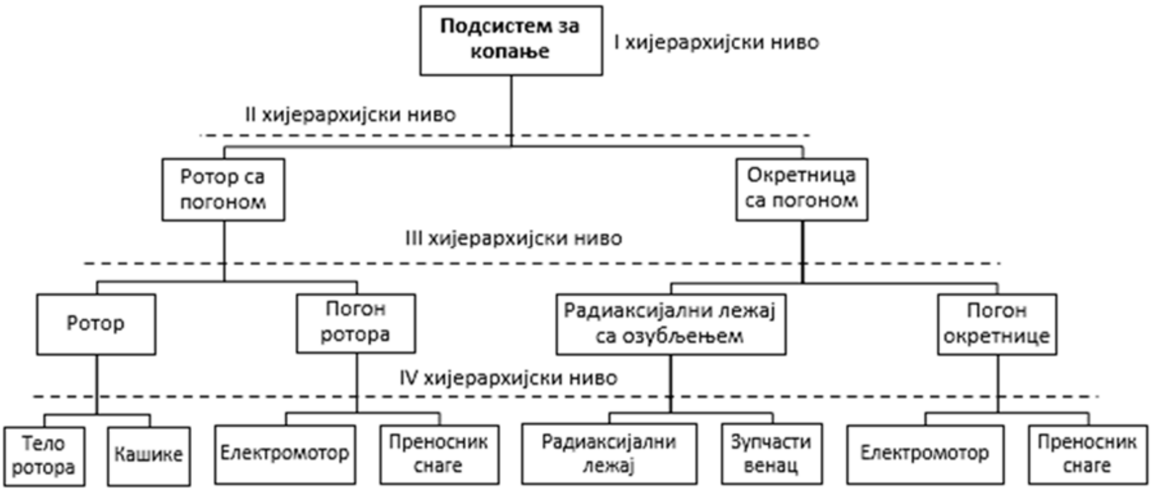
Машина	Основна карактеристика
Роторни багер SRs 2000x32/5 +VR	Теоријски капацитет: 6600 m^3/h
Тракасти транспортери	
Етажни транспортер број 1	Дужина транспортовања: 2858 m
Везни транспортер број 1	Дужина транспортовања: 1676,9 m
Везни транспортер број 2	Дужина транспортовања: 1436,3 m
Одлагалишни транспортер број 1	Дужина транспортовања: 1047,0 m
Одлагач A2Rs-B.8500 +BRs	Теоријски капацитет: 8500 m^3/h

Слика 11. Стабло структуре I БТО система ПК „Тамнава-Западно поље“

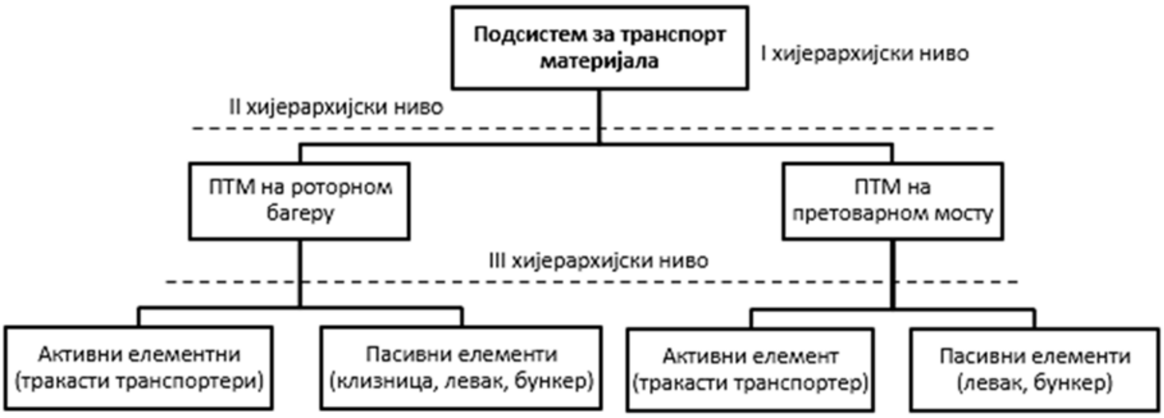


Слика 12. Роторни багер SRs 2000x32/5 са претоварним мостом (VR) као технички систем – објекат истраживања

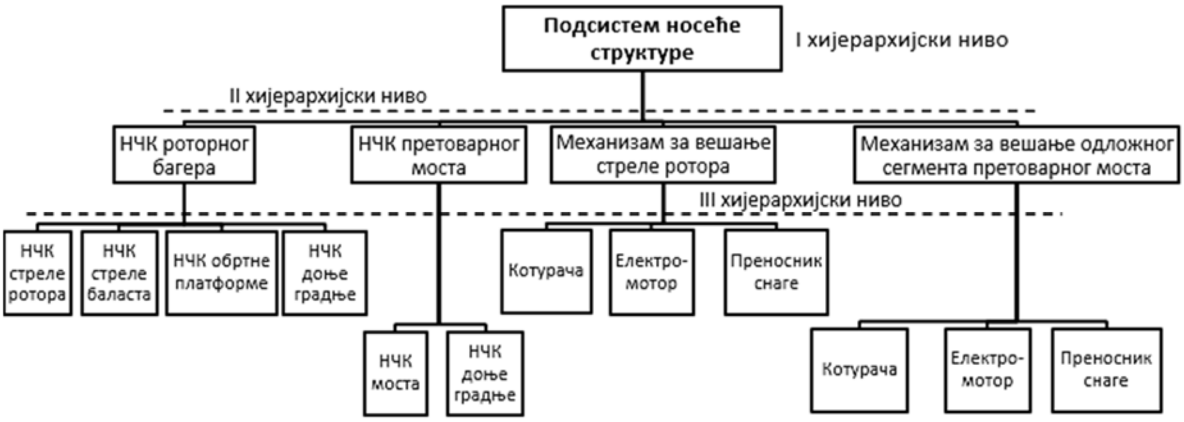
Слика 13. Стабло структуре роторног багера SRs 2000x32/5 +VR (I хијерархијски ниво)



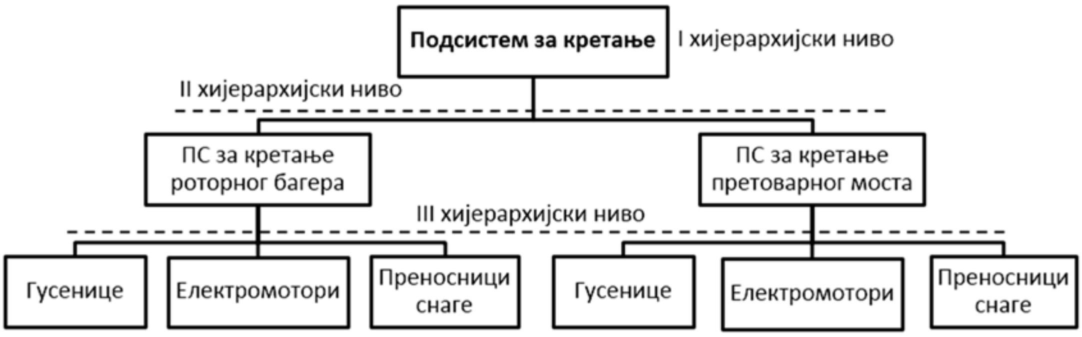
Слика 14. Стабло структуре подсистема за копање



Слика 15. Стабло структуре подсистема за транспорт материјала

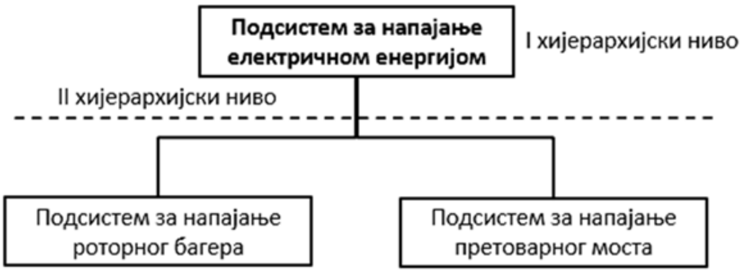


Слика 16. Стабло структуре подсистема носеће структуре



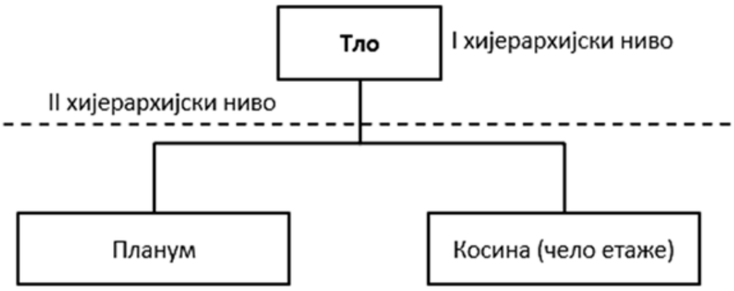
Слика 17. Стабло структуре подсистема носеће структуре

Слика 18. Стабло структуре подсистема заштите и упозорења

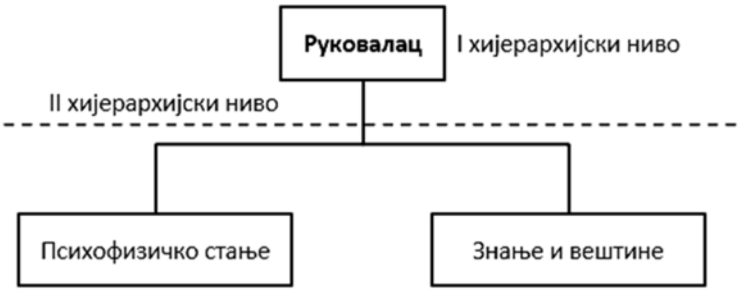


Слика 19. Стабло структуре подсистема за напајање електричном енергијом

Слика 20. Стабло структуре подсистема за управљање



Слика 21. Подсистем тла



Слика 22. Подсистем особља које опслужује машину

С обзиром на чињеницу да приступ структурном разлагању објекта истраживања не утиче на коначни резултат (ранг критичности одређене врсте отказа) и условљен је, пре свега, начином креирања иницијалне базе података, у наставку анализе је коришћена је структурна схема роторног багера усаглашена са начином евидентирања отказа/застоја који се примењује у РБ „Колубара“, табела 7.

Табела 7. Декомпозиција роторног багера са претоварним уређајем

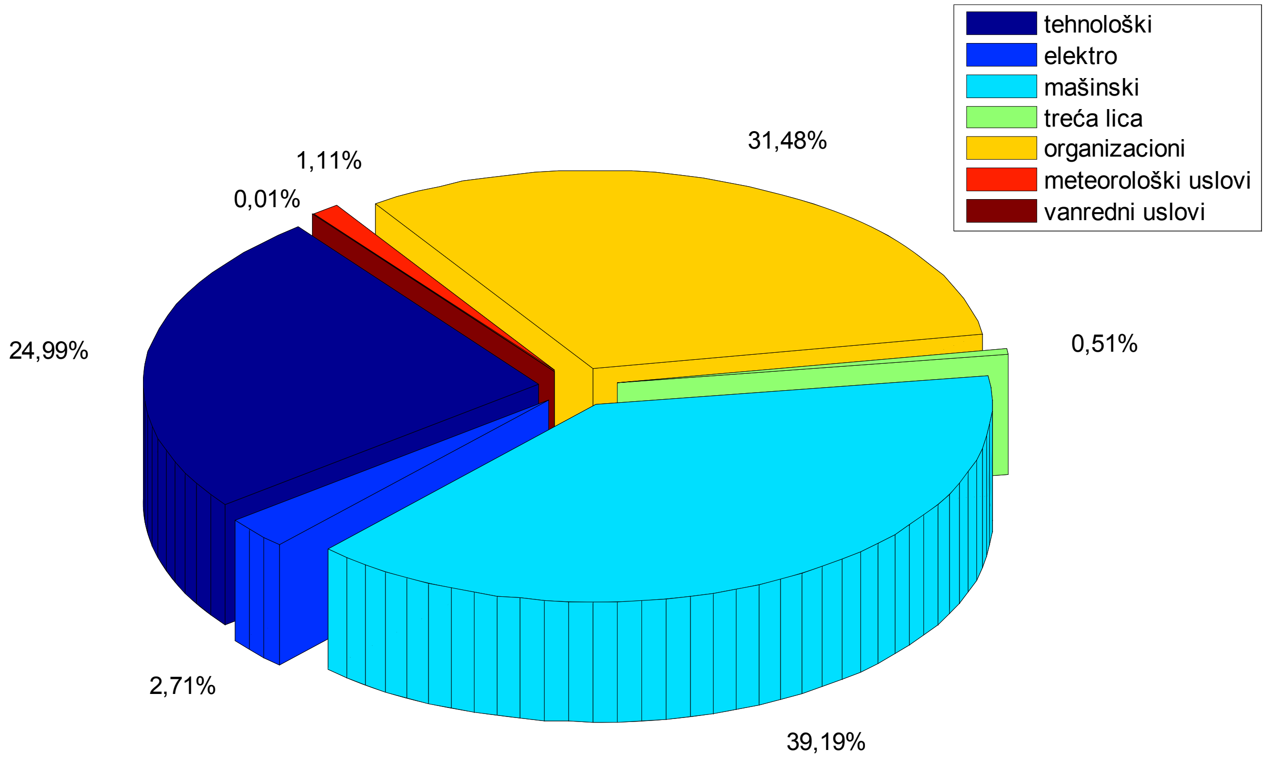
Структурна схема					Уобичајена пракса	
Ознака				Назив	Ознака	Назив
1				2	3	4
1				**Подсистем за копање**	**1**	**Механизам за копање материјала (МКМ)**
	1.1			Ротор са погоном		
		1.1.1		Ротор		
			1.1.1.1	Тело ротора (са полумесецима)		
			1.1.1.2	Кашике		
		1.1.2		Погон ротора		
			1.1.2.1	Електромотор		
			1.1.2.2	Преносник снаге		
	1.2			Окретница са погоном	**2**	**Механизам за кружно кретање (МКК)**
		1.2.1		Радиаксијални лежај са озубљењем		
			1.2.1.1	Радиаксијални лежај		
			1.2.1.2	Зупчасти венац		
		1.2.2		Погон окретнице		
			1.2.2.1	Електромотор		
			1.2.2.2	Преносник снаге		
2				**Подсистем за транспорт материјала**	**5**	**Механизам за транспорт материјала (МТМ)**
	2.1			Подсистем за транспорт материјала на багеру		
		2.1.1		Активни елементи (транспортери)		
		2.1.2		Пасивни елементи (клизница, левак, бункер)		
	2.2			Подсистем за транспорт материјала на претоварном уређају		
		2.2.1		Активни елементи (транспортери)		
		2.2.2		Пасивни елементи (левак, бункер)		
3				**Подсистем структуре**	**6**	**Носећа челична конструкција (НЧК)**
	3.1			Носећа челична конструкција (НЧК) роторног багера		
		3.1.1		НЧК стреле ротора		
		3.1.2		НЧК стреле противтега		
		3.1.3		НЧК обртне платформе		
		3.1.4		НЧК доње градње		
	3.2			Носећа челична конструкција претоварног уређаја		
		3.2.1		НЧК моста		
		3.2.2		НЧК доње градње		
	3.4			Механизам за вешање одложног сегмента претоварног моста		
		3.4.1		Котурача		
		3.4.2		Електромотор		
		3.4.3		Преносник снаге		
	3.3			Механизам за вешање стреле ротора	**3**	**Механизам за дизање стреле ротора (МДС)**
		3.3.1		Котурача		
		3.3.2		Електромотор		
		3.3.3		Преносник снаге		
4				**Подсистем за кретање**	**4**	**Механизам за транспорт багера (МТБ)**
	4.1			Подсистем за кретање роторног багера		
		4.1.1		Гусенице		
		4.1.2		Електромотори		
		4.1.3		Преносници снаге		
	4.2			Подсистем за кретање претоварног уређаја		
		4.2.1		Гусенице		
		4.2.2		Електромотори		
		4.2.3		Преносници снаге		
5				**Подсистем заштите**	**Групишу се по подсистемима (1-6)**	
	5.1			Подсистем заштите од преоптерећења, уласка у недозвољене положаје		
	5.2			Подсистем звучне и светлосне сигнализације		
6				**Подсистем за напајање електричном енергијом**		
	6.1			Подсистем за напајање роторног багера електричном енергијом		
	6.2			Подсистем за напајање претоварног уређаја електричном енергијом		
7				**Подсистем за управљање**		
	7.1			Подсистем за управљање роторним багером		
	7.2			Подсистем за управљање претоварним уређајем		
8				**Тло**	**Не разматрају се**	
	8.1			Планум		
	8.2			Косина (чело етаже)		
9				**Оператери**		
	9.1			Психофизичко стање		
	9.2			Знање и вештине		

Друга етапа у спровођењу техничког решења јесте формирање базе података неопходних за оцену показатеља поузданости, односно за оцену параметара неопходних за квантификацију ризика. Она је формирана на основу електронског дневника рада I БТО система ПК „Тамнава Западно поље", слика 23 (стр. 17), заснованог на дневним извештајима Диспечерског центра РБ „Колубара", слика 24 (стр. 18), за период фебруар-септембар 2017. године

Претраживањем тако формиране базе података утврђена је структура застоја I БТО система ПК „Тамнава Западно поље" у периоду осматрања (фебруар-септембар 2017. године), табела 8, слика 25.

Табела 8. Структура застоја I БТО система

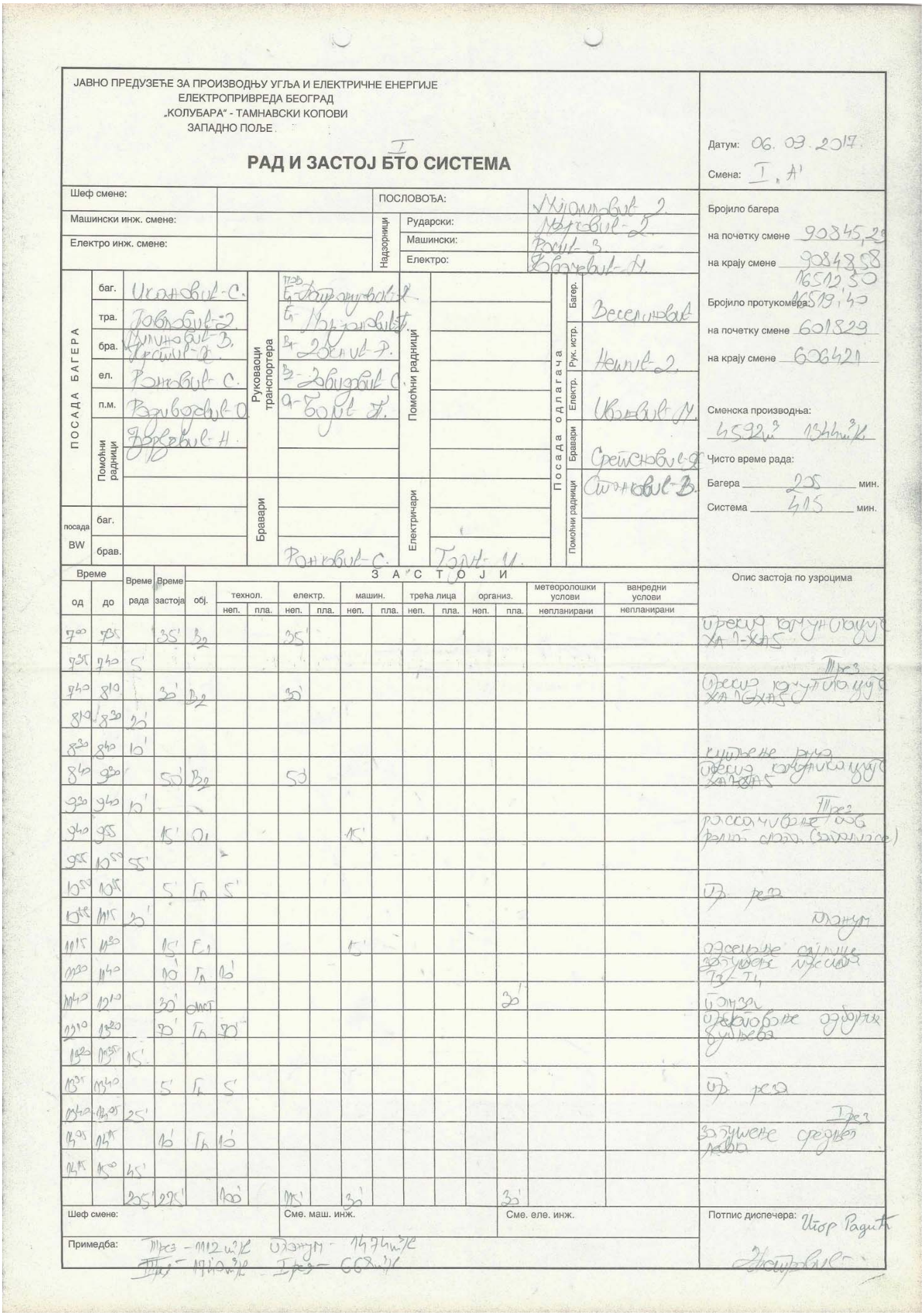
Врста застоја	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Технолошки	3005	43490	24,99
Електро	121	4710	2,71
Машински	1065	68190	39,19
Трећа лица	36	895	0,51
Организациони	629	54770	31,48
Метеоролошки услови	75	1925	1,11
Ванредни услови	2	15	0,01
Укупно	**4933**	**173995**	**100,00**



Слика 25. Процентуално временско учешће врста застоја I БТО система

Месец	Дан	Смена		Време				Време рада	Време застоја	Застоји														Опис застоја по узроцима	Бројило багера			ВАГА			Чисто време рада на крају смене			
				од		до				Систем	Објекат	технол.		електр.		машин.		трећа лица		организ.		метеоролошки услови	ванредни услови								Багер			Систем
				ч	мин	ч	мин	мин	мин			неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	неп.		Почетак смене	Крај смене	Разлика	Почетак смене	Крај смене	Разлика	УКУПНО	Угаљ	Преба.	УКУПНО
9	5	3	Ц	23	0	23	40		40	БТО1	Гл	40												чишћење одбојних бубњева										
9	5	3	Ц	23	40	0	10	30		БТО1														II р.										
9	5	3	Ц	0	10	0	30		20	БТО1	Гл	20												загушење централног левка и чишћење одбојних бубњева										
9	5	3	Ц	0	30	1	0		30	БТО1	Гл							30						чекање на цистерну										
9	5	3	Ц	1	0	1	15		15	БТО1	Гл	15												одгушење централног левка										
9	5	3	Ц	1	15	1	45		30	БТО1	Сист										30			пауза										
9	5	3	Ц	1	45	2	0	15		БТО1																								
9	5	3	Ц	2	0	2	5		5	БТО1	В2пов			5										прекид комуникације										
9	5	3	Ц	2	5	2	10		5	БТО1	Гл	5												промена реза										
9	5	3	Ц	2	10	2	20		10	БТО1	Гл	10												загушење истоварног левка										
9	5	3	Ц	2	20	2	40		20	БТО1	В2пов			20										прекид комуникације										
9	5	3	Ц	2	40	2	45	5		БТО1														III р.										
9	5	3	Ц	2	45	7	0		255	БТО1	В2пов			255										прекид комуникације	90844	90845	1	600376	601829	1453	50			432
9	6	1	А	7	0	7	35		35	БТО1	В2			35										прекид комуникације ХА1-ХА5										
9	6	1	А	7	35	7	40	5		БТО1														III р.										
9	6	1	А	7	40	8	10		30	БТО1	В2			30										прекид комуникације ХА1-ХА5										
9	6	1	А	8	10	8	30	20		БТО1																								
9	6	1	А	8	30	8	40	10		БТО1														купљење руча										
9	6	1	А	8	40	9	30		50	БТО1	В2			50										прекид комуникације ХА1-ХА5										
9	6	1	А	9	30	9	40	10		БТО1														III р.										
9	6	1	А	9	40	9	55		15	БТО1	О1					15								раскачивање повратног радног слога (запалио се)										
9	6	1	А	9	55	10	50	55		БТО1																								
9	6	1	А	10	50	10	55		5	БТО1	Гл	5												промена реза										
9	6	1	А	10	55	11	15	20		БТО1														пл.										
9	6	1	А	11	15	11	30		15	БТО1	Е1					15								одсецање сајлице										
9	6	1	А	11	30	11	40		10	БТО1	Гл	10												загушење пресипа Т3-Т4										
9	6	1	А	11	40	12	10		30	БТО1	Сист										30			пауза										
9	6	1	А	12	10	13	20		70	БТО1	Гл	70												прекопавање одбојних бубњева										
9	6	1	А	13	20	13	35	15		БТО1																								
9	6	1	А	13	35	13	40		5	БТО1	Гл	5												промена реза										
9	6	1	А	13	40	14	5	25		БТО1														I р.										
9	6	1	А	14	5	14	15		10	БТО1	Гл	10												загушење средњег левка										
9	6	1	А	14	15	15	0	45		БТО1															90845	90848	3	601829	606421	4592	205			415

Слика 23. Изглед странице електронског дневника рада I БТО система ПК „Тамнава - Западно поље“



ЈАВНО ПРЕДУЗЕЋЕ ЗА ПРОИЗВОДЊУ УГЉА И ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ
ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА БЕОГРАД
„КОЛУБАРА“ - ТАМНАВСКИ КОПОВИ
ЗАПАДНО ПОЉЕ

РАД И ЗАСТОЈ I БТО СИСТЕМА

Датум: 06. 03. 2017.
Смена: I, A'

Шеф смене:
Машински инж. смене:
Електро инж. смене:
ПОСЛОВОЂА: Милошевић Д.
Надзорници – Рударски: Марковић Д.
Надзорници – Машински: Росић З.
Надзорници – Електро: Благојевић Н.

Бројило багера
на почетку смене 90845,29
на крају смене 90848,58
16512,50
Бројило протукомера: 16519,40
на почетку смене 601829
на крају смене 606421

Сменска производња:
4592 m³ 1344 m³K

Чисто време рада:
Багера 205 мин.
Система 415 мин.

ПОСАДА БАГЕРА	баг.	Иконовић С.
	тра.	Јовановић Д.
	бра.	Милиновић З. Крстић Д.
	ел.	Ранковић С.
	п.м.	Радивојевић О.
	Помоћни радници	Ђорђевић Н.
посада BW	баг.	
	брав.	

Руководиоци транспортера	ПТО Е₁ - Лазаревић Д. Е₁ - Марјановић Т. В₁ - Зекић Р. В₂ - Звиздовић С. О - Бојић Л.
Бравари	Ранковић С.
Помоћни радници	
Електричари	Томић М.

Посада одлагача	
Багер.	Веселиновић
Рук. истр.	Нешић Д.
Електр.	Ивановић Н.
Бравари	Сретеновић Д.
Помоћни радници	Стојановић В.

Време		Време рада	Време застоја	обј.	ЗАСТОЈИ												Опис застоја по узроцима
					технол.		електр.		машин.		трећа лица		организ.		метеоролошки услови	ванредни услови	
од	до				неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	непланирани	непланирани	
7⁰⁰	7³⁵		35'	B₂			35'										прекид комуникације ХА 1 – ХА 5
7³⁵	7⁴⁰	5'															III рез
7⁴⁰	8¹⁰		30'	B₂			30'										прекид комуникације ХА 1 – ХА 5
8¹⁰	8³⁰	20'															
8³⁰	8⁴⁰	10'															чишћење рила
8⁴⁰	9³⁰		50'	B₂			50'										прекид комуникације ХА 1 – ХА 5
9³⁰	9⁴⁰	10'															III рез
9⁴⁰	9⁵⁵		15'	O₁					15'								раскачивање тоб. ролн. стан. (заглављена)
9⁵⁵	10⁵⁰	55'															
10⁵⁰	10⁵⁵		5'	Гл	5'												Пр. реза
10⁵⁵	11¹⁵	20'															Планум
11¹⁵	11³⁰		15'	E₁					15'								одсецање сајлице
11³⁰	11⁴⁰		10'	Гл	10'												затурање траке Т3 – Т4
11⁴⁰	12¹⁰		30'	сист										30'			Пауза
12¹⁰	13²⁰		70'	Гл	70'												прекопавање одбојних бубњева
13²⁰	13³⁵	15'															
13³⁵	13⁴⁰		5'	Гл	5'												Пр. реза
13⁴⁰	14⁰⁵	25'															I рез
14⁰⁵	14¹⁵		10'	Гл	10'												загушење средњег левка
14¹⁵	15⁰⁰	45'															
		205'	275'		100'		115'		30'					30'			

Шеф смене:
Сме. маш. инж.
Сме. еле. инж.
Потпис диспечера: Игор Радић
Петровић

Примедба: III рез - 1112 m³K Планум - 1474 m³K
II рез - 1710 m³K I рез - 668 m³K

Слика 24. Изглед листа „Рад и застој I БТО система“ ПК „Тамнава - Западно поље“

Током репрезентативног периода регистровано је укупно *ND*=2797 застоја изазваних роторним багером, чије је укупно време трајања *DT*=44545 min, табеле 9 и 10. Просечно време трајања застоја износило је

$$\overline{T}_{\mathrm{D}} = \frac{DT}{ND} = \frac{44545}{2797} = 15{,}9 \text{ min.}$$

Просечна времена трајања појединих врста застоја дата су у табели 11, док су процентуална учешћа појединих врста застоја приказана на сликама 26-29.

Табела 9. Број застоја (по врстама)

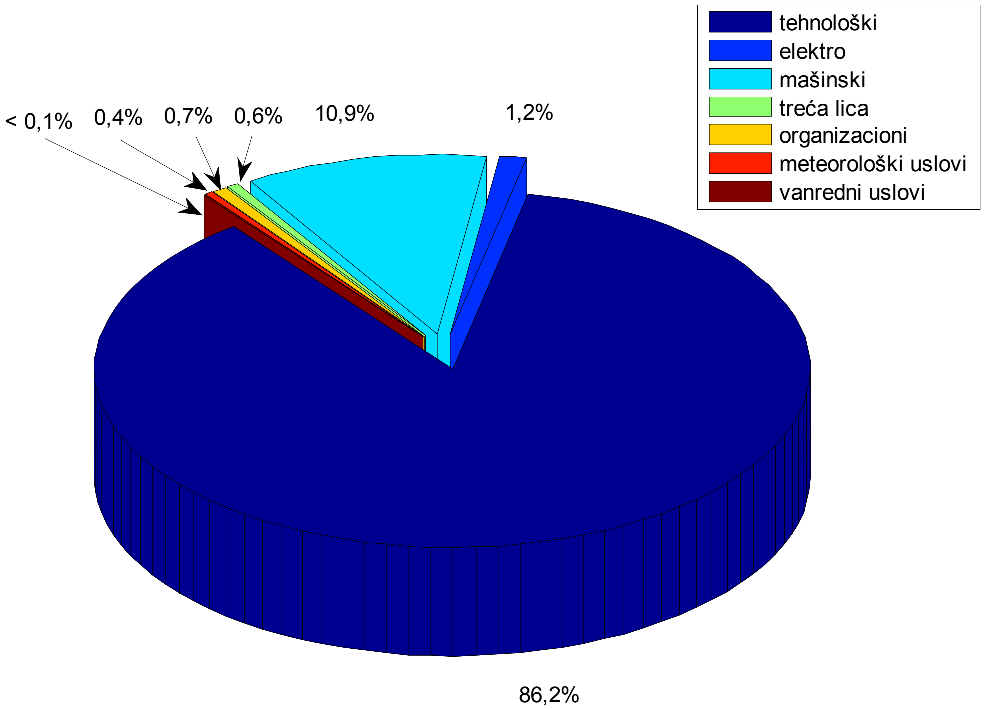
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	месечни број застоја						
Фебруар	301	2	37	7	6	4	0
Март	440	2	40	1	4	0	0
Април	361	8	74	0	1	2	0
Мај	326	1	53	0	5	3	0
Јун	255	3	27	0	3	0	1
Јул	294	5	30	1	0	0	0
Август	434	12	45	7	1	1	0
Укупно	**2411**	**33**	**306**	**16**	**20**	**10**	**1**

Табела 10. Времена трајања застоја (по врстама)

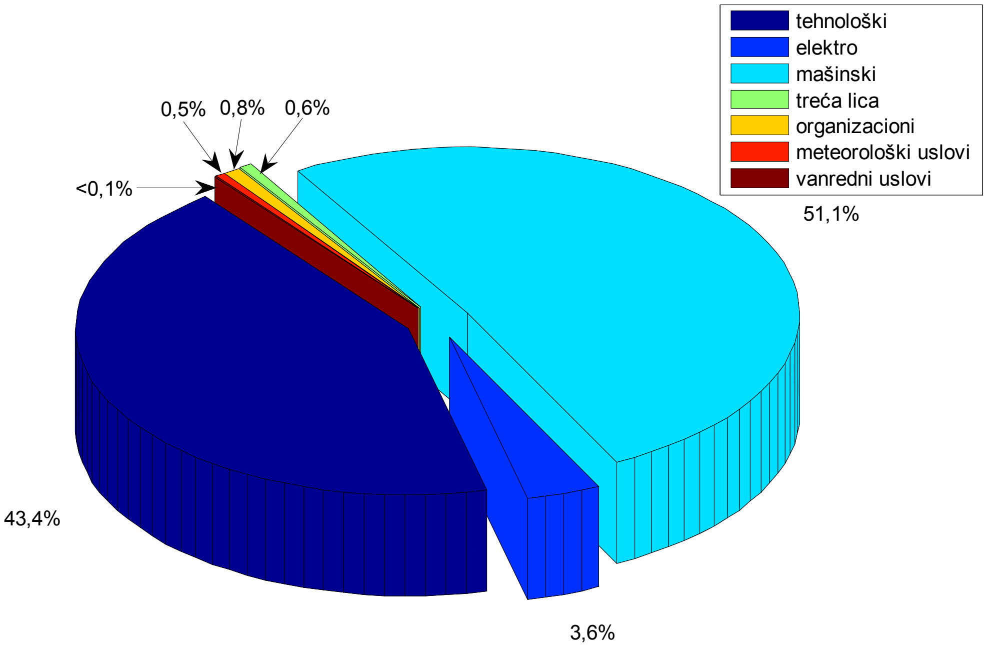
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	(min)						
Фебруар	1930	165	2010	95	85	70	0
Март	3460	15	2625	95	90	0	0
Април	2465	260	6130	0	10	10	0
Мај	1980	115	6365	0	95	20	0
Јун	1855	35	1590	0	60	0	15
Јул	2025	460	1250	35	0	0	0
Август	5605	565	2790	40	30	100	0
Укупно	**19320**	**1615**	**22760**	**265**	**370**	**200**	**15**

Табела 11. Просечна времена трајања појединих врста застоја

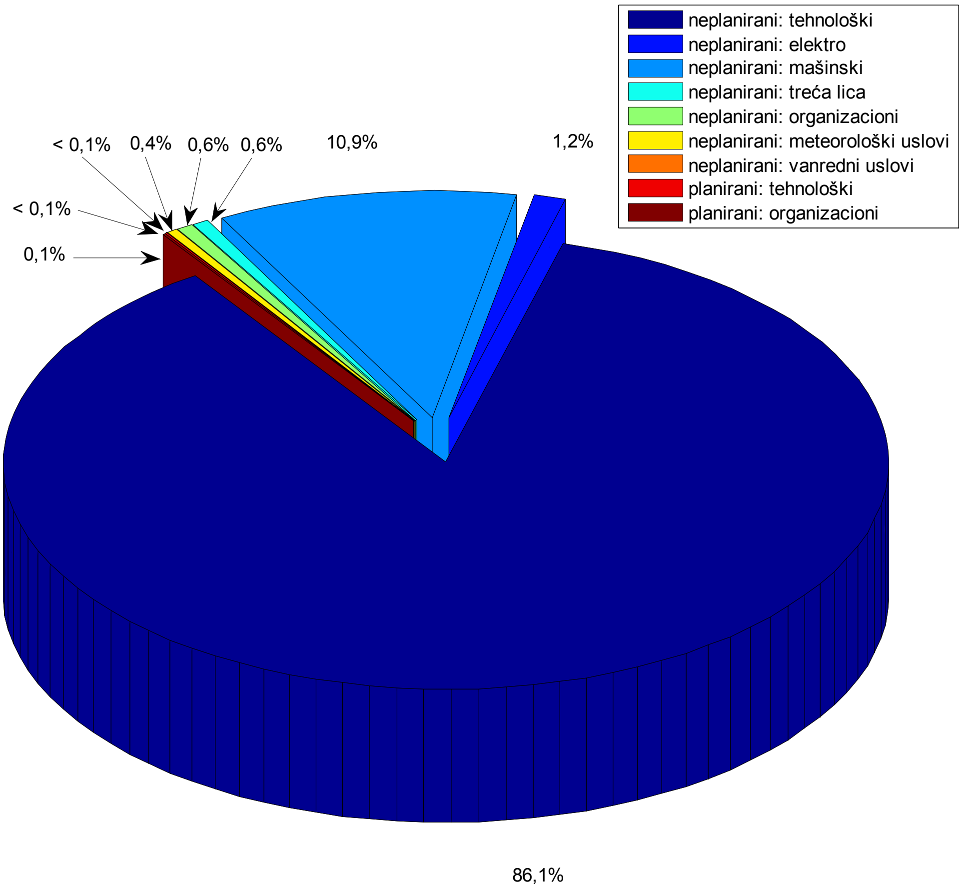
Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
(min)						
8,0	48,9	74,4	16,6	18,5	20,0	15



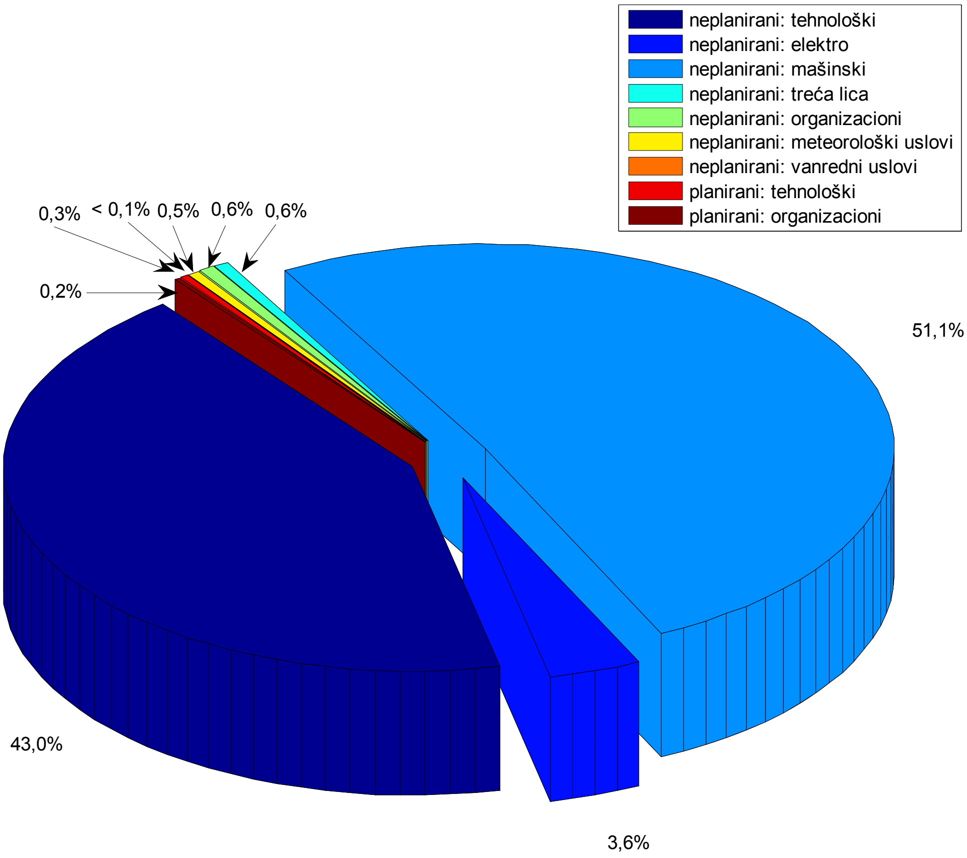
Слика 26. Процентуално учешће врста застоја у укупном броју застоја



Слика 27. Процентуално учешће врста застоја у укупном времену трајања застоја



Слика 28. Процентуално учешће врста застоја у укупном броју застоја



Слика 29. Процентуално учешће врста застоја у укупном времену трајања застоја

Трећа етапа примене техничког решења јесте идентификација и систематизација непланираних машинских и електро-отказа, односно формирање одговарајућих матрица, табеле 12 и 13, са основним подацима о отказу/застоју: ознака (колона 1), целина (подсклоп) у којој се јавио (колона 2), кратки опис (колона 3), подсистем коме припада подсклоп у застоју/отказу (колона 4), укупан број појављивања (колона 5), као и укупно време трајања (колона 6) у референтном периоду.

Табела 12. Непланирани машински откази/застоји разврстани према месту настанка (подсистему)

Ознака	Целина	Опис	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)
1	2	3	4	5	6
1	Сливник ротора	Отказ завртањских веза	1	2	100
2	Сливник ротора	Отказ заварене везе хабајућих шина	1	1	120
3	Ротор	Отказ заварене везе поклопца	1	1	55
4	Полумесец ротора	Отказ заварених веза	1	2	275
5	Полумесец ротора	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	7	2800
6	Зуби кашика	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	26	1420
7	Зуби кашика	Похабаност	1	1	100
8	Транспортери и чворна места	Откази завеса	5	4	375
9	Кашике	Загушење	1	9	280
10	Ротор	Налеп на конусу	1	1	100
11	Погон ротора	Отказ система подмазивања	1	10	95
12	Полумесец ротора	Контрола	1	7	350
13	Ротор	Контрола	1	1	10
14	Погон ротора	Контрола	1	1	75
15	Погон МКК	Несаосност мотора	2	1	40
16	Погон МКК	Отказ гумица	2	1	75
17	Шлајфингер	Дислокација ролнице	2	1	120
18	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	5	1	30
19	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	5	1	15
20	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	5	1	320
21	Погон транспортера Т1	Контрола	5	2	25
22	Погон централног левка	Отказ	5	5	1700
23	Погон централног левка	Контрола	5	1	35
24	Централни левак	Отказ заварених веза гребача	5	1	110
25	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	5	1	10
26	Транспортер Т1	Раскачивање ролни	5	3	50
27	Транспортер Т2	Раскачивање ролни	5	1	5
28	Пресип Т3-Т4	Раскачивање ролни	5	1	30
29	Колица	Отказ петоделног слога ролни	5	1	30
30	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (самозапаљење)	5	1	20
31	Транспортер Т1	Закошење траке	5	1	10

Табела 12. (наставак)

32	Транспортер Т2	Закошење траке	5	3	65
33	Транспортер Т3	Закошење траке	5	2	15
34	Транспортер Т4	Закошење траке	5	2	25
35	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	5	1	10
36	Транспортер Т2	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	1	70
37	Транспортер Т4	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	7	2710
38	Транспортер Т1	Неисправна трака	5	4	85
39	Транспортер Т3	Отказ споја траке	5	3	1100
40	Транспортер Т4	Оштећење траке	5	2	105
41	Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	5	1	25
42	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	5	2	145
43	Транспортер Т1	Проклизавање траке	5	1	5
44	Транспортер Т3	Проклизавање траке	5	7	55
45	Транспортер Т4	Проклизавање траке	5	1	10
46	Истоварни левак	Неисправна завеса	5	3	105
47	Транспортер Т4	Неисправна завеса	5	2	30
48	Пресип Т3-Т4	Неисправна завеса	5	1	15
49	Транспортер Т4	Контрола	5	7	90
50	Транспортер Т4	Отказ жабица	5	20	945
51	Транспортер Т1	Отказ жабица	5	1	10
52	Транспортер Т1	Отказ сајлица	5	7	65
53	Транспортер Т3	Отказ сајлица	5	1	10
54	Транспортер Т4	Отказ сајлица	5	4	50
55	Транспортери	Отказ сајлица	5	2	50
56	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	5	2	40
57	Истоварни левак	Загушење	5	5	55
58	Централни левак	Загушење	5	25	645
59	Пресип Т3-Т4	Загушење	5	4	125
60	Транспортер Т2	Запрљаност траке	5	7	260
61	Транспортер Т1	Запрљаност троугластог брисача на повратном бубњу	5	2	85
62	Транспортери	Запрљаност одбојних бубњева	5	4	120
63	Транспортер Т3	Налеп косог лима	5	2	80
64	Гребачи	Отказ	5	2	105
65	Централни левак	Отказ гребача (неопходно чишћење и враћање у функцију)	5	2	715
66	Одбојни бубањ	Запрљаност	5	4	60
67	Централни левак	Лом гребача	5	1	440
68	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	4	10	250
69	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	4	3	30
70	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице	4	3	65
71	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	9	390
72	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	120
73	Гусенични ланац претоварног уређаја	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	20
74	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ заварене везе осигурања	4	2	35
75	Гусенични ланац багера	Отказ папуча	4	5	1095
76	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ папуча	4	6	1015
77	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	4	1	270
78	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	4	3	170

Табела 12. (наставак)

79	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	4	1	40
80	Гусеница багера	Отказ тркача	4	2	315
81	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	95
82	Гусеница багера	Дислокација колица	4	1	10
83	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	4	1	480
84	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	4	1	90
85	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	4	2	20
86	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	5	1	30
87	Нераспоређено			6	255
88	Сливник и полумесец ротора	Отказ заварених и завртањских веза	1	2	450
89	Гусенични ланац	Отказ папуче	4	2	210
			Укупно	**306**	**22760**

Табела 13. Непланирани електро откази/застоји разврстани према месту настанка (подсистему)

Ознака 1	Целина 2	Опис 3	Подсистем 4	Укупан број појављивања 5	Укупно време трајања (min) 6
1	Коло сигнала старта ротора	Отказ	1	2	20
2	Радна блокада	Отказ	1	1	10
3	Електромагнетна спојница	Контрола	1	1	25
4	Команда горње градње	Кратки спој	2	2	20
5	Шлајфингер	Санација електричних водова	2	1	120
6	Шлајфингер	Дислокација електричних водова	2	1	5
7	МТБ	Отказ	4	1	5
8	Централни левак	Отказ мотора	5	2	140
9	Централни левак	Отказ заштите мотора	5	1	100
10	Потезно уже Т3	Активирање	5	1	5
11	Мотор одбојног бубња	Отказ (демонтажа)	5	1	45
12	Мотор одбојних бубњева	Отказ (замена)	5	1	85
13	Горњи мотор одбојног бубња	Отказ (замена)	5	1	200
14	Откочник Т2	Отказ	5	4	35
15	Мотор Т3	Отказ термичке заштите	5	1	15
16	Мотор истоварног левка	Отказ	5	1	35
17	Мотор истоварног левка	Отказ (замена)	5	1	45
18	Кочница погона истоварног левка	Контрола	5	1	10
19	Команда погона централног левка	Отказ	5	1	10
20	Осигурачи	Испад	7	1	10

Табела 13. (наставак)

21	Нисконапонско напајање	Отказ	7	1	10
22	Високонапонски кабл	Пробој	7	4	540
23	Подсистем напајања	Контрола	7	1	10
24	Нераспоређено			1	115

Са аспекта експлоатације и одржавања СПЕ се одликују бројним специфичностима у односу на индустријске системе. Окружење за одржавање СПЕ изузетно је тешко, јер се операције одржавања доминантно изводе „in situ“, што, само по себи, знатно продужава време интервенција и захтева специфичну организацију система одржавања. На основу вишедеценијског искуства формирани су критеријуми за оцену параметара ризика, табеле 14-16, који су у потпуности усаглашени са условима експлоатације и одржавања СПЕ у РБ „Колубара“.

Табела 14. Ранг вероватноће појављивања отказа СПЕ

Учестаност појављивања	***MTBF****	**Ранг *PFR***
Готово увек	<2 часа	10
Веома висока	2-10 часова	9
Прилично висока	11-100 часова	8
Висока	101-400 часова	7
Просечна	401-1000 часова	6
Ниска	1001-2000 часова	5
Прилично ниска	2001-3000 часова	4
Врло ниска	3001-6000 часова	3
Појединачни случајеви	6001-10000 часова	2
Готово никад	>10000 часова	1

*Средње време између отказа

Табела 15. Ранг тежине последица отказа СПЕ

Тежина последица	**Опис**	**Утицај на извршавање функција**	**Ранг *FDV***
Катастрофална	Непоправљива оштећења (уништење); смртни случајеви; варијација трошкова >15% од предвиђених; драстично нарушавање пословног угледа.	Немогућност извршавања свих функција.	10
Врло озбиљна	Врло висок степен оштећења, уз нарушавање сигурности; тешке повреде; варијација трошкова >15% од предвиђених; озбиљно нарушавање пословног угледа у јавности.	Немогућност извршавања већине функција.	9

Табела 15.(наставак)

Врло висока	Значајан губитак перформанси, значајна оштећења уз могућност репарације; значајно нарушавање сигурности; могућност повређивања оператера, неопходно боловање; варијација трошкова >10% али ≤15% од предвиђених; губитак већи од четворочасовне производње; нарушавање пословног угледа у јавности.	Немогућност потпуног извр-шавања више функција, уз остваривање минималних ефеката; застоји дужи од 8 h.	8
Висока	Систем није у стању пуне радне способности, неке од функција не извршавају се у потпуности, отказ репарабилан; сигурност није нарушена у значајној мери; могућност повређивања оператера, неопходно боловање; варијација трошкова >10% или ≤15% од предвиђених; губици између двочасовне и четворочасовне производње; губитак угледа у пословном окружењу.	Немогућност потпуног извр-шавања одређене функције, остале се остварују изнад минимума; застоји 4-8 h.	7
Значајна	Систем је у стању радне способности, уз губитак перформанси, отказ репарабилан; сигурност није нарушена; могућност повређивања оператера, без боловања; варијација трошкова >5% али ≤10% од предвиђених; губици између једночасовне и двочасовне производње; губитак угледа у пословном окружењу.	Способност извршавања свих функција, уз погоршање пер-форманси; застоји 1-4 h.	6
Приметна	Систем је у стању пуне радне способности, уз појаву репарабилног отказа, сигуран је, захтева подешавање; нарушен радни амбијент што изазива незадовољство руковаоца, а у неким случајевима и пружање прве помоћи; варијација трошкова <5% од предвиђених; губици нижи од једночасовне производње.	Способност извршавања свих функција, уз незнатно погор-шање перформанси; застоји 0,5-1 h.	5
Незнатна	Систем је у стању пуне радне способности, уз незнатна физичка оштећења, сигуран је, захтева подешавање; рад је праћен ефектима (повремене вибрације, бука) који могу да изазову неудобност/непријатност/ узнемирење руковаоца; без израженог губитка производње.	Способност извршавања свих функција, уз неопходност подешавања, застој краћи од 30 min.	4
Слаба	Систем је у стању пуне радне способности, уз незнатна физичка оштећења, сигуран је, захтева подешавање; рад је праћен ефектима (повремене вибрације, бука) који могу да изазову неудобност/непријатност/ узнемирење руковаоца.	Способност извршавања свих функција, уз неопходност по-дешавања.	3
Минорна	Систем је у стању пуне радне способности, нема знакова физичког оштећења, сигуран је, захтева незнатно подешавање; рад је праћен ефектима (повремена подрхтавања, бука ниског нивоа) које руковалац вероватно неће уочити.	Све фукције се извршавају, неопходно незнатно подеша-вање.	2
Безначајна	Систем је у стању пуне радне способности, отказ који не утиче на перформансе система, оператер га не уочава; сигурност имовине и лица није нарушена; не постоје финансијски губици.	Све функције се извршавају у пројектованим границама.	1

Табела 16. Ранг вероватноће детекције одређене врсте отказа СПЕ

Вероватноћа детекције	Опис	Ранг *PFR*
Готово немогућ догађај	ППО* не омогућава детекцију потенцијалног отказа, или се такво одржавање не спроводи	10
Минорна	Незнатни изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	9
Изузетно ниска	Изузетно мали изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	8
Веома ниска	Веома мали изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	7
Ниска	Мали изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	6
Умерена	Умерени изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	5
Просечна	Просечни изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	4
Висока	Велики изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	3
Врло висока	Врло велики изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	2
Готово сигуран догађај	ППО практично увек омогућава детекцију потенцијалног отказа	1

*Планско-превентивно одржавање

У четвртој етапи примене техничког решења, на основу података презентираних у табелама 12-16, одређени су степени критичности свих врста непланираних машинских и електро отказа/застоја, табеле 17 и 18.

Начелно, снижавање вредности степена критичности одређене врсте отказа остварује се снижавањем ранга параметара за оцену ризика (*PF*, *FDV*, *PFR*), што се реализује применом одговарајућих корективних мера током пројектовања, израде или одржавања разматраног техничког система. Применом превентивних и корективних мера током одржавања СПЕ могуће је утицати само на вредности *PFR*, што указује на изузетан значај спровођења FMECA анализа од најранијих фаза животног циклуса система.

У петој етапи примене техничког решења презентирани су резултати примене FMECA одржавања (S-FMECA) на отказе највишим степеном критичности, табеле 19 и 20. Применом превентивних и корективних мера остварује се значајно смањење њихових степена критичности, што представља и коначни резултат примене техничког решења.

Без обзира на ограничења и слабости које су иманентне свакој методи, S-FMECA техника представља основни алат за подизање нивоа не само поузданости SMS, већ и његове сигурности. Наиме, подаци добијени применом S-FMECA технике представљају основу за статистичку анализу сигурности SMS. Подаци о отказима који се јављају током експлоатације СПЕ, добијени применом S-FMECA, изузетно су значајни зато што су узроци потенцијалних хаварија исти, или слични узроцима отказа уочених током S-FMECA анализе.

Табела 17. Степен критичности непланираних машинских отказа/застоја (ознаке отказа/застоја према табели 6.15)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив	низак	средњи	висок	екстремни
🟩 RPN≤20	🟩 20<RPN≤70	🟨 70<RPN≤200	🟧 200<RPN≤400	🟥 RPN>400

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
30		🟧	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (запаљење)	5	1	20	3551.50	3	20.00	9	9	**243**
5		🟧	Полумесец ротора	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	7	2800	500.74	6	400.00	7	4	**168**
22		🟧	Погон централног левка	Отказ	5	5	1700	704.70	6	340.00	7	4	**168**
4		🟧	Полумесец ротора	Отказ заварених веза	1	2	275	1773.63	5	137.50	6	5	**150**
80		🟧	Гусеница багера	Отказ тркача	4	2	315	1773.29	5	157.50	6	5	**150**
75		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ папуча	4	5	1095	706.72	6	219.00	6	4	**144**
76		🟧	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ папуча	4	6	1015	589.15	6	169.17	6	4	**144**
71		🟧	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	9	390	393.93	7	43.33	5	4	**140**
50		🟧	Транспортер Т4	Отказ жабица	5	20	945	176.80	7	47.25	5	4	**140**
65		🟧	Централни левак	Отказ гребача	5	2	715	1769.96	5	357.50	7	4	**140**
37		🟧	Транспортер Т4	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	7	2710	500.95	6	387.14	7	3	**126**
88		🟧	Сливник и полумесец ротора	Отказ заварених и завртањских веза	1	2	450	1772.17	5	225.00	6	4	**120**
89		🟧	Гусенични ланац	Отказ папуче	4	2	210	1774.17	5	105.00	6	4	**120**
59		🟧	Пресип Т3-Т4	Загушење	5	4	125	887.44	6	31.25	5	4	**120**
60		🟧	Транспортер Т2	Запрљаност траке	5	7	260	506.79	6	37.14	5	4	**120**
68		🟧	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	4	10	250	354.77	7	25.00	4	4	**112**
58		🟧	Централни левак	Загушење	5	25	645	141.64	7	25.80	4	4	**112**
8		🟧	Транспортери и чворна места	Откази завеса	5	4	375	886.40	6	93.75	6	3	**108**
9		🟧	Кашике	Загушење	1	9	280	394.13	7	31.11	5	3	**105**
39		🟧	Транспортер Т3	Отказ споја траке	5	3	1100	1177.83	5	366.67	7	3	**105**
78		🟧	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	4	3	170	1183.00	5	56.67	5	4	**100**
61		🟧	Транспортер Т1	Запрљаност троугластог брисача на повратном бубњу	5	2	85	1775.21	5	42.50	5	4	**100**
63		🟧	Транспортер Т3	Налеп косог лима	5	2	80	1775.25	5	40.00	5	4	**100**
62		🟧	Транспортери	Запрљаност одбојних бубњева	5	4	120	887.46	6	30.00	4	4	**96**
2		🟧	Сливник ротора	Отказ заварене везе хабајућих шина	1	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
17		🟧	Шлајфингер	Дислокација ролнице	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
83		🟧	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	4	1	480	3543.83	3	480.00	7	4	**84**

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватноће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20		🟧	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	5	1	320	3546.50	3	320.00	7	4	**84**
67		🟧	Централни левак	Лом гребача	5	1	440	3544.50	3	440.00	7	4	**84**
70		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице	4	3	65	1183.58	5	21.67	4	4	**80**
1		🟧	Сливник ротора	Отказ завртањских веза	1	2	100	1775.08	5	50.00	5	3	**75**
3		🟧	Ротор	Отказ заварене везе поклопца	1	1	55	3550.92	3	55.00	5	5	**75**
40		🟧	Транспортер Т4	Оштећење траке	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
46		🟧	Истоварни левак	Неисправна завеса	5	3	105	1183.36	5	35.00	5	3	**75**
64		🟧	Гребачи	Отказ	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
72		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	120	3549.83	3	120.00	6	4	**72**
84		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	4	1	90	3550.33	3	90.00	6	4	**72**
24		🟧	Централни левак	Отказ заварених веза гребача	5	1	110	3550.00	3	110.00	6	4	**72**
38		🟧	Транспортер Т1	Неисправна трака	5	4	85	887.60	6	21.25	4	3	**72**
57		🟧	Истоварни левак	Загушење	5	5	55	710.18	6	11.00	3	4	**72**
66		🟧	Одбојни бубањ	Запрљаност	5	4	60	887.71	6	15.00	3	4	**72**
6		🟧	Зуби кашика	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	26	1420	135.70	7	54.62	5	2	**70**
77		🟧	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	4	1	270	3547.33	3	270.00	7	3	**63**
12	🟧		Полумесец ротора	Контрола	1	7	350	506.57	6	50.00	5	2	**60**
74		🟧	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ заварене везе осигурања	4	2	35	1775.63	5	17.50	3	4	**60**
79		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	4	1	40	3551.17	3	40.00	5	4	**60**
42		🟧	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	5	2	145	1774.71	5	72.50	6	2	**60**
10		🟧	Ротор	Налеп на конусу	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	3	**54**
16		🟧	Погон МКК	Отказ гумица	2	1	75	3550.58	3	75.00	6	3	**54**
81		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	95	3550.25	3	95.00	6	3	**54**
36		🟧	Транспортер Т2	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	1	70	3550.67	3	70.00	6	3	**54**
15		🟧	Погон МКК	Несаосност мотора	2	1	40	3551.17	3	40.00	5	3	**45**
23	🟧		Погон централног левка	Контрола	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	3	**45**
26		🟧	Транспортер Т1	Раскачивање ролни	5	3	50	1183.67	5	16.67	3	3	**45**
47		🟧	Транспортер Т4	Неисправна завеса	5	2	30	1775.67	5	15.00	3	3	**45**
56		🟧	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	5	2	40	1775.58	5	20.00	3	3	**45**
11		🟧	Погон ротора	Отказ система подмазивања	1	10	95	355.02	7	9.50	2	3	**42**
69		🟧	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	4	3	30	1183.78	5	10.00	2	4	**40**

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
32		🟧	Транспортер Т2	Закошење траке	5	3	65	1183.58	5	21.67	4	2	**40**
55		🟧	Транспортери	Отказ сајлица	5	2	50	1775.50	5	25.00	4	2	**40**
7		🟧	Зуби кашика	Похабаност	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	2	**36**
14	🟧		Погон ротора	Контрола	1	1	75	3550.58	3	75.00	6	2	**36**
73		🟧	Гусенични ланац претоварног уређаја	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	20	3551.50	3	20.00	3	4	**36**
18		🟧	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
28		🟧	Пресип Т3-Т4	Раскачивање ролни	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
29		🟧	Колица	Отказ петоделног слога ролни	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
44		🟧	Транспортер Т3	Проклизавање траке	5	7	55	507.27	6	7.86	2	3	**36**
49	🟧		Транспортер Т4	Контрола	5	7	90	507.19	6	12.86	3	2	**36**
54		🟧	Транспортер Т4	Отказ сајлица	5	4	50	887.75	6	12.50	3	2	**36**
86		🟧	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
85		🟧	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	4	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
21	🟧		Погон транспортера Т1	Контрола	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
34		🟧	Транспортер Т4	Закошење траке	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
87	🟧		Нераспоређено			6	255	591.26	6	42.50	5	1	**30**
19		🟧	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
48		🟧	Пресип Т3-Т4	Неисправна завеса	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
82		🟧	Гусеница багера	Дислокација колица	4	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
25		🟧	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
41	🟧		Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	5	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
51		🟧	Транспортер Т1	Отказ жабица	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
52		🟧	Транспортер Т1	Отказ сајлица	5	7	65	507.25	6	9.29	2	2	**24**
33		🟧	Транспортер Т3	Закошење траке	5	2	15	1775.79	5	7.50	2	2	**20**
45		🟧	Транспортер Т4	Проклизавање траке	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	3	**18**
13	🟧		Ротор	Контрола	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
31		🟧	Транспортер Т1	Закошење траке	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
35		🟧	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
53		🟧	Транспортер Т3	Отказ сајлица	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
27		🟧	Транспортер Т2	Раскачивање ролни	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	**9**
43		🟧	Транспортер Т1	Проклизавање траке	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	**9**

Табела 18. Степен критичности непланираних електро отказа/застоја (ознаке отказа/застоја према табели 6.34)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив 🟩 RPN≤20
низак 🟩 20<RPN≤70
средњи 🟨 70<RPN≤200
висок 🟧 200<RPN≤400
екстремни 🟥 RPN>400

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
22		🟧	Високонапонски кабл	Пробој кабловске главе R045	7	4	540	885.71	6	135.00	6	6	**216**
8		🟧	Централни левак	Отказ мотора	5	2	140	1774.75	5	70.00	6	4	**120**
5		🟧	Шлајфингер	Санација електричних водова	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	4	**72**
9		🟧	Централни левак	Отказ заштите мотора	5	1	100	3550.17	3	100.00	6	4	**72**
12		🟧	Мотор одбојних бубњева	Отказ (замена)	5	1	85	3550.42	3	85.00	6	4	**72**
13		🟧	Горњи мотор одбојног бубња	Отказ (замена)	5	1	200	3548.50	3	200.00	6	4	**72**
11		🟧	Мотор одбојног бубња	Отказ (демонтажа)	5	1	45	3551.08	3	45.00	5	4	**60**
14		🟧	Откочник Т2	Отказ	5	4	35	887.81	6	8.75	2	5	**60**
16		🟧	Мотор истоварног левка	Отказ	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	4	**60**
17		🟧	Мотор истоварног левка	Отказ (замена)	5	1	45	3551.08	3	45.00	5	4	**60**
21		🟧	Нисконапонско напајање	Низак напон	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	9	**54**
20		🟧	Осигурачи	Испад	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	8	**48**
4		🟧	Команда горње градње	Кратки спој	2	2	20	1775.75	5	10.00	2	4	**40**
15		🟧	Мотор Т3	Отказ термичке заштите	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	4	**36**
1		🟧	Коло сигнала старта ротора	Отказ	1	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
19		🟧	Команда погона централног левка	Отказ	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	5	**30**
3	🟧		Електромагнетна спојница	Контрола	1	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
2		🟧	Радна блокада	Отказ	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	3	**18**
24	🟧		Нераспоређено			1	115	3549.92	3	115.00	6	1	**18**
10	🟧		Потезно уже Т3	Активирање	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	5	**15**
6		🟧	Шлајфингер	Дислокација електричних водова	2	1	5	3551.75	3	5.00	1	4	**12**
18	🟧		Кочница погона истоварног левка	Контрола	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
23	🟧		Подсистем напајања	Контрола	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
7		🟧	МТБ	Отказ	4	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	**9**

Табела 19. FMECA одржавања роторног багера SRs 2000x32/5+VR (непланирани машински откази/застоји)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив		низак		средњи		висок		екстремни	
🟩	RPN≤20	🟩	20<RPN≤70	🟨	70<RPN≤200	🟧	200<RPN≤400	🟥	RPN>400

Група градње	Целина	Отказ				Постојеће стање					Побољшано стање				
		ознака	опис	последица	узрок	Превентивне мере	PF	FDV	PFR	RPN	Корективне мере	PF	FDV	PFR	RPN
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
МТМ	повратна ролна Т3	30	блокирање ролне	самозапаљење	блокирање улежиштења	визуелна контрола	3	9	9	**243**	појачана визуелна контрола функционалности	3	9	3	**81**
											примена дијагностике	3	9	2	**54**
											континуални мониторинг	3	9	1	**27**
МКМ	полумесец ротора	5	губитак интегритета (знатна оштећења која захтевају замену сегмената)	нерегуларан рад, губитак капацитета	грешка у монтажи и извођењу веза; неадекватан материјал	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	6	7	4	**168**	појачана контрола монтаже и појачана визуелна контрола стања	5	7	2	**70**
											реатестација уграђених материјала и појачана визуелна контрола стања	4	7	2	**56**
											реатестација уграђених материјала, појачана контрола монтаже и појачана визуелна контрола стања	2	7	2	**28**
МТМ	погон централног левка	22	демонтажа и монтажа погона	смањен проток материјала, губитак капацитета	отежано кретање материјала кроз левак	визуелна контрола; чишћење	6	7	4	**168**	појачана визуела контрола и чишћење	6	7	2	**84**
											коришћење посебних превлака за смањење ефекта лепљења материјала и појачани надзор	3	7	2	**42**
МТБ	гусенични ланац	93	губитак интегритета папуча (неопходна замена)	нерегуларно кретање гусеница; повећани отпори кретања и појачана неравномерност оптерећења	неадекватна припрема планума; неадекватан материјал папуче; грешке у изради папуче	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	7	6	4	**168**	појачана визуелна контрола стања папуча	7	6	2	**84**
											боља припрема планума, појачана визуелна контрола стања папуча	3	6	2	**36**
											прописана припрема планума, појачана контрола материјала и процеса израде папуча, појачана визуелна контрола стања папуча	1	6	2	**12**
МТБ	гусеница багера	80	отказ тркача (неопходна замена)	нерегуларно кретање, повећани отпори кретања и појачана неравномерност оптерећења	неадекватна припрема планума; неадекватан материјал тркача; грешке у изради тркача	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	5	6	5	**150**	појачана визуелна контрола стања тркача	5	6	3	90
											прописана припрема планума, појачана визуелна контрола стања тркача	3	6	3	54
											прописана припрема планума, појачана визуелна контрола стања тркача	2	6	3	36
МТБ	гусенични ланац	91	оштећење и дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	нерегуларно кретање, раскачивање ланца	грешке у монтажи; неадекватан избор материјала	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	7	5	4	**140**	појачана контрола монтаже	5	5	4	**100**
											реатестација уграђених материјала и појачана контрола монтаже	3	5	3	**45**

Табела 20. FMECA одржавања роторног багера SRs 2000x32/5+VR (непланирани електро откази/застоји)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив		низак		средњи		висок		екстремни	
🟩	RPN≤20	🟩	20<RPN≤70	🟨	70<RPN≤200	🟧	200<RPN≤400	🟥	RPN>400

Група градње	Целина	Отказ				Постојеће стање					Побољшано стање				
		ознака	опис	последица	узрок	Превентивне мере	PF	FDV	PFR	RPN	Корективне мере	PF	FDV	PFR	RPN
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
НЕЛЕ*	високонапонски кабл	22	пробој кабловске главе R045	прекид напајања	појава пренапона; улаз воде у пролазни орман R045	визуелна контрола; заштита од уласка воде у орман R045	6	6	6	**216**	појачана контрола заштите од уласка воде у орман	3	6	6	**108**
											замена кабловске главе	2	6	6	**72**
											замена кабловске главе и појачана контрола заштите од уласка воде у орман	1	6	6	**36**
МТМ	централни левак	8	отказ мотора	прекид рада	нагомилани материјал око мотора који спречава хлађење	визуелна контрола; чишћење нагомиланог материјала	5	6	4	**120**	појачана контрола	4	6	4	**96**
											уградња сонде заштите од судара	3	6	4	**72**
											контрола успорења кретања мотора	2	6	4	**48**
МКК	шлајфингер (механизам за ношење каблова)	5	оштећења каблова	прекид рада	механичко оштећење механизма за намотавање и одмотавање каблова	визуелна контрола; сервис механизма за ношење каблова	3	6	4	**72**	појачана контрола	2	6	4	**48**
											ревитализација постојећег механизма за ношење каблова	2	6	3	**36**
											промена механизма за ношење каблова (уградња новог типа пример G3)	1	6	3	**18**
МТМ	централни левак	9	отказ заштите мотора	прекид рада	дотрајалост и квар електричне заштите мотора	провера реаговања заштите	3	6	4	**72**	замена постојеће заштите заштитом новог типа	2	6	3	**36**
МТМ	одбојни бубњеви	12	отказ мотора	прекид рада	нагомилани материјал на бубњевима	визуелна контрола; чишћење нагомиланог материјала	3	6	4	**72**	појачана контрола	2	6	4	**48**
											побољшање функције гребача	1	6	4	**24**
											повећање снаге погонског мотора (под условом да то дозвољава машински склоп погона)	1	6	4	**24**

*Подсистем за напајање електричном енергијом

11. ТЕХНИЧКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

У наставку су дати делови студије под називом „Минимизација ризика у процесу одржавања багерских јединица на површинским коповима“, који се односе на техничко решење.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
БЕОГРАД, Краљице Марије 16

СТУДИЈА

МИНИМИЗАЦИЈА РИЗИКА У ПРОЦЕСУ ОДРЖАВАЊА БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА

ИНВЕСТИТОР:

ЈАВНО ПРЕДУЗЕЋЕ „ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ“
ОГРАНАК РБ „КОЛУБАРА“ - ЛАЗАРЕВАЦ

Руководилац пројекта

Срђан Бошњак

Проф. др Срђан Бошњак

Продекан за научноистраживачку делатност

Проф. др Драгослава Стојиљковић

Београд, 07. јуни 2018. године

САДРЖАЈ

3 АНАЛИЗА ЕКСПЛОАТАЦИОНЕ ПОУЗДАНОСТИ БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА

Савремена површинска експлоатација угља, осим високих капацитета, захтева и високу поузданост свих елемената система, која се, пре свега, мора остварити одговарајућим дизајном. Неки од узрока захтева да се већ у фази пројектовања узме у обзир и поузданост су следећи: увођење клаузула о поздaности у пројектни задатак, сложеност и софистицираност система, високи трошкови набавке машина и опреме што је ствар од општег интереса јавности, лоша претходна искуства, губитак престижа, конкуренција, као и повећање броја тужби везаних за проблеме сигурности, поузданости и квалитета система површинске експлоатације. Да би се одговорило оштрим захтевима корисника, пројектанти рударских машина и опреме, морају се држати смерница [61] приказаних на слици 3.1.

Испитивање (тестирање) представља важну етапу процеса развоја инжењерског производа. Током тестирања производ се подвргава условима који омогућавају да се утврде карактеристике његовог експлоатационог понашања, његове слабости, као и склоност ка одређеној врсти отказа.

Тестирање поузданости је такође важан сегмент процеса испитивања производа. Усмерено је ка добијању скупа информација везаних за отказе, а то су, пре свега, склоност производа или опреме ка отказима, као и за последице које могу бити изазване тим отказима. Приликом конципирања програма тестирања поузданости треба треба имати на уму следећи став: „добар програм тестирања јесте онај који захтева минимални обим тестирања, а даје максимални обим информација о отказу“ [62].

Тестирања поузданости уобичајено се сврставају у три групе:

- развојна/пробна;
- квалификациона и пријемна;
- експлоатациона.

Циљеви развојних/пробних испитивања поузданости су:

- идентификација неопходних измена у дизајну производа са аспекта поузданости;
- валидација унапређења поузданости дизајна производа.

Слика 3.1. Смернице за пројектовање машина и опреме за површинску експлоатацију

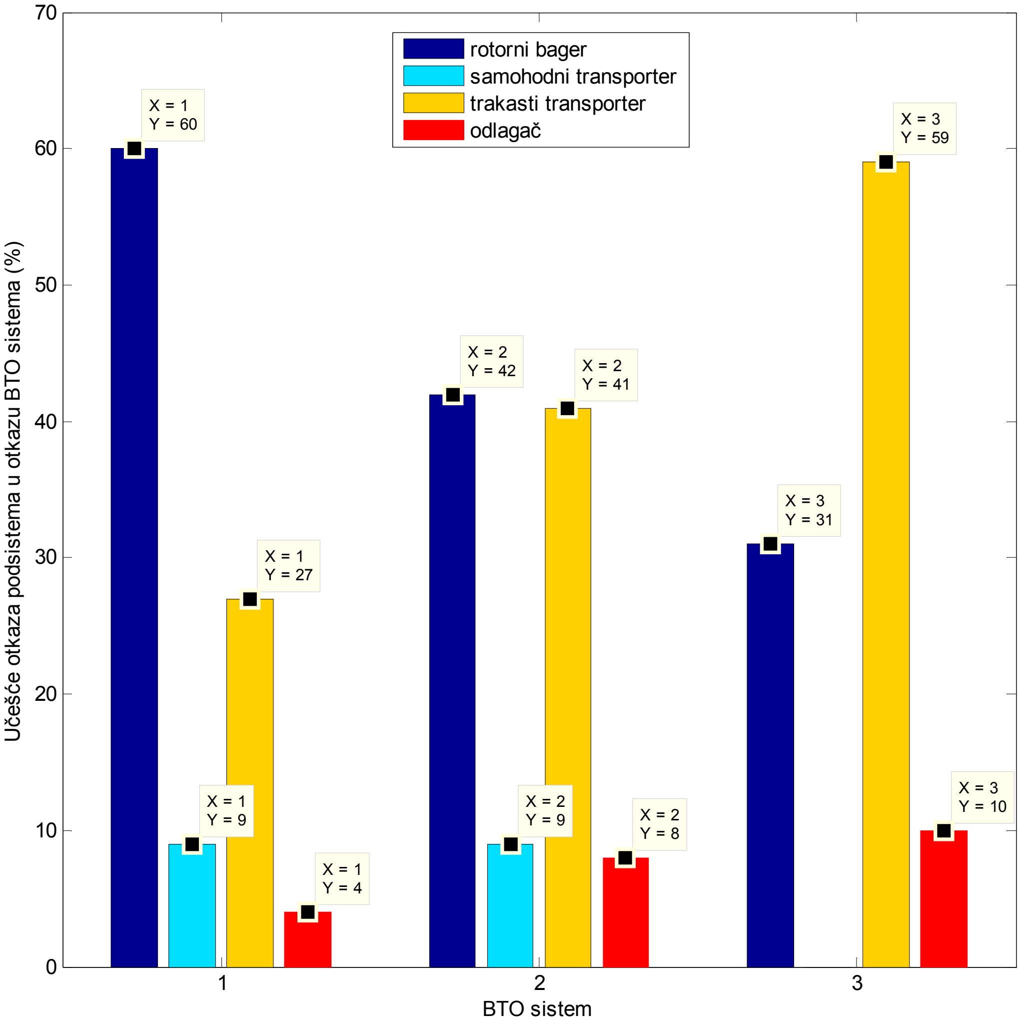
Два основна циља квалификационих и пријемних испитивања поузданости су:

- утврђивање прихватљивости разматраног производа са аспекта поузданости;
- утврђивање усаглашености дизајна производа са специфичностима његове намене.

Циљеви испитивања експлоатационе поузданости су:

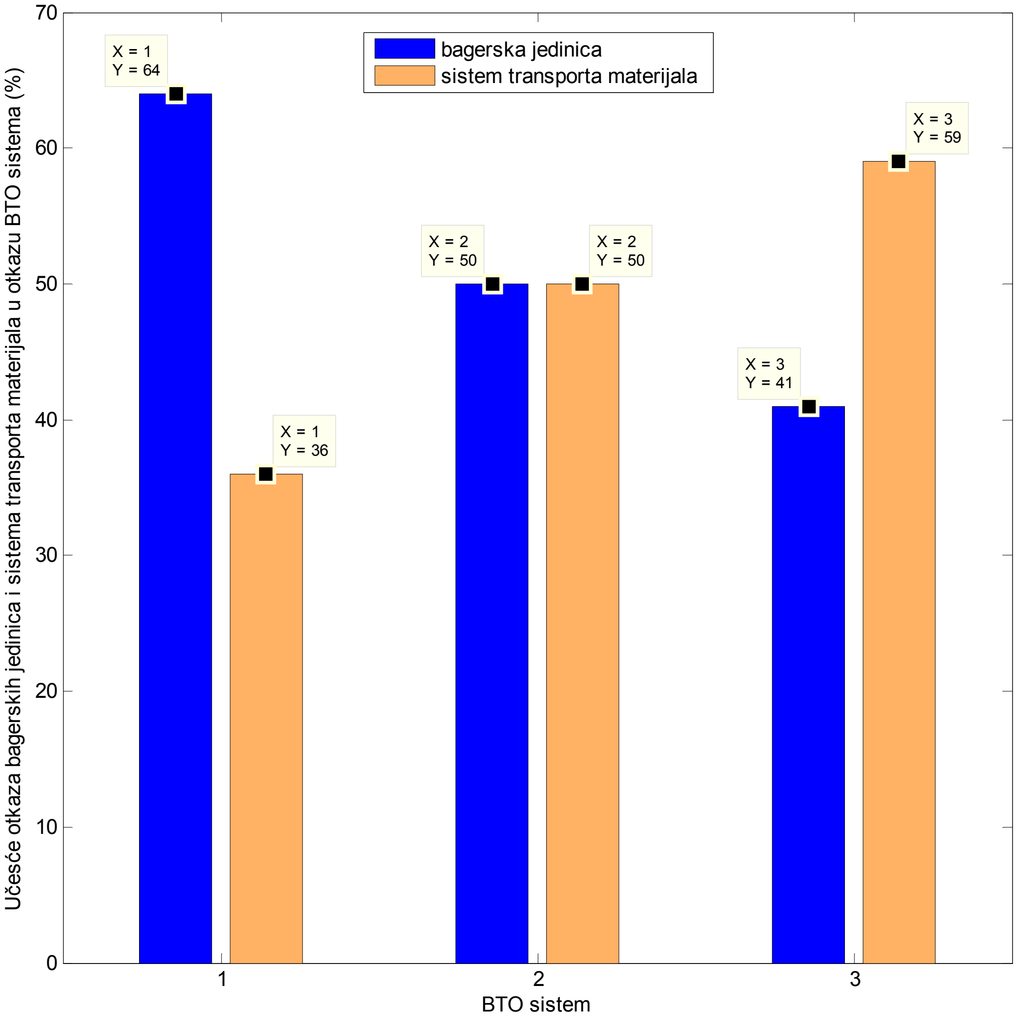
- провера резултата анализа поузданости спроведених током пројектовања и развоја пеоизвода;
- добијање података неопходних за наредне активности везане за проблем поузданости;
- добијање података који указују на евентуалну неопходност промена у начину експлоатације и одржавању, да би се остварила висока поузданост система.

Током протеклих деценија обављена су обимна истраживања везана за проблеме одређивања експлоатационе поузданости, ефективности и продуктивности БТО/БТУ/БТД система. Подаци о процентуалном учешћу појединих подсистема (роторни багер, самоходни транспортер, тракасти транспортер, одлагач), презентирани у [54] слика 3.2, указују да највеће учешће у отказу целог система имају роторни багер и тракасти транспортери. Осим тога, уочава се да повећање броја тракастих транспортера снажно утиче на њихово процентуално учешће у отказу система: повећање броја транспортера са 3, на 5, односно 5-7, доводи до повећања њиховог учешћа са 27% на 41%, односно 59%.



Слика 3.2. Процентуално учешће подсистема у отказу БТО система: 1-роторни багер SchRs 630 са 3 транспортера; 2-роторни багер SchRs 900 са 5 транспортера; 3-роторни багер SchRs 1200 са просечно 5-7 транспортера

Уколико се подаци о процентуалном учешћу систематизују тако да се багерске јединице (багер+одлагач) и систем транспорта материјала (самоходни транспортер+тракасти транспортери) посматрају као два ентитета, слика 3.3, онда се закључује да код разматраних БТО система процентуално учешће багерске јединице опада са 64% на 41% због повећања броја машина за транспорт материјала, а тиме и вероватноће њиховог отказа.



Слика 3.3. Процентуално учешће ентитета у отказу БТО система: 1-роторни багер SchRs 630 са 3 транспортера; 2-роторни багер SchRs 900 са 5 транспортера; 3-роторни багер SchRs 1200 са просечно 5-7 транспортера

Презентирани подаци упућују на закључак да поузданост багерске јединице доминантно утиче на поузданост БТО система, осим у случају врло дугачких система транспортовања материјала, што је последица технолошких захтева на које није могуће утицати. Имајући у виду структуру учешћа ентитета багерске јединице, закључује се да се, у разматраном случају, подизањем нивоа поузданости роторног багера може највише допринети подизању поузданости целокупног система.

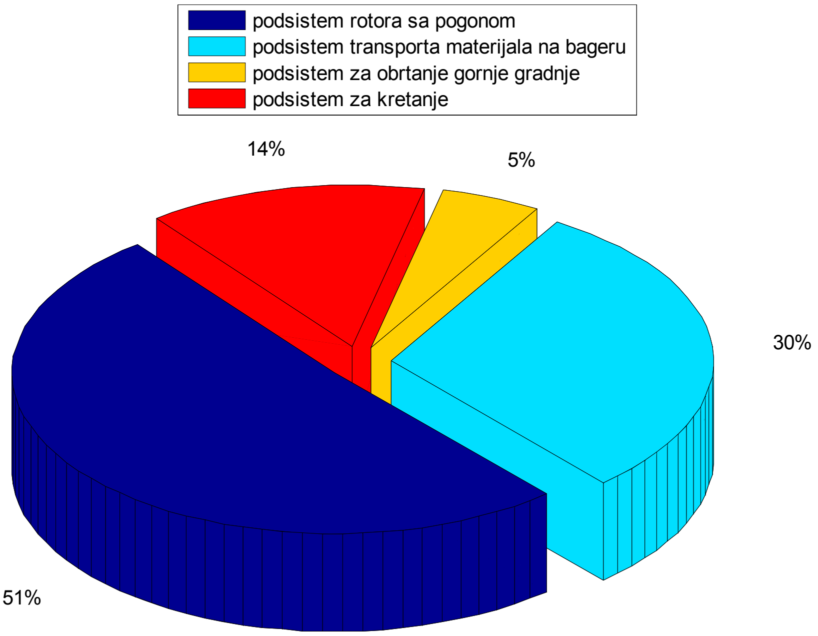
Роторни багер, као машина-копач и прва у ланцу БТО/БТУ/БТД система, доминантно утиче на карактеристике поменутих система. Природну тежњу за сталним унапређивањем перформанси роторних багера, првенствено капацитета, није увек у довољној мери пратила методика прорачуна [63]. О томе сведоче и релативно чести откази, који су увек праћени директним и индиректним финансијским губицима. праћени губитком капацитета. Према [64] недозвољене деформације, односно, ломови подсклопова роторних багера доминантно су последица пропуста у анализи стварних динамичких оптерећења. Недовољно познавање динамичких карактеристика оптерећења, у инжењерској пракси компензује се увођењем тзв. динамичког коефицијента. Њиме се увећава интензитет оптерећења, али се оно и даље третира као статичко, што, у неким случајевима, доводи до непотребно великих степена сигурности, односно неоправданог повећања масе и цене машине. Важно је уочити да, имајући у виду изражен динамички карактер оптерећења, повећање масе подсклопова у извесним случајевима може да изазвове смањење поузданости и века склопова машине.

Основни извор спољашњих поремећаја који делују на роторни багер јесте отпор копања. Његовом одређивању посвећена су бројна теоријска и експериментална истраживања [5,7,40,65-68].

Периодични улазак/излазак кашика из захвата са тлом јесте основни узрок врло израженог динамичког карактера спољашњег оптерећења роторних багера. Управо то их чини подложним појави отказа различите природе. Уобичајено је [54] да се при анализи поузданости роторни багер, као изузетно сложен технички систем, разлаже у следеће подсистеме:

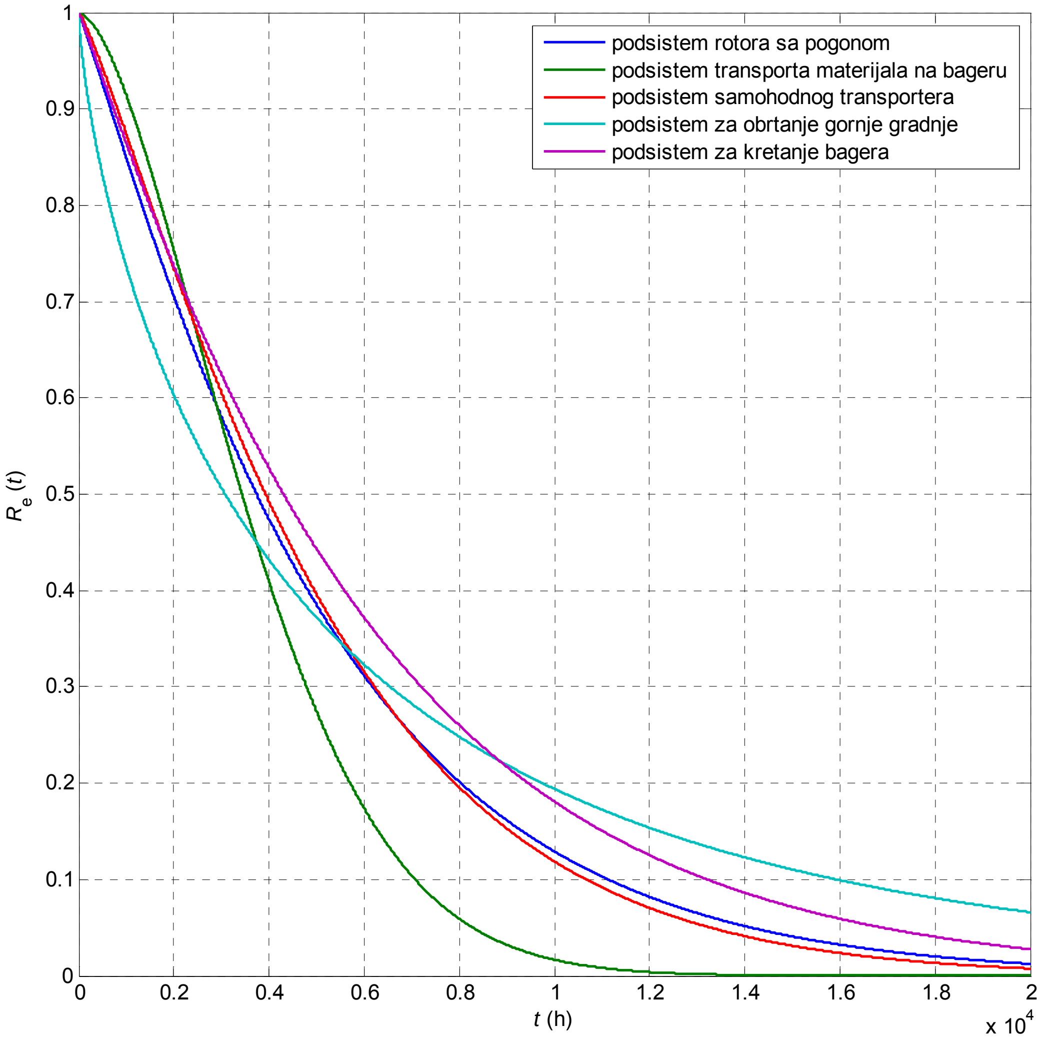
- подсистем ротора са погоном, условно: подсистем за копање;
- подсистем за транспортовање материјала;
- подсистем за обртање горње градње;
- подсистем за кретање.

На основу резултата истраживања публикованих у [54] закључено је да је највећи број застоја роторних багера изазван отказом подсистема ротора са погоном, слика 3.4, при чему је у оквиру тог подсистема најчешћи отказ редуктора, а потом отказ погонског мотора.



Слика 3.4. Процентуално учешће подсистема у отказу роторног багера

Подизањем нивоа поузданости појединих подсистема, подиже се и ниво поузданости целокупне машине. При томе, приоритет се мора дати оним подсистемима роторних багера чија је поузданост најнижа. Према истраживањима публикованим у [69], најнижи ниво екслоатационе поузданости код роторног багера SRs 1200x24/4+VR (400 kW) има подсистем за транспортовање материјала на самом багеру, слика 3.5.



Слика 3.5. Експлоатациона поузданост основних подсистема роторног багера SRs 1200x24/4

3.1 ПРИКАЗ ЈЕДНОГ ОБЈЕКТА ИСТРАЖИВАЊА

Технички системи обично садрже мноштво подсистема и компоненти, међусобно повезаних на начин који омогућава остваривање низа захтеваних функција система. У анализи која следи под појмом „функционални блок“ или „функционална целина“ подразумева се део система, независно од тога да ли је реч о компоненти или релативно великом подсистему [166].

Основна преокупација инжењера који се баве поузданошћу јесте идентификација и превенција потенцијалних отказа. Под отказом функционалног блока подразумева се прекид његове способности да извршава захтевану функцију. Зато је за инжењере који се баве поузданошћу од круцијалног значаја да сагледају све релевантне функције и критеријуме њихових извршења.

Општа структура система, као и његових подсистема и компоненти, презентира се разноврсним функционалним дијаграмима, са одговарајућим описима појединих функција. Након тога приступа се анализи поузданости разматраног система, при чему се, када је реч о системима за површинску експлоатацију, најчешће користе следеће методе:

- анализе врсте (начина) отказа, њихових последица и критичности (**F**ailure **M**odes, **E**ffects and **C**riticality **A**nalysis - **FMECA**);
- анализа стабла отказа (**F**ault-**T**ree **A**nalisys- **FTA**)
- анализа стабла догађаја (**E**vent **T**ree **A**nalisys – **ETA**):
- дијаграми узрока и последица (**C**ause and **E**ffect **D**iagrams - **CED**);
- блок-дијаграми поузданости (**R**eliability **B**lock **D**iagrams - **RBD**).

Технички системи

Према [166] технички систем дефинише се као композит сачињен од људи, процедура, материјала, машина, уређаја, опреме, инструмената и софтвера. Сви елементи тог ентитета користе се у предвиђеном радном окружењу, са циљем да се изврше захтевани задаци. Као део система, људи могу да буду руковаоци који контролишу или изводе специфичне задатке, или представљају подршку систему, односно обављају чишћење, подмазивање, испитивање и одржавање.

Проучавање система захтева, поред осталог, идентификацију следећих основних одредница система:

- (а) границе система

  Границе система одређују оне елементе који се разматрају као део система.

- (б) гранични услови

  Рад система може бити подвргнут различитим граничним условима, као што су, на пример вредности прихватљивог ризика, или захтеви везани за заштиту животне и радне средине.

- (в) улазне јединице

  Улази у систем могу да буду двојаки: (в.1) жељени (материјали и енергија која се користи за извршење задатка) и (в.2) нежељени (непожељне варијације параметара улазних јединица).

- (г) излазне јединице

  Излази из система могу да буду двојаки: (г.1) жељени или (г.2) нежељени (резултати рада система су ван граница толеранције, или проузрокују загађење животне и радне средине, повреде и негативне ефекте по здравље људи).

- (д) подршка

  Систем обично захтева функције подршке, као што су одржавање и репарација.

- (е) екстерне претње

  Систем може да буде изложен широком спектру неповољних спољашњих утицаја. Неки од њих могу имати непосредан утицај на систем, а неки посредан утицај (утицај на улаз у систем). Уобичајено је да се екстерне претње класификују у четири групе:

  (е.1) елементарне непогоде (земљотрес, поплава, олуја, оркански ветар, удар грома);

  (е.2) инфраструктурне претње (недостаци или потпуни прекиди напајања енергијом, комуникација);

  (е.3) социјалне претње (од појединаца или организација, подметање пожара, саботаже, хаковање и напад вирусима на информациони систем);

  (е.4) претње изазване другим техничким системима (утицај спрегнутих или блиских техничких система).

  У извесним случајевима тешко је направити разлику између нежељеног улаза и спољашње претње. У суштини, није од круцијалне важности класификација утицаја, већ чињеница да сви улази и претње по систем буду идентификовани и обухваћени анализом.

Функционална анализа система

Начин разматрања техничког система зависи од фазе његовог животног циклуса и циљева истраживања. Начелно, системи се могу разматрати са два аспекта и то:

- структурални аспект (у фокусу истраживања је физичка структура различитих компоненти и подсистема разматраног система);

- функционални аспект (у фокусу истраживања су разноврсне функције разматраног система и начини њиховог извршавања).

Идентификација свих потенцијалних отказа захтева темељно познавање скупа функција сваког функционалног блока, као и критеријуме за вредновање његових перформанси. Дакле, функционална анализа јесте изузетно важан и незаобилазан део анализе сигурности и поузданости техничких система. Циљеви функционалне анализе су:

- идентификација свих функција система;
- идентификација захтеваних функција у различитим режимима рада система;
- успостављање хијерархијске декомпозиције функција система;
- идентификација међусобних односа појединих функција система;
- идентификација интерфејса са осталим системима и окружењем.

Под функцијом се подразумева планирани ефекат функционалног блока и она мора бити дефинисана тако да има једнозначно одређену сврху. Препоручује се да се функцијама дају имена декларативне структуре, која дефинишу шта је потребно урадити, а не како је потребно урадити (пожељно је да назив функције садржи глагол и именицу, на пример „подизање/спуштање стреле ротора“).

Функционални захтев представља спецификацију критеријума за оцену перформанси извршења функције.

Класификација функција система

Комплексни системи могу имати велики број захтеваних функција. Међутим, све функције нису истог степена важности. Да би се олакшала њихова идентификација и анализа система, уобичајено је да се функције класификују у следеће групе:

1. Основне функције: То су функције које се морају извршити сагласно намени функционалног блока. У суштини, основне функције јесу разлог уградње одређеног функционалног блока и често су присутне у његовом називу.
2. Помоћне функције: То су функције које представљају подршку основним функцијама. Помоћне функције обично су мање уочљиве, међутим, у многим случајевима могу имати исти степен важности као и основне функције (на пример, вешање и промена угла нагиба стреле ротора). Врло је важно уочити да у многим случајевима помоћне функције имају већи степен критичности у односу на основне функције (на пример, већ поменута функција вешања и промене угла нагиба стреле ротора).

3. Заштитне функције: То су функције чији је циљ заштита људи од повреде, заштита машина/опреме од оштећења, као и заштита околине. Деле се у следеће групе:
    (а) сигурносне функције (превенција акцидентних ситуација и догађаја са циљем ублажавања последица по људе, материјалну имовину и околину);
    (б) функције заштите околине (спречавање загађења околине током нормалног рада);
    (в) хигијенске функције.
4. Информатичке функције: Ове функције укључују праћење стања (мониторинг) као и различите мерне инструменте и аларме.
5. Функције повезивања (интерфејс): Ове функције односе се на повезивање разматраног функционалног блока са осталим функционалним блоковима. Интерфејс може бити пасивног или активног карактера. Пасивни интерфејс постоји када је разматрани функционални блок подршка или основа за спрегнути функционални блок.
6. Непотребне функције: У извесним случајевима функционални блокови могу имати функције које се никада не користе. Ове је понекад случај са електронском опремом коју може карактерисати читав спектар тзв. „лепо је имати“ функција које нису стварно потребне. Непотребне функције срећу се код система који су модификовани у више наврата, као и у случајевима када је функционални блок пројектован за услове рада који се разликују од услова рада конкретног система. Важно је уочити да у неким случајевима отказ непотребне функције може изазвати отказ осталих функција разматраног функционалног блока.

Наведене класе функција нису нужно неповезане. Наиме, неке од функција могу се сврстати у две или више класа.

У неким анализама често је важно разликовати очигледне и скривене (или „успаване“) отказе. У тим случајевима корисно је применити следећу класификацију функција:

1. „Онлајн“ функције: Ово су функције које се извршавају континуално или врло често, тако да корисник има тренутно опажање начина њиховог извршавања. Прекид у извршавању онлајн функције назива се очигледним отказом.
2. „Офлајн“ функције: Ове функције користе се повремено, или толико ретко да њихова расположивост кориснику није позната без извођења провере, или посебних тестова. И основне функције, као што је функција искључења „у случају опасности“, могу припадати класи офјалн функција. Осим тога, многе заштитне

функције припадају класи офјалн функција. Немогућност извршавања офлајн функције назива се скривеним отказом.

Режими рада система

Систем у целини, као и његови функционални блокови, могу имати више режима рада и остваривати различите функције у различитим режимима рада. Режими рада укључују:

- нормални режим рада;
- испитне режиме рада;
- прелазне режиме рада;
- акцидентне режиме рада изазване отказима или грешкама руковалаца.

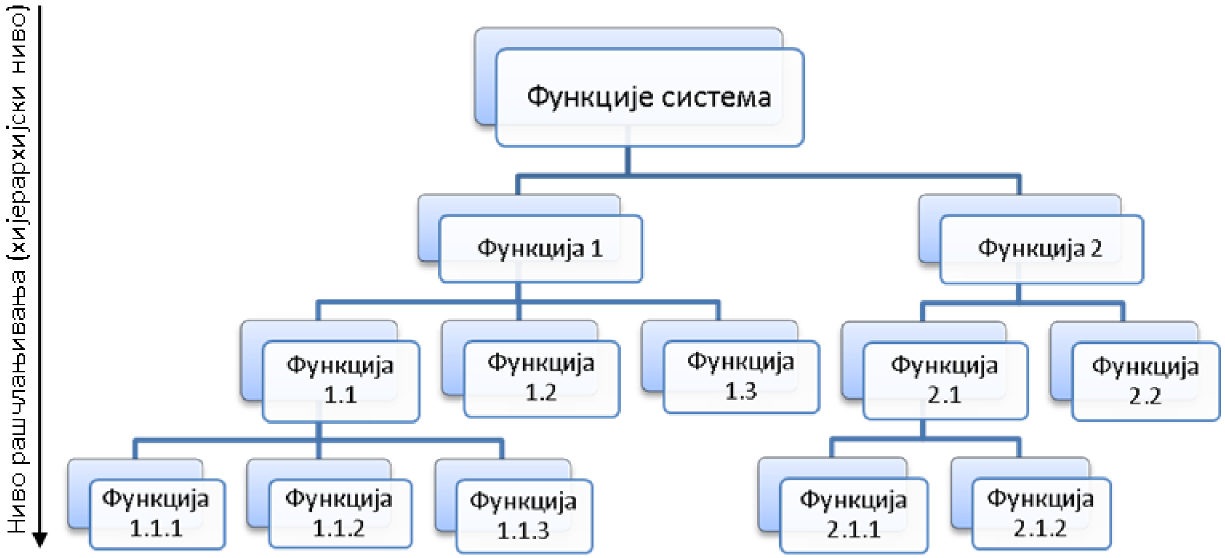
Увођење појма и дефинисање радних режима олакшава идентификацију функција и модова отказа зато што:

- омогућава идентификацију функција које се потенцијално могу превидети;
- омогућава формирање структурисане основе за идентификацију модова отказа који су повезани, или зависе од режима рада.

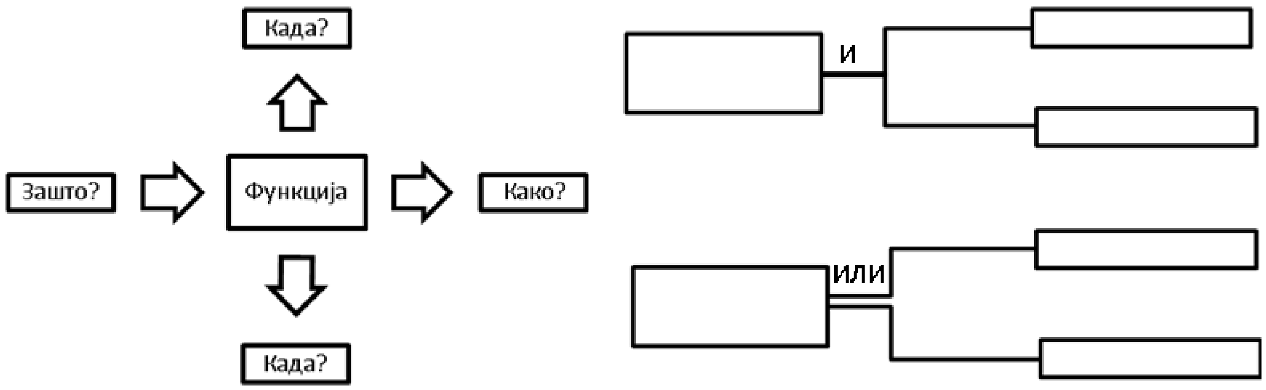
Стабло функција система

При анализи комплексних система корисно је графички приказати различите функције у форми стабла, односно, форми тзв. „стабла функција“. Оно представља хијерархијски рашчлањену функционалну структуру система која почиње навођењем функције или задатка система (највиши хијерархијски ниво) а потом се приказују одговарајуће неопходне функције на нижим хијерархијским нивоима, слика 3.6. Стабло функција формира се постављањем питања „како“ се остварује већ утврђена функција. Поступак се понавља све док се не достигне најнижи хијерархијски ниво рашчлањивања система. Стабло се може формирати и у супротном смеру постављањем питања „зашто“ је одређена функција неопходна све док се не достигне највиши хијерархијски ниво, односно, ниво система. Важно је уочити да неке од функција на нижим хијерархијским нивоима могу бити захтеване од већег броја функција на вишим нивоима, због чега се могу појавити на више места у стаблу функција.

Алтернатива стаблу функција јесте техника анализе функција система (**F**unction **A**nalysis **S**ystem **T**echnique - **FAST**). FAST дијаграм формира се слева надесно. Почиње се функцијом система са леве стране и наставља у десну страну постављањем питања „како“ се та функција остварује, или како може бити остварена. Тиме се идентификују и у дијаграм уносе функције првог хијерархијског нивоа. Потом се на аналоган начин долази до жељеног нивоа рашчлањивања система. Функције нижег хијерархијског нивоа могу бити повезане релацијама „и“ или „или“, слика 3.7. Функције које се морају извршавати истовремено означавају се вертикалним стрелицама. Изглед типичног FAST дијаграма приказан је на слици 3.8.

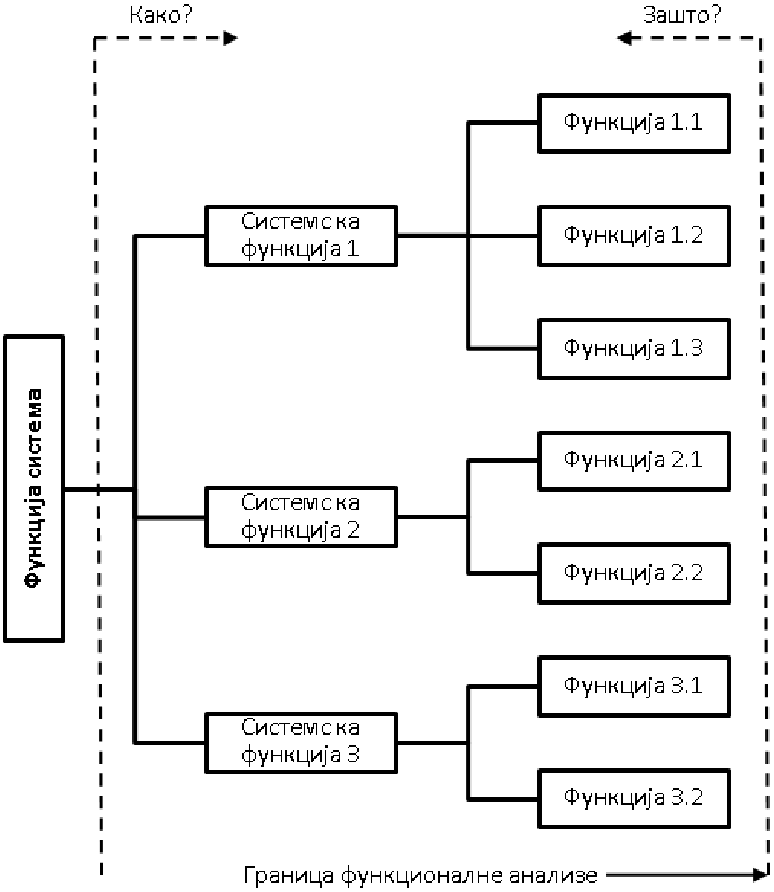


Слика 3.6. Стабло функција система



Слика 3.7. Симболи FAST дијаграма

У анализи система уместо функционалног, често се користи физичко рашчлањивање система. Формирана структура аналогна је стаблу функција с тим што се уместо функција наводе одговарајући физички елементи (технички делови, руковаоци, процедуре). Управо због поменуте аналогије поступка формирања, структура која се формира при физичком рашчлањивању система насива се стаблом стуктуре система. Када се свака од функција остварује једним физичким елементом, функционални и структурни прилаз дају сличне резултате – дијаграме. Међутим, код редундантних система, очигледно, мора постојати разлика зато што исту функцију могу да остварују два, или више физичких елемената.

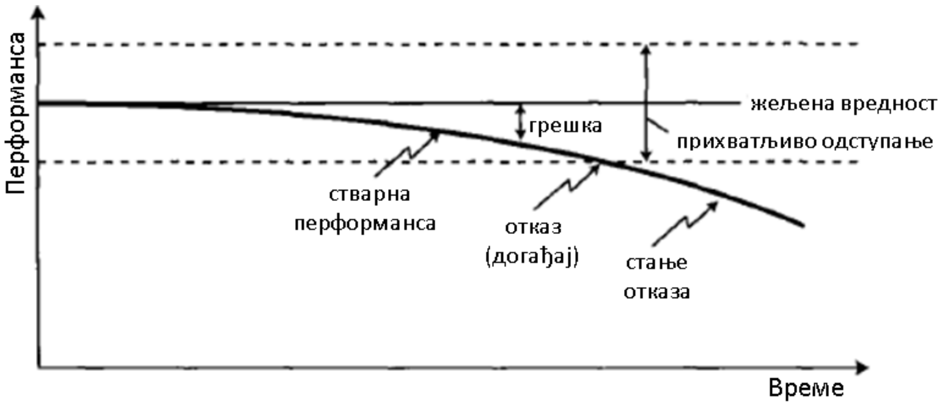


Слика 3.8. Изглед типичног FAST дијаграма

Грешка, отказ, стање отказа

Познавање функционалности система јесте потребан, али не и довољан услов за способност идентификације свих могућих врста отказа. Разлог томе јесте чињеница да свака од функција на различите начине може да откаже, као и чињеница да не постоји званична, обавезујућа и општеприхваћена процедура за идентификацију могућих модова отказа.

Под отказом се подразумева догађај, слика 3.9, који изазива прекид извршавања неке од функција система, или њено нерегуларно извршавање (излаз система је ван прописаних граница) захтеване функције/задатка. Стање отказа јесте стање разматране компоненте/подсистема/система у коме разматрани објекат не може да извршава звоју функцију, или је извршава на незадовољавајући начин, при чему се изузимају стања оперативне неспособности због превентивног одржавања или других планираних активности, као и недостатка спољашњих ресурса. Под грешком се подразумева разлика између израчунате, опажене или измерене вредности и њене захтеване, специфициране или теоријски тачне вредности или стања, слика 3.9. Грешка, дакле, није отказ зато што се одступања посматраног излаза система налазе у прихватљивим границама. У литератури се грешка дефинише и као иницијални отказ.



Слика 3.9. Грешка, отказ, стање отказа

Врсте отказа

Начин (врста или мод) отказа представља његов опис, односно начин опажања и доживљаја грешке, односно недостатка. Стриктно говорећи, термин „врста недостатка“ био би коректнији од термина „врста отказа“ који је, међутим, широко распрострањен у научно-стручној литератури.

Идентификација модова отказа захтева познавање излаза различитих функција које систем извршава, при чему неке од функција могу имати више излаза. Осим тога, неки од излаза могу бити строго дефинисани, што олакшава доношење суда о томе да ли су испуњени захтеви који се њихово испуњавање. У осталим случајевима прописује се прихватљиво одступање излаза, слика 3.9.

Важно је уочити да врста (мод, начин) отказа представља спољашњу манифестају отказа, односно прекид у извршавању једне или више функција. На пример, „унутрашње цурење“ јесте мод отказа запорног вентила зато што поменути вентил у том случају губи своју функцију „затварање протока“. Похабаност (дотрајалост) заптивача вентила, међутим, представља узрок отказа, а не мод отказа вентила.

Основна класификација модова отказа изложена је у [168] и обухвата:

- повремене отказе, односно, отказе који резултирају врло краткотрајним губитком функционалности, при чему се разматрани функционални блок враћа у стање пуне радне способности одмах након отказа;
- дуготрајне отказе, односно отказе код којих губитак функционалности траје све дотле док део или функционални блок не буду поправљени, односно замењени; ови откази даље се могу класификовати на:
    - потпуне отказе, дакле отказе код којих је у потпуности изгубљена функционалност;

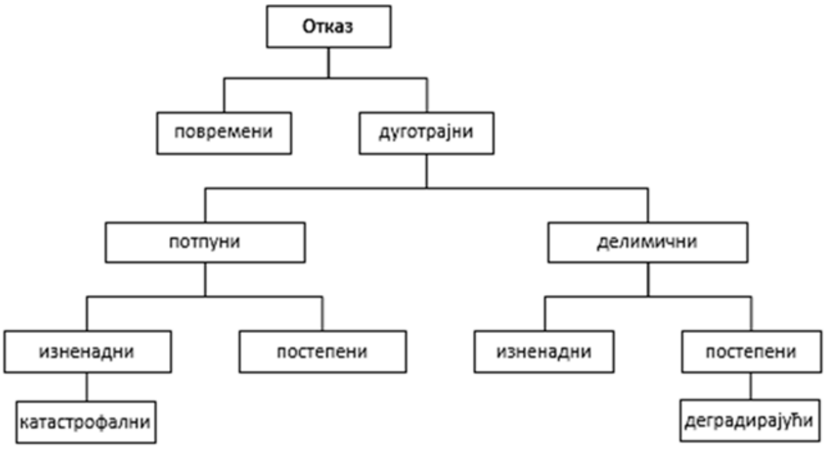
- парцијалне отказе, односно отказе које карактерише недостатак у испуњавању одређених функција, али не доводе до потпуног губитка функционалности.

Осим тога, и потпуни и парцијални дуготрајни откази могу бити:

- изненадни откази, односно откази који се не могу предвидети на основу резултата истраживања и испитивања;
- постепени откази, односно откази који се могу предвидети на основу резултата истраживања и испитивања; ова врста отказа изазива померање опсега вредности одређене перформансе; идентификација постепених отказа захтева упоређивање стварних перформанси са захтеваним нивоом перформанси, што у неким случајевима може да доведе до потешкоћа.

Коначно, дуготрајни откази деле се у четири категорије, слика 3.10, од којих две имају посебне називе:

- катастрофални откази, који су и изненадни и потпуни;
- деградирајући откази, који су парцијални и постепени.



Слика 3.10. Класификација отказа

За неке примене погодна је следећа класификација отказа [169,170]:

- примарни откази;
- секундарни откази;
- управљачки откази.

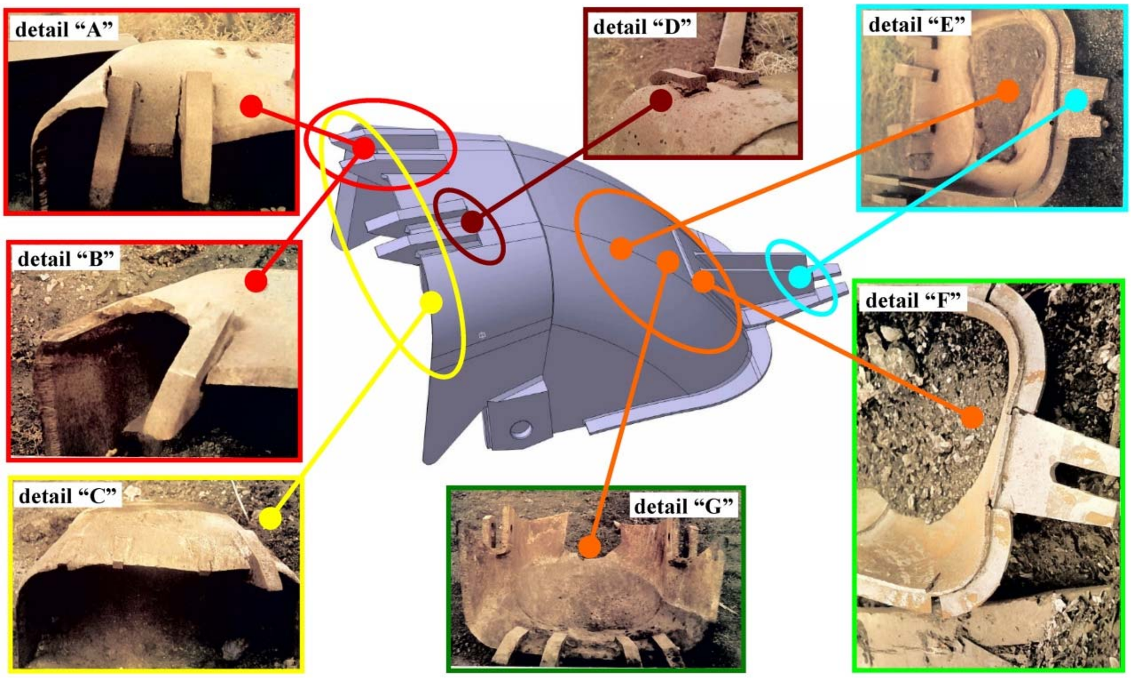
Примарни откази су они откази који су изазвани природним старењем функционалног блока. Јављају се у условима који су обухваћени пројектом и неопходна је интервенција (репарација) да би се функционални блок вратио у стање пуне радне способности.

Секундарни откази изазвани су прекомерним напрезањима функционалног блока, ван пројектованих. Поменута напрезања могу бити изазвана наглим дејством термичких, механичких, електричних, хемијских, магнетних или радиоактивних утицаја који су последица деловања суседних компоненти/подсистема, као и окружења. Да би се функционални блок вратио у стање пуне радне способности неопходно је извршити одговарајућу поправку.

Управљачки откази последица су неправилног управљачког сигнала или шума. Обично није потребна интервенција да би се функционални блок вратио у стање пуне радне способности. Ови откази често се називају и пролазним отказима.

Узроци и последице отказа

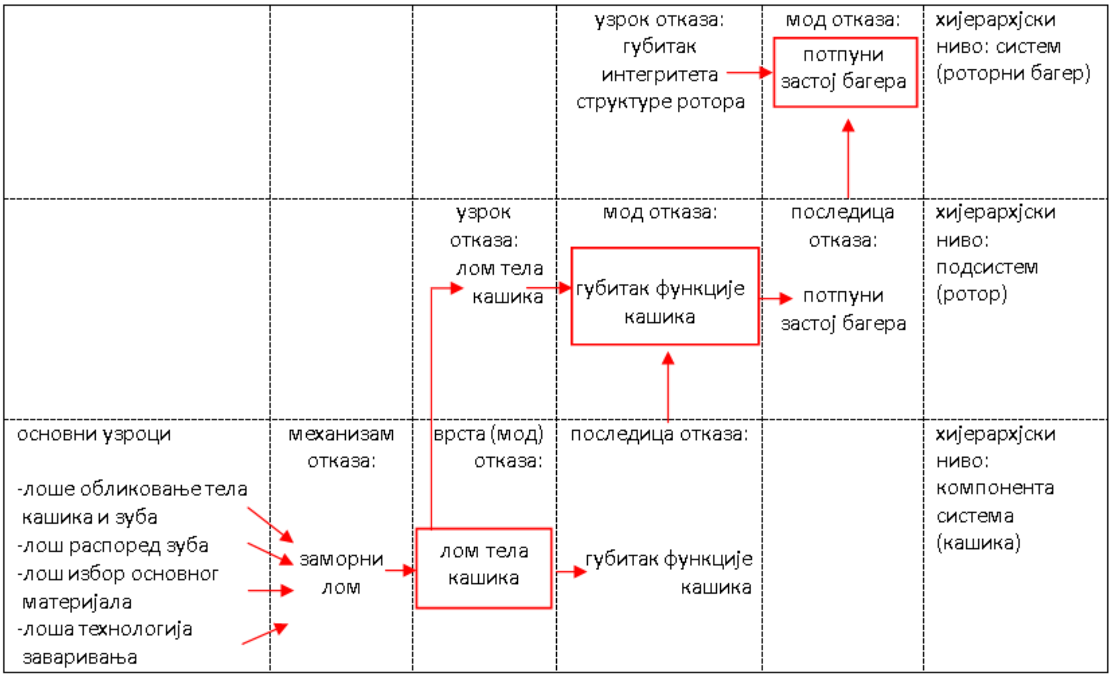
Функције система обично се могу разложити на одговарајуће подфункције. Отказ на уоченом хијерархијском нивоу често је последица отказа на нижем хијерархијском нивоу. Зато је од изузетне важности успоставити ланац отказа од нижих хијерархијских нивоа ка вишим, сагласно структури стабла функција и/или стабла структуре. На пример, у раду [171] је на основу анализе експериментално-нумеричких истраживања утврђено да је лом кашика роторног багера SRs 470, слика 3.11, заморног карактера. Основни узроци лома су: лоше обликовање тела кашика и зуба, лош распоред зуба, лош избор основног материјала тело кашике, као и лоша технологија заваривања, слика 3.12.



Слика 3.11. Лом кашика роторног багера SRs 470

Према IEC 50(191) под узроком отказа подразумевају се околности током пројектовања, израде или коришћења машине/уређаја/опреме које су довеле до отказа. Сазнања о узроцима отказа неопходна су да би се они избегли, или избегло њихово понављање. У односу на фазу животног циклуса, узроци отказа класификују се на следећи начин [171]:

- грешке у пројектовању, слика 3.13: (а) узрок отказа је неадекватно пројектанско решење; (б) узрок отказа је недовољна чврстоћа при декларисаним оптерећењима;
- грешке у изради;
- старење (они откази код којих током времена расте вероватноћа појаве);
- неправилна употреба (излагање оптерећењима већим од пројектованих);
- неправилно руковање или небрига.



Слика 3.12. Односи (везе) узрока, мода и последица отказа

Слика 3.13. Класификација узрока отказа [171]

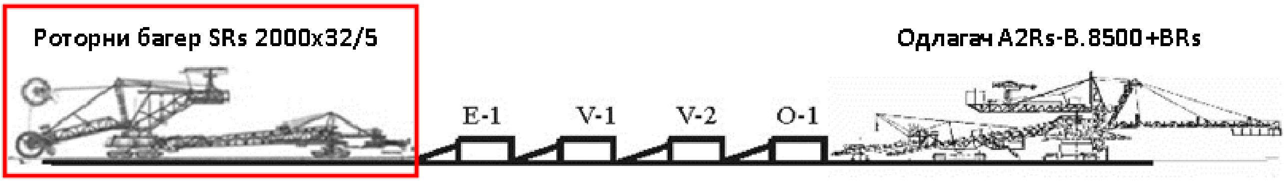
Различити узроци отказа приказани на слици 3.13 нису нужно неповезани, напротив, често постоји преклапање. На пример, недовољна носивост може да буде повезана са лошим пројектним решењем и грешкама насталим током процеса израде.

Сагласно IEC 50(191) механизми отказа дефинишу се као физички, хемијски или други процеси који доводе до појаве отказа. Уобичајна интерпретација овог термина су непосредни узроци на најнижем хијерархијском нивоу, као што су, на пример: хабање, корозија, питинг. Међутим, овај ниво описа узрока није довољан за процену мера које је неопходно предузети. Хабање, на пример, може да буде последица више узрока: лош избор материјала (грешка у дизајну) коришћење ван прописаних услова (грешка током коришћења) или лошег одржавања – недовољног подмазивања.

Коначно, важно је уочити, слика 3.12, да мод отказа на најнижем хијерархијском нивоу јесте један од могућих узрока отказа на следећем вишем хијерархијском нивоу; истовремено, последица отказа на најнижем хијерархијском нивоу јесте мод отказа на следећем вишем хијерархијском нивоу.

Објекат истраживања

Објекат истраживања у оквиру ове студије јесте роторни багер SRs 2000x32/5 са претоварним мостом (VR) којим се врши ископ јаловине у оквиру I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“, слика 3.14, табела 3.1. Стабло структуре система приказано је на слици 3.15.



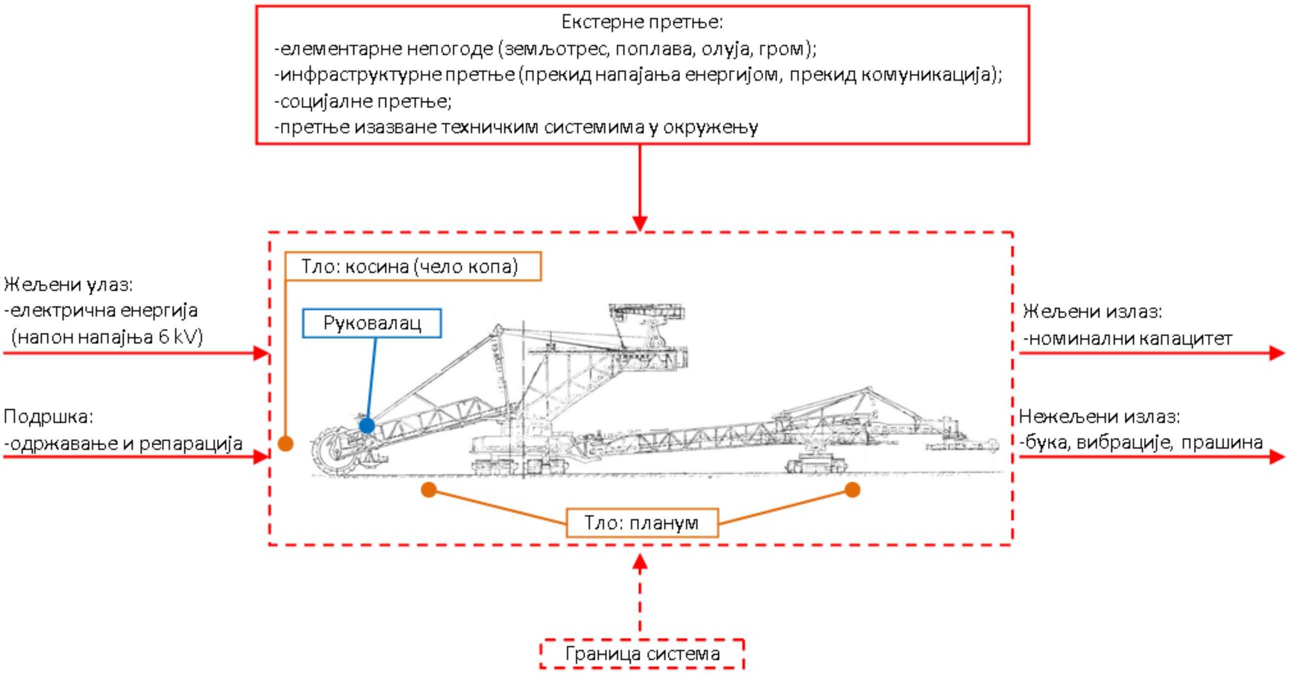
Слика 3.14. Технолошка схема I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“: E-1 - етажни транспортер број 1; V-1, V-2 – везни транспортери број 1 и 2; O-1 – одлагалишни транспортер број 1

Табела 3.1. Основне техничке карактеристике машина I БТО система

Машина	Основна карактеристика
Роторни багер SRs 2000x32/5 +VR	Теоријски капацитет: 6600 m^3_{rm} / h
Тракасти транспортери	
Етажни транспортер број 1	Дужина транспортовања: 2858 m
Везни транспортер број 1	Дужина транспортовања: 1676,9 m
Везни транспортер број 2	Дужина транспортовања: 1436,3 m
Одлагалишни транспортер број 1	Дужина транспортовања: 1047,0 m
Одлагач A2Rs-B.8500 +BRs	Теоријски капацитет: 6600 m^3_{rm} / h

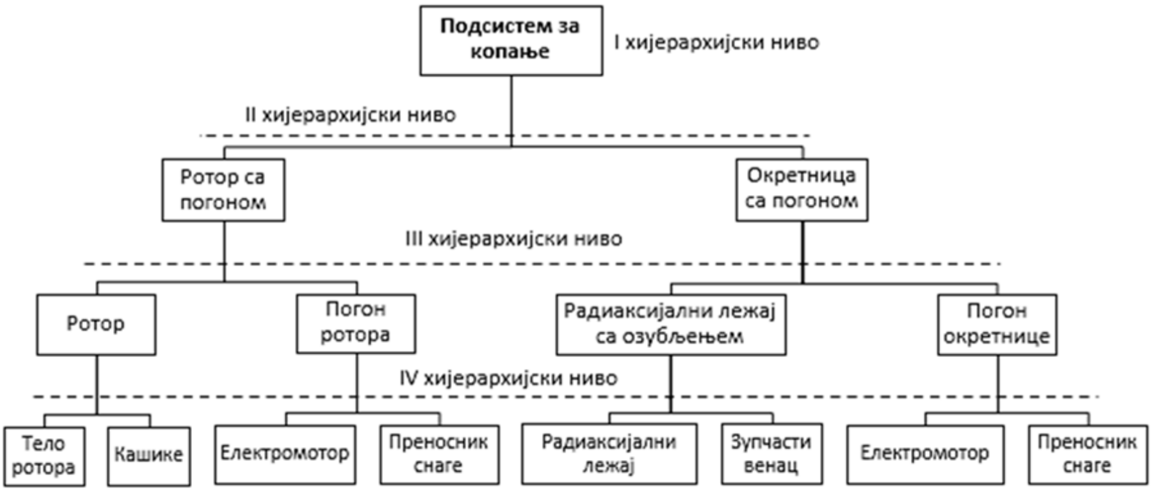
Слика 3.15. Стабло структуре I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“

Роторни багер SRs 2000x32/5 са претоварним мостом (VR) представља комплексан технички систем, слика 3.16, чије је стабло структуре презентирано на сликама 3.17 - 3.26.

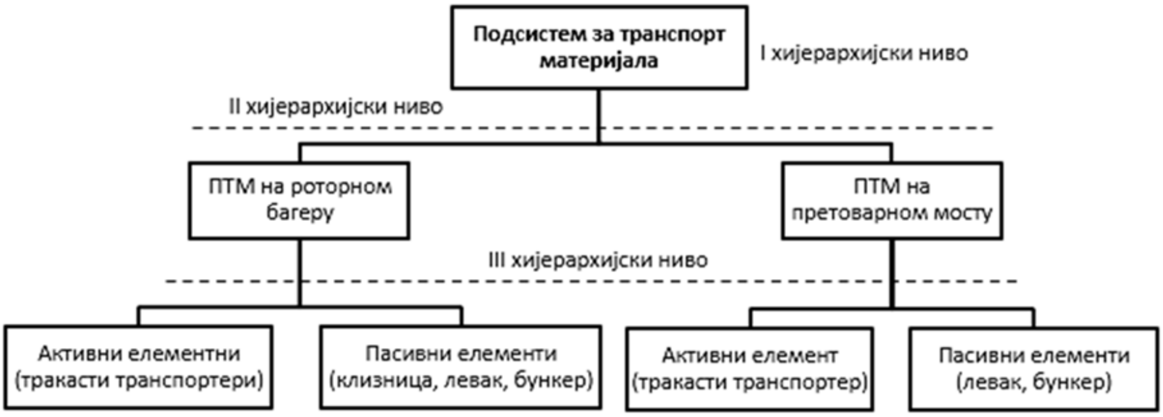


Слика 3.16. Роторни багер SRs 2000x32/5 са претоварним мостом (VR) као технички систем – објекат истраживања

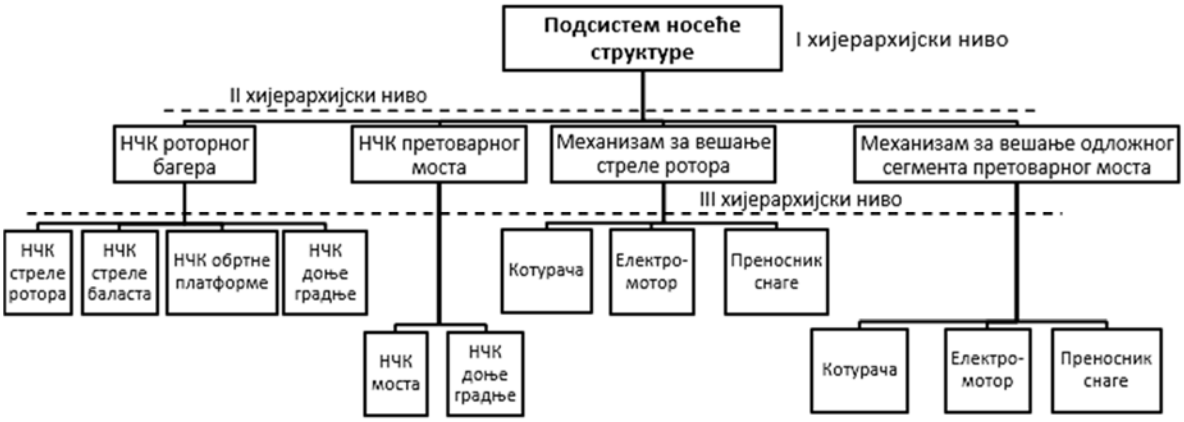
Слика 3.17. Стабло структуре роторног багера SRs 2000x32/5 +VR (Напомена: ПС=подсистем)



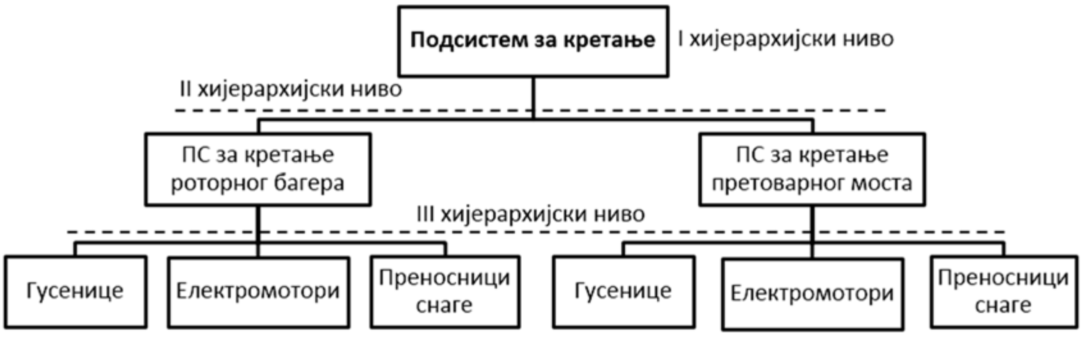
Слика 3.18. Стабло структуре подсистема за копање



Слика 3.19. Стабло структуре подсистема за транспорт материјала

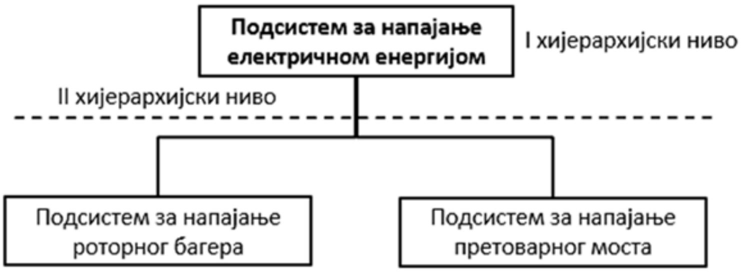


Слика 3.20. Стабло структуре подсистема носеће структуре



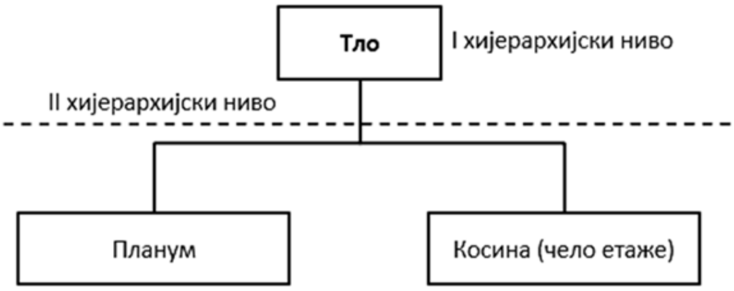
Слика 3.21. Стабло структуре подсистема носеће структуре

Слика 3.22. Стабло структуре подсистема заштите и упозорења

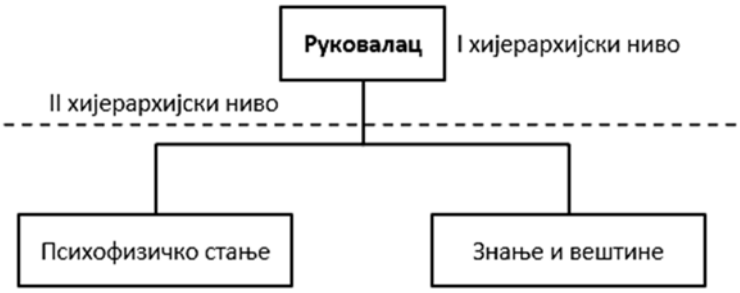


Слика 3.23. Стабло структуре подсистема за напајање електричном енергијом

Слика 3.24. Стабло структуре подсистема за управљање



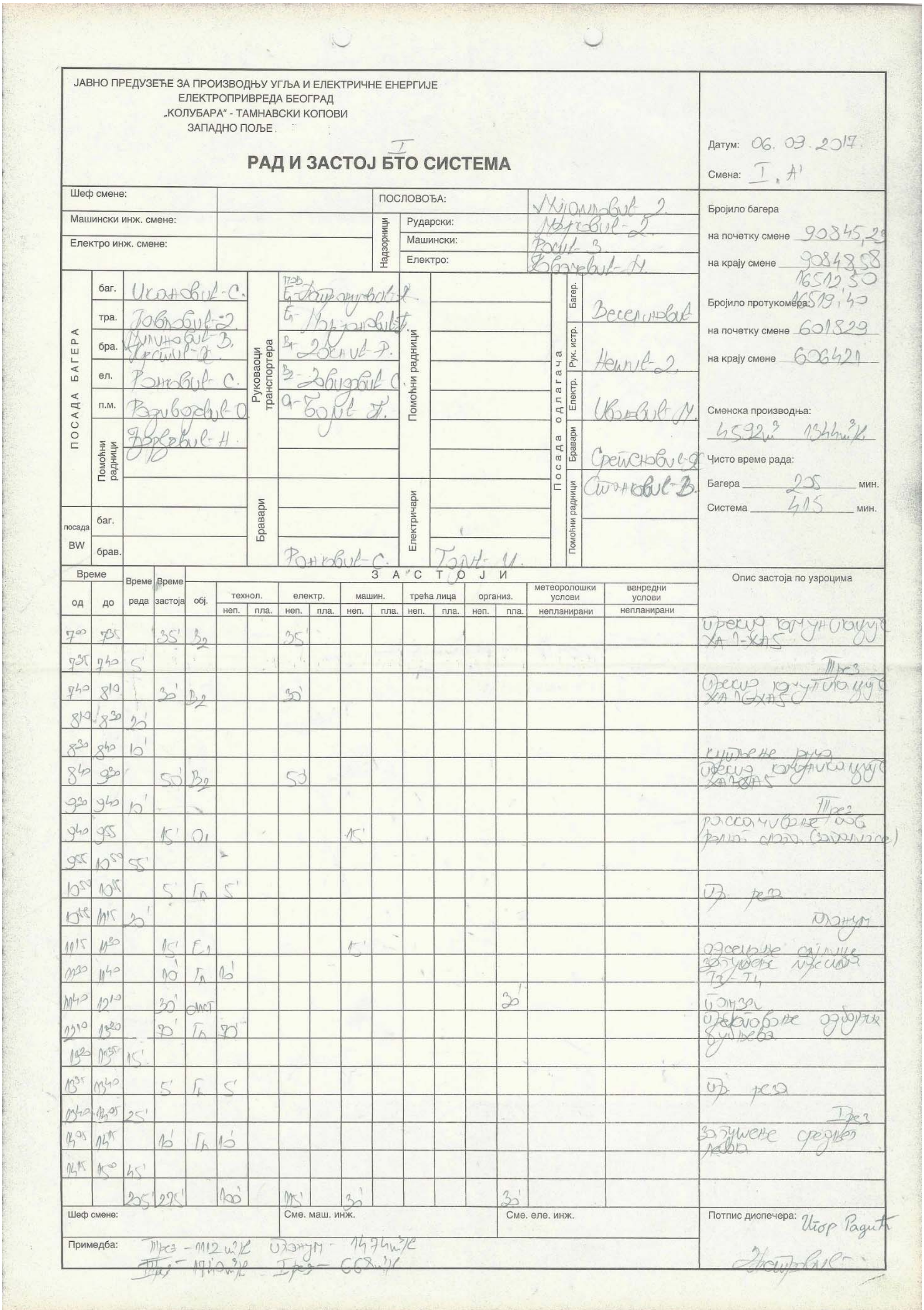
Слика 3.25. Подсистем тла



Слика 3.26. Подсистем персонала

3.2 СПРОВОЂЕЊЕ ИСПИТИВАЊА ЗА ОЦЕНУ ПОУЗДАНОСТИ

Улазни подаци за истраживање преузети су из извештаја Диспечерског центра РБ „Колубара“, слика 3.27, на основу којих је формиран електронски дневник рада I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“ (Прилог) слика 3.28, за период фебруар-септембар 2017. године. Из тако формираног електронског дневника рада I БТО система излучени су подаци који се односе на роторни багер SRs 2000x32/5 +VR. На тај начин формирана је база података неопходна за спровођење истраживања у оквиру ове студије.



ЈАВНО ПРЕДУЗЕЋЕ ЗА ПРОИЗВОДЊУ УГЉА И ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ
ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА БЕОГРАД
„КОЛУБАРА" - ТАМНАВСКИ КОПОВИ
ЗАПАДНО ПОЉЕ

I
РАД И ЗАСТОЈ БТО СИСТЕМА

Датум: 06. 03. 2017.
Смена: I, A'

Шеф смене:		ПОСЛОВОЂА:	Миловановић З.
Машински инж. смене:		Надзорници – Рударски:	Марковић З.
Електро инж. смене:		Надзорници – Машински:	Росић З.
		Надзорници – Електро:	Ђорђевић Н.

Бројило багера
на почетку смене 90845,29
на крају смене 90848,58
16512,50
Бројило протукомера: 16519,40
на почетку смене 601829
на крају смене 606421

Сменска производња: 4592 m^3 1344 m^3/h

Чисто време рада:
Багера 225 мин.
Система 415 мин.

ПОСАДА БАГЕРА	баг.	Ускоковић С.	Руковаоци транспортера	ПЭВ Е₁-Дамјановић А.	Помоћни радници	Посада одлагача – Багер.	Веселиновић
	тра.	Јовановић З.		Е₂-Марјановић Т.		Рук. истр.	Нешић З.
	бра.	Милановић З. Крстић Д.		В₁-Зекић Р.		Електр.	Ивановић М.
	ел.	Ранковић С.		В₂-Звиздић С.		Бравари	Срећковић Д.
	п.м.	Војводић О.		Д-Бојић Д.		Помоћни радници	Станковић В.
	Помоћни радници	Ђорђевић Н.					
посада BW	баг.		Бравари		Електричари		
	брав.			Ранковић С.		Тодић М.	

Време од	Време до	Време рада	Време застоја	обј.	технол. неп.	технол. пла.	електр. неп.	електр. пла.	машин. неп.	машин. пла.	трећа лица неп.	трећа лица пла.	организ. неп.	организ. пла.	метеоролошки услови непланирани	ванредни услови непланирани	Опис застоја по узроцима
7⁰⁰	7³⁵		35'	B₂			35'										прекид комуникације ХА1-ХА5
7³⁵	7⁴⁰	5'															III рез
7⁴⁰	8¹⁰		30'	B₂			30'										прекид комуникације ХА1-ХА5
8¹⁰	8³⁰	20'															
8³⁰	8⁴⁰	10'															кидање руке
8⁴⁰	9³⁰		50'	B₂			50'										прекид комуникације ХА1-ХА5
9³⁰	9⁴⁰	10'															III рез
9⁴⁰	9⁵⁵		15'	O₁					15'								раскачивање [illegible] реглог. слоја (заглињење)
9⁵⁵	10⁵⁰	55'															
10⁵⁰	10⁵⁵		5'	Гл	5'												пр. реза
10⁵⁵	11¹⁵	20'															планум
11¹⁵	11³⁰		15'	E₁					15'								одсецање сајлице заустављања [illegible]
11³⁰	11⁴⁰		10'	Гл	10'												Т3-Т4
11⁴⁰	12¹⁰		30'	сист									30'				пауза
12¹⁰	13²⁰		70'	Гл	70'												[illegible] одбојних бубњева
13²⁰	13³⁵	15'															
13³⁵	13⁴⁰		5'	Гл	5'												пр. реза
13⁴⁰	14⁰⁵	25'															I рез
14⁰⁵	14¹⁵		10'	Гл	10'												загушење средњег левка
14¹⁵	15⁰⁰	45'															
		225'	275'		100'		115'		30'				30'				

Шеф смене:
Сме. маш. инж.
Сме. еле. инж.
Потпис диспечера: Игор Радић
Петровић

Примедба: III рез - 1112 m^3/h планум - 1474 m^3/h
II рез - 1710 m^3/h I рез - 668 m^3/h

Слика 3.27. Изглед листа „Рад и застој I БТО система" ПК „Тамнава - Западно поље"

Месец	Дан	Смена		Време				Време рада	Време застоја	Застоји														Опис застоја по узроцима	Бројило багера			ВАГА			Чисто време рада на крају смене			
				од		до				Систем	Објекат	технол.		електр.		машин.		трећа лица		организ.		метеоролошки услови	ванредни услови								Багер			Систем
				ч	мин	ч	мин	мин	мин			неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	пла.	неп.	неп.		Почетак смене	Крај смене	Разлика	Почетак смене	Крај смене	Разлика	УКУПНО	Угаљ	Преба.	УКУПНО
9	5	3	Ц	23	0	23	40		40	БТО1	Гл	40												чишћење одбојних бубњева										
9	5	3	Ц	23	40	0	10	30		БТО1														II р.										
9	5	3	Ц	0	10	0	30		20	БТО1	Гл	20												загушење централног левка и чишћење одбојних бубњева										
9	5	3	Ц	0	30	1	0		30	БТО1	Гл							30						чекање на цистерну										
9	5	3	Ц	1	0	1	15		15	БТО1	Гл	15												одгушење централног левка										
9	5	3	Ц	1	15	1	45		30	БТО1	Сист										30			пауза										
9	5	3	Ц	1	45	2	0	15		БТО1																								
9	5	3	Ц	2	0	2	5		5	БТО1	В2пов			5										прекид комуникације										
9	5	3	Ц	2	5	2	10		5	БТО1	Гл	5												промена реза										
9	5	3	Ц	2	10	2	20		10	БТО1	Гл	10												загушење истоварног левка										
9	5	3	Ц	2	20	2	40		20	БТО1	В2пов			20										прекид комуникације										
9	5	3	Ц	2	40	2	45	5		БТО1														III р.										
9	5	3	Ц	2	45	7	0		255	БТО1	В2пов			255										прекид комуникације	90844	90845	1	600376	601829	1453	50			432
9	6	1	А	7	0	7	35		35	БТО1	В2			35										прекид комуникације ХА1-ХА5										
9	6	1	А	7	35	7	40	5		БТО1														III р.										
9	6	1	А	7	40	8	10		30	БТО1	В2			30										прекид комуникације ХА1-ХА5										
9	6	1	А	8	10	8	30	20		БТО1																								
9	6	1	А	8	30	8	40	10		БТО1														купљење руча										
9	6	1	А	8	40	9	30		50	БТО1	В2			50										прекид комуникације ХА1-ХА5										
9	6	1	А	9	30	9	40	10		БТО1														III р.										
9	6	1	А	9	40	9	55		15	БТО1	О1					15								раскачивање повратног радног слога (запалио се)										
9	6	1	А	9	55	10	50	55		БТО1																								
9	6	1	А	10	50	10	55		5	БТО1	Гл	5												промена реза										
9	6	1	А	10	55	11	15	20		БТО1														пл.										
9	6	1	А	11	15	11	30		15	БТО1	Е1					15								одсецање сајлице										
9	6	1	А	11	30	11	40		10	БТО1	Гл	10												загушење пресипа Т3-Т4										
9	6	1	А	11	40	12	10		30	БТО1	Сист										30			пауза										
9	6	1	А	12	10	13	20		70	БТО1	Гл	70												прекопавање одбојних бубњева										
9	6	1	А	13	20	13	35	15		БТО1																								
9	6	1	А	13	35	13	40		5	БТО1	Гл	5												промена реза										
9	6	1	А	13	40	14	5	25		БТО1														I р.										
9	6	1	А	14	5	14	15		10	БТО1	Гл	10												загушење средњег левка										
9	6	1	А	14	15	15	0	45		БТО1															90845	90848	3	601829	606421	4592	205			415

Слика 3.28. Изглед странице електронског дневника рада I БТО система ПК „Тамнава - Западно поље“

3.3 КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОУЗДАНОСТИ ОБЈЕКТА ИСТРАЖИВАЊА

Поузданост система, машина и опреме у рударству

Постоји више показатеља рада рударских система, машина и опреме који су тесно повезани са њиховом поузданошћу [158].

Расположивост

Удео времена у коме је машина/опрема способна за обављање своје функције одређује се на основу израза

$$AV_{\mathrm{m}} = \frac{TH - DT}{TH} \times 100\ (\%), \qquad \text{...(3.1)}$$

у коме је: TH – укупни расположиви временски фонд;

DT – време провдено у стању застоја.

Средње време између застоја

Средње време између застоја израчунава се на основу израза

$$MTBF = \frac{TH - DT - SH}{NF}, \qquad \text{...(3.2)}$$

при чему је: SH – време проведено у приправности („standby“ режим);

NF – број застоја.

Временски степен искоришћења

Временски степен искоришћења одређује се на основу израза

$$U = \frac{TH - DT - SH}{TH - DT} \times 100\ (\%). \qquad \text{...(3.3)}$$

Производна ефективност

Производна ефективност дефинише се као однос стварног учинка машине (опреме, система) током времена ефективног рада и њеног номиналног учинка,

$$PE = \frac{AV}{Q_{\mathrm{v}}\left(TH - DT - SH\right)} \times 100\ (\%), \qquad \text{...(3.4)}$$

при чему је: AV – стварни учинак машине (m^3);

Q_v – номинални учинак машине (m^3/h).

Укупна ефективност

Укупна ефективност разматраног система одређује се на основу израза

$$OEE = AV_{\mathrm{m}} \times PE \times U. \qquad \text{...(3.5)}$$

3.3.1 Карактеристике поузданости I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“

Рад I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“ праћен је током 8 месеци (фебруар-септембар 2017. године – Прилог 1) при чему је укупни расположиви временски фонд био *TH*=348420 min. Укупно време застоја система износило је *DT*=173995 min, рачунајући при томе и време трајања инвестиционог одржавања *IOT*=33120 min.

Сагласно изразу (3.1) расположивост система у референтном периоду износила је

$$AV_{\mathrm{m}} = \frac{TH - DT}{TH} \times 100 = \frac{348420 - 173995}{348420} \times 100 = 50{,}1\%. \qquad ...(3.6)$$

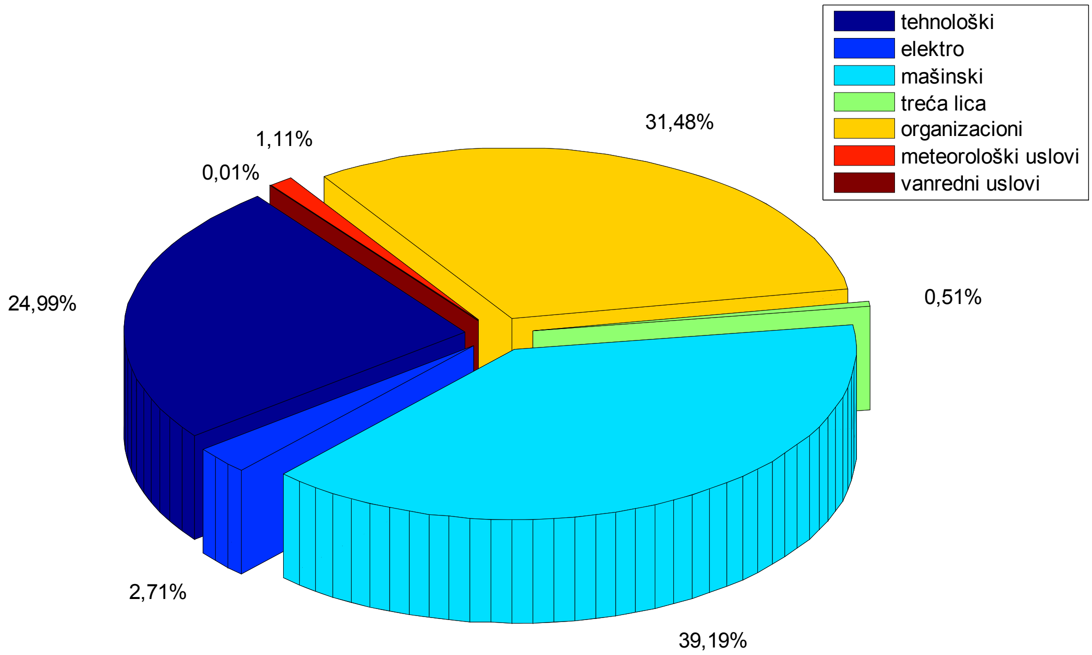
Преглед ознака коришћених у наставку анализе дат је у табели 3.2. Структура застоја рангирана по процентуалном учешћу у укупном застоју презентирана је у табели 3.3 и на слици 3.29.

Табела 3.2. Ознаке времена застоја по врстама

Величина	Ознака
Укупно време трајања машинских застоја	DT_{mas}
Укупно време трајања планираних машинских застоја	$DT_{\mathrm{mas,pl}}$
Укупно време трајања непланираних машинских застоја	$DT_{\mathrm{mas,npl}}$
Укупно време трајања електро застоја	DT_{el}
Укупно време трајања планираних електро застоја	$DT_{\mathrm{el,pl}}$
Укупно време трајања непланираних електро застоја	$DT_{\mathrm{el,npl}}$
Укупно време трајања технолошких застоја	DT_{teh}
Укупно време трајања планираних технолошких застоја	$DT_{\mathrm{teh,pl}}$
Укупно време трајања непланираних технолошких застоја	$DT_{\mathrm{teh,npl}}$
Укупно време трајања организационих застоја	DT_{org}
Укупно време трајања планираних организационих застоја	$DT_{\mathrm{org,pl}}$
Укупно време трајања непланираних организационих застоја	$DT_{\mathrm{org,npl}}$
Укупно време трајања застоја изазваних трећим лицима	DT_{tl}
Укупно време трајања планираних застоја изазваних трећим лицима	$DT_{\mathrm{tl,pl}}$
Укупно време трајања непланираних застоја изазваних трећим лицима	$DT_{\mathrm{tl,npl}}$
Укупно време трајања застоја изазваних метеоролошким условима	DT_{met}
Укупно време трајања застоја изазваних ванредним условима	DT_{van}

Табела 3.3. Структура застоја система

Врста застоја	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Технолошки	3005	43490	24,99
Електро	121	4710	2,71
Машински	1065	68190	39,19
Трећа лица	36	895	0,51
Организациони	629	54770	31,48
Метеоролошки услови	75	1925	1,11
Ванредни услови	2	15	0,01
Укупно	**4933**	**173995**	**100,00**



Слика 3.29. Процентуално временско учешће врста застоја система

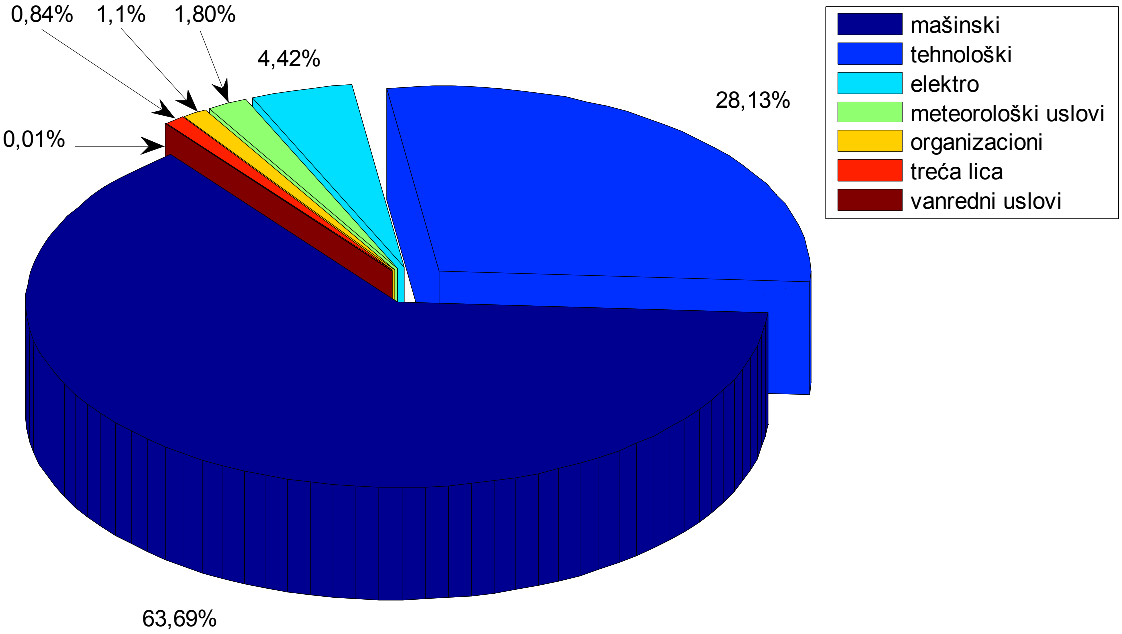
Структуре непланираних и планираних застоја ситема дате су у табелама 3.4 и 3.5, а приказане су на сликама 3.30 и 3.31.

Табела 3.4. Структура непланираних застоја система рангирана по временском процентуалном учешћу

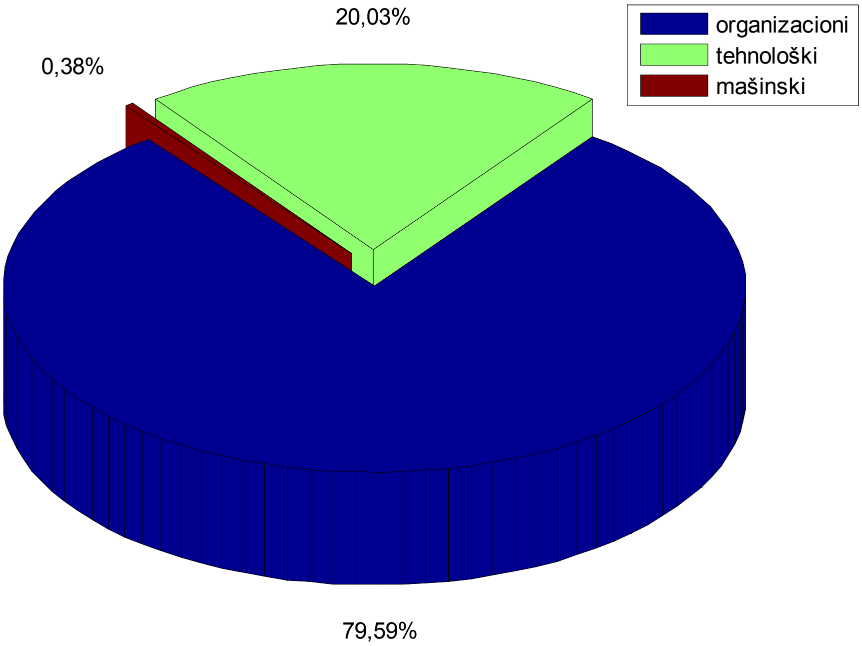
Врста застоја	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Машински	1063	67935	63,69
Технолошки	2966	30005	28,13
Електро	121	4710	4,42
Метеоролошки услови	75	1925	1,80
Организациони	31	1175	1,10
Трећа лица	36	895	0,84
Ванредни услови	2	15	0,01
Укупно	**4294**	**106660**	**100,00**

Табела 3.5. Структура планираних застоја система рангирана по временском процентуалном учешћу

Врста застоја	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Организациони	598	53595	79,59
Технолошки	39	13485	20,03
Машински	2	255	0,38
Електро	0	0	0,00
Трећа лица	0	0	0,00
Укупно	**639**	**67335**	**100,00**



Слика 3.30. Процентуално временско учешће врста непланираних застоја система



Слика 3.31. Процентуално временско учешће врста планираних застоја система

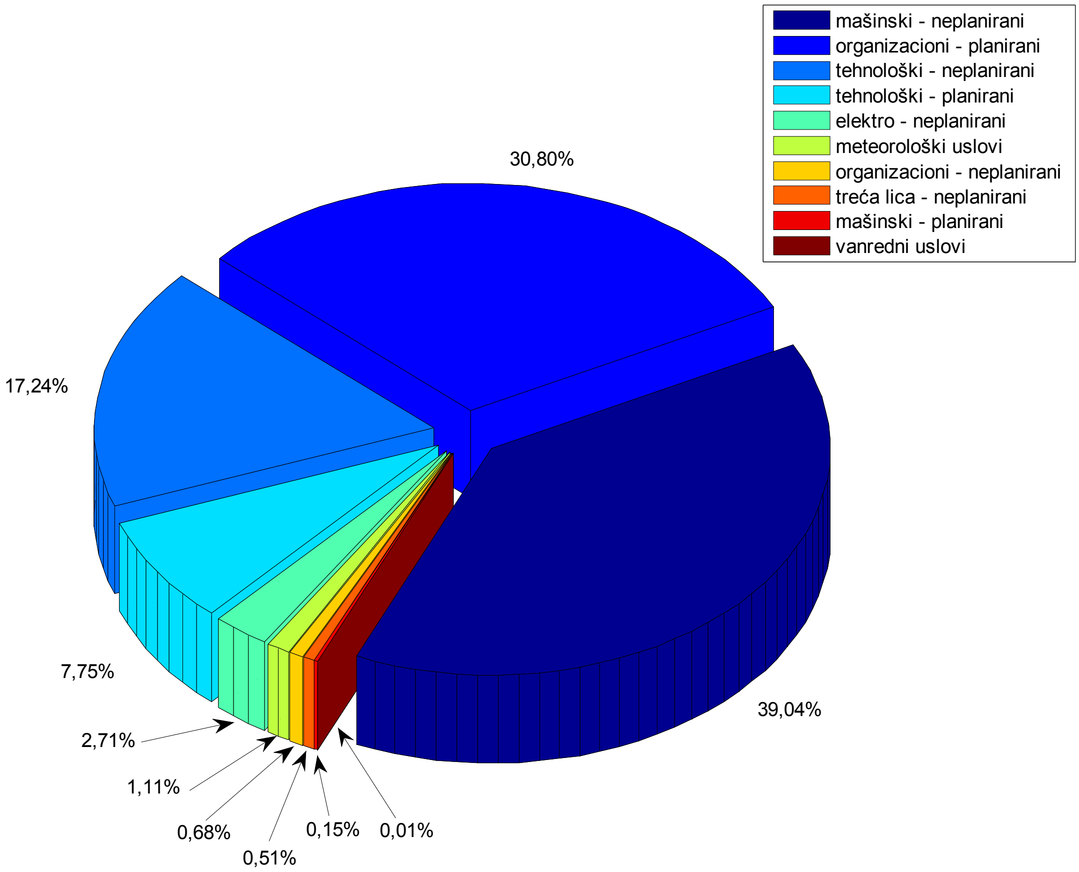
Највеће процентуално учешће у укупном времену трајања застоја имају машински застоји (39,2%), табела 3.3, слика 3.29. Потом следе организациони (31,5%) и технолошки застоји (25,0%). Када је реч о непланираним застојима, готово 2/3 укупног времена проведеног у непланираном застоју последица је непланираних застоја машинских подсистема машина и опреме који чине БТО систем, табела 3.4, слика 3.30. Значајно је и учешће технолошких непланираних застоја (28,1%). Учешће непланираних електро застоја износи 4,4%, док је укупно учешће осталих непланираних застоја (метеоролошки услови, организациони, трећа лица, ванредни услови) 3,8%, табела 3.4, слика 3.30.

Доминантно учешће у планираним застојима имају организациони застоји (79,6%) табела 3.5, слика 3.31, што је последица релативно дугог трајања инвестиционог одржавања (33120 min). Значајно је и учешће планираних технолошких застоја (20,0%).

Процентуално учешће свих застоја, класификованих по врсти и плану, дата је у табели 3.6 и приказана на слици 3.32.

Табела 3.6. Структура застоја система (класификованих по врсти и плану) рангирана по временском процентуалном учешћу

Врста застоја	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Машински непланирани	1063	67935	39,04
Организациони планирани	598	53595	30,80
Технолошки непланирани	2966	30005	17,24
Технолошки планирани	39	13485	7,75
Електро непланирани	121	4710	2,71
Метеоролошки услови	75	1925	1,11
Организациони непланирани	31	1175	0,68
Трећа лица непланирани	36	895	0,51
Машински планирани	2	255	0,15
Ванредни услови	2	15	0,01
Електро планирани	0	0	0,00
Трећа лица планирани	0	0	0,00
УКУПНО	**4933**	**173995**	**100**

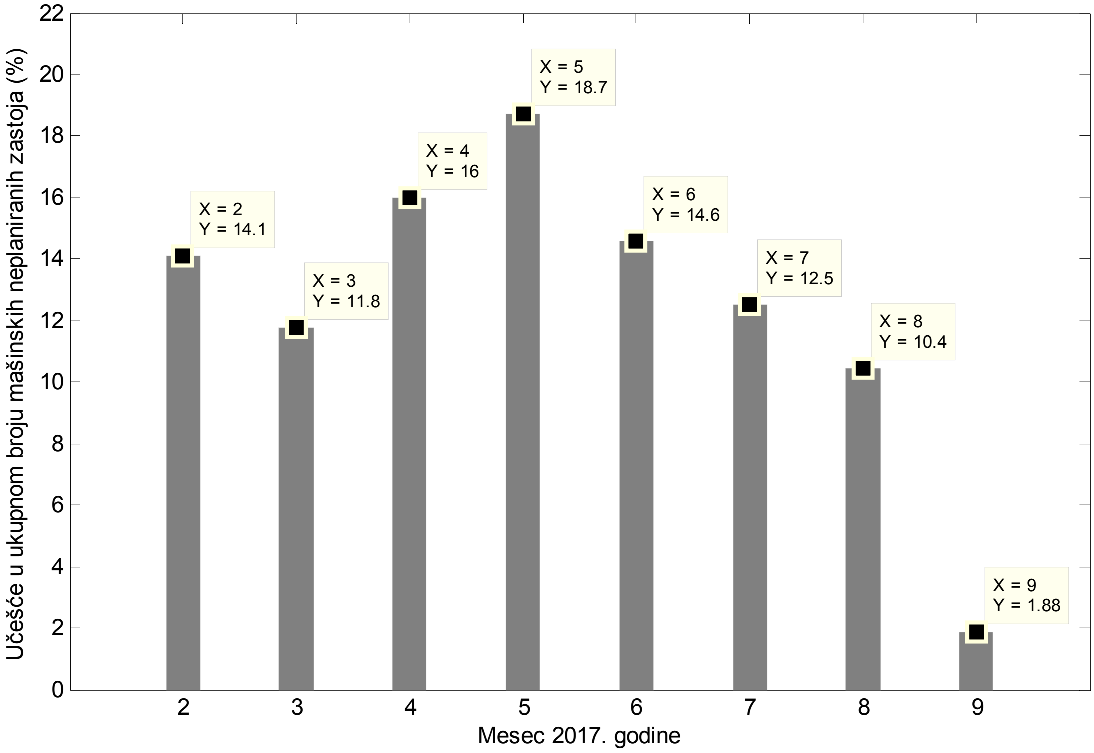


Слика 3.32. Процентуално временско учешће врста застоја система

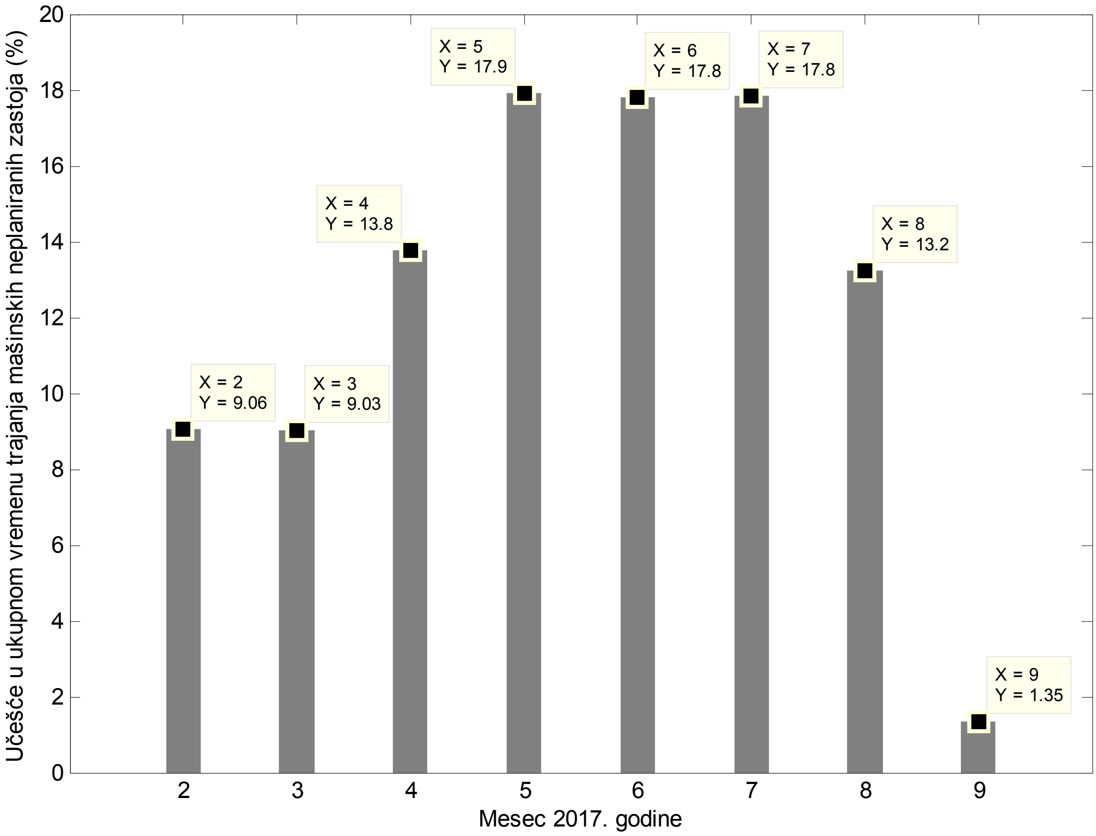
Непланирани машински застоји имају доминантно учешће у укупном времену застоја I БТО система, табеле 3.4 и 3.6. Током референтног периода (фебруар – септембар 2017. године) снимљено је укупно 1063 застоја идентификованих као „непланирани машински застој“, у укупном времену трајања 67935 min, табела 3.7. Дистрибуција месечног процентуалног учешћа у укупном броју и времену трајања непланираних машинских застоја приказана је на сликама 3.33 и 3.34.

Табела 3.7. Непланирани машински застоји (фебруар – септембар 2017. године)

Месец	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Фебруар	150	6155	9,06
Март	125	6135	9,03
Април	170	9360	13,78
Мај	199	12170	17,91
Јун	155	12105	17,82
Јул	133	12115	17,83
Август	111	8980	13,20
Септембар	20	915	1,35
Укупно	**1063**	**67935**	**100,00**



Слика 3.33. Расподела процентуалног учешћа у укупном броју непланираних машинских застоја

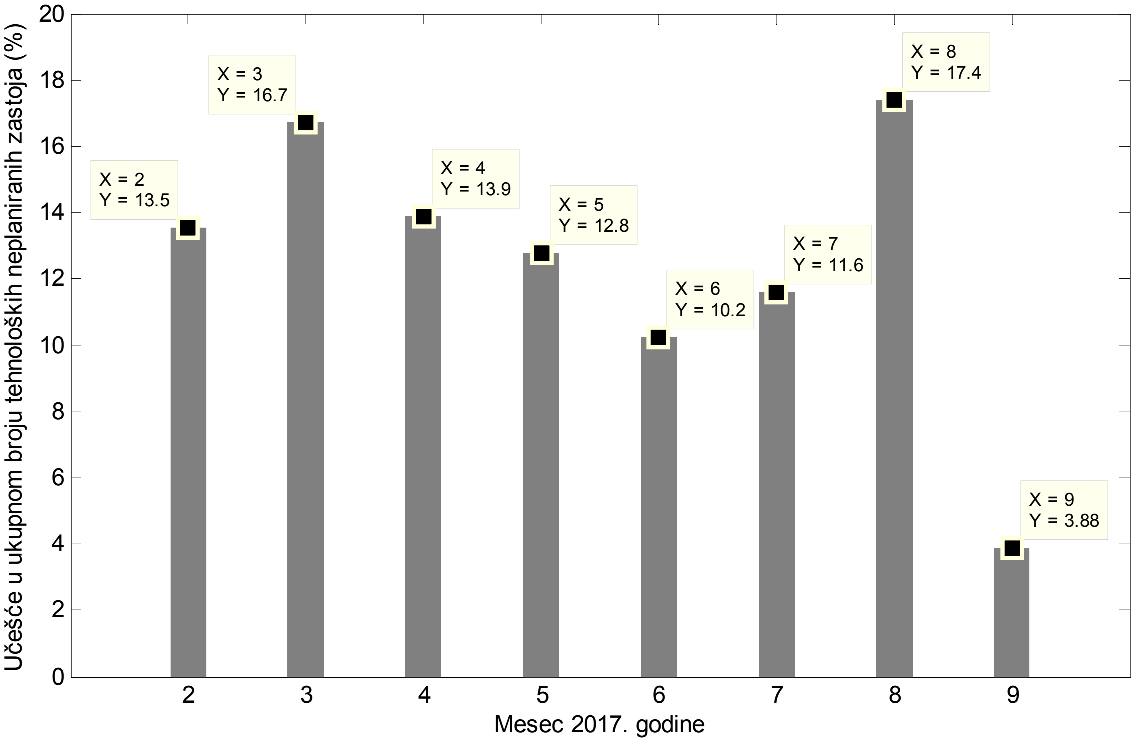


Слика 3.34. Расподела процентуалног учешћа у укупном времену трајања непланираних машинских застоја

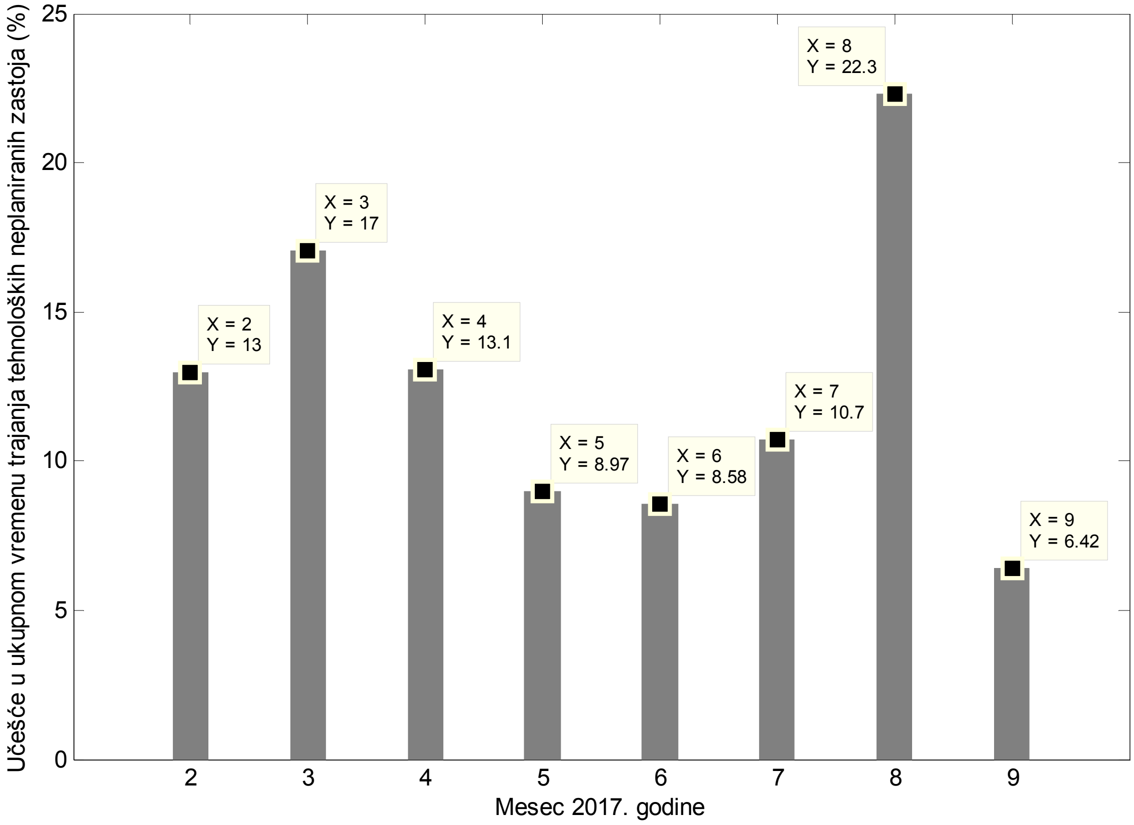
Времена трајања непланираних технолошких застоја, табела 3.8, чине 28,1% укупног времена трајања непланираних застоја, табела 3.4. Дистрибуција месечног процентуалног учешћа у укупном броју и времену трајања непланираних технолошких застоја приказана је на сликама 3.35 и 3.36.

Табела 3.8. Непланирани технолошки застоји (фебруар – септембар 2017. године)

Месец	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Фебруар	401	3890	12,96
Март	496	5110	17,03
Април	412	3920	13,06
Мај	379	2690	8,97
Јун	303	2575	8,58
Јул	344	3210	10,70
Август	516	6685	22,28
Септембар	115	1925	6,42
Укупно	**2966**	**30005**	**100,00**



Слика 3.35. Расподела процентуалног учешћа у укупном броју непланираних технолошких застоја

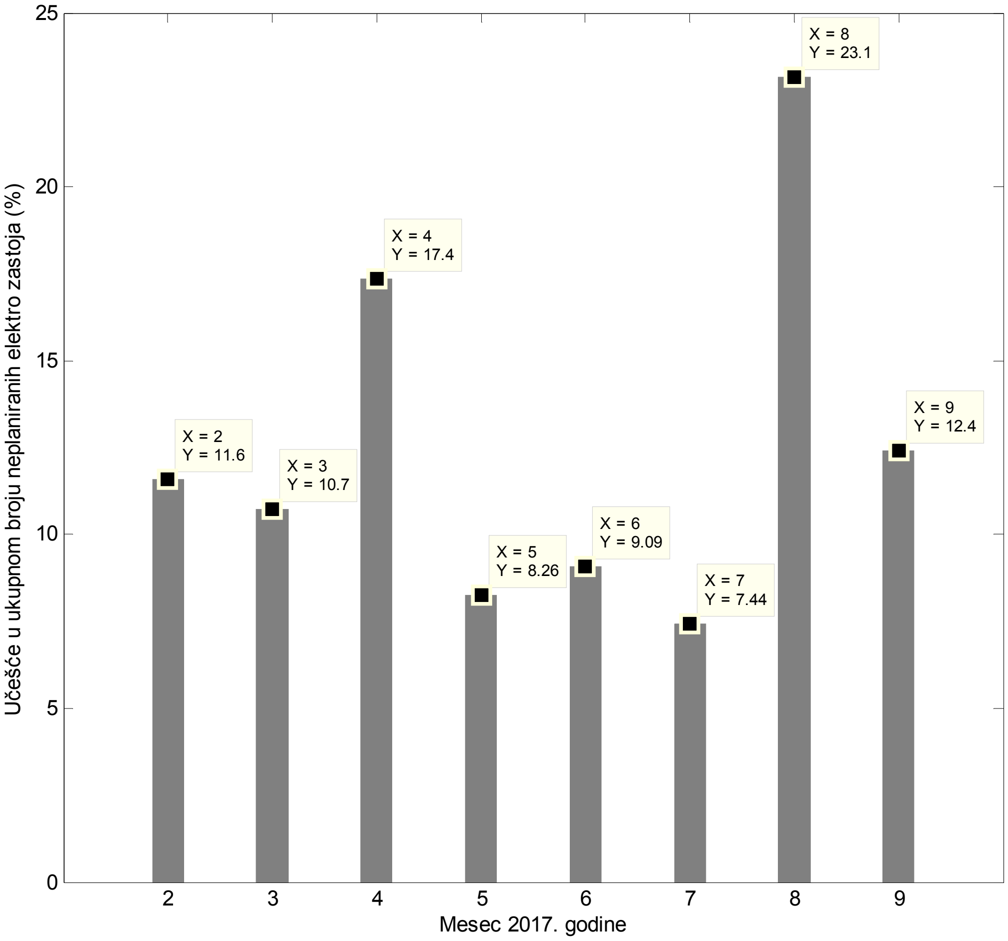


Слика 3.36. Расподела процентуалног учешћа у укупном времену трајања непланираних технолошких застоја

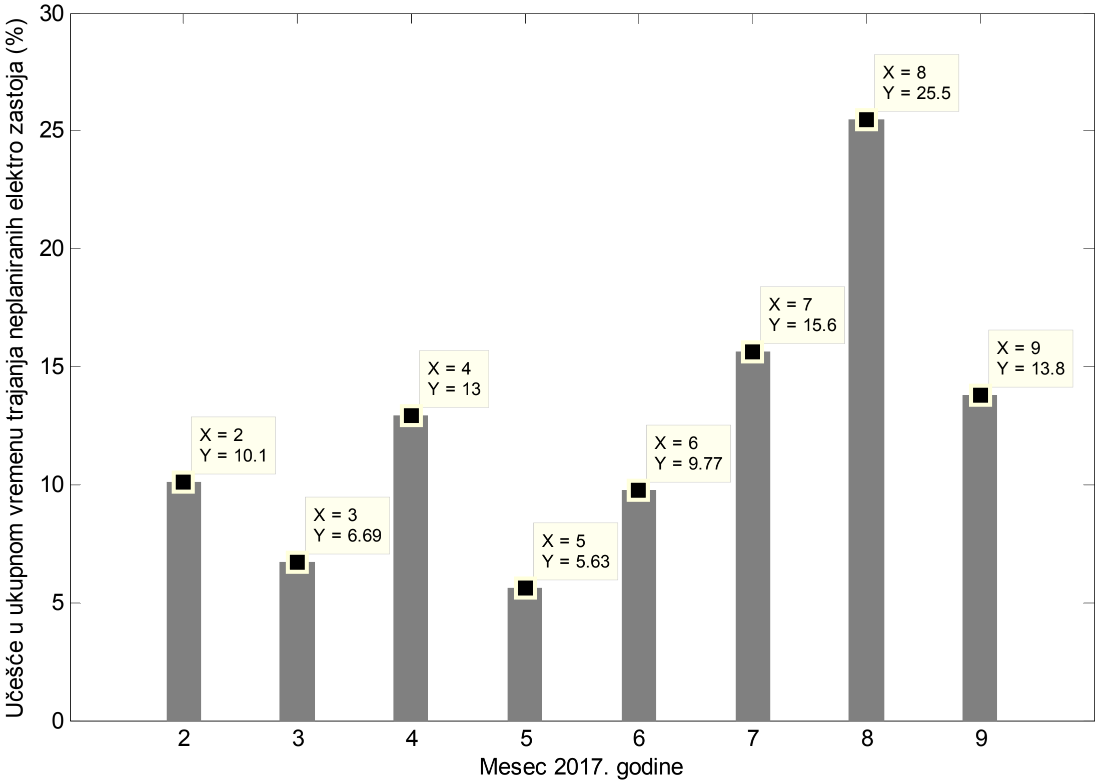
Времена трајања непланираних електро застоја, табела 3.9, чине 4,4% укупног времена трајања непланираних застоја, табела 3.4. Дистрибуција месечног процентуалног учешћа у укупном броју и времену трајања непланираних елекро застоја приказана је на сликама 3.37 и 3.38.

Табела 3.9. Непланирани електро застоји (фебруар – септембар 2017. године)

Месец	Број	Време трајања (min)	Временско учешће (%)
Фебруар	14	475	10,08
Март	13	315	6,69
Април	21	610	12,95
Мај	10	265	5,63
Јун	11	460	9,77
Јул	9	735	15,61
Август	28	1200	25,48
Септембар	15	650	13,80
Укупно	**121**	**4710**	**100,00**



Слика 3.37. Расподела процентуалног учешћа у укупном броју непланираних електро застоја



Слика 3.38. Расподела процентуалног учешћа у укупном времену трајања непланираних електро застоја

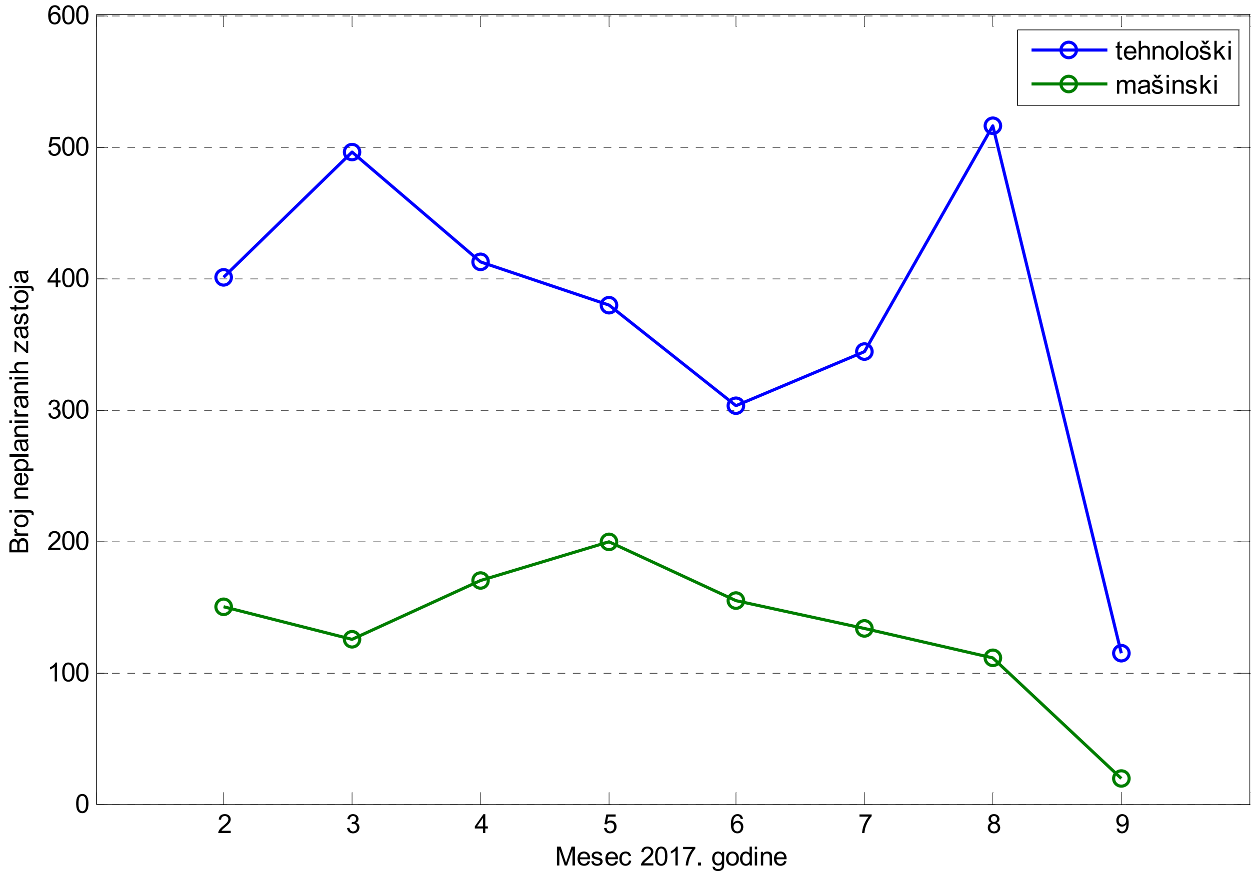
Дистрибуција броја и времена трајања свих непланираних застоја током референтног периода (фебруар – септембар 2017. године) табеле 3.10 и 3.11, приказана је на сликама 3.39-3.42.

Табела 3.10. Број непланираних застоја (по врстама)

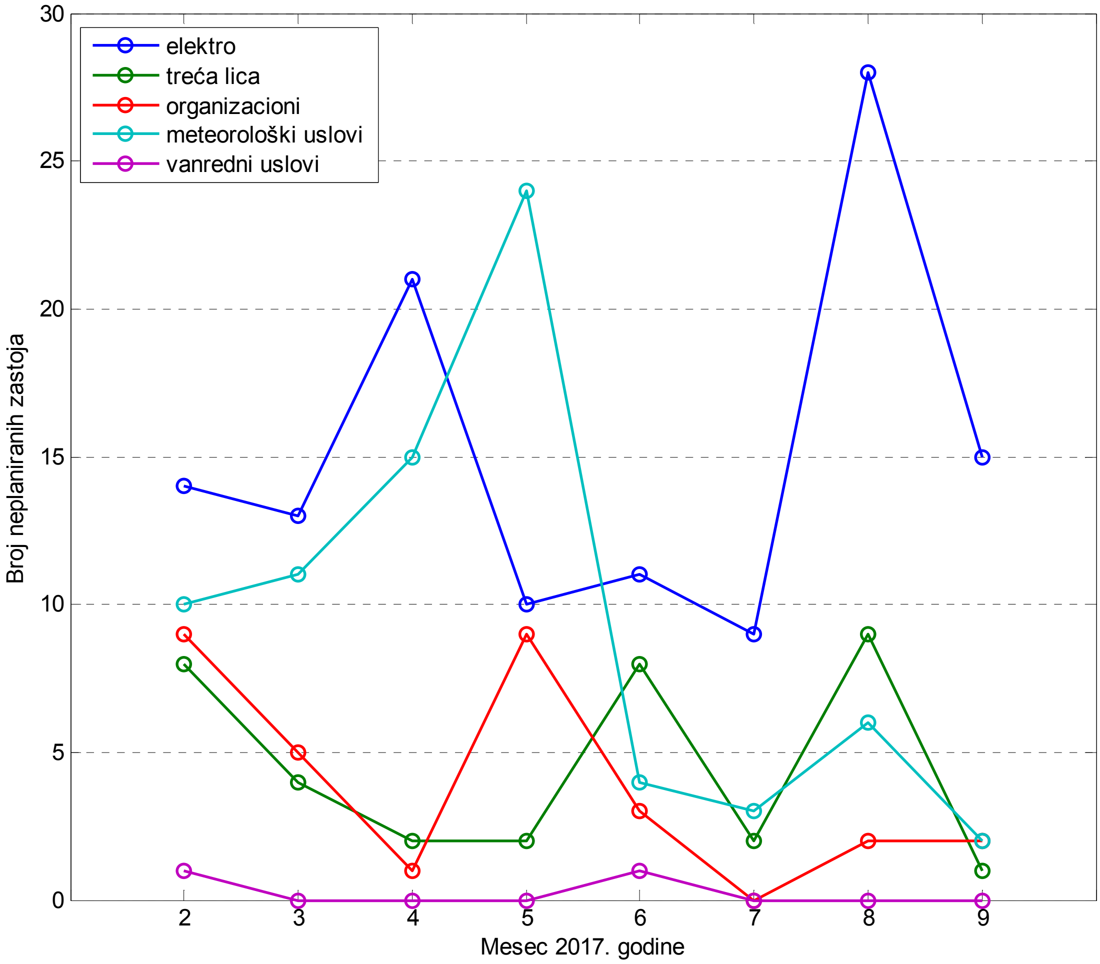
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	месечни број застоја						
Фебруар	401	14	150	8	9	10	1
Март	496	13	125	4	5	11	0
Април	412	21	170	2	1	15	0
Мај	379	10	199	2	9	24	0
Јун	303	11	155	8	3	4	1
Јул	344	9	133	2	0	3	0
Август	516	28	111	9	2	6	0
Септембар	115	15	20	1	2	2	0
Укупно	**2966**	**121**	**1063**	**36**	**31**	**75**	**2**

Табела 3.11. Времена трајања непланираних застоја (по врстама)

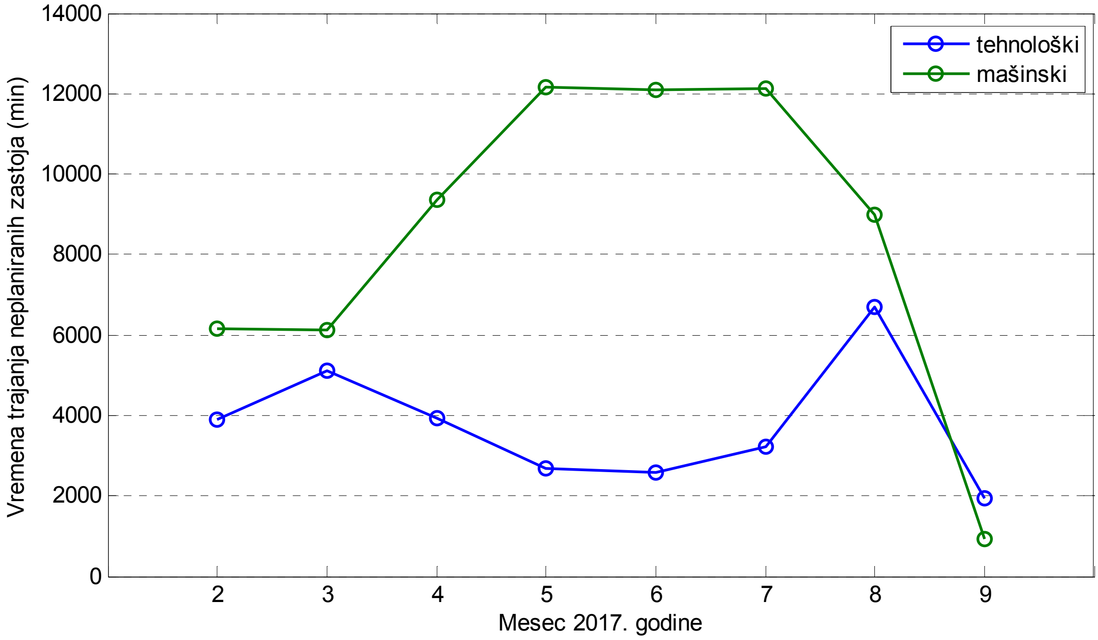
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	(min)						
Фебруар	3890	475	6155	145	180	405	0
Март	5110	315	6135	195	215	170	0
Април	3920	610	9360	25	10	165	0
Мај	2690	265	12170	20	195	510	0
Јун	2575	460	12105	335	45	105	15
Јул	3210	735	12115	45	0	230	0
Август	6685	1200	8980	100	440	300	0
Септембар	1925	650	915	30	90	40	
Укупно	**30005**	**4710**	**67935**	**895**	**1175**	**1925**	**15**



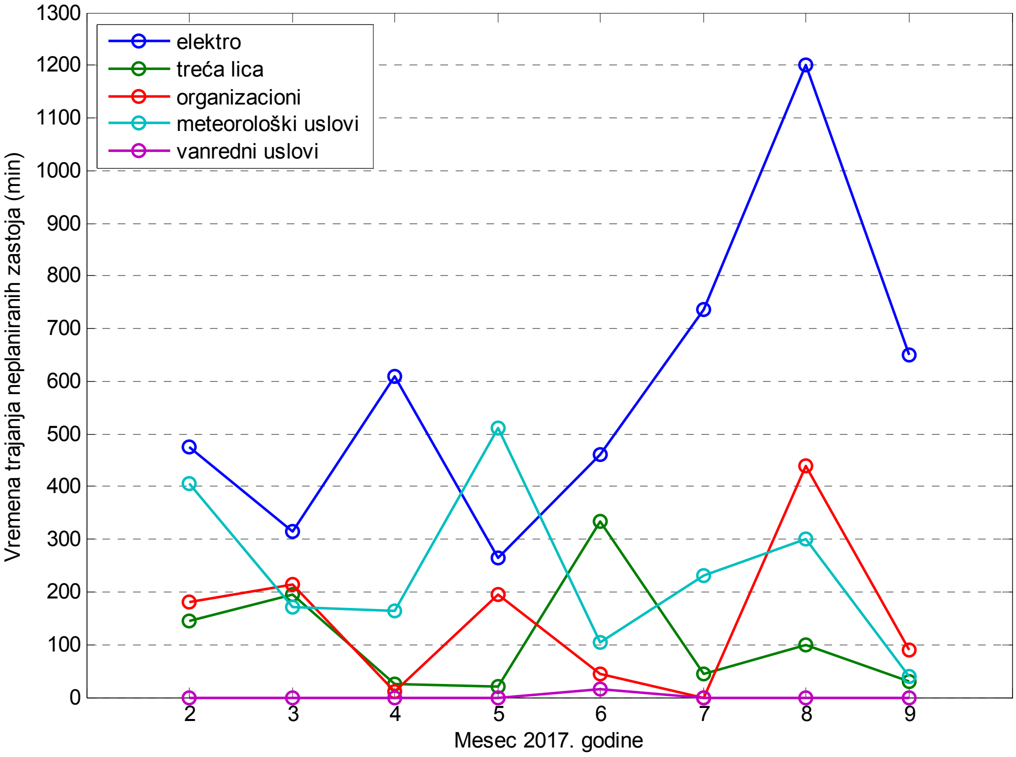
Слика 3.39. Расподела укупног броја непланираних технолошких и машинских застоја



Слика 3.40. Расподела укупног броја непланираних електро и организационих застоја и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким условима и ванредним околностима



Слика 3.41. Расподела укупног времена трајања непланираних технолошких и машинских застоја



Слика 3.42. Расподела укупног времена трајања непланираних електро и организационих застоја и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким условима и ванредним околностима

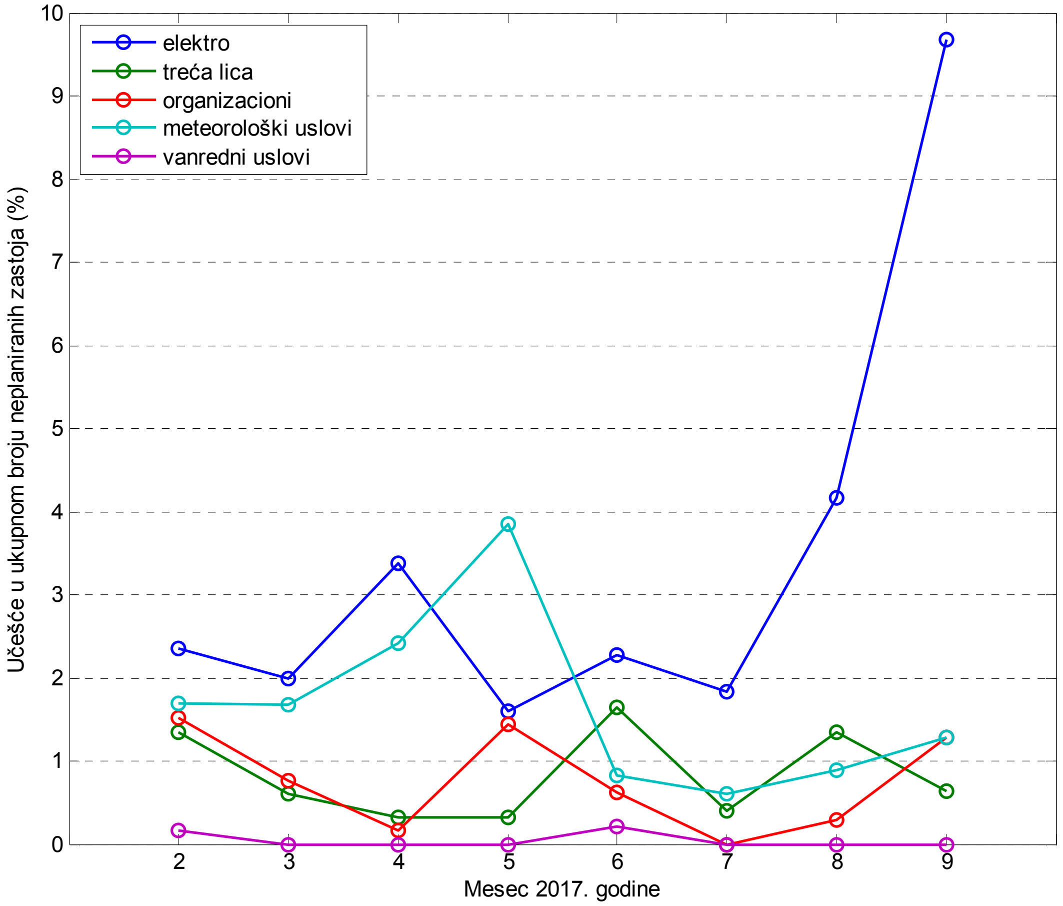
Процентуално учешће појединих врста застоја у укупном броју и времену трајања непланираних застоја у референтном периоду, табеле 3.12 и 3.13, приказано је на сликама 3.43-3.46.

Табела 3.12. Процентуално учешће појединих врста непланираних застоја у укупном броју непланираних застоја

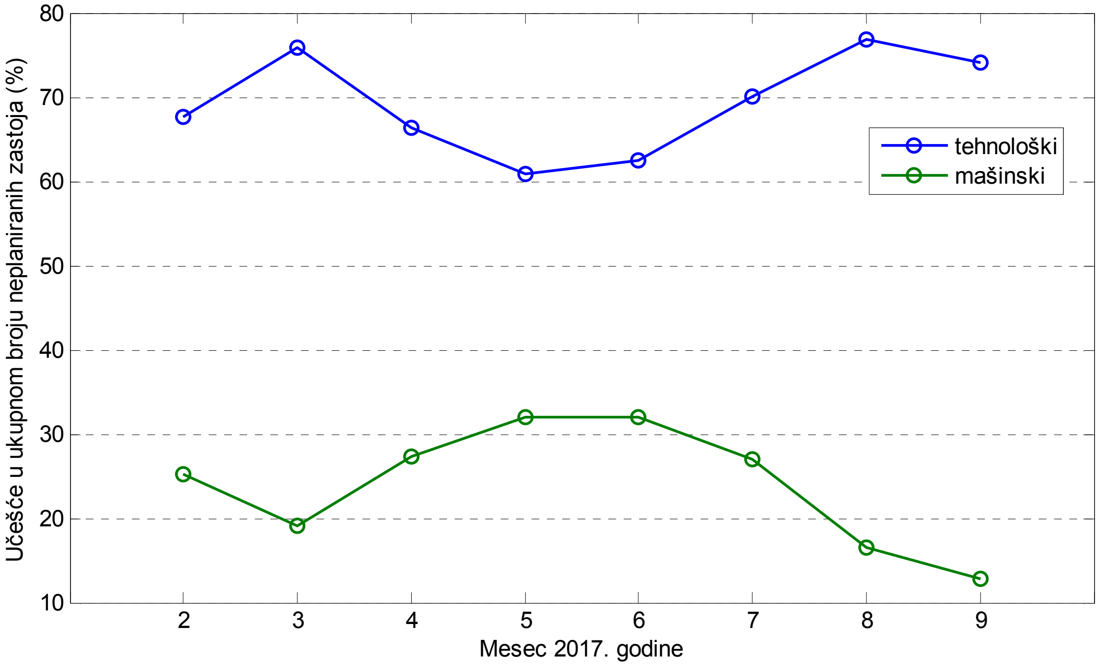
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	(%)						
Фебруар	67,6	2,4	25,3	1,4	1,5	1,7	0,2
Март	75,8	2,0	19,1	0,6	0,8	1,7	0,0
Април	66,4	3,4	27,4	0,3	0,2	2,4	0,0
Мај	60,8	1,6	31,9	0,3	1,5	3,9	0,0
Јун	62,5	2,3	32,0	1,7	0,6	0,8	0,2
Јул	70,1	1,8	27,1	0,4	0,0	0,6	0,0
Август	76,8	4,2	16,5	1,3	0,3	0,9	0,0
Септембар	74,2	9,7	12,9	0,7	1,3	1,3	0,0

Табела 3.13. Процентуално учешће појединих врста непланираних застоја у укупном времену трајања непланираних застоја

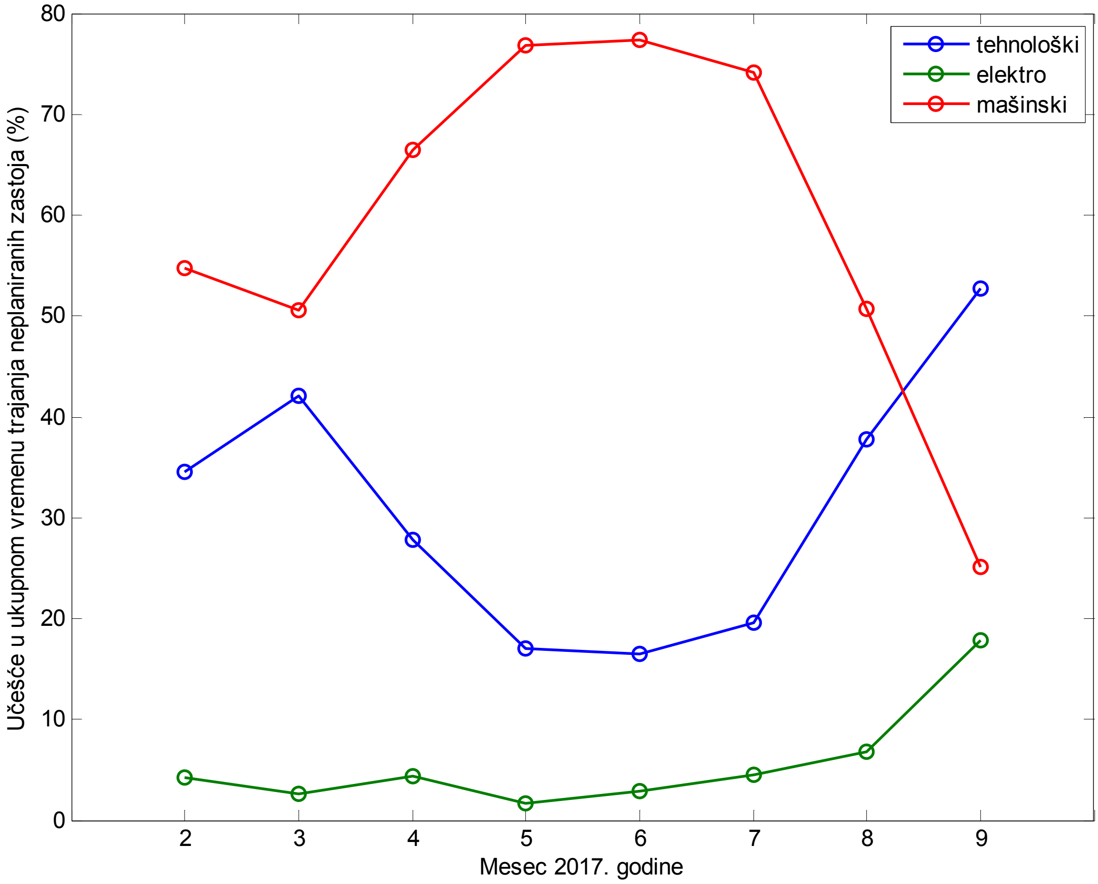
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	(%)						
Фебруар	34,6	4,2	54,7	1,3	1,6	3,6	0,0
Март	42,1	2,6	50,5	1,6	1,8	1,4	0,0
Април	27,8	4,3	66,4	0,2	0,1	1,2	0,0
Мај	17,0	1,7	76,8	0,1	1,2	3,2	0,0
Јун	16,5	2,9	77,4	2,1	0,3	0,7	0,1
Јул	19,7	4,5	74,2	0,3	0,0	1,4	0,0
Август	37,8	6,8	50,7	0,6	2,5	1,7	0,0
Септембар	52,7	17,8	25,1	0,8	2,5	1,1	0,0



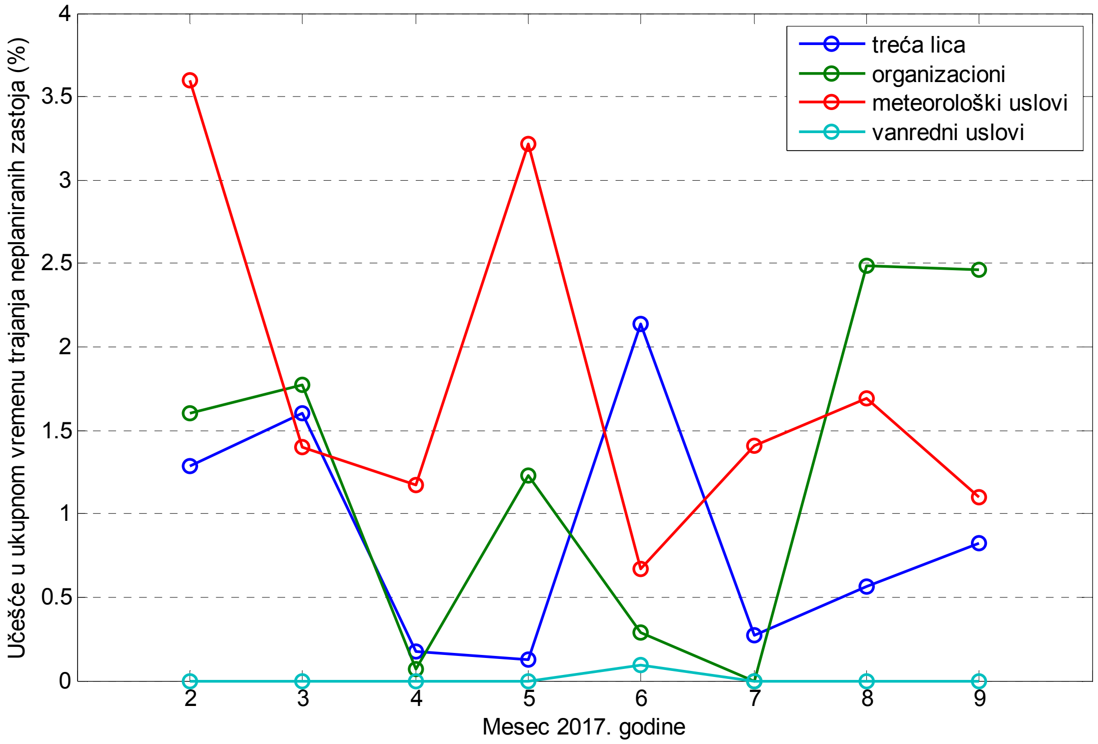
Слика 3.43. Расподела процентуалног учешћа броја непланираних електро и организационих застоја и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким условима и ванредним околностима



Слика 3.44. Расподела процентуалног учешћа броја непланираних технолошких и машинских застоја у укупном броју непланираних застоја



Слика 3.45. Расподела процентуалног учешћа непланираних технолошких, електро и машинских застоја у укупном времену трајања непланираних застоја



Слика 3.46. Расподела процентуалног учешћа непланираних организационих застоја и непланираних застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким условима и ванредним околностима у укупном времену трајања непланираних застоја

На основу података о временима проведеним у стању „у раду“ и „у застоју“, одређује се просечан степен временског коришћења система, табела 3.14.

Табела 3.12. Расподела времена „у раду“ и „у застоју“ по месецима 2017. године

Месец	Укупно време			У раду	У застоју
	у раду (*OT*)	у застоју (*DT*)	расположиво (*TH*)	*η*=(*OT*/*TH*)x100	(*DT*/*TH*)x100
	(min)			(%)	
Фебруар	24550	15770	40320	60,9	39,1
Март	25295	19285	44580	56,7	43,3
Април	26345	16855	43200	61,0	39,0
Мај	24525	20115	44640	54,9	45,1
Јун	22780	20420	43200	52,7	47,3
Јул	21125	23515	44640	47,3	52,7
Август	23945	20695	44640	53,6	46,4
Септембар	5860	37340	43200	13,6	86,4
Укупно	**174425**	**173995**	**348420**	**-**	**-**

Просечни степен временског коришћења система израчунава се на основу израза

$$\overline{\eta}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\eta_{i}}{m}=\frac{60,9+56,7+61,0+54,9+52,7+47,3+53,6+13,6}{8}=50,1\%, \qquad ...(3.7)$$

у коме је *m*=8 укупан број месеци у референтном периоду.

Стандардна девијација одређује се на основу формуле

$$\sigma=\frac{1}{100}\left[\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(\eta_{i}-\overline{\eta}\right)^{2}}{m}\right]^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{100}\left[\frac{\left(60,9-50,1\right)^{2}+\left(56,7-50,1\right)^{2}+\left(61,0-50,1\right)^{2}}{8}+\right.$$

$$\left.+\frac{\left(54,9-50,1\right)^{2}+\left(52,7-50,1\right)^{2}+\left(47,3-50,1\right)^{2}+\left(53,6-50,1\right)^{2}+\left(13,6-50,1\right)^{2}}{8}\right]^{\frac{1}{2}}=$$

$$=0,1442, \qquad ...(3.8)$$

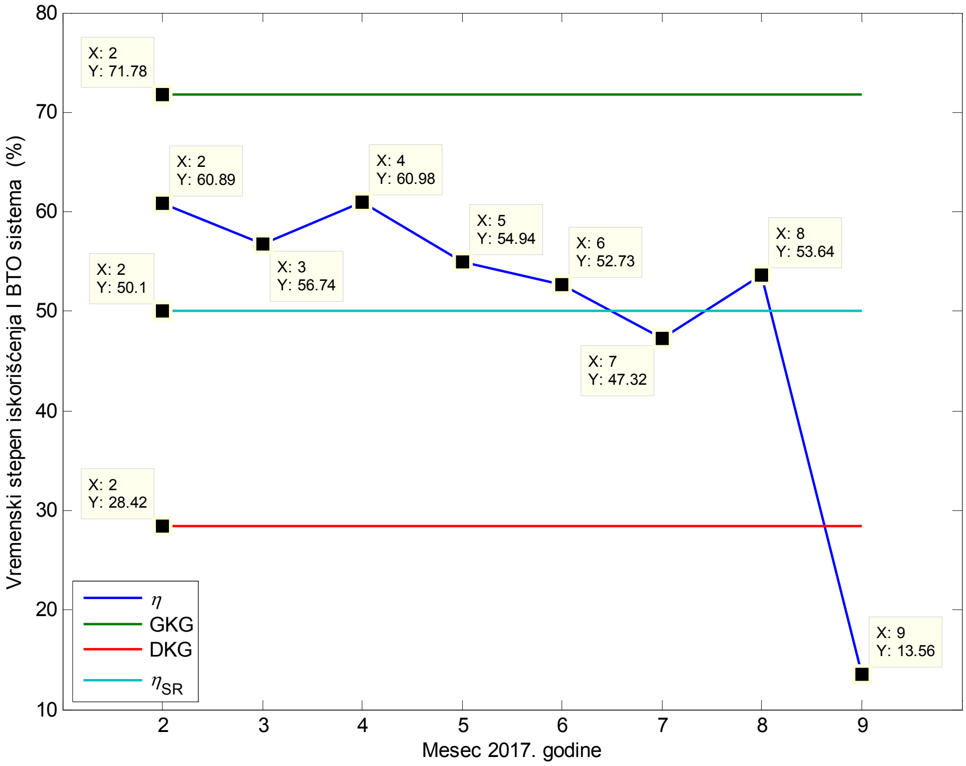
док се вредности горње и доње контролне границе одређују на основу израза

$$GKD=\overline{\eta}+3\sigma\overline{\eta}=50,1+3\times0,1442\times50,1=71,8\% \qquad ...(3.9)$$

и

$$DKD=\overline{\eta}-3\sigma\overline{\eta}=50,1-3\times0,1442\times50,1=28,4\%\,. \qquad ...(3.10)$$

Очигледно, слика 3.47, просечан степен временског искоришћења система у месецу септембру налази се ван контролних граница одређених применом правила „3σ“.

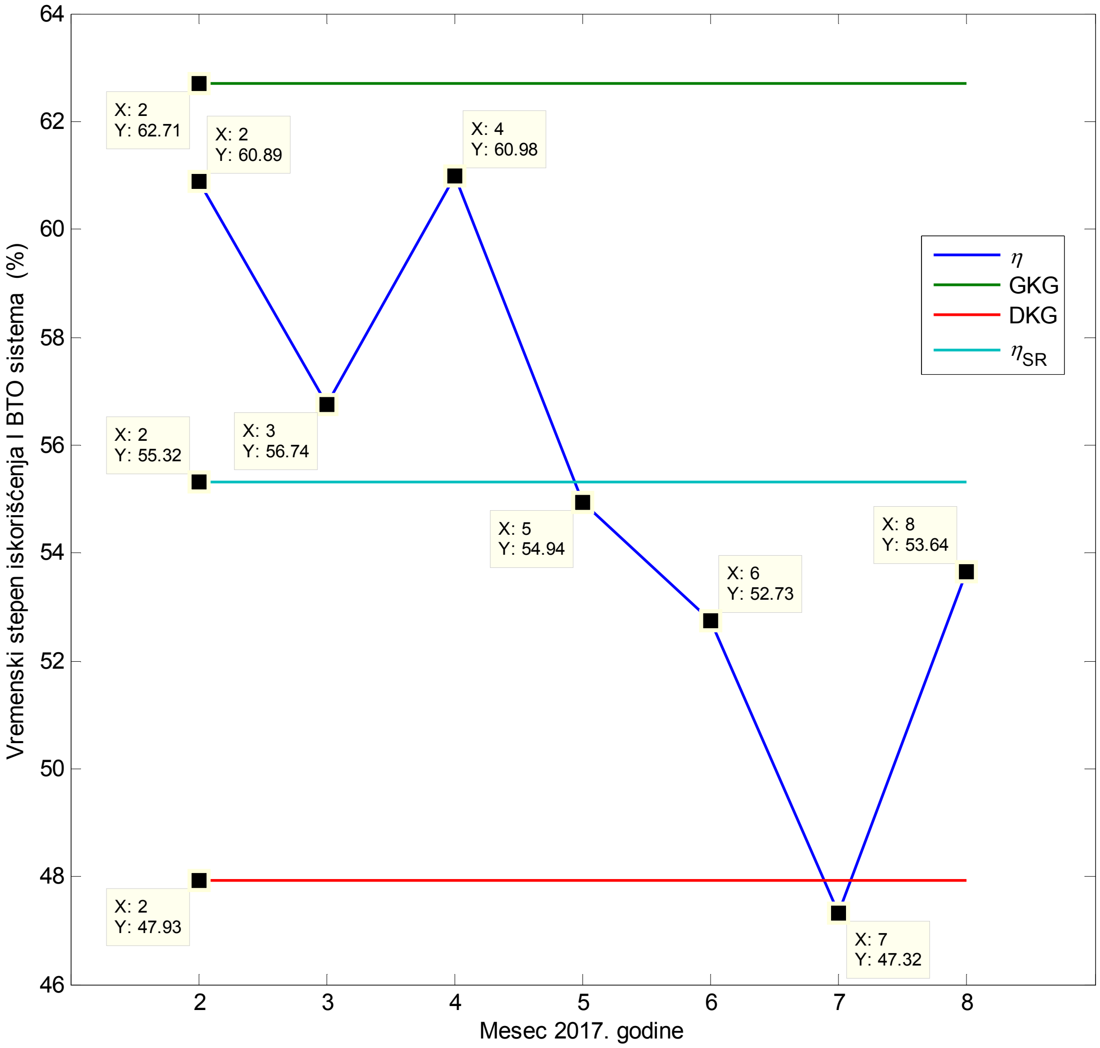


Слика 3.47. Расподела просечног временског искоришћења система (фебруар-септембар)

Изузетно ниска вредност просечног временског искоришћења система у месецу септембру последица је обављања инвестиционог одржавања. Након елиминације података за месец септембар, применом израза (3.7)-(3.10) добија се:

- просечан степен временског коришћења система $\overline{\eta} = 55{,}3\%$;
- стандардна девијација: $\sigma = 0{,}0445$;
- горња контролна граница: $GKD = 62{,}7\%$;
- доња контролна граница: $DKD = 47{,}9\%$.

Просечно временско искоришћење система налази се у оквиру контролних граница, слика 3.48, изузев у месецу августу, када је незнатно ниже од доње контролне границе, на основу чега се потврђује веродостојност кориговане вредности просечног степена временског искоришћења система добијене након елиминације података за месец септембар.



Слика 3.48. Расподела просечног временског искоришћења система (фебруар-август)

3.3.2 Карактеристике поузданости објекта истраживања-роторног багера SRs 2000x32/5+VR

Током репрезентативног периода посматрања (фебруар-август 2017. године) регистровано је укупно *ND*=2797 застоја чије је укупно време трајања *DT*=44545 min, табеле 3.13 и 3.14. Просечно време трајања застоја износи

$$\overline{T}_{\mathrm{D}} = \frac{DT}{ND} = \frac{44545}{2797} = 15{,}9 \text{ min.} \qquad ...(3.11)$$

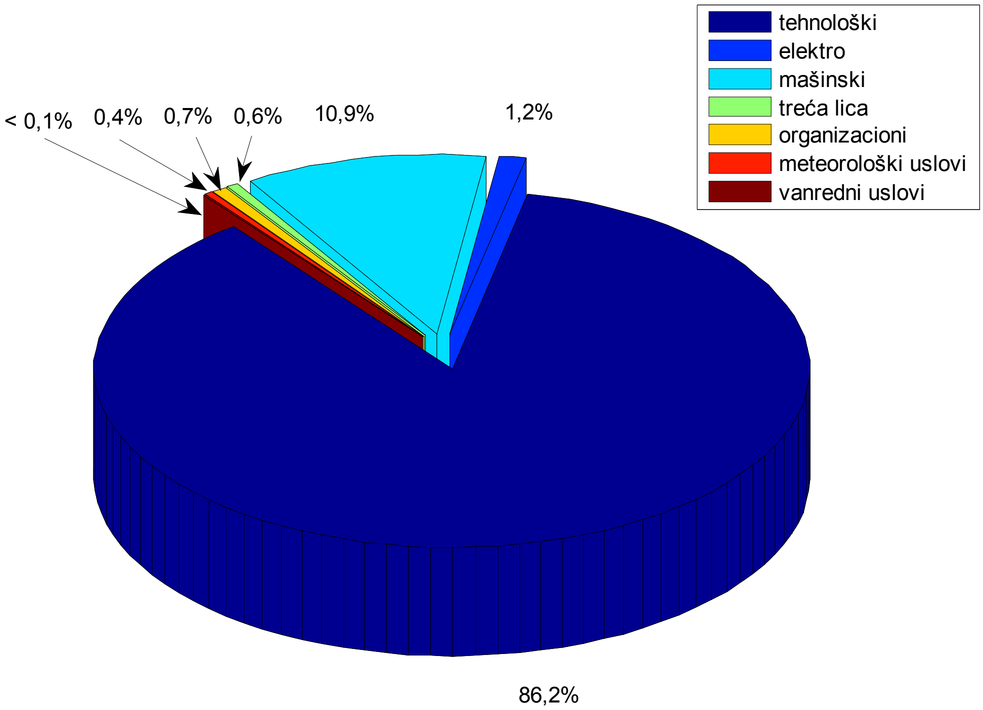
Процентуална учешћа појединих врста застоја приказана су на сликама 3.49 и 3.50. док су просечна времена трајања појединих врста застоја дата у табели 3.15.

Табела 3.13. Број застоја (по врстама)

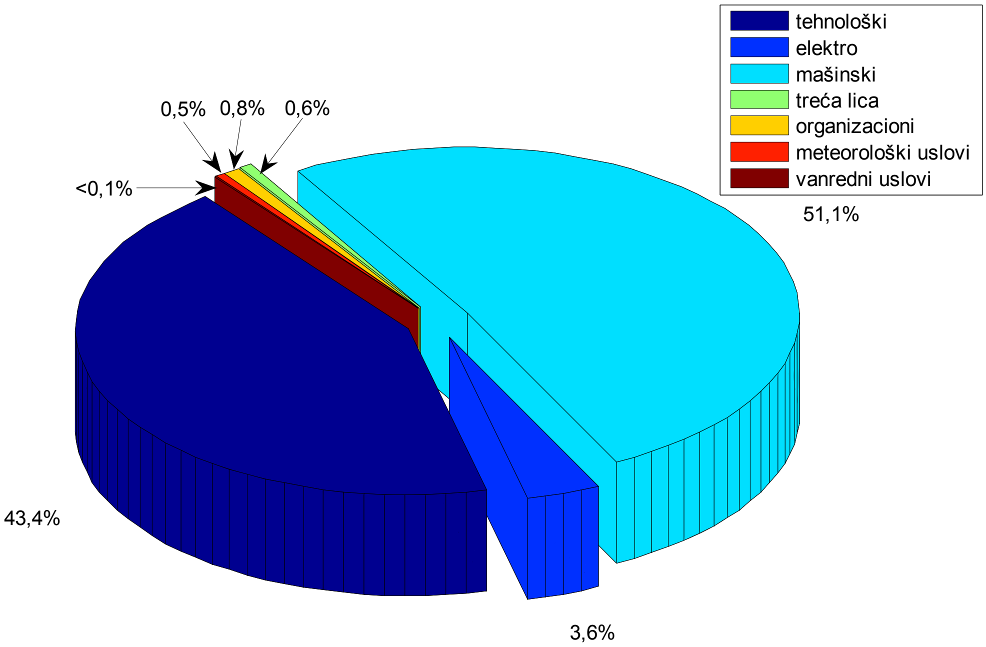
Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	месечни број застоја						
Фебруар	301	2	37	7	6	4	0
Март	440	2	40	1	4	0	0
Април	361	8	74	0	1	2	0
Мај	326	1	53	0	5	3	0
Јун	255	3	27	0	3	0	1
Јул	294	5	30	1	0	0	0
Август	434	12	45	7	1	1	0
Укупно	**2411**	**33**	**306**	**16**	**20**	**10**	**1**

Табела 3.14. Времена трајања застоја (по врстама)

Месец	Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
	(min)						
Фебруар	1930	165	2010	95	85	70	0
Март	3460	15	2625	95	90	0	0
Април	2465	260	6130	0	10	10	0
Мај	1980	115	6365	0	95	20	0
Јун	1855	35	1590	0	60	0	15
Јул	2025	460	1250	35	0	0	0
Август	5605	565	2790	40	30	100	0
Укупно	**19320**	**1615**	**22760**	**265**	**370**	**200**	**15**



Слика 3.49. Процентуално учешће врста застоја у укупном броју застоја

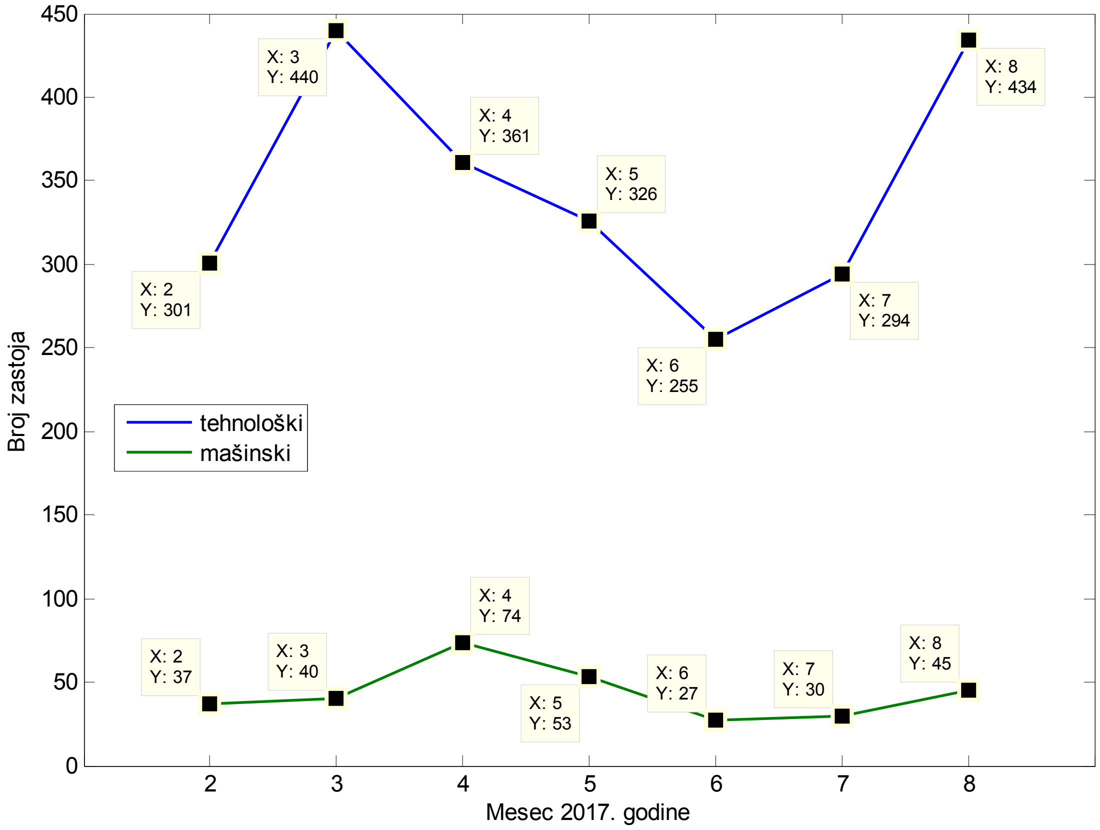


Слика 3.50. Процентуално учешће врста застоја у укупном времену трајања застоја

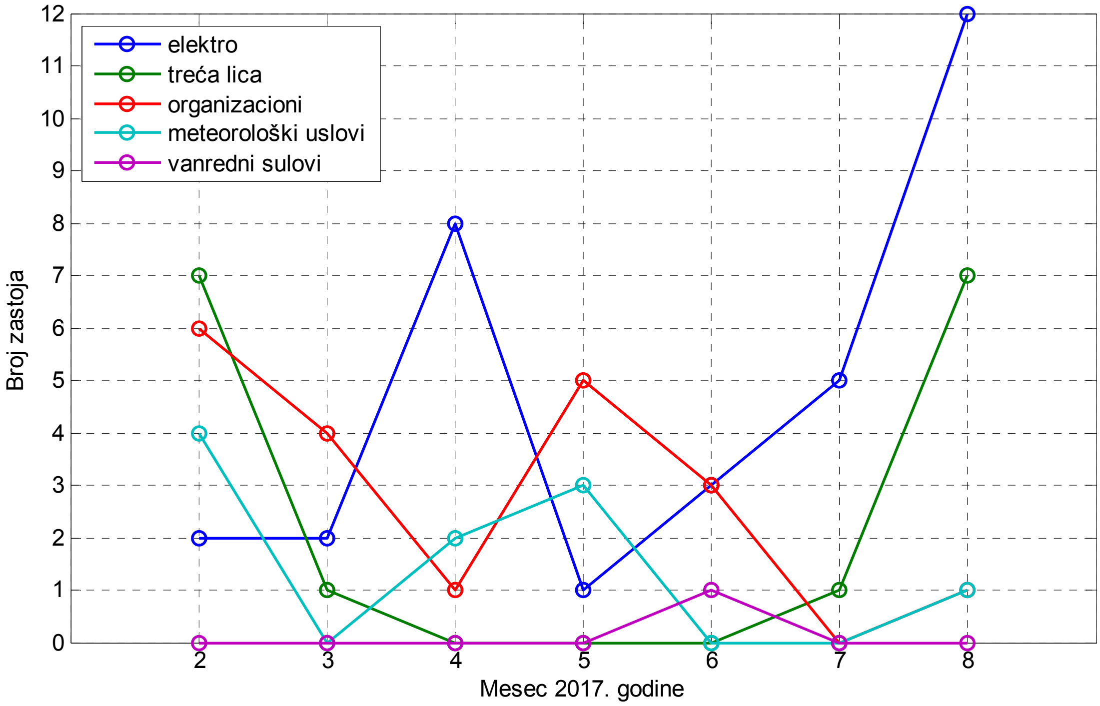
Табела 3.15. Просечна времена трајања појединих врста застоја

Технолошки	**Електро**	**Машински**	**Трећа лица**	**Организациони**	**Метеоролошки услови**	**Ванредни услови**
(min)						
8,0	48,9	74,4	16,6	18,5	20,0	15

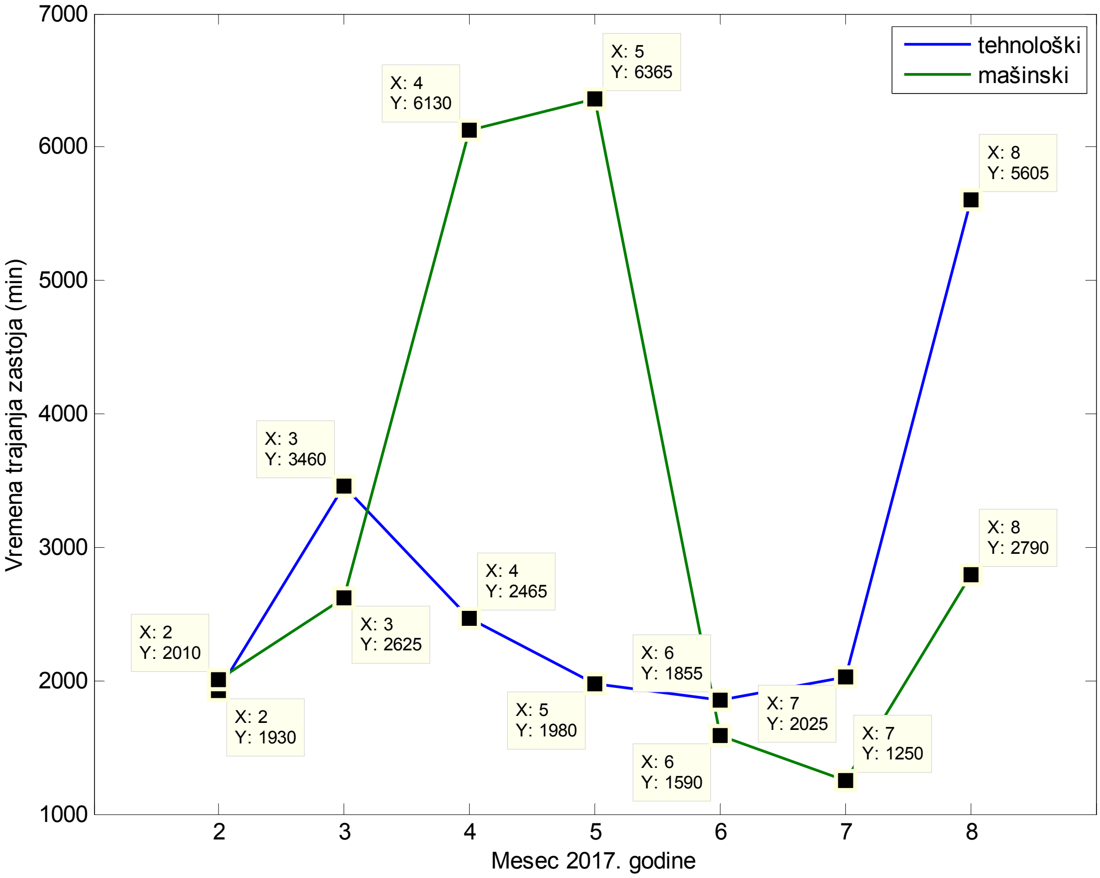
Дистрибуција укупног броја и времена трајања појединих врста застоја током референтног периода приказана је на сликама 3.51-3.54.



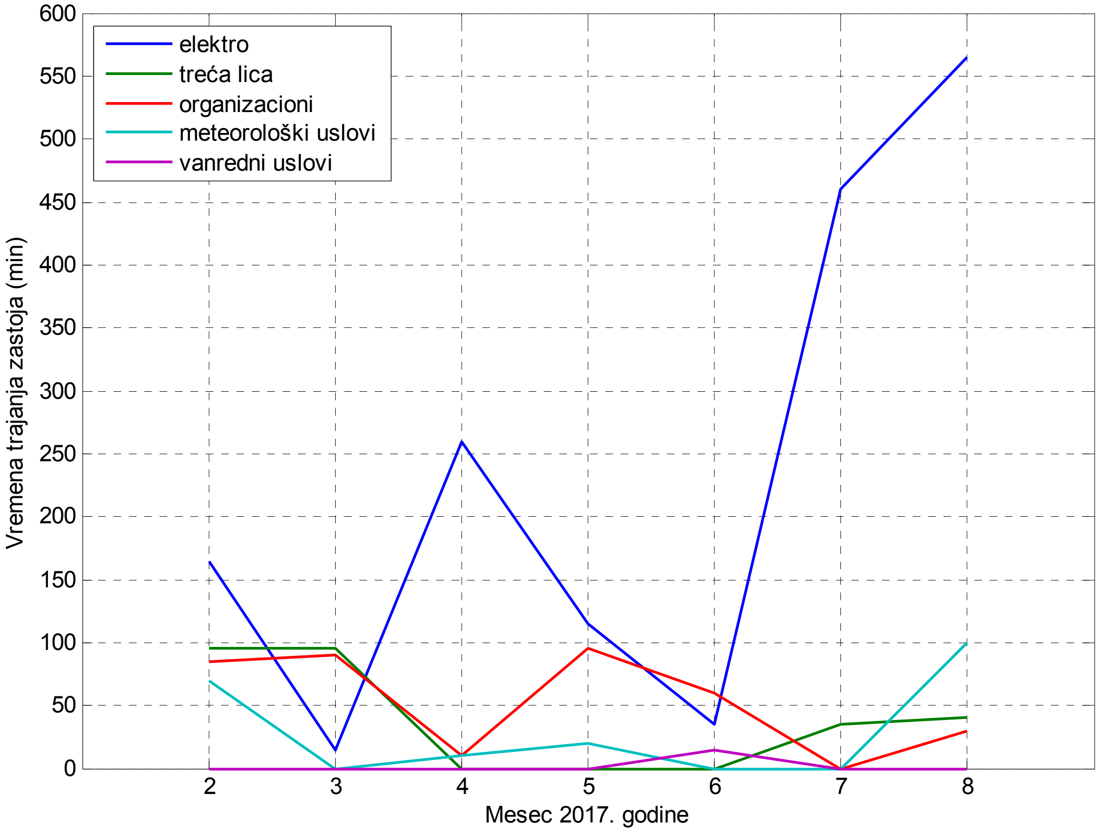
Слика 3.51. Расподела укупног броја технолошких и машинских застоја



Слика 3.52. Расподела укупног броја електро и организационих застоја и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким условима и ванредним околностима



Слика 3.53. Расподела укупног времена трајања технолошких и машинских застоја



Слика 3.54. Расподела укупног времена трајања електро и организационих застоја и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким условима и ванредним околностима

Подаци о броју и времену трајања застоја класификованих по врсти и плану дати су у табелама 3.16 и 3.17. Њихова процентуална учешћа у укупном броју и времену трајања застоја приказани су на сликама 3.55 и 3.56.

Табела 3.16. Број застоја (по врстама и плану)

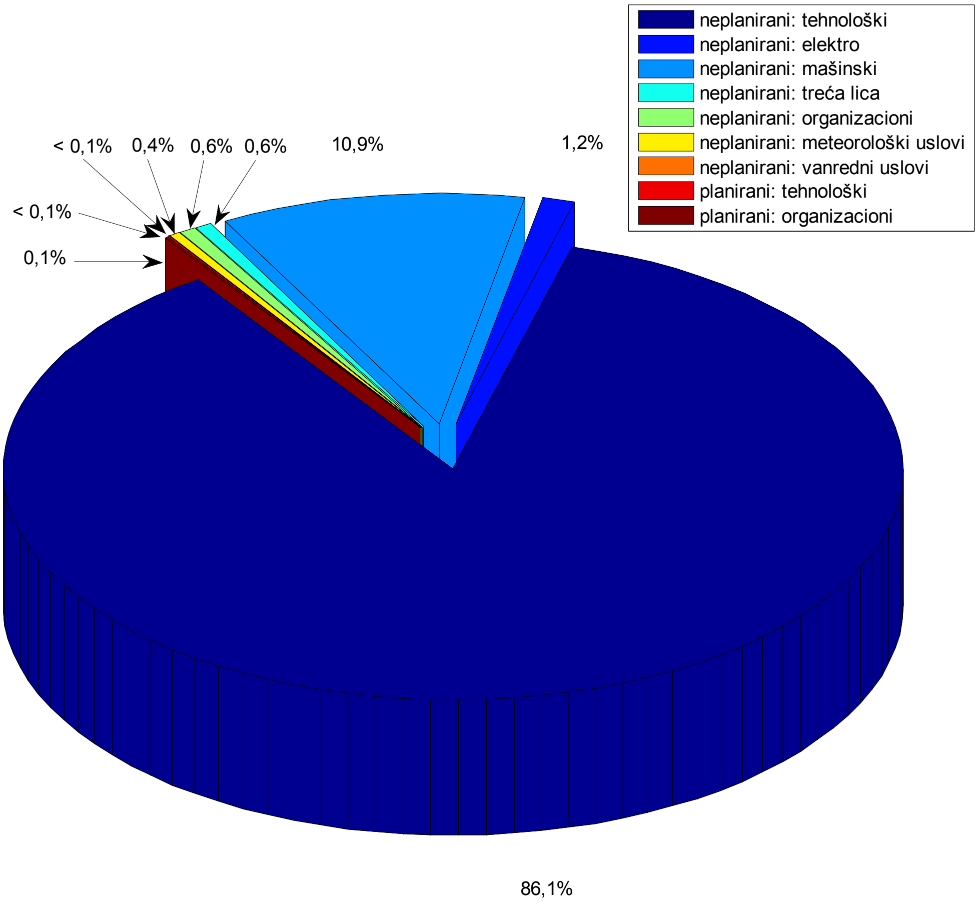
Месец*	Непланирани								Планирани			
	технолошки	електро	машински	трећа лица	организациони	метеоролошки услови	ванредни услови	технолошки	електро	машински	трећа лица	организациони
	месечни број застоја											
2	301	2	37	7	6	4	0	0	0	0	0	0
3	440	2	40	1	3	0	0	0	0	0	0	1
4	361	8	74	0	1	2	0	0	0	0	0	0
5	326	1	53	0	5	3	0	0	0	0	0	0
6	254	3	27	0	2	0	1	1	0	0	0	1
7	294	5	30	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	434	12	45	7	0	1	0	0	0	0	0	1
Σ	**2410**	**33**	**306**	**16**	**17**	**10**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**3**

*2-фебруар; 3-март; 4-април; 5-мај; 6-јун; 7-јул; 8-август

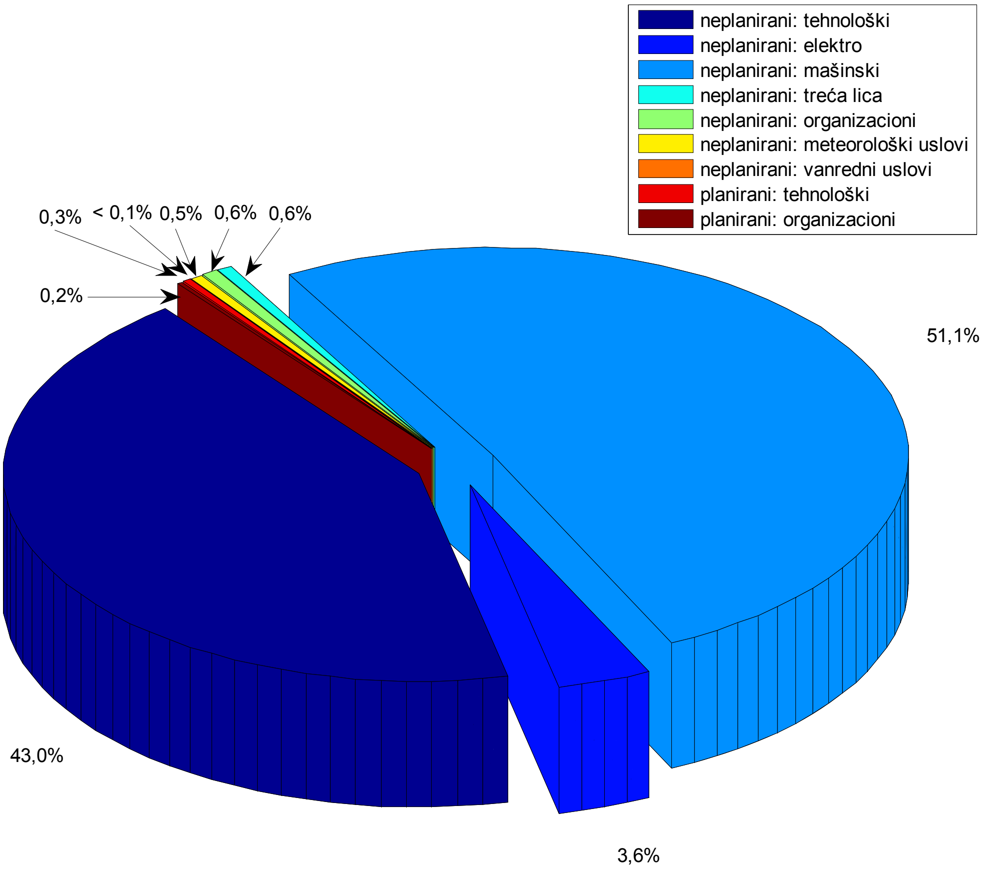
Табела 3.17. Времена трајања застоја (по врстама и плану)

Месец*	Непланирани							Планирани				
	технолошки	електро	машински	трећа лица	организациони	метеоролошки услови	ванредни услови	технолошки	електро	машински	трећа лица	организациони
	min											
2	1930	165	2010	95	85	70	0	0	0	0	0	0
3	3460	15	2625	95	60	0	0	0	0	0	0	30
4	2465	260	6130	0	10	10	0	0	0	0	0	0
5	1980	115	6365	0	95	20	0	0	0	0	0	0
6	1705	35	1590	0	30	0	15	150	0	0	0	30
7	2025	460	1250	35	0	0	0	0	0	0	0	0
8	5605	565	2790	40	0	100	0	0	0	0	0	30
Σ	**19170**	**1615**	**22760**	**265**	**280**	**200**	**15**	**150**	**0**	**0**	**0**	**90**

*2-фебруар; 3-март; 4-април; 5-мај; 6-јун; 7-јул; 8-август

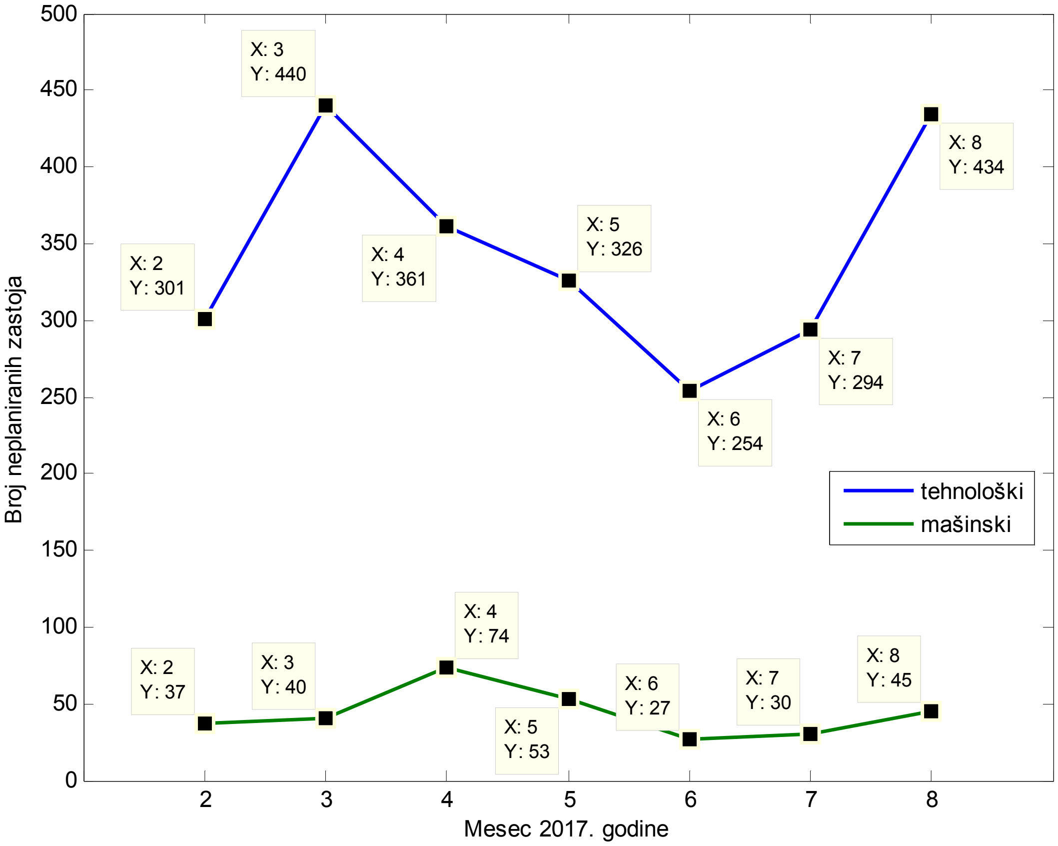


Слика 3.55. Процентуално учешће застоја у укупном броју застоја

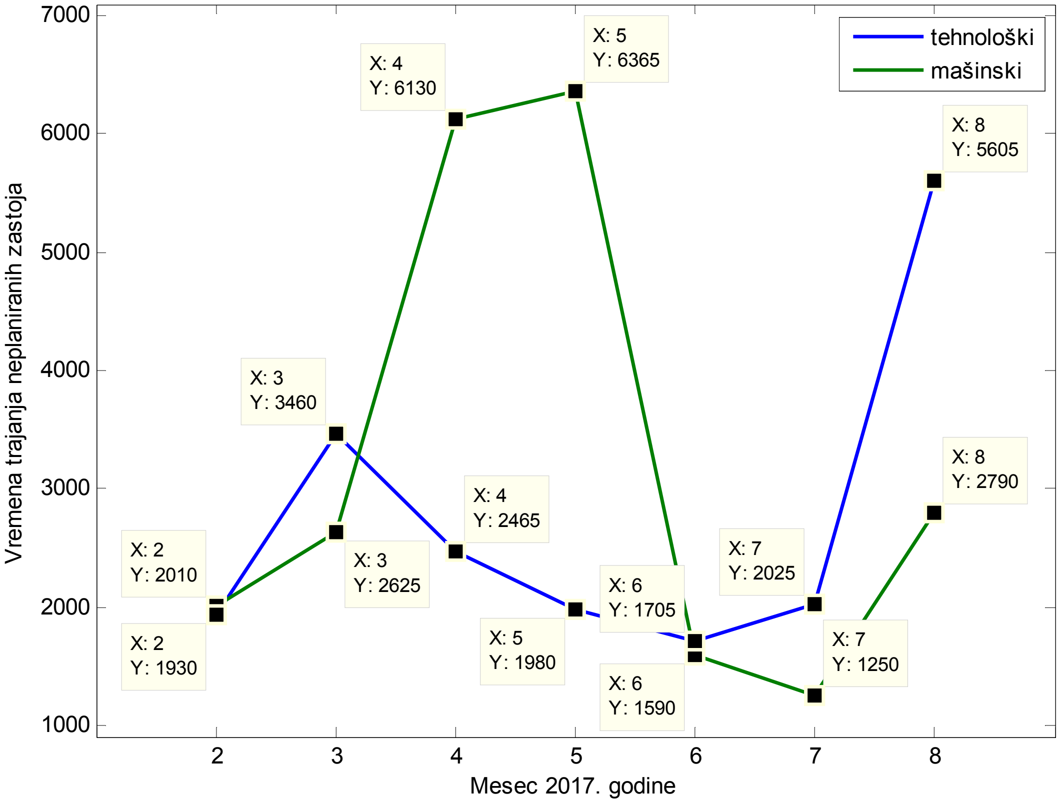


Слика 3.56. Процентуално учешће застоја у укупном времену трајања застоја

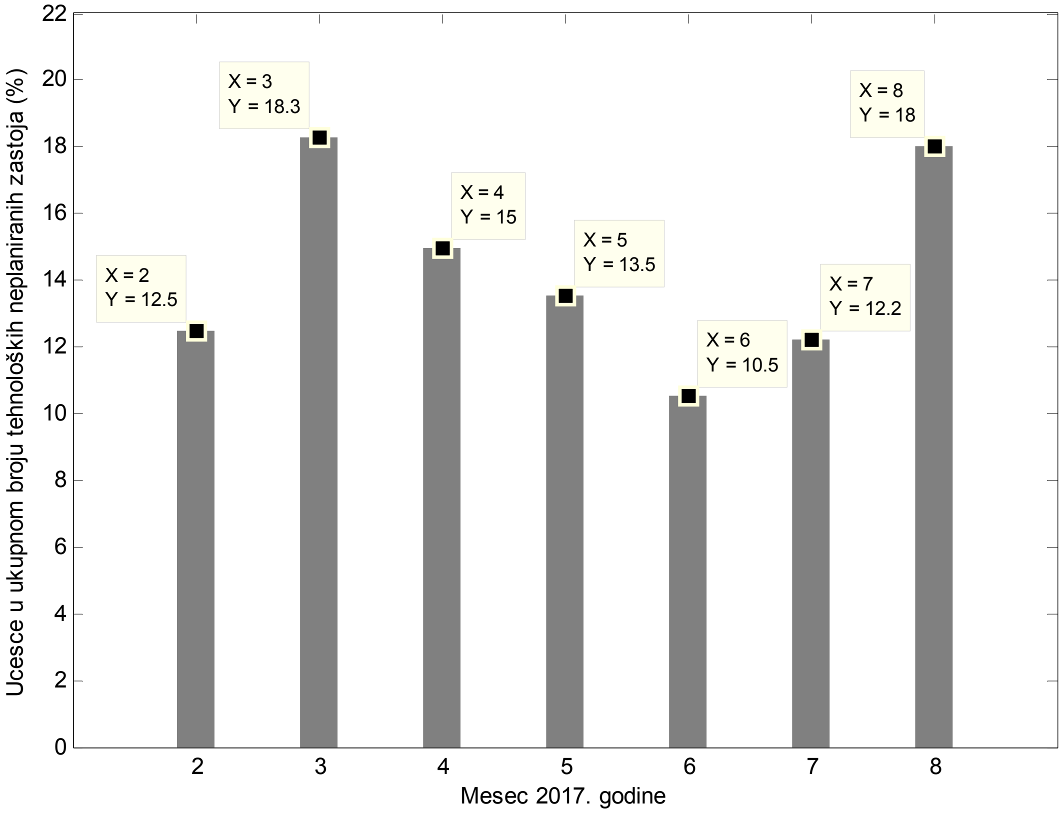
Уочава се, слике 3.55 и 3.56, да у укупном броју и времену трајања застоја доминантан удео имају непланирани технолошки и машински застоји. Њихова диструбуција током референтног периода приказана је на сликама 3.57-3.62.



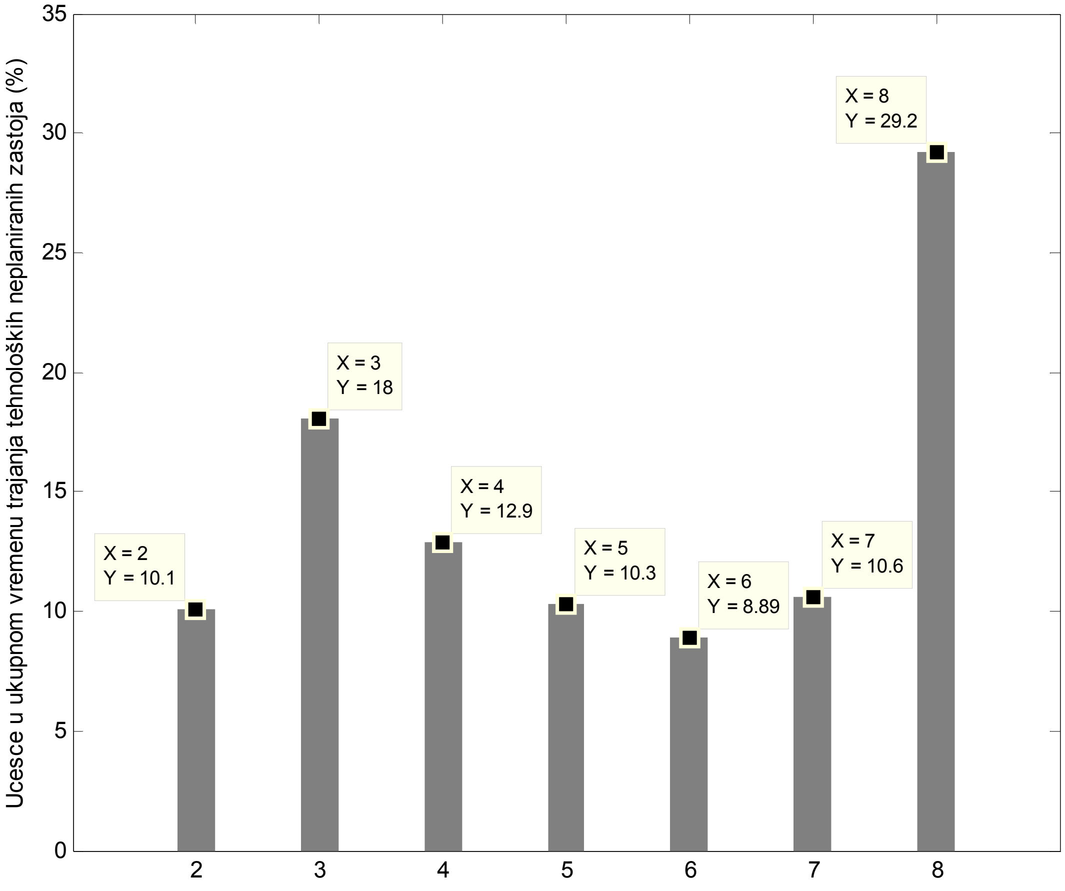
Слика 3.57. Расподела броја непланираних технолошких и машинских застоја



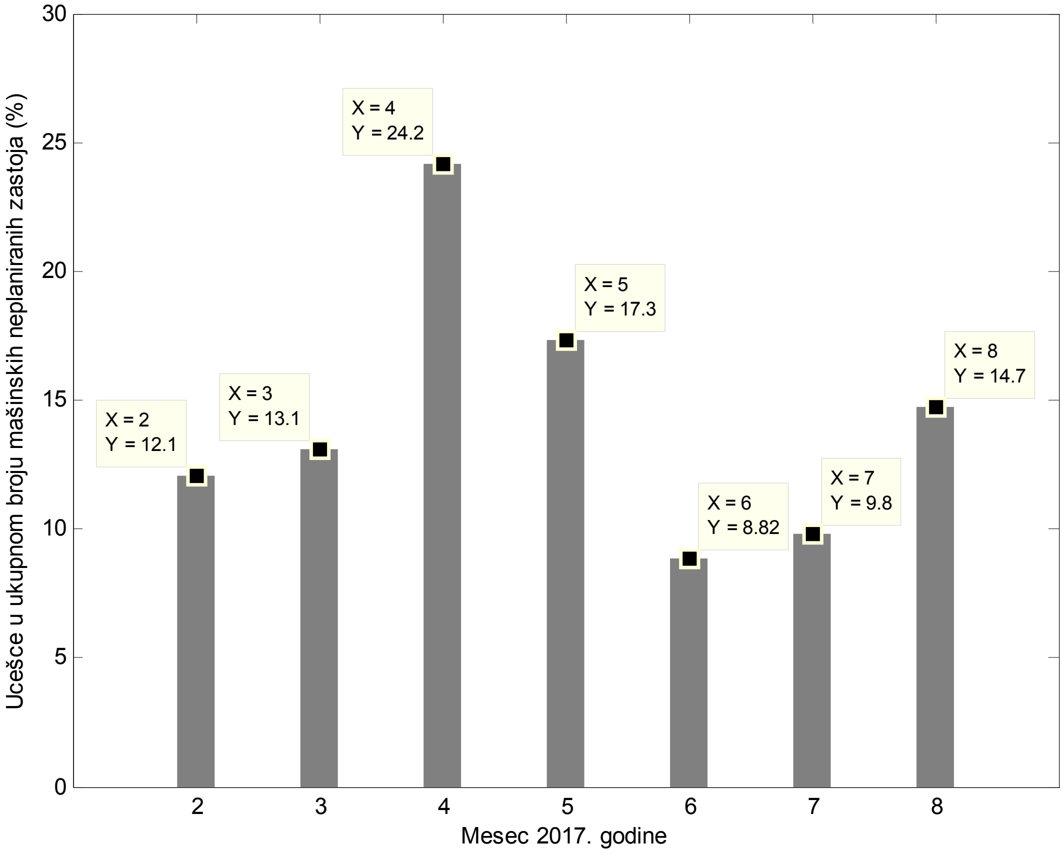
Слика 3.58. Расподела времена трајања непланираних технолошких и машинских застоја



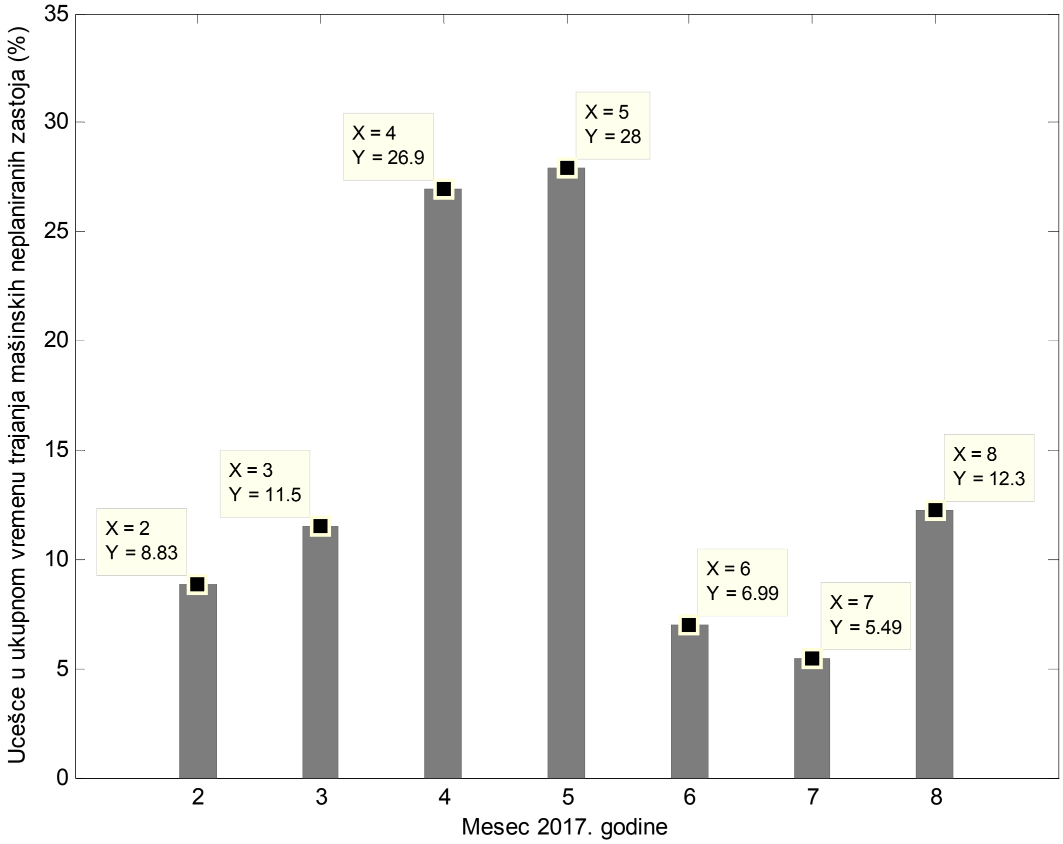
Слика 3.59. Расподела процентуалног учешћа у укупном броју непланираних технолошких застоја



Слика 3.60. Расподела процентуалног учешћа у укупном времену трајања непланираних технолошких застоја



Слика 3.61. Расподела процентуалног учешћа у укупном броју непланираних машинских застоја



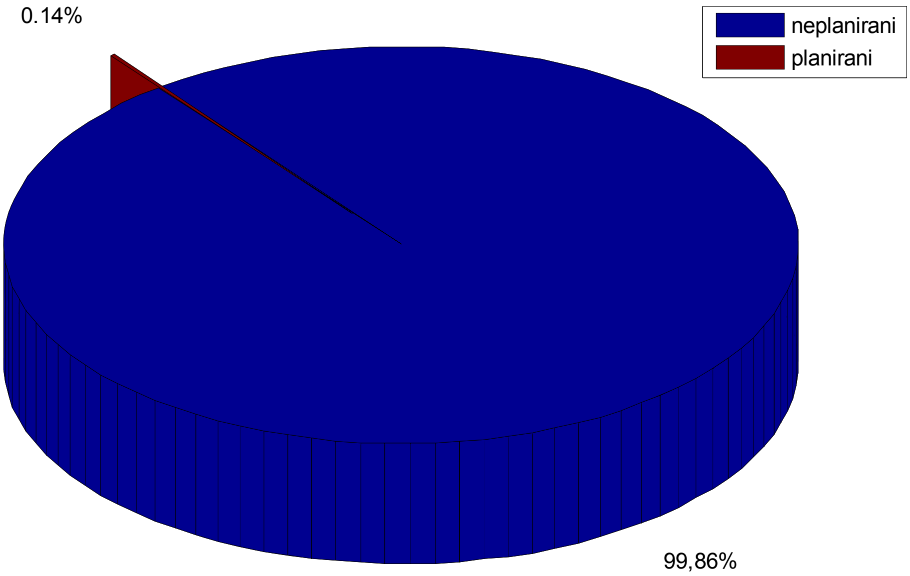
Слика 3.62. Расподела процентуалног учешћа у укупном времену трајања непланираних машинских застоја

Просечна времена трајања непланираних застоја дата су у табели 3.7.

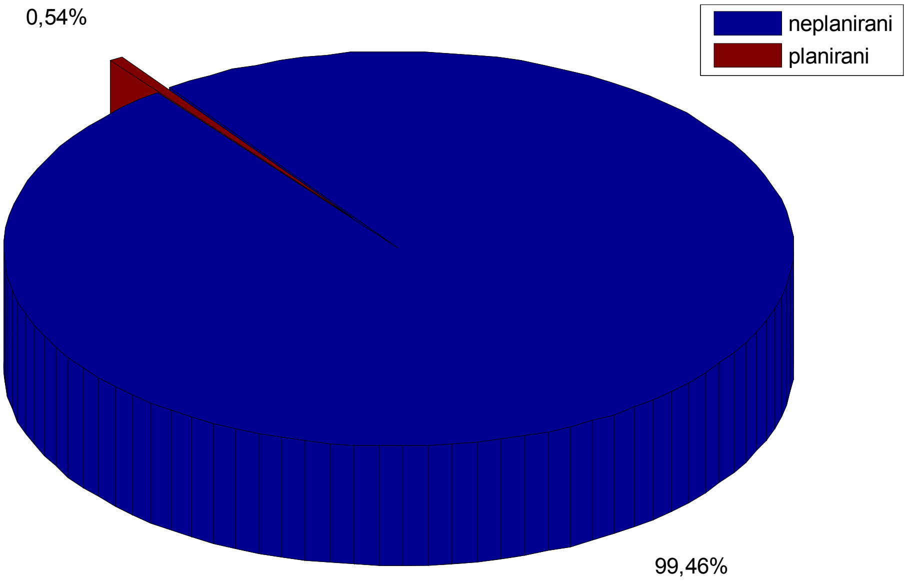
Табела 3.18. Просечна времена трајања појединих врста непланираних застоја

Технолошки	Електро	Машински	Трећа лица	Организациони	Метеоролошки услови	Ванредни услови
(min)						
8,0	48,9	74,4	16,6	16,5	20,0	15

Процентуална учешћа свих планираних и непланираних застоја у укупном броју и времену трајања застоја приказана су на сликама 3.63 и 3.64.



Слика 3.63. Процентуално учешће непланираних и планираних застоја у укупном броју застоја



Слика 3.64. Процентуално учешће непланираних и планираних застоја у укупном времену трајања застоја

Укупно расположиво време рада система у разматраном периоду (фебруар-август 2017. године) било је TH_S=305220 min, док је укупно време трајања застоја система износило DT_S=136655 min. У истом периоду, укупно време трајања застоја роторног багера било је DT_B=44545 min. Дакле, удео застоја роторног багера у укупном времену застоја система износио је

$$\frac{DT_B}{DT_S}\times 100=\frac{44545}{136655}\times 100=32,6\%. \quad ...(3.12)$$

Време које је роторни багер провео у приправности (тзв. „standby“ режим) одређује се на основу израза

$$SH_B=DT_S-DT_B=136555-44545=92110 \text{ min}. \quad ...(3.13)$$

Применом израза (3.1) и (3.3) израчуната је расположивост

$$AV_m=\frac{TH_S-DT_B}{TH_S}\times 100=\frac{305220-44545}{305220}\times 100=85,4(\%), \quad ...(3.14)$$

као и временски степен искоришћења роторног багера

$$U=\frac{TH_S-DT_B-SH_B}{TH_S-DT_B}\times 100=\frac{305220-44545-92110}{305220-44545}\times 100=64,7\ (\%). \quad ...(3.15)$$

3.4 КРАТКИ ЗАКЉУЧЦИ

3.4.1 Показатељи поузданости и ефективности I БТО система ПК „Тамнава Западно поље“

На основу резултата истраживања презентираних у одељку 3.3.1 закључује се следеће:

- Месечни временски степен искоришћења система у периоду фебруар-септембар 2017. већи је од 50%, осим у августу и септембру, слика 3.47.
- Највећа вредност (61,0%) временског степена искоришћења система јавља се у априлу, слика 3.47.
- Најмања вредност (13,6%) временског степена искоришћења система јавља се у септембру, слика 3.47, што је последица чињенице да је у поменутом месецу обављено инвестиционо одржавање (време трајања инвестиционог одржавања *IOT*=33120 min).
- Просечан временски степен искоришћења I БТО система за период фебруар-септембар 2017. године износи 50,1%.
- Највеће процентуално учешће у укупном времену застоја система (период фебруар-септембар), табела 3.3, слика 3.29, имају машински застоји: 39,2%.

- Потом следе организациони (31,5%) и технолошки застоји (25,0%). Учешће електро застоја износи 2,7%, застоја изазваних метеоролошким условима 1,1%, док је учешће застоја изазваних трећим лицима и ванредним условима ниже од 1%.
- У периоду фебруар-септембар време трајања непланираних застоја чини 61,3% укупног времена трајања застоја. Остатак (38,7%) чине планирани застоји.
- Највећи удео у укупном времену трајања свих застоја за период фебруар-септембар, табела 3.6, слика 3.32, имају непланирани машински застоји (39,0%). Потом следе планирани организациони застоји (30,8%) и непланирани технолошки застоји (17,2%). Планирани технолошки застоји учествују са 7,8% у укупном времену трајања застоја, док су појединачна учешћа свих осталих врста застоја испод 3%.
- Доминантан удео у укупном времену трајања непланираних застоја, табела 3.4, слика 3.30, имају машински застоји (64,0%). Значајан је и удео технолошких застоја (28,1%). Учешће електро застоја износи 4,4%, док је збирно учешће осталих застоја (организациони, трећа лица, метеоролошки услови) мање од 4%.
- Готово 4/5 укупног времена трајања (79,6%) планираних застоја отпада на организационе застоје, табела 3.5, слика 3.31. Технолошки застоји учествују са 20,0%, а машински са 0,4%. У разматраном периоду није било планираних електро застоја, као ни застоја изазваних трећим лицима.
- Процентуално учешће технолошких застоја у укупном броју непланираних застоја током целокупног периода праћења рада веће је од 60%, табела 3.12, слика 3.44. Највеће процентуално учешће технолошких застоја у укупном броју непланираних застоја износи 76,8% (август) а најмање 60,8% (мај).
- Процентуално учешће машинских застоја у укупном броју непланираних застоја варира у границама од 12,9% (септембар) до 32,0% (јун) табела 3.12, слика 3.44.
- Највеће процентуално учешће електро застоја у укупном броју непланираних застоја (9,7%) јавља се у септембру, табела 3.12, слика 3.43, а најмање у мају (1,6%).

- Појединачна процентуална учешћа организационих застоја, као и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким и ванредним условима, табела 3.12, слика 3.43, у укупном броју непланираних застоја не прелазе 4% на месечном нивоу, током целокупног референтног периода.
- Процентуално учешће машинских застоја у укупном времену трајања непланираних застоја веће је од 50%, осим у септембру (25,1%), при чему се највеће процентуално учешће јавља у јуну и износи 77,4%, табела 3.13, слика 3.45.
- Процентуално учешће технолошких застоја у укупном времену трајања непланираних застоја варира у границама од 16,5% (јун) до 52,7% (септембар) табела 3.13, слика 3.45.
- Највеће процентуално учешће електро застоја у укупном времену трајања непланираних застоја јавља се у септембру и износи 17,8%, табела 3.13, слика 3.45, док је у свим осталим месецима мање од 7%.
- Појединачна процентуална учешћа организационих застоја, као и застоја изазваних трећим лицима, метеоролошким и ванредним условима, табела 3.13, слика 3.46, у укупном времену трајања непланираних застоја не прелазе 4% на месечном нивоу, током целокупног референтног периода.
- Расподела процентуалног учешћа месечног броја непланираних машинских застоја варира у границама од 1,9% до 18,7%, слика 3.33. У односу на просечну вредност (100/8=12,5%) максимално одступање износи 49,6% (мај) а минимално –84,8% (септембар). Када је реч о расподели процентуалног учешћа месечног времена трајања непланираних машинских застоја, оно варира у границама од 1,4% до 17,9%, слика 3.34. У односу на просечну вредност (12,5%) највеће одступање јавља се у мају и износи 43,2%, док најмање одступање износи –88,8% (септембар).
- Расподела процентуалног учешћа месечног броја непланираних технолошких застоја варира у границама од 3,9% до 17,4%, слика 3.35. У односу на просечну вредност (100/8=12,5%) максимално одступање износи 39,2% (август) а минимално –68,8% (септембар). Када је реч о расподели процентуалног учешћа месечног времена трајања непланираних машинских застоја, оно варира у границама од 6,4% до 22,3%, слика 3.36. У односу на просечну

вредност (12,5%) највеће одступање јавља се у августу и износи 78,4%, док најмање одступање износи –48,8% (септембар).

- Расподела процентуалног учешћа месечног броја непланираних електро застоја варира у границама од 7,4% до 23,1%, слика 3.37. У односу на просечну вредност (100/8=12,5%) максимално одступање износи 84,8% (август) а минимално –40,8% (јул). Када је реч о расподели процентуалног учешћа месечног времена трајања непланираних електро застоја, оно варира у границама од 5,6% до 25,5%, слика 3.38. У односу на просечну вредност (12,5%) највеће одступање јавља се у августу и износи 104,0%, док најмање одступање износи –55,2% (мај).
- Динамика расподеле броја и времена трајања непланираних застоја, слике 3.39-3.42, је изразито стохастичког карактера.
- С обзиром на чињеницу да је због обављања инвестиционог одржавања, током септембра временски степен искоришћења система износио свега 13,6%, слика 3.47, што даје нереалну слику о ефективности рада система и представља вредност која је далеко испод вредности доње контролне границе (28,4%) добијене применом правила „3σ“, подаци за месец септембар искључују се из анализе, са циљем да се добију репрезентативне вредности показатеља ефективности система. У том случају, просечан временски степен искоришћења система за период фебруар-август износи 55,3%, слика 3.48.

3.4.2 Показатељи поузданости и ефективности роторног багера SRs 2000x32/5+VR

На основу резултата истраживања презентираних у одељку 3.3.2 закључује се следеће:

- Расположивост роторног багера у референтном периоду износила је 85,4%.
- Временски степен искоришћења роторног багера у референтном периоду био је 64,7%.
- Технолошки застоји, табела 3.13, слике 3.49, 3.51 и 3.52, имају највећу учестаност (укупно 2411 застоја, односно 86,2% од укупног броја застоја). Потом, по учестаности, следе машински (укупно 306 застоја, односно 10,9% од укупног броја застоја) и електро застоји (укупно 33 застоја, односно 1,2% од укупног броја застоја). Учестаности осталих застоја (трећа лица, организациони, метеоролошки услови, ванредни услови) су врло ниске, испод 1% од укупног броја застоја.

- Најдуже укупно време трајања јавља се код машинских застоја (22760 min, односно 51,1% од укупног времена трајања застоја), табела 3.14, слике 3.50, 3.53 и 3.54. Потом, по укупном времену трајања, следе технолошки (укупно 19320 min, односно 43,4% од укупног времена трајања застоја) и електро застоји (укупно 1615 min, односно 3,6% од укупног времена трајања застоја). Процентуална учешћа осталих врста застоја (трећа лица, организациони, метеоролошки услови, ванредни услови) у укупном времену трајања застоја су врло ниска, испод 1% од укупног времена трајања застоја.
- Најдуже просечно време трајања имају машински (74,4 min) а најкраће технолошки застоји (8,0 min), табела 3.15.
- У референтном периоду анализе рада роторног багера није било планираних машинских и електро застоја, као ни планираних застоја изазваних трећим лицима, табела 3.16. Осим тога, био је један планирани технолошки застој, као и три организациона застоја. Учешће планираних застоја у укупном броју застоја износи 0,14%, слика 3.63, што је занемарљиво мала величина.
- Учешће планираних застоја у укупном времену трајања застоја износи 0,54%, слика 3.64, што је, такође, занемарљиво мала величина.
- С обзиром на чињеницу да у референтном периоду није било планираних машинских и електро застоја, као и планираних застоја изазваних трећим лицима, просечна времена трајања непланираних поменутих врста застоја, иста су као и просечна времена трајања одговарајућих укупних застоја, табеле 3.15 и 3.18. Осим тога, због релативно кратког времена трајања планираног технолошког застоја (150 min) у односу на време трајања непланираних технолошких застоја (19170 min) просечно време трајања непланираних технолошких отказа једнако је просечном времену трајања технолошкиих отказа, са тачношћу до мале величине првог реда, табеле 3.15 и 3.18. Просечно време трајања непланираних организационих застоја (16,5 min) нешто је краће је од просечног времена трајања свих организационих застоја (18,5 min), табеле 3.15 и 3.18.
- Доминантан удео, и по броју и по времену тајања, имају непланирани технолошки и машински застоји.

- Учешћа непланираних технолошких и машинских застоја у укупном броју застоја износе 86,1% и 10,1%, респективно, слика 3.55.
- Учешћа непланираних технолошких и машинских застоја у укупном времену трајања застоја износе 43,0% и 51,1%, слика 3.56.
- Расподела процентуалног учешћа месечног броја непланираних технолошких застоја варира у границама од 10,5% до 18,3%, слика 3.59. У односу на просечну вредност (100/7=14,3%) максимално одступање износи 28,0% (март) а минимално –26,6% (јун). Када је реч о расподели процентуалног учешћа месечног времена трајања непланираних технолошких застоја, границе варијације су шире: од 8,9% до 29,2%, слика 3.60. У односу на просечну вредност (14,3%) највеће одступање јавља се у августу и износи 104,2%, док најмање одступање износи –37,8% (јул).
- Расподела процентуалног учешћа месечног броја непланираних машинских застоја варира у границама од 8,8% до 24,2%, слика 3.61. У односу на просечну вредност (14,3%) максимално одступање износи 69,2% (април) а минимално –38,3% (јун). Када је реч о расподели процентуалног учешћа месечног времена трајања непланираних машинских застоја, границе варијације су шире: од 5,5% до 28,0%, слика 3.62. У односу на просечну вредност (14,3%) највеће одступање јавља се у мају и износи 95,8%, док најмање одступање износи –61,5% (јул).
- Учешће непланираних електро застоја у укупном броју и времену трајања застоја је релативно ниско и износи 1,2% и 3,6%, респективно, слике 3.55 и 3.56.
- Учешћа свих осталих непланираних застоја (трећа лица, организациони, метеоролошки и ванредни услови) замемарљиво су мала, испод 1%, слике 3.55 и 3.56.

6 АНАЛИЗА ВРСТА, ПОСЛЕДИЦА И КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗА У ТОКУ ОДРЖАВАЊА БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА

6.1 ШТА ЈЕ FMECA? (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)

Метод **FMECA** (**F**ailure **M**odes, **E**ffects and **C**riticality **A**nalysis) односно метод анализе врста (начина) отказа, њихових последица и критичности, користи се за идентификацију и анализу:

- свих потенцијалних начина (врста) отказа различитих делова система;
- последица које разматрани откази генеришу у анализираном систему;
- начина елиминације отказа и/или ублажавања њихових ефеката.

Према [160] FMECA је техника за идентификацију, утврђивање приоритета (ранга) и елиминацију потенцијалних отказа система, пројекта или процеса, пре него што они стигну до корисника. Другим речима, FMECA је техника уочавања и решавања потенцијалних проблема у функционисању система пре него што се они појаве [161].

У почетној фази развоја методе FMECA је била названа FMEA (**F**ailure **M**odes and **E**ffects **A**nalysis). Слово „C“ у акрониму указује да се разматрају критичности (озбиљности) различитих ефеката отказа и врши њихово рангирање. Данас се често користи термн FMEA као синоним за FMECA, зато што њихова граница није оштра. У суштини, акроним FMECA може да се разложи у два акронима:

- FMEA (**F**ailure **M**odes and **E**ffects **A**nalysis) – анализа врсте и ефеката отказа;
- CA (**C**riticality **A**nalysis) - анализа критичности;

која дефинишу квалитативни (FMEA) и квантитативни (CA) сегмент FMECA методе.

FMECA је једна од првих систематичних техника за анализу отказа. Развијена је од стране Армије Сједињених Америчких Држава. Прве смернице (директиве) за спровођење FMECA изложене су 1949. године у „Military Procedure MIL-P-1629“.

FMECA је техника која се најчешће примењује за анализу поузданости у иницијалној фази развоја производа и система. Користи се још у фази концептуалног развоја са циљем да се утврди да су разматрани сви потенцијални начини отказа система, односно његових компоненти, као и да су обезбеђене одговарајуће мере за елиминацију поменутих отказа.

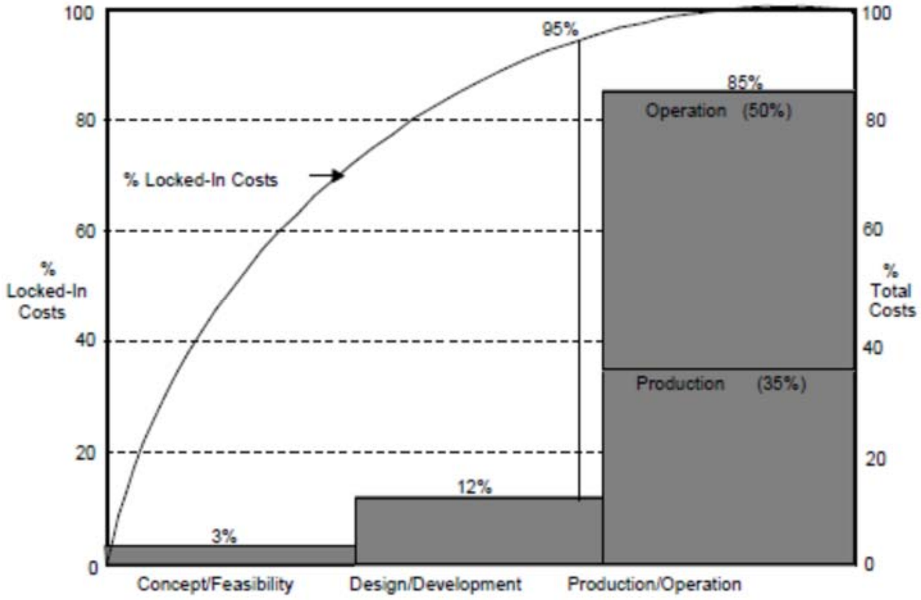
Поље примене FMECA технике врло је широко. Поред осталог, користи се за:

- избор алтернативних решења која се одликују високом поузданошћу и високим потенцијалном сигурности, у раној фази пројектовања;
- утврђивање да су разматрани сви могући начини отказа, као ефекти њихових последица на рад система;
- сагледавање свих потенцијалних отказа и идентификацију озбиљности њихових последица;
- развој основних критеријума за планирање тестирања, као и захтева за испитну опрему;
- формирање базе података - историје претходних отказа као драгоценог извора за анализу отказа на терену и разматрање и конципирање измена у дизајну;
- формирање основе неопходне за планирање одржавања;
- формирање основе за квантитативну анализу поузданости и расположивости.

Основна питања којима се бави метода FMECA су:

- Који су могући начини отказа сваког елемента разматраног система?
- Који механизми могу произвести разматране начине отказа?
- Које су могуће последице уколико се десе разматрани откази?
- Да ли разматрани отказ у компромитује сигурност система?
- Како је отказ откривен?
- Које су мере компензације отказа предвиђене пројектом (упутством)?

Трошкови ране фазе животног циклуса обично имају најмањи удео у укупним трошковима животног циклуса производа/система, слика 6.1. Међутим, управо у раној фази животног циклуса могуће је остварити највећи утицај на поузданост производа, или система који се развија. Управо зато, метода FMECA мора се увести већ у тој фази животног циклуса. Напредовањем фазе пројектовања/развоја, детаљи дизајна све више постају одређени. Због тога расту трошкови (изражени у новцу и времену) решавања проблема везаних за поузданост. На крају фазе развоја и пројектовања утроши се свега ≈15% укупних трошкова животног циклуса, али је одређено ≈95% укупних трошкова животног циклуса (тзв. „locked-in costs“), слика 6.1. Другим речима, након завршетка фазе развоја и пројектовања све измене које се чине са циљем да се унапреди поузданост имају мали утицај на укупне трошкове животног циклуса, али могу бити врло скупе са аспекта трошкова промене дизајна, предвиђене опреме, сервисних позива и гарантних захтева, као и добре воље корисника. То, међутим, не значи да опрему која се већ налази у фази производње или употребе треба игнорисати са аспекта унапређења поузданости. Оно се мора спроводити током целог животног циклуса. Иако унапређења поузданости у раној фази животног циклуса могу повећати иницијалне трошкове испоручиоца машине/опреме, она генерално резултирају мањим трошковима испоручиоца за техничку подршку кориснику, као и мањим експлоатационим трошковима, односно трошковима које доминантно сноси корисник.



Слика 6.1. Структура трошкова током животног циклуса [161]

Приликом примене FMECA методе може се користити функционални или структурни приказ. Код функционалног приказа, разматрани производ (машина, опрема, склоп, део, процес) хијерархијски се рашчлањује у функције које се извршавају, при чему се даје одговарајући опис функција, односно, функционалности. Код структурног модела, хијерархијском структурном саставницом дефинише се функционалност разматраног система. Три основне фазе спровођења FMECA методе приказане су у табели 6.1.

Табела 6.1. Основне фазе FMECA методе

Фаза	Питање	Одговор
Идентификација	Шта се погрешно може догодити?	Опис отказа Узроци → Врсте отказа → Ефекти
Анализа	Колика је вероватноћа отказа? Каква је тежина последица?	Стопа (интензитет) отказа Ранг ризика
Дејство	Шта се може урадити? Како елиминисати узроке? Како редуковати тежину последица?	Пројектантска решења План испитивања Контрола

Основне предности FMECA методе су:

- метода је чврсто структурисана и поуздана за анализу и оцену;
- могућа је анализа и оцена врло комплексних система;
- релативно лака примена.

Основни недостаци FMECA процеса су:

- може бити дуготрајан, скуп и монотон;
- није подесан за вишеструке отказе;
- постоји могућност превида утицаја отказа људског фактора (персонала).

На основу критичке анализе и систематизације стечених знања и искуства формирано је више стандардних процедура за спровођење FMEA/FMECA процеса, од којих су најважније:

- MIL-STD 1629 “Procedures for performing a failure mode and effect analysis”;
- IEC 60812 “Procedures for failure mode and effect analysis (FMEA)”;
- BS 5760-5 “Guide to failure modes, effects and criticality analysis (FMEA and FMECA)”;
- SAE ARP 5580 “Recommended failure modes and effects analysis (FMEA) practices for non-automobile applications”;
- SAE J1739 “Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)”;
- SEMATECH (1992) “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry”.

6.2 ЗАШТО (СЕ СПРОВОДИ) FMECA?

Захтеви за сталним унапређењем квалитета, поузданости и сигурности производа последица су [162]:

- повлачења читавих серија производа реномираних светских произвођача;
- захтева државних институција и правно-техничке регулативе;
- настојања произвођача/испоручиоца машина и опреме да побољшају свој положај на тржишту и пруже одговарајућу сатисфакцију купцу.

Наведени разлози представљају основни мотив произвођачима да, на основу резултата анализе ризика, идентификују и на најмању могућу меру сведу отказе (и њихове последице) машина и опреме током њиховог животног циклуса.

Полазећи од добро познате чињенице да чврстоћу сваког ланца одређује најслабија карика, развијена је метода FMEA за проучавање проблема који могу настати због једног отказа у техничком систему. Увођењем анализе критичности, она се трансформише у FMECA методу, чијом применом се остварују следећи бенефити:

- идентификација делова система који захтевају интензивније истраживање да би се смањила опасност, односно, повећала вероватноћа сигурног рада и смањио степен ризика;
- идентификација делова система који захтевају посебну пажњу током израде, односно, строжу контролу и специјални начин транспортовања;
- дефинисање посебних захтева набавке, везаних за спецификације које се односе на дизајн, перформансе, поузданост и обезбеђење квалитета;
- дефинисање посебних услова прихватања производа подиспоручиоца, укључујући и дефинисање параметара који подлежу испитивању;
- дефинисање посебних процедура, заштитних мера, заштитне опреме, уређаја за мониторинг и упозоравање;
- дефинисање економски оптималних ресурса за превенцију акцидентних ситуација.

Приликом анализе критичности, евалуација се мора извршити претпостављајући најгоре могуће услове одвијања отказа, односно развоја његових последица. У зависности од доступности података о степену (интензитету) отказа, анализа критичности отказа може бити квалитативна или квантитативна. Квалитативни приступ је подесан када подаци о степену разматраног отказа нису доступни. Код квалитативног приступа, начини отказа процењују се у зависности од вероватноће појаве разматраног отказа. Квалитативни приступ примењује се у раним фазама развоја пројекта, док се квантитативни приступ користи у каснијим фазама развоја пројекта, када се раполаже већом базом расположивим података.

FMEA/FMECA метода иницијално се користила за анализу отказа физичких компоненти система, међутим она се данас успешно проширује увођењем утицаја отказа људског фактора и софтвера. Примена поменутих метода у различитим фазама животног циклуса машина/опреме омогућава да се сагледају и истраже сви потенцијални начини отказа производа. Резултати FMEA/FMECA анализа утичу на дизајн, развој процеса, квалитет набавке, испоручиоца, оперативности, као и теренског сервиса. Важно је уочити да се квалитет производа/процеса може ефикасно остварити спровођењем корективних мера за отклањање или редуковање начина отказа идентификованих применом FMECA методе.

Примену FMECA методе требало би започети у раним фазама пројектовања производа/процеса и наставити током даљег развоја производа или система. Прелиминарна FMECA анализа може се извршити коришћењем ограниченог скупа информација којим се располаже у концептуалној фази пројекта. Напретком пројекта ствара се јаснија слика производа што омогућава много детаљнију анализу. Завршетком пројекта и потпуним дефинисањем производа/процеса стварају се услови за свеобухватну оцену свих потенцијалних начина отказа и њиховим последица. FMECA анализа мора бити континуални процес да би се узеле у обзир и све промене настале током коришћења машине/опреме.

Коначно, применом FMECA методе остварују се добри резултати у пракси, при чему метода не захтева примену сложених поступака прорачуна, што доносиоцима одлука у пословно-производним системима знатно олакшава процес управљања ризицима.

6.3 МЕТОДА FMECA И ЖИВОТНИ ЦИКЛУС ТЕХНИЧКОГ СИСТЕМА

На поузданост (сигурност, издржљивост и робустност) сваке компоненте, подсистема и система у целини, утичу следећи фактори [162]:

- дизајн процеса и производа;
- верификација дизајна производа;
- квалитет компоненти и услога испоручених од стране коопераната;
- валидација производних процеса;
- количина промена процеса;
- јасноћа упутстава везаних за опрему и уређаје.

Примена FMEA/FMECA методе у различитим фазама животног циклуса машине/система омогућава идентификацију не само дефеката насталих током процеса пројектовања и производње, већ и оних карактеристика производа или процеса које захтевају посебан режим контроле, мониторинга и испитивања. Информације о томе, укључујући и методе мониторинга и испитивања представљају основу за формирање плана контроле. Поменути документ представља писани сажетак активности које обезбеђују неопходан ниво квалитета процеса, производа или услуге. План контроле специфицира све карактеристике дизајна и процеса за које се сматра да су битне да би се задовољили захтеви купца и које захтевају специфичне активности обезбеђења квалитета. Поменутим планом описују се све неопходне акције и реакције са циљем да се процес одржи у стању статистичке контроле, сагласно договору потврђеном од стране пројектанта, испоручиоца и купца машине/опреме. Осим тога, план контроле омогућава верификацију и валидацију производа и процеса и помаже да се смање варијације у самом процесу.

Сагласно фази животног циклуса у којој се примењују, разликују се [162], табела 6.2:

- D-FMEA/FMECA (**D**esign FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA пројектовања;
- P-FMEA/FMECA (**P**rocess FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA процеса;
- A-FMEA/FMECA (**A**pplication FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA (начина и услова) примене;
- S-FMEA/FMECA (**S**ervice FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA током фазе експлоатације и одржавања (када се у значајној мери промене услови рада или карактеристике подсистема/компонентни, или на сваких десет година [163]).

Табела 6.2. Основне карактеристике различитих типова **FMEA/FMECA**

Тип FMEA/FMECA	D-FMEA/FMECA	P-FMEA/FMECA	S-A-FMEA/FMECA	C-A-FMEA/FMECA	S-FMEA/FMECA
Предмет	Дизајн производа	Процес (израда и монтажа)	Производ и начин примене	Производ и примена од стране корисника	Производ
Фокус	Идентификација могућих проблема током производње и употребе, изазваних слабостима дизајна	Анализа потенцијалних отказа током прозводње и експлоатације, изазваних неусаглашеношћу са спецификацијама и/или пројектованом наменом	Анализа отказа који се односе на делове и компоненте добављене од стране коопераната	Анализа отказа који утичу на реализацију процеса од стране корисника	Минимизаціа отказа током експлоатације
Врсте отказа	На производу, односно, компонентама, подсистемима и подсклоповима	У изради (машине, опрема, алат и прибор, кораци процеса производње)	На производу	На производу	На производу током и у процесу експлоатације и одржавања
Узроци	Инжењеринг (лоше толеранције, грешке у прорачуну напонских стања, погрешне претпоставке)	Производња (недостајући делови, грешке подешавања, грешке у уградњи опреме, откази делова)	Нејасно и непотпуно упутство за коришћење (испоручилац)	Лоша интерпретација упутства (корисник)	Људска грешка, слабости процеса и контроле, неодговарајући избор делова и компоненти
Последице	Локалне (на разматрани део) по крајњег корисника, или на нивоу између поменута два	Утицај на процес (локално или глобално) и крајњи корисник	Утицај на значајне карактеристике производа (локални ефекти) или крајњег корисника (крајњи ефекти)	Утицај на значајне карактеристике производа (локални ефекти) или крајњег корисника (крајњи ефекти)	Утицај на експлоатационе параметре и крајњег корисника

FMEA/FMECA пројектовања

Примарни фокус D-FMEA/FMECA је на производу. При томе се разматрају компоненте/делови, коришћене сировине и карактеристике производа. D-FMEA/FMECA је од изузетног значаја за животни циклус производа зато што се ≈76% свих инжењерских измена током животног века односи на корекције лошег дизајна, док се остатак односи на друга унапређења. Управо због тога, од круцијалног је значаја идентификација свих потенцијалних отказа већ током фазе пројектовања.

FMEA/FMECA процеса

P-FMEA/FMECA фокусирана је на процес израде, укључујући све кораке процса, опрему која се користи, услове одвијања процеса, алате и прибор, грешке људског фактора, као квалитет коришћених материјала. Применом P-FMEA/FMECA идентификују се сви потенцијални начини отказа и одређују мере за праћење процеса, као и његову корекцију, пре почетка реализације првог, или неког наредног циклуса процеса производње.

FMEA/FMECA (начина и услова) примене

A-FMEA/FMECA фокусирана је на начин и услове примене примене пројектоване машине/опреме. Разликују се две врсте ове методе:

- A-FMEA/FMECA коју спроводи пројектант/испоручилац: S-A-FMEA/FMECA (Supplier-side A-FMEA/FMECA);
- A-FMEA/FMECA коју спроводи корисник: C-A-FMEA/FMECA (Customer-side A-FMEA/FMECA).

S-A-FMEA/FMECA изводи се са циљем да се открију потенцијални откази машине/опреме који се тичу начина и услова примене, дизајна и процеса производње делова и материјала добављених од стране коопераната. C-A-FMEA/FMECA истражује ефекте начина и услова примене производа на сам производ и корисника. Примењује се да би се елиминисале евентуалне неусаглашености и примедбе купца/корисника.

FMEA/FMECA експлоатације и одржавања

S-FMEA/FMECA фокусирана је на сервис, експлоатацију и одржавање. Спроводи се са циљем да се одреде, докажу и унапреде (максимизирају) решења која се односе на квалитет, поузданост, погодност за одржавање, трошкове и продуктивност, сагласно пројектованим каракеристикама и спецификацијама корисника. Ови циљеви остварују се, поред осталог, и активним учешћем особља одељења за развој производа, обезбеђење квалитета, маркетинг, експлоатацију и одржавање. Применом S-FMEA/FMECA остварује се минимизација ефеката отказа током експлоатације, што доприноси задовољству купца.

6.4 ПОСТУПАК FMECA

Једноставност примене једна је од основних одлика FMECA поступка. Он не захтева познавање сложених аналитичких процедура, међутим, захтева добро познавање и разумевање намене разматраног система, његове функционалности, као и ограничења под којим поменути систем остварује своју функцију. Основни кораци FMECA поступка приказани су на слици 6.2.

Слика 6.2. Основна структура FMECA поступка [163]

У стандардима и научно-стручној литератури дају се категоризације и табеле на основу којих се одређују величине неопходне за одређивање степена критичности. У [164] наведена је класификација и категоризација вероватноће појављивања (likelihood of **O**ccurence - ***O***), тежине последица (**S**everity - ***S***) и вероватноће откривања отказа (**D**etectability - ***D***) приказана у табелама 6.3-6.5.

Табела 6.3. Категорије вероватноће појаве отказа (*O*)

Опис вероватноће	Вероватноћа појављивања	Ранг
Врло ниска вероватноћа појаве отказа (готово извесно никада се неће појавити)	0	1
Ниска вероватноћа (вероватно ће се појавити једном, али не чешће)	1:20000	2
	1:10000	3
Умерена вероватноћа (вероватно ће се појавити више него једном)	1:2000	4
	1:1000	5
	1:200	6
Висока вероватноћа (готово сигурно ће се појавити више него једном)	1:100	7
	1:20	8
Врло висока вероватноћа (готово сигурно вишеструко појављивање)	1:10	9
	1:2	10

Табела 6.4. Категорије тежине последица отказа (*S*)

Тежина последица	Опис последица	Ранг
Минорна	Отказ који не утиче на перформансе система (руковалац га вероватно неће ни уочити)	1
Ниска	Отказ који може да изазове благу узнемиреност руковаоца, али не доводи до погоршања перформанси система	2
		3
Умерена	Отказ који може да изазове висок степен незадовољства руковаоца (звучна сигнализација, јак отпор командних ручица) уз благо погоршање перформанси система	4
		5
		6
Висока	Отказ који изазива значајно погоршање перформанси система, али не утиче на његову сигурност и безбедност	7
		8
Врло висока	Отказ који озбиљно утиче на способност система да изврши задатак, или који може да доведе до његовог оштећења, тешких повреда или смрти	9
		10

Табела 6.5. Категорије вероватноће откривања отказа (*D*)

Опис	Вероватноћа откривања (%)	Ранг
Врло ниска вероватноћа недетековања отказа (отказ који би готово сигурно био откривен током прегледа и испитивања)	86-100	1
Ниска вероватноћа да ће дефект остати неоткривен	76-85	2
	66-75	3
Умерена вероватноћа да ће дефект остати неоткривен	56-65	4
	46-55	5
	36-45	6
Висока вероватноћа да ће дефект остати неоткривен	26-35	7
	16-25	8
Врло висока вероватноћа да ће дефект остати неоткривен све док перформансе система не буду угрожене у мери која не омогућава извршавање функције система	6-15	9
	0-5	10

Применом FMECA поступка идентификују се врсте отказа компоненти разматраног система и рангирају према степену критичности (**R**isk **P**riority **N**umber - **RPN**),

$$RPN = O \times S \times D. \qquad ...(6.1)$$

Подаци презентирани у табелама 6.3-6.5 представљају смернице за оцену ранга параметара на основу којих се одређује степен критичности. Они се могу модификовати сагласно искуству произвођача/корисника система. Међутим, мора се имати на уму да повећање броја категорија може да појача утицај субјективности.

Сагласно форми израза (6.1) као и чињеници да су вредности параметара *O*, *S* и *D* рангиране у целобројном интервалу од 1 до 10, закључује са да минимална и максимална вредност степена критичности износе 1 и 100, респективно. Високе вредности степена критичности морају бити елиминисане коришћењем бољих компоненти, или увођењем бољег система детекције дефеката. Осим тога, вероватноћа појављивања отказа може се смањити увођењем редундансе у систем.

Значајна предност FMECA поступка јесте и чињеница да се, као итеративни процес, може применити у раним фазама животног циклуса (концептуални дизајн, детаљни инжењеринг) када се још увек не располаже подацима о испитивањима. Осим тога, предност FMECA методе лежи и у чињеници да она подразумева компаративну анализу, дакле упоређивање степена критичности за различите варијанте, чиме се избегава расправа о искључиво конкретним нумеричким вредностима степена критичности.

6.5 ОСНОВНЕ КОНЦЕПЦИЈЕ МЕТОДЕ FMECA

С обзиром на чињеницу да FMECA метода представља хибридну методу, насталу суперпонирањем метода FMEA (Анализа врсте и ефеката отказа) и CA (Анализа критичности отказа) њене концепције проистичу из концепција метода од којих је формирана.

FMEA технике

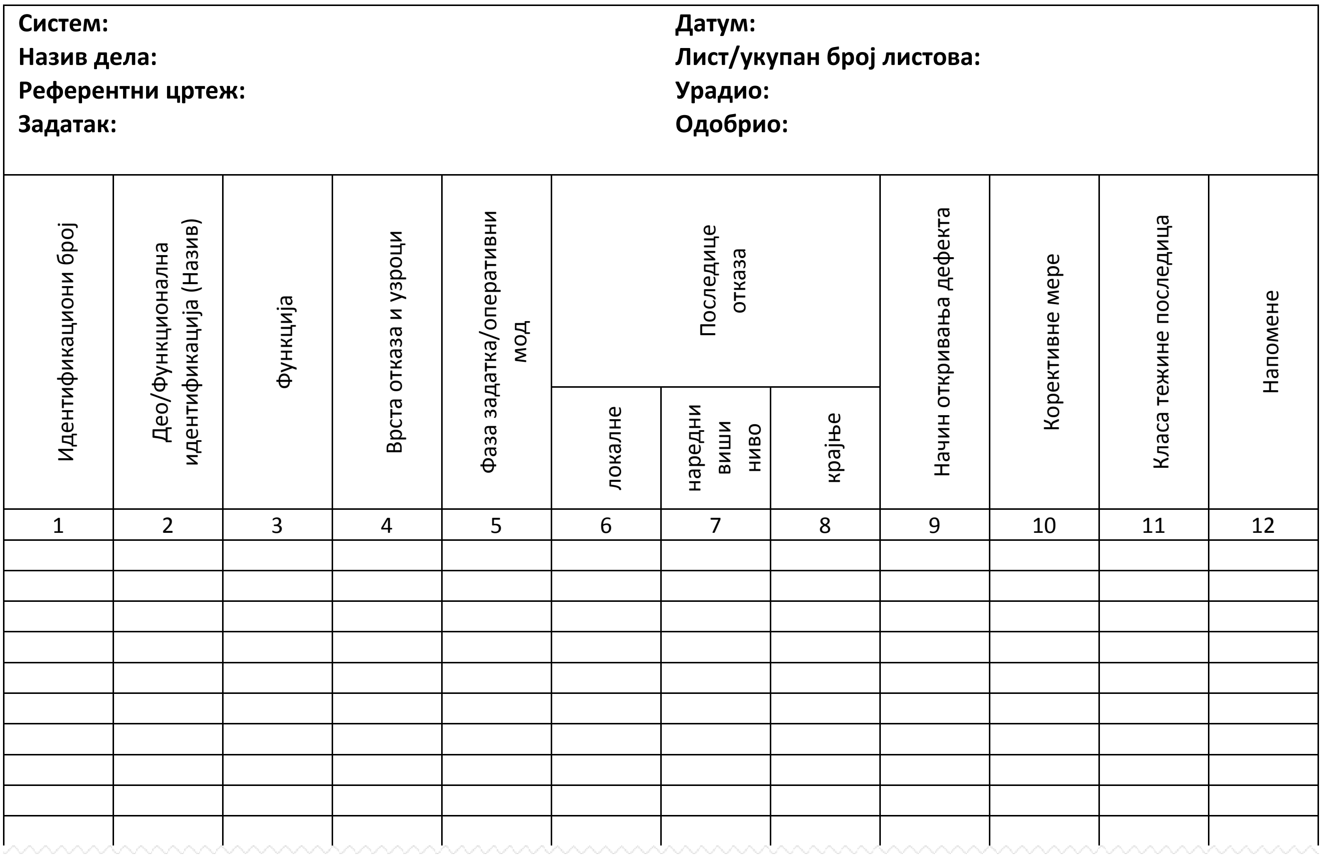
FMEA поступак може да се имплементира применом хардверског или функционалног приступа. Често се, међутим, примењује комбиновани приступ, што зависи од комплексности разматраног система. У суштини, начин приступа одређен је степеном развоја пројекта, скупом расположивих података и сложеношћу објекта истраживања. Свака анализа може бити започета са било ког нивоа декомпозиције система и креће се навише, ка вишим хијерархијским нивоима.

Хардверски приступ (**H**ardware **A**pproach - **HA**)

Хардверски приступ заснива се на попису појединих хардверских јединица (делови, подсклопови, склопов, подсистеми) и анализира врсте њихових могућих отказа. Користи се када се хардверске јединице могу једназначно идентификовати на основу layout-a и других инжењерских података. Хардверски приступ обично је типа одоздо-навише. Анализа почиње на најнижем хијерархијском нивоу и наставља се сукцесивно навише, кроз сваки хијерархијски ниво разматраног система. Хардверски приступ примењује се када је потпуно дефинисана схема система и свих његових делова. Да би се извела хардверска FMEA неопходно је следеће:

- потпуно и детаљно познавање анализираног система;
- блок дијаграми функционалности и поузданости;
- схеме;
- списак делова;
- дефиниције хијерархијских нивоа.

Аналитичар који спроводи методу мора да идентификује сваки део обухваћен анализом и да упише његов идентификациони број у радни лист (формулар) FMEA поступка, слика 6.3. Анализа врсте и ефеката отказа завршава се идентификацијом потенцијалног начина отказа сваког елемента разматраног система.



Систем:	**Датум:**
Назив дела:	**Лист/укупан број листова:**
Референтни цртеж:	**Урадио:**
Задатак:	**Одобрио:**

Идентификациони број	Део/Функционална идентификација (Назив)	Функција	Врста отказа и узроци	Фаза задатка/оперативни мод	Последице отказа			Начин откривања дефекта	Корективне мере	Класа тежине последица	Напомене
					локалне	наредни виши ниво	крајње				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Слика 6.3. Изглед радног листа (формулара) FMEA поступка [165]

Ефекти сваке врсте отказа одређују се пропагирањем разматраног отказа кроз хијерархијске нивое (локални, наредни виши нивои и ниво система). Након тога дефинишу се методе детекције отказа, као и корективне мере. Након анализе утицаја сваког функционалног блока укључујући и ниво система, FMEA поступак даје одговарајући излаз. Информације добијене применом хардверског FMEA поступка морају укључивати и листу опасних ризика који се морају елиминисати или редуковати, листу критичних једноструких отказа, као и листу отказа који не могу да се детектују визуелном контролом, или предвиђеним/уграђеним техникама и средствима испитивања.

Функционални приступ (**F**unctional **A**pproach - **FA**)

Функционални приступ разматра функцију сваког дела анализираног система. Свака функција може се описати и класификовати, сагласно броју придружених врста отказа. Функционални приступ примењује се у оној фази развоја пројекта у којој је дефинисан функционални блок-дијаграм система, док се хардверске јединице још увек не могу једнозначно идентификовати. Дакле, функционални приступ користи се у раним фазама животног циклуса, односно, у раним фазама развоја пројекта и ажурира се са развојем пројекта, односно, применом корективних мера. За извођење функционалне FMEA неопходно је:

- дефинисати систем и прекиде његове функционалности;
- познавати функционални блок-дијаграм система;
- детљно познавање рада система;
- познавати основна правила и претпоставке за функционисање система;
- познавати карактеристике (спецификације) софтвера.

Аналитичар који спроводи функционалну FMEA мора бити способан да дефинише и идентификује било који функцију система, као и придружене врсте отказа за сваку од функција система. Анализа врсте и ефеката отказа завршава се идентификацијом потенцијалног начина отказа сваке функције разматраног система. Вероватноћа врсте отказа и ранг врсте отказа процењују се уколико је неопходна анализа критичности. Вероватноћа врсте отказа је проценат времена (изражен у децималном формату) у коме се функција не извршава због разматране врсте отказа. Ранг врсте отказа изражава се као производ ранга отказа функције (број отказа за милион часова рада) и вероватноће појаве разматране врсте отказа. Након тога, даљи поступак аналоган је поступку хардверске FMEA: пропагација отказа, детекција, корективне мере, списак критичних отказа који се морају отклонити, односно, редуковати, списак отказа који не могу бити детектовани контролом.

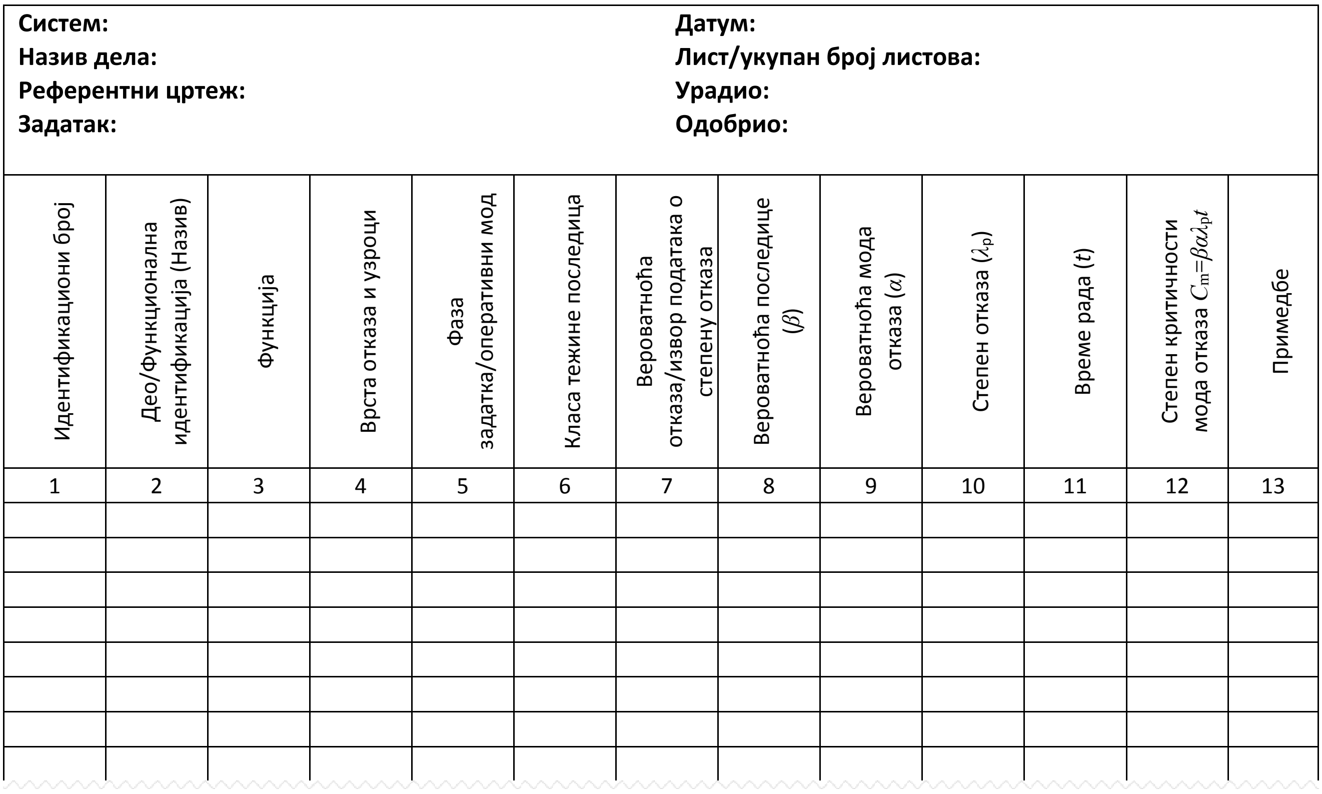
Комбиновани приступ (FMEA Tailoring)

Комплексност система, или специфичности његове примене могу захтевати комбиновану хардверско-функционалну FMEA. Дакле, FMEA с може прилагодити било којој врсти система у било којој фази његовог животног циклуса. Поменуто прилагођавање може обухватити промене врсте анализе, као и методе за њено спровођење.

Анализа критичности (Criticality Analysis - CA)

Анализа критичности, слично као и FMEA, изводи се као део процеса пројектовања. Почиње, дакле, као интегрални део ране фазе пројектовања и ажурира се сагласно еволуцији пројекта. Анализа критичности даје релативну меру значаја последица разматране врсте отказа за функционалност и сигурност система. Завршава се проценом утицаја последица отказа на локалном и вишим хијерархијским нивоима, укључујући и крајње ефекте на нивоу система.

Радни лист (формулар) CA поступка, слика 6.4, мора бити усаглашен са радним листом FMEA поступка на истом хијерарсхијском нивоу. Информације развијене за FMEA поступак (идентификациони бројеви, функције, врсте и узроци отказа, фаза задатка, класификација тежине последица) директно се преносе у радни лист CA поступка.



Систем:
Назив дела:
Референтни цртеж:
Задатак:

Датум:
Лист/укупан број листова:
Урадио:
Одобрио:

Идентификациони број	Део/Функционална идентификација (Назив)	Функција	Врста отказа и узроци	Фаза задатка/оперативни мод	Класа тежине последица	Вероватноћа отказа/извор података о степену отказа	Вероватноћа последице (β)	Вероватноћа мода отказа (α)	Степен отказа (λ_p)	Време рада (t)	Степен критичности мода отказа $C_m = \beta\alpha\lambda_p t$	Примедбе
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Слика 6.4. Изглед радног листа (формулара) за CA [165]

Да би се извршила анализа критичности, мора бити завршен FMEA поступак. Поред информација о задатку система, за извођење квантитативне CA неопходне су и дефиниције отказа, категоризација тежина последица, као и информације о степену отказа делова/подсистема. Величине α и β репрезентују степен отказа и вероватноћу последица отказа, респективно, и такође се уносе у радни лист (формулар) CA поступка. Величина α представља вероватноћу да посматрани део система откаже у одређеном моду и изражава се као децимални разломак. Величина β представља условну вероватноћу да ће последица отказа бити одређене класе, уколико се реализује дати мод отказа.

CA поступак може бити квалитативног или квантитативног карактера, што зависи од доступности података о конфигурацији и степену отказа разматраног дела. Квалитативни приступ се користи када специфични подаци о делу и степену отказа нису познати, или нису доступни. Квантитативни приступ користи се када се располаже са довољно података за израчунавање степена критичности делова и компоненти посматраног система.

Анализа критичности - квалитативни приступ

Квалитативна CA идентификује врсте отказа у смислу нивоа вероватноће појављивања када нису познати подаци о степену отказа. Управо због тога степен оказа и вероватноћа отказа не користе се у квалитативној CA. Вероватноће појаве свих отказа груписане су у дискретне нивое, при чему се процена се врши на основу експертског суда о учестаности појаве отказа. Поменути нивои представљају квалитативне нивое вероватноће, неопходне за обављање CA поступка. Према [165] дефинише се пет нивоа вероватноће појављивања одређене врсте отказа, табела 6.6.

Табела 6.6. Класе вероватноће појављивања одређене врсте отказа [165]

Ниво	Опис
A: често	Велика вероватноћа појаве отказа током радног века анализиране компоненте. Висока вероватноћа може да се дефинише као вероватноћа појаве једног отказа већа од 0,2 од укупне вероватноће отказа током радног века компоненте.
B: врло вероватно	Умерена вероватноћа појаве отказа током рада анализиране компоненте. Вероватноћа појаве отказа може да се дефинише као вероватноћа појаве једног отказа већа од 0,10 а мања од 0,2 од укупне вероватноће отказа током радног века компоненте.
C: повремено	Вероватноћа појаве отказа дефинише се као вероватноћа појаве једног отказа већа од 0,01 а мања од 0,1 од укупне вероватноће отказа током радног века компоненте.
D: мало вероватно	Вероватноћа појаве отказа дефинише се као вероватноћа појаве једног отказа већа од 0,001 а мања од 0,01 од укупне вероватноће отказа током радног века компоненте.
E: изузетно мало вероватно	Отказ чија је вероватноћа појављивања током радног века практично једнака нули (готово немогућ догађај). Вероватноћа појаве отказа дефинише се као вероватноћа појаве једног отказа мања од 0,001 од укупне вероватноће отказа током радног века.

Анализа критичности - квантитативни приступ

Квантитативни приступ CA захтева познавање степена отказа делова и компоненти система. Степен критичности сваке врсте отказа одређује се на основу израза [165]

$$C_\mathrm{m} = \beta \alpha \lambda_\mathrm{p} t, \qquad \text{...(6.2)}$$

при чему је: C_m - критичност врсте (мода) отказа;

β - условна вероватноћа појаве последице одређене критичности, под условом да се реализује разматрани мод отказа, табела 6.7;

α - вероватноћа појаве одређеног мода отказа;

λ_p - степен отказа дела (број отказа за милион часова рада);

t - време трајања задатка (у часовима).

Табела 6.7. Вероватноћа појаве последице одређене критичности (β) [164]

Последица отказа	β
Реални губитак	1
Вероватни губитак	>0.1
Могућ губитак	≤0.1
Без последица	0

6.6 FMECA ОДРЖАВАЊА

6.6.1 Увод

FMECA метод успешно се користи за дефинисање захтева везаних за експлоатацију и одржавање, као и за дефинисање и развој упутстава за ефикасно одржавање, сагласно специфичностима корисника [164]. Осим тога, FMECA представља основни аналитички алат за примену концепта одржавања заснованог на поузданости (**R**eliability **C**entered **M**aintenance - **RCM**) [166].

6.6.2 Тим

Иако је обично једна особа одговорна за координацију одређеног FMECA процеса, сви FMECA пројекти подразумевају тимски рад. Циљ формирања FMECA тима јесте да сваки од његових чланова обогати начин и перспективе сагледавања разматраних проблема [167]. С обзиром на чињеницу да је сваки FMECA процес практично уникатан, што проистиче из разноврсности система који се анализирају, FMECA тим формира се сагласно захтевима конкретног проблема и престаје са радом након обављеног FMECA истраживања. Дакле, било би потпуно нерационално формирати један стални FMECA тим, зато што је састав тима диктиран специфичним задацима, односно, циљевима. У случајевима када је за решавање неког проблема неопходно спровести неколико FMECA процеса, добра је пракса да у изесном степену постоји преклапање тимова, међутим, и тада треба да постоје експерти који су чланосви само једног, или два тима. Тиме се обезбеђује ширина и актуелност сагледавања потенцијалних проблема и њихових решења.

Оптималан број чланова тима износи од четири до шест. Минимални број чланова тима одређен је бројем и ширином области третираних FMECA пројектом. Свака релевантна област (на пример, производња, инжењеринг, одржавање, материјали и техничка служба) мора бити заступљена у тиму. Осим тога, и корисник (интерни, у оквиру истог пословно-производног система, или екстерни) резултата FMECA пројекта може дати нови, или другачији поглед на разматрани проблем. Зато је пожељно да и представник корисника буде укључен у FMECA тим.

Корисно је у FMECA тиму имати чланове различитог нивоа блискости са разматраном машином/опремом/системом. Они који су највише блиски, иако имају драгоцени увид у проблем, због унапред формираног мишљења могу превидете неке очигледне потенцијалне проблеме. Они чланови тима који су мање блиски разматраном проблему уносе непристрасне, објективне идеје у FMECA процес. Мора се имати на уму да чланови тима који су емотивно везани (у професионалном смислу) за разматрани проблем могу постати претерано осетљиви током критичке анализе и реаговати одбрамбеним ставом. Коначно, одлука о томе да ли такве експерте укључити у тим мора се донети пажљивим одмеравањем изложеног недостатка и предности које ће њихово знање и искуство унети у FMECA процес.

Руководиоца FMECA тима именује менаџмент, или га бирају чланови тима. Руководилац (тим-лидер) јесте одговоран за координацију FMECA процеса укључујући [167]:

- заказивање, вођење и управљање састанцима;
- снабдевање FMECA тима свим неопходним ресурсима;
- конвергенцију и успешан завршетак FMECA процеса.

Тим-лидер не сме доминирати над тимом, нити његова реч мора бити последња у дискусијама чланова тима. Улога FMECA тим-лидера је да координира, саветује и пружа подршку члановима, а не да има одлучујућу улогу при доношењу одлука. Подаци о састанцима, као и донетим одлукама, морају бити документовани. Дакле, мора се водити записник, при чему се у улози запсничара смењују чланови тима. Тиме се обезбеђује равномерније оптерећење чланова тима.

Често се расправља и о улози експерта, за одређени производ или процес, у FMECA тиму. Експерт у датој области (пројектант, инжењер у производњи, инжењер одржавања) може у FMECA процес унети изванредан потенцијал и допринети брзом и ефикасно завршетку анализа, односно, на различите начине може представљати право богатство FMECA тима. Са друге стране, експерт може и успоравати FMECA процес. Чланови FMECA тима који имају удела у разматраном процесу или производу, због велике инвестиције (време, персонални интегритет) у процес/производ, својим егом често постају препрека FMECA процесу. Наиме, FMECA представља критички поглед на производ или процес, што значи да се истражују потенцијалне грешке тих чланова тима. Тада то постаје врло тежак процес који може изазвати одбрамбене реакције, бес и губитак самопоштовања. Све то јесте контрапродуктивно и за експерта и за чланове тима.

Имајући у виду комплексност функције одржавања на површинском копу, чланови тима за спровођење FMECA одржавања требало би да буду:

- главни инжењер система;
- главни инжењер одржавања;
- експерт за сигурност и поузданост;
- експерт за квалитет;
- руковаоци машинама/опремом;
- одржаваоци машина/опреме.

6.6.3 Полазне поставке

Да би се омогућила коректна интерпретација и примена резултата FMECA пројекта, морају се јасно навести базне поставке и претпоставке које су коришћене током сваког дела анализе. Базна поставке примењују се на систем/машине/опрему, њихово окружење, мисију и коришћене методе анализе. Базне поставке, које захтевају и сагласност и учешће корисника анализе, у општем случају укључују [165]:

- мисију/задатак објекта истраживања;
- фазу задатка/мисије која се анализира;
- време рада неопходно за обављање задатка;
- класификацију тежина последица;
- податке о дистрибуцији врсте отказа;
- извор података о степену отказа;
- концепте и методе детекције дефеката.

Према [149] при реализацији пројекта FMECA одржавања полази се од следећих специфичних поставки:

- да се машина/опрема користи на начин који одговара захтевима експлоатације и циљевима процеса рада;
- да се за сваку активност одржавања користи сопствени алат и прибор (контролу његовог стања врши особље које не припада служби одржавања);
- тежине последица оштећења машина/опреме са једне стране, и алата и прибора, са друге стране, нису исте.

6.6.4 Испоручиоци и корисници

Тим за спровођење FMECA одржавања система површинске експлоатације мора се држати чињенице да одржавање није изоловани циљ, није самом себи сврха.

Реализација активности везаних за остваривање високог степена радне способности машина и опреме у оквиру система површинске експлоатације треба да омогући стабилну производњу угља. Дакле, унутар пословно-производног система морају се успоставити здрави односи на релацији испоручилац-корисник. Када је реч о одржавању, организациона јединица која се бави њиме представља испоручиоца, односно, даваоца услуге. Систем за површинску експлоатацију, као организациона целина, представља у суштини посредног корисника, док је крајњи корисник услуга одржавања цео пословно-производни комплекс рудника.

6.6.5 Циљеви

Остваривање парцијалних циљева FMECA одржавања [162]:

- провера да су током фазе пројектовања и развоја идентификоване све потенцијалне врсте (начини, модови) отказа, као и последица по машину/опрему које изазива њихова појава;
- смањење трошкова животног циклуса подизањем нивоа поузданости и издржљивости машина/опреме;
- обезбеђивање неопходних података за развој ефикасног плана превентивног одржавања;
- идентификација, елиминација или редукција утицаја потенцијалних ризика на ниво који је прихватљив за корисника машина/опреме;
- идентификација критичних и/или значајних карактеристика машина/опреме;
- утврђивање приоритета ангажовања ресурса (људских и материјалних) на основу оцене утицаја отказа на машину, односно, корисника;

омогућава достизање крајњег циља функције одржавања система: повећање времена рада између два отказа, односно, смањење времена трајања стања у отказу, односно застоја система.

6.7 РАЗЛИКЕ ИЗМЕЂУ FMECA ПРОЦЕСА И FMECA ОДРЖАВАЊА

Са аспекта саме FMECA методе и фаза њеног спровођења, не постоји суштинска разлика између FMECA процеса и FMECA одржавања. Разлике које проистичу из самог предмета истраживања применом FMECA методе, манифестују се незнатним разликама у радним листовима неопходним за спровођење и систематизацију резултата истраживања.

Када је реч о процесу (производње, односно израде) онда је један од основних циљева остваривање жељеног квалитета, што се постиже спровођењем „контролних мера“ [162].

Током експлоатације и одржавања машина/опреме жељени ниво перформанси остварује се „превентивним мерама“ [162].

На основу наведених чињеница закључује се да је једина суштинска разлика у радним листовима (формуларима) за спровођење FMECA методе у анализи процеса (производње) и у анализи оджавања, проистиче из природе активности којом се обезбеђује жељено понашање објекта истраживања. FMECA процеса, као један од кључних резултата даје тзв. „план контроле“, док FMECA одржавања даје тзв. „план превентивног одржавања“.

6.8 КОРИШЋЕЊЕ МОДЕЛА FMECA ОДРЖАВАЊА

(попуњавање колона, опрема, вероватноћа појављивања отказа, тежина последице отказа, вероватноћа откривања отказа, превентивне мере)

За примену FMECA технике у одржавању примењује се хардверски приступ. Њено спровођење захтева формирање радних листова, слика 6.5, који представљаују синтезу радних листова који се користе приликом примене FMEA (слика 6.3) и CA поступка (слика 6.4). Степен критичности (**R**isk **P**riority **N**umber - **RPN**) израчунава се као као производ ранга вероватноће појављивања (**P**robability of **F**ailure - **PF**) тежине последице (**F**ailure **D**emerit **V**alue - **FDV**) и вероватноће детектовања (**P**robability of **F**ailure **R**emedy - **PFR**) одређене врсте отказа,

$$RPN = PF \times FDV \times PFR. \qquad ...(6.3)$$

Опрема/подсклоп/део	**Елемент**	**Отказ**			**Постојеће стање**							**Побољшано стање**				
		Врста	**Последица**	**Узрок**	**Превентивне мере**	***PF***	***FDV***	***PFR***	***RPN***	**Предложене корективне мере**	**Одговорна функција**	**Примењене корективне мере**	***PF***	***FDV***	***PFR***	***RPN***
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Слика 6.5. Изглед радног листа (формулара) за FMECA одржавања

Квантификација вероватноће појављивања одређене врсте отказа заснива се на учестаности његовог појављивања. С обзиром на специфичности функција које извршавају разноврсни технички системи, као и специфичности организације пословно/производних система у оквиру којих се обавља функција одржавања, није могуће формирати јединствени приступ квантификовању вероватноће појављивања одређене врсте отказа. Начелно, отказима који се чешће појављују, додељује се виши ранг вероватноће појављивања. Уобичајено је да се рангирање вероватноће појављивања изводи на основу средњег времена између појављивања одређене врсте отказа (*MTBF*) одређеног на основу израза (3.2) које је у директној корелацији са учестаношћу (бројем) отказа у одређеном временском периоду, табела 6.8.

Табела 6.8. Ранг вероватноће појављивања одређене врсте отказа

Средње време између појављивања: *MTBF* (месец)		**Ранг вероватноће појављивања: *PF***
≥	**<**	
6	-	1
5	6	2
4	5	3
3	4	5
2	3	8
1	2	9
0	1	10

Тежина последице одређене врсте отказа може да се процењује са различитих аспеката имајући и виду могуће утицаје на:

- перформансе техничког система;
- сигурност људи и имовине који чине технички систем и његово окружење;
- термин-план извршења задатака пословно/производног система;
- углед пословно/производног система;
- финансијске губитке.

Када је реч о одржавању, уобичајено је да се рангирање тежина последица врши на основу времена трајања застоја изазваног одређеном врстом отказа, чиме је имплицитно обухваћен његов утицај на перформансе техничког система, термин план извршења задатака и углед пословно/производног система, као и утицај на квалитет финансијског пословања, табела 6.9.

Имајући у виду различиту природу и механизме настанка и развоја појединих врста отказа, разликују се откази праћени ефектима који се релативно лако могу детектовати (бука, шкрипа, вибрације, похабаност) као и откази који настају изненада, без претходне најаве. Управо због тога, дужина трајања периода у коме се јављају поменути ефекти, односно тзв. упозоравајућег периода, представља основу за рангирање вероватоће откривања одређене врсте отказа, табела 6.10.

Табела 6.9. Ранг тежине последица одређене врсте отказа

Време трајања застоја (дан)		Ранг тежине последица: *FDV*
≥	<	
5	-	10
4	5	9
3	4	8
2	3	5
1	2	2
0	1	1

Табела 6.10. Ранг вероватноће откривања отказа

Време трајања упозоравајућег периода		Ранг вероватноће откривања: *PFR*
≥	<	
0	1 дан	10
1 дан	7 дана	9
7 дана	1 месец	8
1 месец	2 месеца	5
2 месеца	6 месеци	2
6 месеци	-	1

6.9 ПРИМЕНА FМЕСА ОДРЖАВАЊА

Одржавање система за површинску експлоатацију (СПЕ) одликује се бројним специфичностима у односу на одржавање индустријских система. На основу вишедеценијског искуства на пословима одржавања система за површинску експлоатацију у РБ „Колубара“ формирани су критеријуми за оцену параметара ризика појединих врста отказа, табеле 6.11-6.13.

Табела 6.11. Ранг вероватноће појављивања одређене врсте отказа СПЕ

Учестаност појављивања	*MTBF*	Ранг *PFR*
Готово увек	<2 часа	10
Веома висока	2-10 часова	9
Прилично висока	11-100 часова	8
Висока	101-400 часова	7
Просечна	401-1000 часова	6
Ниска	1001-2000 часова	5
Прилично ниска	2001-3000 часова	4
Врло ниска	3001-6000 часова	3
Појединачни случајеви	6001-10000 часова	2
Готово никад	>10000 часова	1

Табела 6.12. Ранг тежине последица одређене врсте отказа СПЕ

Тежина последица	Опис	Утицај на извршавање функција	Ранг *FDV*
Катастрофална	Непоправљива оштећења (уништење); смртни случајеви; варијација трошкова >15% од предвиђених; драстично нарушавање пословног угледа.	Немогућност извршавања свих функција.	10
Врло озбиљна	Врло висок степен оштећења, уз нарушавање сигурности; тешке повреде; варијација трошкова >15% од предвиђених; озбиљно нарушавање пословног угледа у јавности.	Немогућност извршавања већине функција.	9
Врло висока	Значајан губитак перформанси, значајна оштећења уз могућност репарације; значајно нарушавање сигурности; могућност повређивања оператера, неопходно боловање; варијација трошкова >10% или ≤15% од предвиђених; губитак већи од четворочасовне производње; нарушавање пословног угледа у јавности.	Немогућност потпуног извршавања више функција, уз остваривање минималних ефеката; застоји дужи од 8 h.	8
Висока	Систем није у стању пуне радне способности, неке од функција не извршавају се у потпуности, отказ репарабилан; сигурност није нарушена у значајној мери; могућност повређивања оператера, неопходно боловање; варијација трошкова >10% или ≤15% од предвиђених; губици између двочасовне и четворочасовне производње; губитак угледа у пословном окружењу.	Немогућност потпуног извршавања одређене функције, остале се остварују изнад минимума; застоји 4-8 h.	7
Значајна	Систем је у стању радне способности, уз губитак перформанси, отказ репарабилан; сигурност није нарушена; могућност повређивања оператера, без боловања; варијација трошкова >5% или ≤10% од предвиђених; губици између једночасовне и двочасовне производње; губитак угледа у пословном окружењу.	Способност извршавања свих функција, уз погоршање перформанси; застоји 1-4 h.	6
Приметна	Систем је у стању пуне радне способности, уз појаву репарабилног отказа, сигуран је, захтева подешавање; нарушен радни амбијент што изазива незадовољство руковаоца, а у неким случајевима и пружање прве помоћи; варијација трошкова <5% од предвиђених; губици нижи од једночасовне производње.	Способност извршавања свих функција, уз незнатно погоршање перформанси; застоји 0,5-1 h.	5
Незнатна	Систем је у стању пуне радне способности, уз незнатна физичка оштећења, сигуран је, захтева подешавање; рад је праћен ефектима (повремене вибрације, бука) који могу да изазову неудобност/непријатност/ узнемирење руковаоца; без израженог губитка производње.	Способност извршавања свих функција, уз неопходност подешавања, застој краћи од 30 min.	4
Слаба	Систем је у стању пуне радне способности, уз незнатна физичка оштећења, сигуран је, захтева подешавање; рад је праћен ефектима (повремене вибрације, бука) који могу да изазову неудобност/непријатност/ узнемирење руковаоца.	Способност извршавања свих функција, уз неопходност подешавања.	3
Минорна	Систем је у стању пуне радне способности, нема знакова физичког оштећења, сигуран је, захтева незнатно подешавање; рад је праћен ефектима (повремена подрхтавања, бука ниског нивоа) које руковалац вероватно неће уочити.	Све фукције се извршавају, неопходно незнатно подешавање.	2
Безначајна	Систем је у стању пуне радне способности, отказ који не утиче на перформансе система, оператер га не уочава; сигурност имовине и лица није нарушена; не постоје финансијски губици.	Све функције се извршавају у пројектованим границама.	1

Табела 6.13. Ранг вероватноће детекције одређене врсте отказа СПЕ

Вероватноћа детекције	Опис	Ранг *PFR*
Готово немогућ догађај	ППО* не омогућава детекцију потенцијалног отказа, или се такво одржавање не спроводи	10
Минорна	Незнатни изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	9
Изузетно ниска	Изузетно мали изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	8
Веома ниска	Веома мали изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	7
Ниска	Мали изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	6
Умерена	Умерени изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	5
Просечна	Просечни изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	4
Висока	Велики изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	3
Врло висока	Врло велики изгледи да ППО омогући детекцију потенцијалног отказа	2
Готово сигуран догађај	ППО практично увек омогућава детекцију потенцијалног отказа	1

*Планско-превентивно одржавање

6.10 FMECA ОДРЖАВАЊА ОБЈЕКТА ИСТРАЖИВАЊА

Први корак у спровођењу FMECA технике јесте структурно разлагање разматраног система. Оно се може извршити на различите начине, табела 6.14. Приступ структурном разлагању не утиче на коначни резултат (ранг критичности одређене врсте отказа) и условљен је, пре свега, начином креирања иницијалне базе података. У овом случају то је документ „Рад и застој I БТО система“ на основу кога је формиран електронски дневник рада који чини основу за наставак анализе. Уобичајени приступ структурног разлагања разматраног система не обухвата, очигледно, утицај тла и оператера, табела 6.14. Осим тога, сам начин вођења дневника рада/застоја система – уписивањем у хартијане формуларе – система јесте конзервативан, и не омогућава континуално праћење понашања система. Увођењем електронских формулара са падајућим менијима, из који се једноставно, брзо и прецизно идентификују подсистеми/подсклопови који су изазвали застој, и кратким, али прецизним описом застоја/отказа, омогућило би се аутоматско генерисање базе података неопходне за спровођење FMECA технике, као и њено брзо спровођење.

Табела 6.14. Декомпозиција роторног багера са претоварним уређајем

Структурна схема					Уобичајена пракса	
Ознака				Назив	Ознака	Назив
1				2	3	4
1				**Подсистем за копање**	**1**	**Механизам за копање материјала (МКМ)**
	1.1			Ротор са погоном		
		1.1.1		Ротор		
			1.1.1.1	Тело ротора (са полумесецима)		
			1.1.1.2	Кашике		
		1.1.2		Погон ротора		
			1.1.2.1	Електромотор		
			1.1.2.2	Преносник снаге		
	1.2			Окретница са погоном	**2**	**Механизам за кружно кретање (МКК)**
		1.2.1		Радиаксијални лежај са озубљењем		
			1.2.1.1	Радиаксијални лежај		
			1.2.1.2	Зупчасти венац		
		1.2.2		Погон окретнице		
			1.2.2.1	Електромотор		
			1.2.2.2	Преносник снаге		
2				**Подсистем за транспорт материјала**	**5**	**Механизам за транспорт материјала (МТМ)**
	2.1			Подсистем за транспорт материјала на багеру		
		2.1.1		Активни елементи (транспортери)		
		2.1.2		Пасивни елементи (клизница, левак, бункер)		
	2.2			Подсистем за транспорт материјала на претоварном уређају		
		2.2.1		Активни елементи (транспортери)		
		2.2.2		Пасивни елементи (левак, бункер)		
3				**Подсистем структуре**	**6**	**Носећа челична конструкција (НЧК)**
	3.1			Носећа челична конструкција (НЧК) роторног багера		
		3.1.1		НЧК стреле ротора		
		3.1.2		НЧК стреле противтега		
		3.1.3		НЧК обртне платформе		
		3.1.4		НЧК доње градње		
	3.2			Носећа челична конструкција претоварног уређаја		
		3.2.1		НЧК моста		
		3.2.2		НЧК доње градње		
	3.4			Механизам за вешање одложног сегмента претоварног моста		
		3.4.1		Котурача		
		3.4.2		Електромотор		
		3.4.3		Преносник снаге		
	3.3			Механизам за вешање стреле ротора	**3**	**Механизам за дизање стреле ротора (МДС)**
		3.3.1		Котурача		
		3.3.2		Електромотор		
		3.3.3		Преносник снаге		
4				**Подсистем за кретање**	**4**	**Механизам за транспорт багера (МТБ)**
	4.1			Подсистем за кретање роторног багера		
		4.1.1		Гусенице		
		4.1.2		Електромотори		
		4.1.3		Преносници снаге		
	4.2			Подсистем за кретање претоварног уређаја		
		4.2.1		Гусенице		
		4.2.2		Електромотори		
		4.2.3		Преносници снаге		
5				**Подсистем заштите**	**Групишу се по подсистемима (1-6)**	
	5.1			Подсистем заштите од преоптерећења, уласка у недозвољене положаје		
	5.2			Подсистем звучне и светлосне сигнализације		
6				**Подсистем за напајање електричном енергијом**		
	6.1			Подсистем за напајање роторног багера електричном енергијом		
	6.2			Подсистем за напајање претоварног уређаја електричном енергијом		
7				**Подсистем за управљање**		
	7.1			Подсистем за управљање роторним багером		
	7.2			Подсистем за управљање претоварним уређајем		
8				**Тло**	**Не разматрају се**	
	8.1			Планум		
	8.2			Косина (чело етаже)		
9				**Оператери**		
	9.1			Психофизичко стање		
	9.2			Знање и вештине		

Уважавајући изложене чињенице, пре свега начин формирања иницијалне базе података, у наставку истраживања примењено је структурно разлагање сагласно уобичајеној пракси у РБ „Колубара“. Из електронског дневника рада/застоја I БТО система излучени су и систематизовани подаци о непланираним машинским и електро застојима, који представљају основу за израчунавање ранга ризика.

6.10.1 FMECA непланираних машинских отказа

На основу електронског дневника рада/застоја I БТО система формирана је табела 6.15 са основним подацима о отказу/застоју: ознака (колона 1) целина (подсклоп) у којој се јавио (колона 2) кратки опис (колона 3) подсистем коме припада подсклоп у застоју/отказу (колона 4) укупан број појављивања (колона 5) и укупно време трајања (колона 6) у референтном периоду. Учешћа појединих подсистема у купном броју и времену трајања непланираних машинских застоја приказана су у табелама 6.16 и 6.17, као и на сликама 6.5 и 6.6.

Табела 6.15. Опис непланираних машинских отказа/застоја
развртаних према месту настанка (подсистему)

Ознака	Целина	Опис	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)
1	2	3	4	5	6
1	Сливник ротора	Отказ завртањских веза	1	2	100
2	Сливник ротора	Отказ заварене везе хабајућих шина	1	1	120
3	Ротор	Отказ заварене везе поклопца	1	1	55
4	Полумесец ротора	Отказ заварених веза	1	2	275
5	Полумесец ротора	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	7	2800
6	Зуби кашика	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	26	1420
7	Зуби кашика	Похабаност	1	1	100
9	Кашике	Загушење	1	9	280
10	Ротор	Налеп на конусу	1	1	100
11	Погон ротора	Отказ система подмазивања	1	10	95
12	Полумесец ротора	Контрола	1	7	350
13	Ротор	Контрола	1	1	10
14	Погон ротора	Контрола	1	1	75
88	Сливник и полумесец ротора	Отказ заварених и завртањских веза	1	2	450
15	Погон МКК	Несаосност мотора	2	1	40
16	Погон МКК	Отказ гумица	2	1	75
17	Шлајфингер	Дислокација ролнице	2	1	120
68	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	4	10	250
69	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	4	3	30
70	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице	4	3	65
71	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	9	390
72	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	120
73	Гусенични ланац претоварног уређаја	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	20

Табела 6.15. (наставак)

74	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ заварене везе осигурања	4	2	35
75	Гусенични ланац багера	Отказ папуча	4	5	1095
76	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ папуча	4	6	1015
77	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	4	1	270
78	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	4	3	170
79	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	4	1	40
80	Гусеница багера	Отказ тркача	4	2	315
81	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	95
82	Гусеница багера	Дислокација колица	4	1	10
83	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	4	1	480
84	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	4	1	90
85	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	4	2	20
89	Гусенични ланац	Отказ папуче	4	2	210
8	Транспортери и чворна места	Откази завеса	5	4	375
18	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	5	1	30
19	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	5	1	15
20	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	5	1	320
21	Погон транспортера Т1	Контрола	5	2	25
22	Погон централног левка	Отказ	5	5	1700
23	Погон централног левка	Контрола	5	1	35
24	Централни левак	Отказ заварених веза гребача	5	1	110
25	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	5	1	10
26	Транспортер Т1	Раскачивање ролни	5	3	50
27	Транспортер Т2	Раскачивање ролни	5	1	5
28	Пресип Т3-Т4	Раскачивање ролни	5	1	30
29	Колица	Отказ петоделног слога ролни	5	1	30
30	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (самозапаљење)	5	1	20
31	Транспортер Т1	Закошење траке	5	1	10
32	Транспортер Т2	Закошење траке	5	3	65
33	Транспортер Т3	Закошење траке	5	2	15
34	Транспортер Т4	Закошење траке	5	2	25
35	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	5	1	10
36	Транспортер Т2	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	1	70
37	Транспортер Т4	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	7	2710
38	Транспортер Т1	Неисправна трака	5	4	85
39	Транспортер Т3	Отказ споја траке	5	3	1100
40	Транспортер Т4	Оштећење траке	5	2	105
41	Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	5	1	25
42	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	5	2	145
43	Транспортер Т1	Проклизавање траке	5	1	5
44	Транспортер Т3	Проклизавање траке	5	7	55
45	Транспортер Т4	Проклизавање траке	5	1	10
46	Истоварни левак	Неисправна завеса	5	3	105
47	Транспортер Т4	Неисправна завеса	5	2	30
48	Пресип Т3-Т4	Неисправна завеса	5	1	15
49	Транспортер Т4	Контрола	5	7	90
50	Транспортер Т4	Отказ жабица	5	20	945
51	Транспортер Т1	Отказ жабица	5	1	10

Табела 6.15. (наставак)

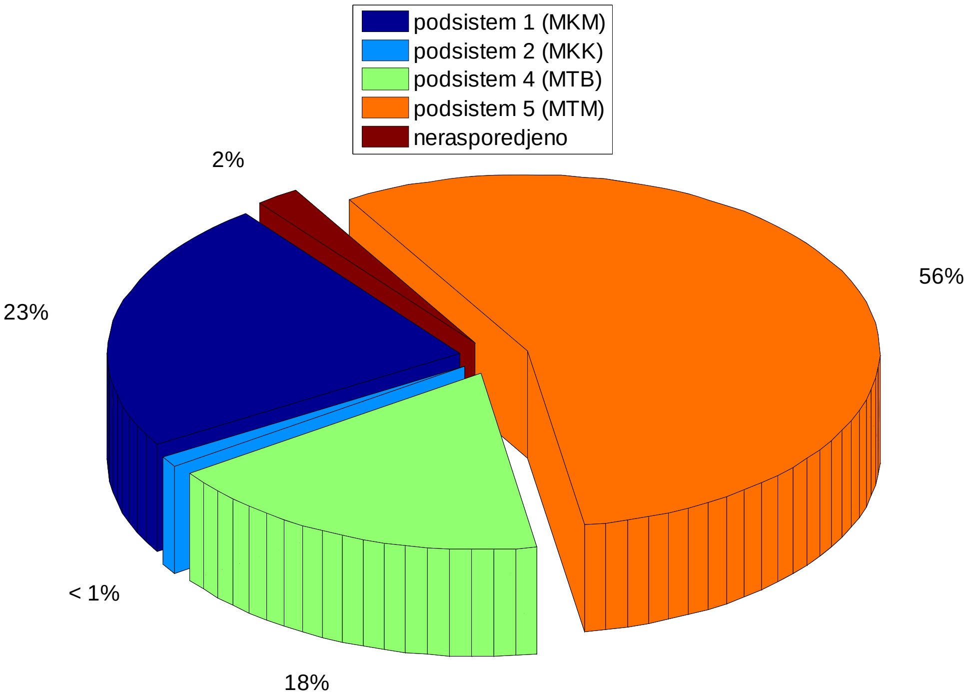
52	Транспортер Т1	Отказ сајлица	5	7	65
53	Транспортер Т3	Отказ сајлица	5	1	10
54	Транспортер Т4	Отказ сајлица	5	4	50
55	Транспортери	Отказ сајлица	5	2	50
56	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	5	2	40
57	Истоварни левак	Загушење	5	5	55
58	Централни левак	Загушење	5	25	645
59	Пресип Т3-Т4	Загушење	5	4	125
60	Транспортер Т2	Запрљаност траке	5	7	260
61	Транспортер Т1	Запрљаност троугластог брисача на повратном бубњу	5	2	85
62	Транспортери	Запрљаност одбојних бубњева	5	4	120
63	Транспортер Т3	Налеп косог лима	5	2	80
64	Гребачи	Отказ	5	2	105
65	Централни левак	Отказ гребача (неопходно чишћење и враћање у функцију)	5	2	715
66	Одбојни бубањ	Запрљаност	5	4	60
67	Централни левак	Лом гребача	5	1	440
86	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	5	1	30
87	Нераспоређено			6	255
			Укупно	**306**	**22760**

Табела 6.16. Учешће подсистема у укупном броју непланираних машинских застоја

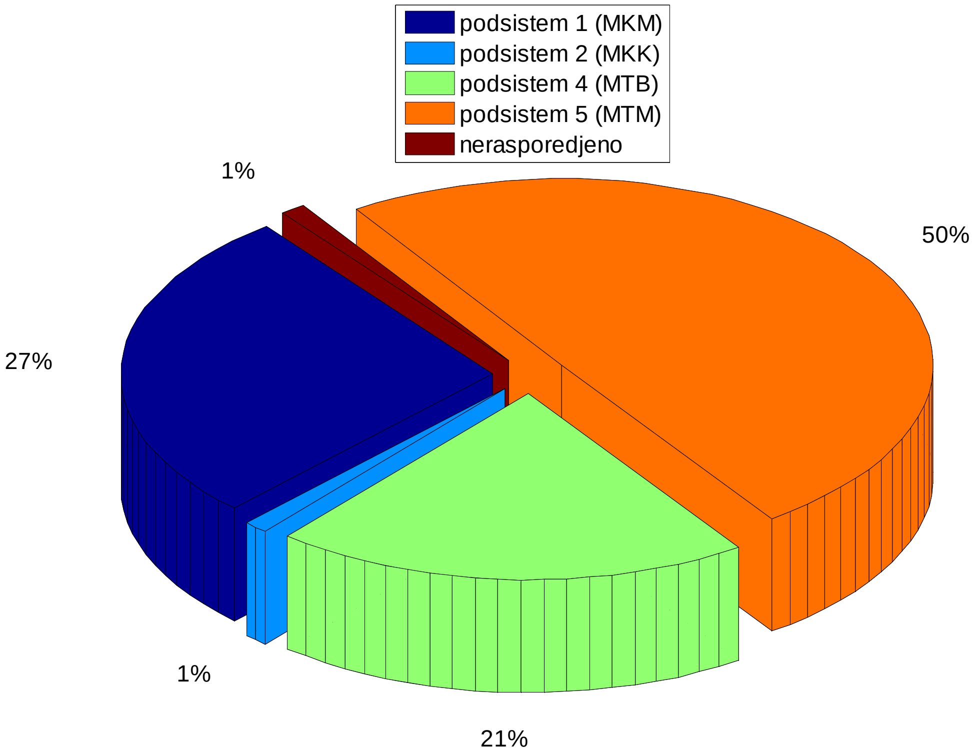
Подсистем	Број застоја	Учешће (%)
1	2	3
МКМ (1)	71	23,20
МКК (2)	3	0,98
МТБ (4)	55	17,97
МТМ (5)	171	55,88
Нераспоређено	6	1,96
Укупно	**306**	**100**

Табела 6.17. Учешће подсистема у укупном времену трајања непланираних машинских застоја

Подсистем	Време застоја (min)	Учешће (%)
1	2	3
МКМ (1)	6230	27,37
МКК (2)	235	1,03
МТБ (4)	4720	20,74
МТМ (5)	11320	49,74
Нераспоређено	255	1,12
Укупно	**22760**	**100**



Слика 6.5. Процентуално учешће подсистема у укупном броју непланираних машинских застоја



Слика 6.6. Процентуално учешће подсистема у укупном времену трајања непланираних машинских застоја

Учешће подсистема 2 (МКК) и нераспоређених отказа/застоја у укупном броју и укупном времену трајања непланираних машинских отказа/застоја занемарљиво је мало, табеле 6.16 и 6.17, слике 6.5 и 6.6. Зато је у наставку презентирано учешће доминантних целина (подсклопова) у укупном броју и времену трајања непланираних машинских застоја изазваних подсистемима 1 (МКК) 4 (МТБ) и 5 (МТМ), табеле 6.18-6.23, слике 6.7-6.12.

Табела 6.18. Подсистем МКМ (1): учешће подсклопова у укупном броју непланираних машинских отказа/застоја

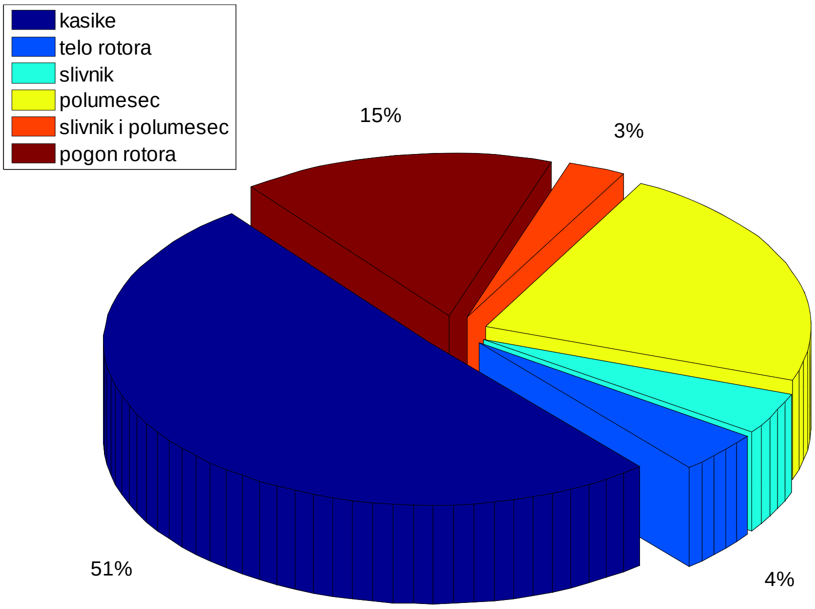
Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
1	2	3	4
Кашике	6,7,9	36	50,70
Полумесец	4,5,12	16	22,54
Погон ротора	11,14	11	15,49
Тело ротора	3,10,13	3	4,23
Сливник	1,2	3	4,23
Сливник и полумесец*	88	2	2,82
	Укупно:	**71**	**100**

*Према документу „Рад и застој I БТО система“

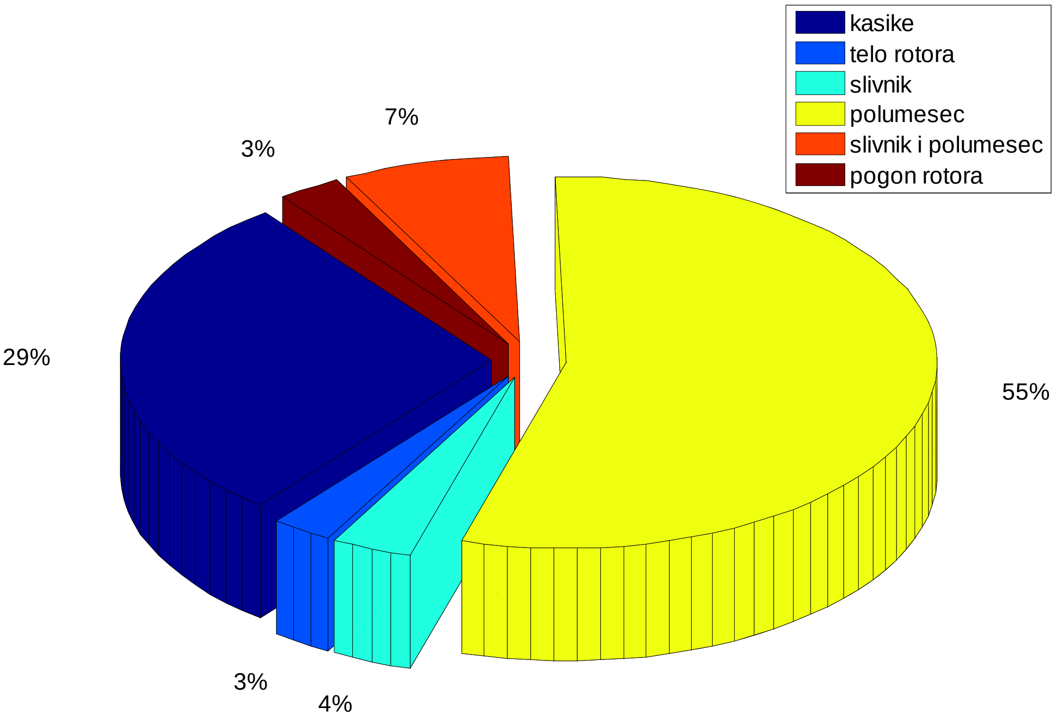
Табела 6.19. Подсистем МКМ (1): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних машинских отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време трајања (min)	Учешће (%)
1	2	3	4
Полумесец	4,5,12	3425	54,98
Кашике	6,7,9	1800	28,89
Сливник и полумесец*	88	450	7,22
Сливник	1,2	220	3,53
Погон ротора	11,14	170	2,73
Тело ротора	3,10,13	165	2,65
	Укупно:	**6230**	**100**

*Према документу „Рад и застој I БТО система“



Слика 6.7. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних машинских застоја МКМ (1)



Слика 6.8. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних машинских застоја МКМ (1)

Табела 6.20. Подсистем МТБ (4): учешће подсклопова у укупном броју непланираних машинских отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
1	2	3	4
Гусенични ланац*	68,69,71,78,83,89	28	50,91
Гусенични ланац багера	70,72,75,79-82,84	16	29,09
Гусенични ланац претоварног уређаја	73,74,76	9	16,36
Погон гусенице багера	85	2	3,64
	Укупно:	**55**	**100**

*Према документу „Рад и застој I БТО система“

Табела 6.21. Подсистем МТБ (4): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних машинских отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време (min)	Учешће (%)
1	2	3	4
Гусенични ланац багера	70,72,75,79-82,84	2100	44,49
Гусенични ланац*	68,69,71,78,83,89	1530	32,42
Гусенични ланац претоварног уређаја	73,74,76	1070	22,67
Погон гусенице багера	85	20	0,42
	Укупно:	**4720**	**100**

*Према документу „Рад и застој I БТО система“

Табела 6.22. Подсистем МТМ (5): учешће подсклопова у укупном броју непланираних машинских отказа/застоја

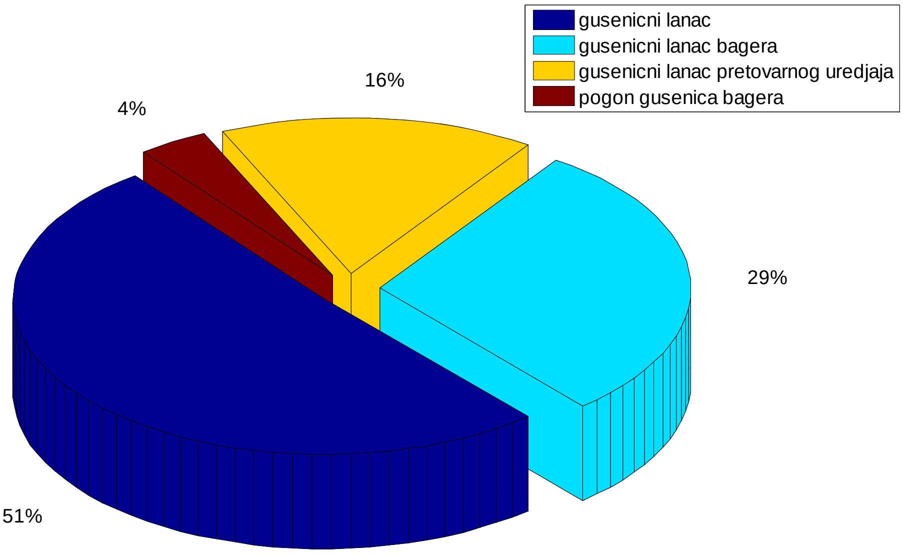
Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
1	2	3	4
Транспортер Т4	19,20,34,35,37,40,42,45,47,49,50,54	50	29,24
Централни левак	22-24,58,65,67	35	20,47
Транспортер Т1	18,21,26,3138,43,51,52,61	22	12,87
Транспортер Т3	30,33,39,41,44,53,63	17	9,94
Транспортер Т2	27,32,36,60	12	7,02
Истоварни левак	46,57	8	4,68
Транспортери*	55,62	6	3,51
Одбојни бубањ*	25,61,86	6	3,51
Пресип Т3-Т4	28,48,59	6	3,51
Транспортери и чворна места*	8	4	2,34
Погонски бубањ*	56	2	1,17
Гребачи*	64	2	1,17
Колица*	29	1	0,58
	Укупно:	**171**	**100**

*Према документу „Рад и застој I БТО система“

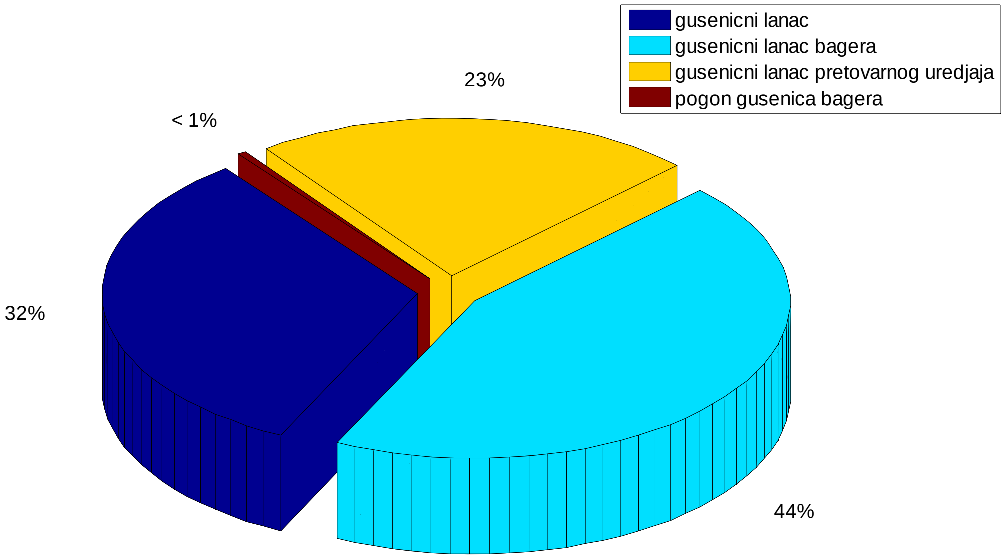
Табела 6.23. Подсистем МТМ (5): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних машинских отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време (min)	Учешће (%)
1	2	3	4
Транспортер Т4	19,20,34,35,37,40,42,45,47,49,50,54	4455	39,36
Централни левак	22-24,58,65,67	3645	32,20
Транспортер Т3	30,33,39,41,44,53,63	1305	11,53
Транспортер Т2	27,32,36,60	400	3,53
Транспортери и чворна места*	8	375	3,31
Транспортер Т1	18,21,26,3138,43,51,52,61	365	3,22
Транспортери*	55,62	170	1,50
Пресип Т3-Т4	28,48,59	170	1,50
Истоварни левак	46,57	160	1,41
Гребачи*	64	105	0,93
Одбојни бубањ*	25,61,86	100	0,88
Погонски бубањ*	56	40	0,35
Колица*	29	30	0,27
	Укупно:	**11320**	**100**

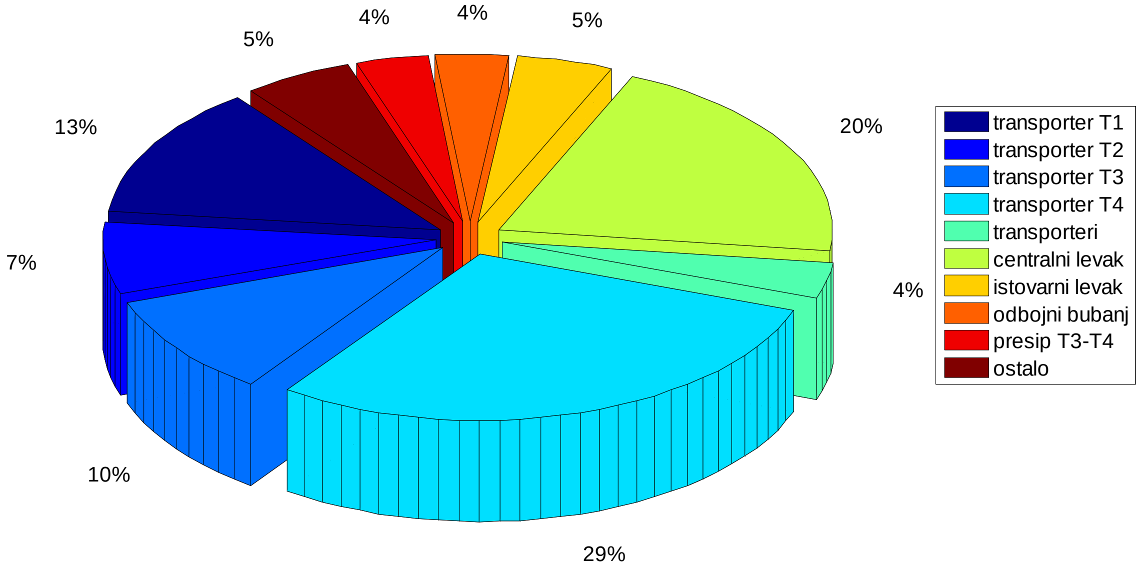
*Према документу „Рад и застој I БТО система“



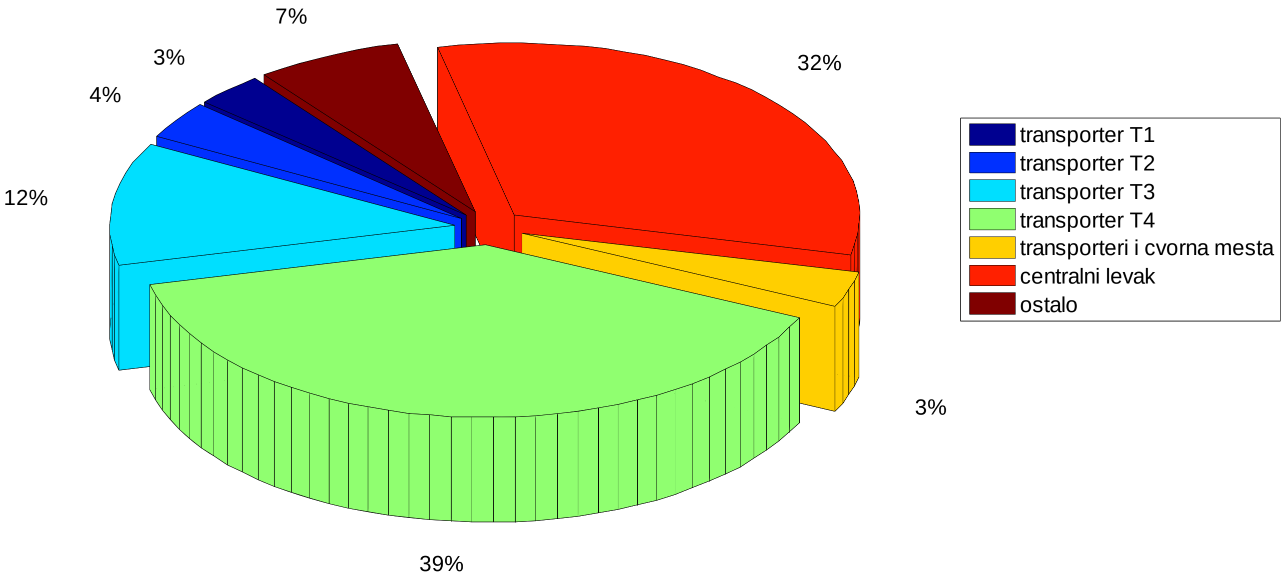
Слика 6.9. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних машинских застоја МТБ (4)



Слика 6.10. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних машинских застоја МТБ (4)



Слика 6.11. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних машинских застоја МТМ (5)



Слика 6.12. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних машинских застоја МТМ (5)

Степени критичности појединих врста отказа/застоја, рангирани према методи Kineey, дати су у табелама 6.24-6.27.

Легенда за табеле 6.24-6.27

Степен критичности (према методи Kineey)

RPN≤20 занемарљив **20<RPN≤70** низак **70<RPN≤200** средњи **200<RPN≤400** висок **RPN>400** екстремни

Табела 6.24. Степени критичности отказа МКМ (подсистем 1)

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (*PF*)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (*FDV*)	Ранг вероватоће откривања (*PFR*)	Ранг критичности (*RPN*)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	Полумесец ротора	Губитак интегритета (неопходна замена)	500.74	6	400.00	7	4	**168**
4	Полумесец ротора	Отказ заварених веза	1773.63	5	137.50	6	5	**150**
88	Сливник и полумесец ротора	Отказ заварених и завртањских веза	1772.17	5	225.00	6	4	**120**
9	Кашике	Загушење	394.13	7	31.11	5	3	**105**
2	Сливник ротора	Отказ заварене везе хабајућих шина	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
1	Сливник ротора	Отказ завртањских веза	1775.08	5	50.00	5	3	**75**
3	Ротор	Отказ заварене везе поклопца	3550.92	3	55.00	5	5	**75**
6	Зуби кашика	Губитак интегритета (неопходна замена)	135.70	7	54.62	5	2	**70**
12	Полумесец ротора	Контрола	506.57	6	50.00	5	2	**60**
10	Ротор	Налеп на конусу	3550.17	3	100.00	6	3	**54**
11	Погон ротора	Отказ система подмазивања	355.02	7	9.50	2	3	**42**
7	Зуби кашика	Похабаност	3550.17	3	100.00	6	2	**36**
14	Погон ротора	Контрола	3550.58	3	75.00	6	2	**36**
13	Ротор	Контрола	3551.67	3	10.00	2	2	**12**

Табела 6.25. Степени критичности отказа МКК (подсистем 2)

Ознака 1	Целина 2	Опис 3	Просечно време између отказа (h) 4	Ранг вероватноће појављивања *(PF)* 5	Просечно време трајања (min) 6	Ранг тежине последица *(FDV)* 7	Ранг вероватоће откривања *(PFR)* 8	Ранг критичности *(RPN)* 9
17	Шлајфингер	Дислокација ролнице	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
16	Погон МКК	Отказ гумица	3550.58	3	75.00	6	3	**54**
15	Погон МКК	Несаосност мотора	3551.17	3	40.00	5	3	**45**

Табела 6.26. Степени критичности отказа МТБ (подсистем 4)

Ознака 1	Целина 2	Опис 3	Просечно време између отказа (h) 4	Ранг вероватноће појављивања *(PF)* 5	Просечно време трајања (min) 6	Ранг тежине последица *(FDV)* 7	Ранг вероватоће откривања *(PFR)* 8	Ранг критичности *(RPN)* 9
80	Гусеница багера	Отказ тркача	1773.29	5	157.50	6	5	**150**
75	Гусенични ланац багера	Отказ папуча	706.72	6	219.00	6	4	**144**
76	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ папуча	589.15	6	169.17	6	4	**144**
71	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	393.93	7	43.33	5	4	**140**
89	Гусенични ланац	Отказ папуче	1774.17	5	105.00	6	4	**120**
68	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	354.77	7	25.00	4	4	**112**
78	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	1183.00	5	56.67	5	4	**100**
83	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	3543.83	3	480.00	7	4	**84**
70	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице	1183.58	5	21.67	4	4	**80**
72	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	3549.83	3	120.00	6	4	**72**
84	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	3550.33	3	90.00	6	4	**72**
77	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	3547.33	3	270.00	7	3	**63**
74	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ заварене везе осигурања	1775.63	5	17.50	3	4	**60**
79	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	3551.17	3	40.00	5	4	**60**

Табела 6.26. (наставак)

81	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	3550.25	3	95.00	6	3	**54**
69	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	1183.78	5	10.00	2	4	**40**
73	Гусенични ланац претоварног уређаја	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	3551.50	3	20.00	3	4	**36**
85	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
82	Гусеница багера	Дислокација колица	3551.67	3	10.00	2	4	**24**

Табела 6.27. Степени критичности отказа МТМ (подсистем 5)

Ознака	**Целина**	**Опис**	**Просечно време између отказа (h)**	**Ранг вероватноће појављивања (*PF*)**	**Просечно време трајања (min)**	**Ранг тежине последица (*FDV*)**	**Ранг вероватноће откривања (*PFR*)**	**Ранг критичности (*RPN*)**
1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (запаљење)	3551.50	3	20.00	9	9	**243**
22	Погон централног левка	Отказ	704.70	6	340.00	7	4	**168**
50	Транспортер Т4	Отказ жабица	176.80	7	47.25	5	4	**140**
65	Централни левак	Отказ гребача	1769.96	5	357.50	7	4	**140**
37	Транспортер Т4	Дотрајалост траке (неопходна замена)	500.95	6	387.14	7	3	**126**
59	Пресип Т3-Т4	Загушење	887.44	6	31.25	5	4	**120**
60	Транспортер Т2	Запрљаност траке	506.79	6	37.14	5	4	**120**
58	Централни левак	Загушење	141.64	7	25.80	4	4	**112**
8	Транспортери и чворна места	Откази завеса	886.40	6	93.75	6	3	**108**
39	Транспортер Т3	Отказ споја траке	1177.83	5	366.67	7	3	**105**
61	Транспортер Т1	Запрљаност троугластог брисача на повратном бубњу	1775.21	5	42.50	5	4	**100**
63	Транспортер Т3	Налеп косог лима	1775.25	5	40.00	5	4	**100**
62	Транспортери	Запрљаност одбојних бубњева	887.46	6	30.00	4	4	**96**
20	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	3546.50	3	320.00	7	4	**84**
67	Централни левак	Лом гребача	3544.50	3	440.00	7	4	**84**
40	Транспортер Т4	Оштећење траке	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
46	Истоварни левак	Неисправна завеса	1183.36	5	35.00	5	3	**75**
64	Гребачи	Отказ	1775.04	5	52.50	5	3	**75**

Табела 6.27. (наставак)

24	Централни левак	Отказ заварених веза гребача	3550.00	3	110.00	6	4	**72**
38	Транспортер Т1	Неисправна трака	887.60	6	21.25	4	3	**72**
57	Истоварни левак	Загушење	710.18	6	11.00	3	4	**72**
66	Одбојни бубањ	Запрљаност	887.71	6	15.00	3	4	**72**
42	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	1774.71	5	72.50	6	2	**60**
36	Транспортер Т2	Дотрајалост траке (неопходна замена)	3550.67	3	70.00	6	3	**54**
23	Погон централног левка	Контрола	3551.25	3	35.00	5	3	**45**
26	Транспортер Т1	Раскачивање ролни	1183.67	5	16.67	3	3	**45**
47	Транспортер Т4	Неисправна завеса	1775.67	5	15.00	3	3	**45**
56	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	1775.58	5	20.00	3	3	**45**
32	Транспортер Т2	Закошење траке	1183.58	5	21.67	4	2	**40**
55	Транспортери	Отказ сајлица	1775.50	5	25.00	4	2	**40**
18	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
28	Пресип Т3-Т4	Раскачивање ролни	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
29	Колица	Отказ петоделног слога ролни	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
44	Транспортер Т3	Проклизавање траке	507.27	6	7.86	2	3	**36**
49	Транспортер Т4	Контрола	507.19	6	12.86	3	2	**36**
54	Транспортер Т4	Отказ сајлица	887.75	6	12.50	3	2	**36**
86	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
21	Погон транспортера Т1	Контрола	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
34	Транспортер Т4	Закошење траке	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
19	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
48	Пресип Т3-Т4	Неисправна завеса	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
25	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
41	Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
51	Транспортер Т1	Отказ жабица	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
52	Транспортер Т1	Отказ сајлица	507.25	6	9.29	2	2	**24**
33	Транспортер Т3	Закошење траке	1775.79	5	7.50	2	2	**20**
45	Транспортер Т4	Проклизавање траке	3551.67	3	10.00	2	3	**18**
31	Транспортер Т1	Закошење траке	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
35	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
53	Транспортер Т3	Отказ сајлица	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
27	Транспортер Т2	Раскачивање ролни	3551.75	3	5.00	1	3	**9**
43	Транспортер Т1	Проклизавање траке	3551.75	3	5.00	1	3	**9**

С обзиром на следеће чињенице:

- да међу отказима у појединим подсистемима постоје сродности по природи и месту појављивања (целини) начину отклањања, као и вероватноћи детекције мерама планско-превентивног одржавања;
- да начин вођења документа „Рад и застој I БТО система“ није једнообразан, односно да се иста врста отказа различито назива;
- да се описи отказа разликују по прецизности идентификације целине у којима су се десили;

у наставку анализе извршено је груписање отказа у подсистемима 4 (механизам за транспорт багера - МТБ, табела 6.26) и 5 (механизам за транспорт материјала - МТМ, табела 6.27) на начин приказан у табели 6.28. То је условило промену ранга критичности појединих врста отказа у поменутим подсистемима, табеле 6.29 и 6.30.

Табела 6.28. Груписани откази у подсистемима 4 (МТБ) и 5(МТМ)

Ознака	Ознаке груписаних отказа*	Целина	Опис	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)
1	2	3	4	5	6	7
90	69,70	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	4	6	90
91	71-73	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	11	530
92	68,74	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	4	12	285
93	75,76,89	Гусенични ланац	Отказ папуча	4	13	2320
94	36,37	Транспортери	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	8	2780
95	57-59	Чворна места	Загушење	5	34	825
96	60-63,66	Транспортери	Запрљаност	5	19	605
97	31-34	Транспортери	Закошење траке	5	8	115
98	8,46-48	Чворна места	Неисправна завеса	5	10	525
99	50,51	Транспортери	Отказ жабица	5	21	955
100	52-55	Транспортери	Отказ сајлица	5	14	175
101	43-45	Транспортери	Проклизавање траке	5	9	70
102	26-28	Транспортери	Раскачивање ролни	5	5	85
103	39-40	Транспортери	Оштећење траке	5	5	1205
104	24,67	Централни левак	Отказ гребача	5	2	550

*Према табели 6.15

Табела 6.29. Степени критичности отказа МТБ (подсистем 4) након груписања отказа

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања *(PF)*	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица *(FDV)*	Ранг вероватноће откривања *(PFR)*	Ранг критичности *(RPN)*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
93	Гусенични ланац	Отказ папуча	270.24	7	178.46	6	4	**168**
80	Гусеница багера	Отказ тркача	1773.29	5	157.50	6	5	**150**
91	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	322.09	7	48.18	5	4	**140**
92	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	295.59	7	23.75	4	4	**112**
78	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	1183.00	5	56.67	5	4	**100**
83	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	3543.83	3	480.00	7	4	**84**
84	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	3550.33	3	90.00	6	4	**72**
90	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	591.71	6	15.83	3	4	**72**
77	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	3547.33	3	270.00	7	3	**63**
79	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	3551.17	3	40.00	5	4	**60**
81	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	3550.25	3	95.00	6	3	**54**
85	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
82	Гусеница багера	Дислокација колица	3551.67	3	10.00	2	4	**24**

Табела 6.29. Степени критичности отказа МТМ (подсистем 5) након груписања отказа

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања *(PF)*	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица *(FDV)*	Ранг вероватноће откривања *(PFR)*	Ранг критичности *(RPN)*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (запаљење)	3551.50	3	20.00	9	9	**243**
22	Погон централног левка	Отказ	704.70	6	340.00	7	4	**168**
65	Централни левак	Отказ гребача	1769.96	5	357.50	7	4	**140**
96	Транспортери	Запрљаност	186.41	7	31.84	5	4	**140**
99	Транспортери	Отказ жабица	168.38	7	45.48	5	4	**140**
104	Централни левак	Отказ гребача	1771.33	5	275.00	7	4	**140**
94	Транспортери	Дотрајалост траке (неопходна замена)	438.19	6	347.50	7	3	**126**
103	Транспортери	Оштећење траке	706.35	6	241.00	7	3	**126**
95	Чворна места	Загушење	104.06	7	24.26	4	4	**112**
98	Чворна места	Неисправна завеса	354.31	7	52.50	5	3	**105**
20	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	3546.50	3	320.00	7	4	**84**

Табела 6.29. (наставак)

64	Гребачи	Отказ	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
38	Транспортер Т1	Неисправна трака	887.60	6	21.25	4	3	**72**
42	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	1774.71	5	72.50	6	2	**60**
102	Транспортери	Раскачивање ролни	710.08	6	17.00	3	3	**54**
23	Погон централног левка	Контрола	3551.25	3	35.00	5	3	**45**
56	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	1775.58	5	20.00	3	3	**45**
100	Транспортери	Отказ сајлица	253.49	7	12.50	3	2	**42**
101	Транспортери	Проклизавање траке	394.52	7	7.78	2	3	**42**
18	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
29	Колица	Отказ петоделног слога ролни	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
49	Транспортер Т4	Контрола	507.19	6	12.86	3	2	**36**
86	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
97	Транспортери	Закошење траке	443.74	6	14.38	3	2	**36**
21	Погон транспортера Т1	Контрола	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
19	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
25	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
41	Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
35	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	3551.67	3	10.00	2	2	**12**

Сумарни прикази релевантних података за све врсте отказа који су се у референтном периоду јавили у свим подсистемима роторног багера, презентирани су у табелама 6.30 и 6.31, при чему су откази наведени у опадајућем поретку вредности степена критичности.

Начелно, снижавање вредности степена критичности одређене врсте отказа остварује се снижавањем бројних вредности ранга вероватноће – учестаности појављивања (*PF*) и/или ранга тежине последица (*FDV*) и/или ранга вероватноће детекције/предикције отказа (*PFR*). То се реализује применом одговарајућих корективних мера током пројектовања, израде или одржавања разматраног техничког система, табела 6.32. Дакле, применом превентивних и корективних мера током одржавања система могуће је утицати само на вредности *PFR*, што указује на изузетан значај спровођења FMECA анализа од најранијих фаза животног циклуса система. У наставку анализе презентирани су резултати примене FMECA одржавања на шест врста отказа са највећим степеном критичности, табела 6.33.

Табела 6.32. Утицај корективних мера на вредности ранга вероватноће појављивања, тежине последица и вероватноће детекције/предикције отказа

Фаза	*PF*	*FDV*	*PFR*
1	2	3	4
Пројектовање система	**да**	**да**	**да**
Израда система	**да**	**не**	**да**
Одржавање система	**да**	**не**	**да**

Табела 6.30. Степен критичности непланираних машинских отказа/застоја (ознаке отказа/застоја према табели 6.15)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив		низак		средњи		висок		екстремни	
🟩	RPN≤20	🟩	20<RPN≤70	🟨	70<RPN≤200	🟧	200<RPN≤400	🟥	RPN>400

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватноће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
30		🟧	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (запаљење)	5	1	20	3551.50	3	20.00	9	9	**243**
5		🟧	Полумесец ротора	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	7	2800	500.74	6	400.00	7	4	**168**
22		🟧	Погон централног левка	Отказ	5	5	1700	704.70	6	340.00	7	4	**168**
4		🟧	Полумесец ротора	Отказ заварених веза	1	2	275	1773.63	5	137.50	6	5	**150**
80		🟧	Гусеница багера	Отказ тркача	4	2	315	1773.29	5	157.50	6	5	**150**
75		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ папуча	4	5	1095	706.72	6	219.00	6	4	**144**
76		🟧	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ папуча	4	6	1015	589.15	6	169.17	6	4	**144**
71		🟧	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	9	390	393.93	7	43.33	5	4	**140**
50		🟧	Транспортер Т4	Отказ жабица	5	20	945	176.80	7	47.25	5	4	**140**
65		🟧	Централни левак	Отказ гребача	5	2	715	1769.96	5	357.50	7	4	**140**
37		🟧	Транспортер Т4	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	7	2710	500.95	6	387.14	7	3	**126**
88		🟧	Сливник и полумесец ротора	Отказ заварених и завртањских веза	1	2	450	1772.17	5	225.00	6	4	**120**
89		🟧	Гусенични ланац	Отказ папуче	4	2	210	1774.17	5	105.00	6	4	**120**
59		🟧	Пресип Т3-Т4	Загушење	5	4	125	887.44	6	31.25	5	4	**120**
60		🟧	Транспортер Т2	Запрљаност траке	5	7	260	506.79	6	37.14	5	4	**120**
68		🟧	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	4	10	250	354.77	7	25.00	4	4	**112**
58		🟧	Централни левак	Загушење	5	25	645	141.64	7	25.80	4	4	**112**
8		🟧	Транспортери и чворна места	Откази завеса	5	4	375	886.40	6	93.75	6	3	**108**
9		🟧	Кашике	Загушење	1	9	280	394.13	7	31.11	5	3	**105**
39		🟧	Транспортер Т3	Отказ споја траке	5	3	1100	1177.83	5	366.67	7	3	**105**
78		🟧	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	4	3	170	1183.00	5	56.67	5	4	**100**
61		🟧	Транспортер Т1	Запрљаност троугластог брисача на повратном бубњу	5	2	85	1775.21	5	42.50	5	4	**100**
63		🟧	Транспортер Т3	Налеп косог лима	5	2	80	1775.25	5	40.00	5	4	**100**
62		🟧	Транспортери	Запрљаност одбојних бубњева	5	4	120	887.46	6	30.00	4	4	**96**
2		🟧	Сливник ротора	Отказ заварене везе хабајућих шина	1	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
17		🟧	Шлајфингер	Дислокација ролнице	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
83		🟧	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	4	1	480	3543.83	3	480.00	7	4	**84**
20		🟧	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	5	1	320	3546.50	3	320.00	7	4	**84**

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
67		🟧	Централни левак	Лом гребача	5	1	440	3544.50	3	440.00	7	4	**84**
70		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице	4	3	65	1183.58	5	21.67	4	4	**80**
1		🟧	Сливник ротора	Отказ завртањских веза	1	2	100	1775.08	5	50.00	5	3	**75**
3		🟧	Ротор	Отказ заварене везе поклопца	1	1	55	3550.92	3	55.00	5	5	**75**
40		🟧	Транспортер Т4	Оштећење траке	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
46		🟧	Истоварни левак	Неисправна завеса	5	3	105	1183.36	5	35.00	5	3	**75**
64		🟧	Гребачи	Отказ	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
72		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	120	3549.83	3	120.00	6	4	**72**
84		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	4	1	90	3550.33	3	90.00	6	4	**72**
24		🟧	Централни левак	Отказ заварених веза гребача	5	1	110	3550.00	3	110.00	6	4	**72**
38		🟧	Транспортер Т1	Неисправна трака	5	4	85	887.60	6	21.25	4	3	**72**
57		🟧	Истоварни левак	Загушење	5	5	55	710.18	6	11.00	3	4	**72**
66		🟧	Одбојни бубањ	Запрљаност	5	4	60	887.71	6	15.00	3	4	**72**
6		🟧	Зуби кашика	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	26	1420	135.70	7	54.62	5	2	**70**
77		🟧	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	4	1	270	3547.33	3	270.00	7	3	**63**
12	🟧		Полумесец ротора	Контрола	1	7	350	506.57	6	50.00	5	2	**60**
74		🟧	Гусенични ланац претоварног уређаја	Отказ заварене везе осигурања	4	2	35	1775.63	5	17.50	3	4	**60**
79		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	4	1	40	3551.17	3	40.00	5	4	**60**
42		🟧	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	5	2	145	1774.71	5	72.50	6	2	**60**
10		🟧	Ротор	Налеп на конусу	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	3	**54**
16		🟧	Погон МКК	Отказ гумица	2	1	75	3550.58	3	75.00	6	3	**54**
81		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	95	3550.25	3	95.00	6	3	**54**
36		🟧	Транспортер Т2	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	1	70	3550.67	3	70.00	6	3	**54**
15		🟧	Погон МКК	Несаосност мотора	2	1	40	3551.17	3	40.00	5	3	**45**
23	🟧		Погон централног левка	Контрола	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	3	**45**
26		🟧	Транспортер Т1	Раскачивање ролни	5	3	50	1183.67	5	16.67	3	3	**45**
47		🟧	Транспортер Т4	Неисправна завеса	5	2	30	1775.67	5	15.00	3	3	**45**
56		🟧	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	5	2	40	1775.58	5	20.00	3	3	**45**
11		🟧	Погон ротора	Отказ система подмазивања	1	10	95	355.02	7	9.50	2	3	**42**
69		🟧	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	4	3	30	1183.78	5	10.00	2	4	**40**
32		🟧	Транспортер Т2	Закошење траке	5	3	65	1183.58	5	21.67	4	2	**40**

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
55		🟧	Транспортери	Отказ сајлица	5	2	50	1775.50	5	25.00	4	2	**40**
7		🟧	Зуби кашика	Похабаност	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	2	**36**
14	🟧		Погон ротора	Контрола	1	1	75	3550.58	3	75.00	6	2	**36**
73		🟧	Гусенични ланац претоварног уређаја	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	20	3551.50	3	20.00	3	4	**36**
18		🟧	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
28		🟧	Пресип Т3-Т4	Раскачивање ролни	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
29		🟧	Колица	Отказ петоделног слога ролни	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
44		🟧	Транспортер Т3	Проклизавање траке	5	7	55	507.27	6	7.86	2	3	**36**
49	🟧		Транспортер Т4	Контрола	5	7	90	507.19	6	12.86	3	2	**36**
54		🟧	Транспортер Т4	Отказ сајлица	5	4	50	887.75	6	12.50	3	2	**36**
86		🟧	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
85		🟧	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	4	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
21	🟧		Погон транспортера Т1	Контрола	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
34		🟧	Транспортер Т4	Закошење траке	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
87	🟧		Нераспоређено			6	255	591.26	6	42.50	5	1	**30**
19		🟧	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
48		🟧	Пресип Т3-Т4	Неисправна завеса	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
82		🟧	Гусеница багера	Дислокација колица	4	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
25		🟧	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
41	🟧		Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	5	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
51		🟧	Транспортер Т1	Отказ жабица	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
52		🟧	Транспортер Т1	Отказ сајлица	5	7	65	507.25	6	9.29	2	2	**24**
33		🟧	Транспортер Т3	Закошење траке	5	2	15	1775.79	5	7.50	2	2	**20**
45		🟧	Транспортер Т4	Проклизавање траке	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	3	**18**
13	🟧		Ротор	Контрола	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
31		🟧	Транспортер Т1	Закошење траке	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
35		🟧	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
53		🟧	Транспортер Т3	Отказ сајлица	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
27		🟧	Транспортер Т2	Раскачивање ролни	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	**9**
43		🟧	Транспортер Т1	Проклизавање траке	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	**9**

Табела 6.31. Степен критичности непланираних машинских отказа/застоја: груписани сродни откази у подсистемима 4 (МТБ) и 5 (МТМ) (ознаке отказа/застоја према табелама 6.15 и 6.28)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив	низак	средњи	висок	екстремни
🟩 RPN≤20	🟩 20<RPN≤70	🟨 70<RPN≤200	🟧 200<RPN≤400	🟥 RPN>400

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
30		🟧	Повратна ролна на Т3	Блокирање ролне (запаљење)	5	1	20	3551.50	3	20.00	9	9	**243**
5		🟧	Полумесец ротора	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	7	2800	500.74	6	400.00	7	4	**168**
93		🟧	Гусенични ланац	Отказ папуча	4	13	2320	270.24	7	178.46	6	4	**168**
22		🟧	Погон централног левка	Отказ	5	5	1700	704.70	6	340.00	7	4	**168**
4		🟧	Полумесец ротора	Отказ заварених веза	1	2	275	1773.63	5	137.50	6	5	**150**
80		🟧	Гусеница багера	Отказ тркача	4	2	315	1773.29	5	157.50	6	5	**150**
91		🟧	Гусенични ланац	Дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	11	530	322.09	7	48.18	5	4	**140**
65		🟧	Централни левак	Отказ гребача	5	2	715	1769.96	5	357.50	7	4	**140**
96		🟧	Транспортери	Запрљаност	5	19	605	186.41	7	31.84	5	4	**140**
99		🟧	Транспортери	Отказ жабица	5	21	955	168.38	7	45.48	5	4	**140**
104		🟧	Централни левак	Отказ гребача	5	2	550	1771.33	5	275.00	7	4	**140**
94		🟧	Транспортери	Дотрајалост траке (неопходна замена)	5	8	2780	438.19	6	347.50	7	3	**126**
103		🟧	Транспортери	Оштећење траке	5	5	1205	706.35	6	241.00	7	3	**126**
88		🟧	Сливник и полумесец ротора	Отказ заварених и завртањских веза	1	2	450	1772.17	5	225.00	6	4	**120**
92		🟧	Гусенични ланац	Отказ заварене везе осигурања	4	12	285	295.59	7	23.75	4	4	**112**
95		🟧	Чворна места	Загушење	5	34	825	104.06	7	24.26	4	4	**112**
9		🟧	Кашике	Загушење	1	9	280	394.13	7	31.11	5	3	**105**
98		🟧	Чворна места	Неисправна завеса	5	10	525	354.31	7	52.50	5	3	**105**
78		🟧	Гусенични ланац	Отказ кутијастог носача папуче	4	3	170	1183.00	5	56.67	5	4	**100**
2		🟧	Сливник ротора	Отказ заварене везе хабајућих шина	1	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
17		🟧	Шлајфингер	Дислокација ролнице	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	**90**
83		🟧	Гусенични ланац	Дислокација ланца и отказ папуче	4	1	480	3543.83	3	480.00	7	4	**84**
20		🟧	Погон транспортера Т4	Отказ редуктора	5	1	320	3546.50	3	320.00	7	4	**84**
1		🟧	Сливник ротора	Отказ завртањских веза	1	2	100	1775.08	5	50.00	5	3	**75**
3		🟧	Ротор	Отказ заварене везе поклопца	1	1	55	3550.92	3	55.00	5	5	**75**
64		🟧	Гребачи	Отказ	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	**75**
84		🟧	Гусенични ланац багера	Дислокација гусеничног ланца	4	1	90	3550.33	3	90.00	6	4	**72**
90		🟧	Гусенични ланац	Дислокација осовинице	4	6	95	591.71	6	15.83	3	4	**72**
38		🟧	Транспортер Т1	Неисправна трака	5	4	85	887.60	6	21.25	4	3	**72**
6		🟧	Зуби кашика	Губитак интегритета (неопходна замена)	1	26	1420	135.70	7	54.62	5	2	**70**

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватноће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
77		🟧	Гусенични ланац багера	Растављање ланца	4	1	270	3547.33	3	270.00	7	3	**63**
12	🟧		Полумесец ротора	Контрола	1	7	350	506.57	6	50.00	5	2	**60**
79		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ осовинице	4	1	40	3551.17	3	40.00	5	4	**60**
42		🟧	Транспортер Т4	Незатегнутост траке	5	2	145	1774.71	5	72.50	6	2	**60**
10		🟧	Ротор	Налеп на конусу	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	3	**54**
16		🟧	Погон МКК	Отказ гумица	2	1	75	3550.58	3	75.00	6	3	**54**
81		🟧	Гусенични ланац багера	Отказ папуче, дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	4	1	95	3550.25	3	95.00	6	3	**54**
102		🟧	Транспортери	Раскачивање ролни	5	5	85	710.08	6	17.00	3	3	**54**
15		🟧	Погон МКК	Несаосност мотора	2	1	40	3551.17	3	40.00	5	3	**45**
23	🟧		Погон централног левка	Контрола	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	3	**45**
56		🟧	Погонски бубањ	Отказ заштите погонског бубња	5	2	40	1775.58	5	20.00	3	3	**45**
11		🟧	Погон ротора	Отказ система подмазивања	1	10	95	355.02	7	9.50	2	3	**42**
100		🟧	Транспортери	Отказ сајлица	5	14	175	253.49	7	12.50	3	2	**42**
101		🟧	Транспортери	Проклизавање траке	5	9	70	394.52	7	7.78	2	3	**42**
7		🟧	Зуби кашика	Похабаност	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	2	**36**
14	🟧		Погон ротора	Контрола	1	1	75	3550.58	3	75.00	6	2	**36**
18		🟧	Погон транспортера Т1	Отказ заптивке	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
29		🟧	Колица	Отказ петоделног слога ролни	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
49	🟧		Транспортер Т4	Контрола	5	7	90	507.19	6	12.86	3	2	**36**
86		🟧	Одбојни бубањ	Неподешеност гребача	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	**36**
97		🟧	Транспортери	Закошење траке	5	8	115	443.74	6	14.38	3	2	**36**
85		🟧	Погон гусенице багера	Неподешеност кочнице	4	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
21	🟧		Погон транспортера Т1	Контрола	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	**30**
87	🟧		Нераспоређено			6	255	591.26	6	42.50	5	1	**30**
19		🟧	Погон транспортера Т4	Дислокација осовинице кочнице	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	**27**
82		🟧	Гусеница багера	Дислокација колица	4	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
25		🟧	Одбојни бубањ	Отказ сегмента гребача	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	**24**
41	🟧		Транспортер Т3	Контрола затегнутости траке	5	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
13	🟧		Ротор	Контрола	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
35		🟧	Транспортер Т4	Отказ ланца на усмеривачу	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**

Табела 6.33. FMECA одржавања роторног багера SRs 2000x32/5+VR (непланирани машински откази/застоји)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив 🟩 RPN≤20

низак 🟩 20<RPN≤70

средњи 🟨 70<RPN≤200

висок 🟧 200<RPN≤400

екстремни 🟥 RPN>400

Група градње	Целина	Отказ				Постојеће стање					Побољшано стање				
		ознака	опис	последица	узрок	Превентивне мере	PF	FDV	PFR	RPN	Корективне мере	PF	FDV	PFR	RPN
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
МТМ	повратна ролна Т3	30	блокирање ролне	самозапаљење	блокирање улежиштења	визуелна контрола	3	9	9	**243**	појачана визуелна контрола функционалности	3	9	3	**81**
											примена дијагностике	3	9	2	**54**
											континуални мониторинг	3	9	1	**27**
МКМ	полумесец ротора	5	губитак интегритета (знатна оштећења која захтевају замену сегмената)	нерегуларан рад, губитак капацитета	грешка у монтажи и извођењу веза; неадекватан материјал	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	6	7	4	**168**	појачана контрола монтаже и појачана визуелна контрола стања	5	7	2	**70**
											реатестација уграђених материјала и појачана визуелна контрола стања	4	7	2	**56**
											реатестација уграђених материјала, појачана контрола монтаже и појачана визуелна контрола стања	2	7	2	**28**
МТМ	погон централног левка	22	демонтажа и монтажа погона	смањен проток материјала, губитак капацитета	отежано кретање материјала кроз левак	визуелна контрола; чишћење	6	7	4	**168**	појачана визуела контрола и чишћење	6	7	2	**84**
											коришћење посебних превлака за смањење ефекта лепљења материјала и појачани надзор	3	7	2	**42**
МТБ	гусенични ланац	93	губитак интегритета папуча (неопходна замена)	нерегуларно кретање гусеница; повећани отпори кретања и појачана неравномерност оптерећења	неадекватна припрема планума; неадекватан материјал папуче; грешке у изради папуче	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	7	6	4	**168**	појачана визуелна контрола стања папуча	7	6	2	**84**
											боља припрема планума, појачана визуелна контрола стања папуча	3	6	2	**36**
											прописана припрема планума, појачана контрола материјала и процеса израде папуча, појачана визуелна контрола стања папуча	1	6	2	**12**
МТБ	гусеница багера	80	отказ тркача (неопходна замена)	нерегуларно кретање, повећани отпори кретања и појачана неравномерност оптерећења	неадекватна припрема планума; неадекватан материјал тркача; грешке у изради тркача	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	5	6	5	**150**	појачана визуелна контрола стања тркача	5	6	3	90
											прописана припрема планума, појачана визуелна контрола стања тркача	3	6	3	54
											прописана припрема планума, појачана визуелна контрола стања тркача	2	6	3	36
МТБ	гусенични ланац	91	оштећење и дислокација осовинице и отказ заварене везе осигурања	нерегуларно кретање, раскачивање ланца	грешке у монтажи; неадекватан избор материјала	визуелна контрола; атести материјала добијени од испоручиоца	7	5	4	**140**	појачана контрола монтаже	5	5	4	**100**
											реатестација уграђених материјала и појачана контрола монтаже	3	5	3	**45**

6.10.2 FMECA непланираних електро отказа

На основу електронског дневника рада/застоја I БТО система формирана је табела 6.34 са основним подацима о отказу/застоју: ознака (колона 1) целина (подсклоп) у којој се јавио (колона 2) кратки опис (колона 3) подсистем коме припада подсклоп у застоју/отказу (колона 4) укупан број појављивања (колона 5) и укупно време трајања (колона 6) у референтном периоду. Учешћа појединих подсистема у укупном броју и времену трајања непланираних електро застоја приказана су у табелама 6.35 и 6.36, као и на сликама 6.13 и 6.14.

Табела 6.34. Опис непланираних електро отказа/застоја разврстаних према месту настанка (подсистему)

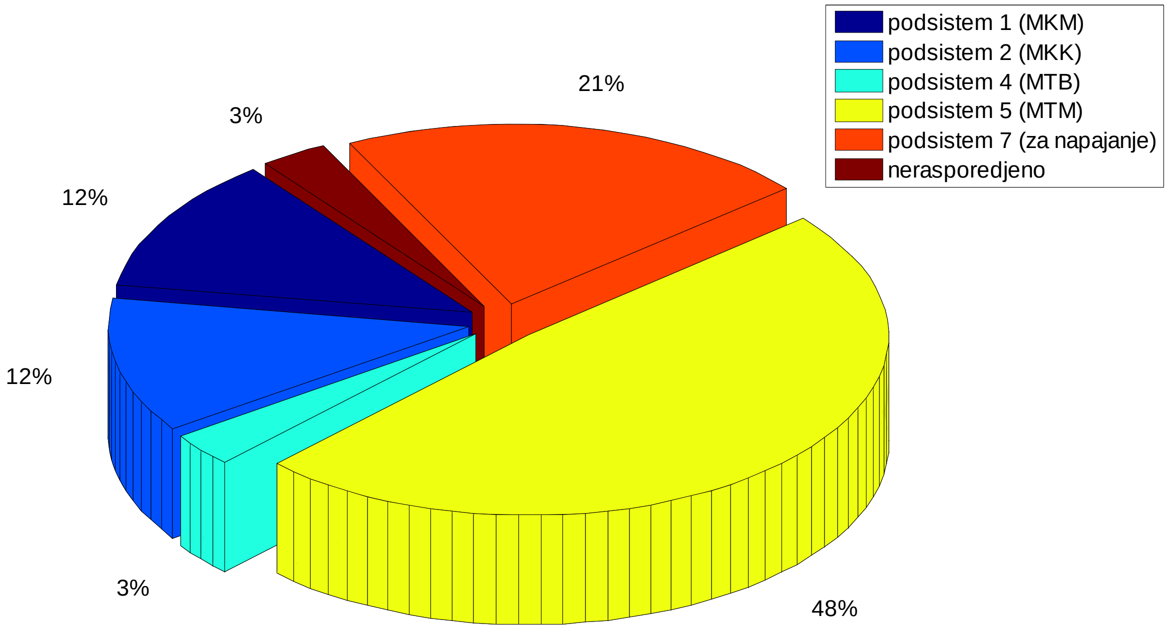
Ознака	Целина	Опис	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)
1	2	3	4	5	6
1	Коло сигнала старта ротора	Отказ	1	2	20
2	Радна блокада	Отказ	1	1	10
3	Електромагнетна спојница	Контрола	1	1	25
4	Команда горње градње	Кратки спој	2	2	20
5	Шлајфингер	Санација електричних водова	2	1	120
6	Шлајфингер	Дислокација електричних водова	2	1	5
7	МТБ	Отказ	4	1	5
8	Централни левак	Отказ мотора	5	2	140
9	Централни левак	Отказ заштите мотора	5	1	100
10	Потезно уже Т3	Активирање	5	1	5
11	Мотор одбојног бубња	Отказ (демонтажа)	5	1	45
12	Мотор одбојних бубњева	Отказ (замена)	5	1	85
13	Горњи мотор одбојног бубња	Отказ (замена)	5	1	200
14	Откочник Т2	Отказ	5	4	35
15	Мотор Т3	Отказ термичке заштите	5	1	15
16	Мотор истоварног левка	Отказ	5	1	35
17	Мотор истоварног левка	Отказ (замена)	5	1	45
18	Кочница погона истоварног левка	Контрола	5	1	10
19	Команда погона централног левка	Отказ	5	1	10
20	Осигурачи	Испад	7	1	10
21	Нисконапонско напајање	Отказ	7	1	10
22	Високонапонски кабл	Пробој	7	4	540
23	Подсистем напајања	Контрола	7	1	10
24	Нераспоређено			1	115

Табела 6.35. Учешће подсистема у укупном броју непланираних електро застоја

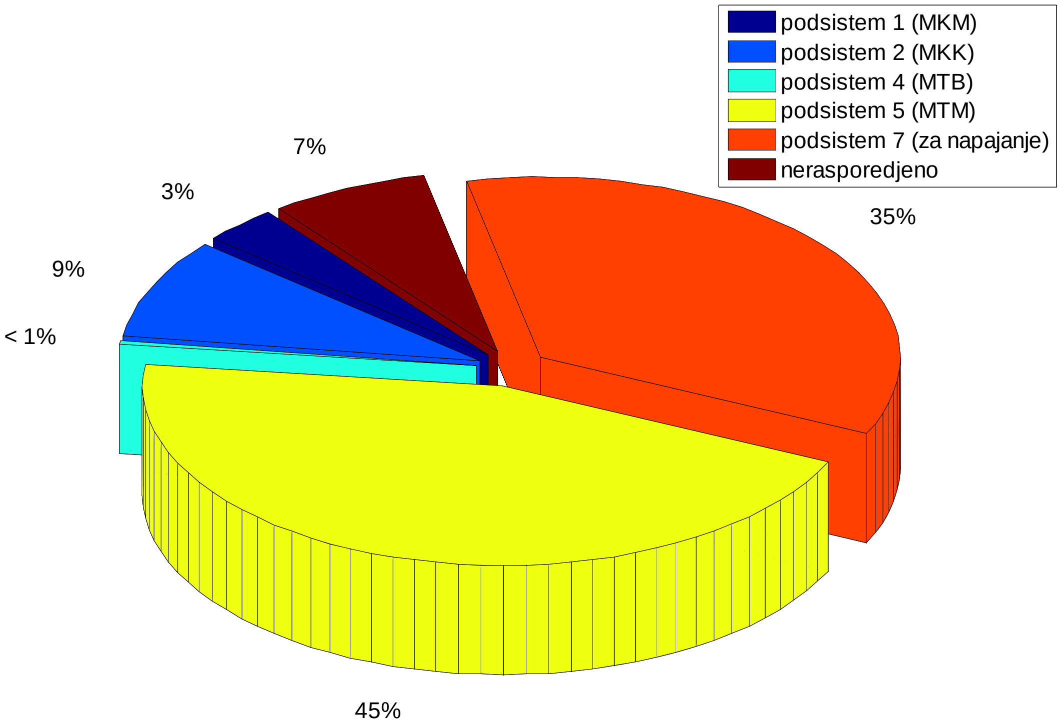
Подсистем	Број застоја	Учешће (%)
1	2	3
МКМ (1)	4	12.12
МКК (2)	4	12.12
МТБ (4)	1	3.03
МТМ (5)	16	48.48
Подсистем за напајање (7)	7	21.21
Нераспоређено	1	3.03
Укупно	**33**	**100**

Табела 6.36. Учешће подсистема у укупном времену трајања непланираних електро застоја

Подсистем	Време застоја (min)	Учешће (%)
1	2	3
МКМ (1)	55	3.41
МКК (2)	145	8.98
МТБ (4)	5	0.31
МТМ (5)	725	44.89
Подсистем за напајање (7)	570	35.29
Нераспоређено	115	7.12
Укупно	**1615**	**100**



Слика 6.13. Процентуално учешће подсистема у укупном броју непланираних електро застоја



Слика 6.14. Процентуално учешће подсистема у укупном времену трајања непланираних електро застоја

С обзиром на чињенице:

- да се у подсистему 4 (МТБ) јавио само један непланирани електро отказ који у документу „Рад и застој I БТО система“ није једнозначно идентификован;
- да је време његовог трајања (5 min) занемарљиво мало;

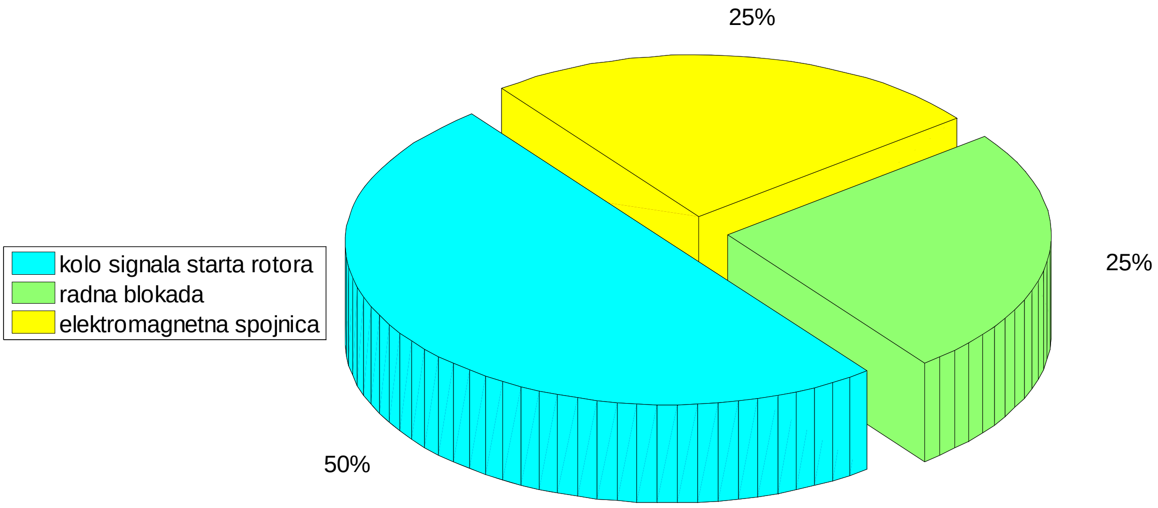
у наставку анализе презентирано је учешће доминантних целина (подсклопова) у укупном броју и времену трајања непланираних електро застоја у подсистемима 1 (МКМ) 2 (МКК) 5 (МТМ) и 7 (подсистем за напајање), табеле 6.37-6.44, слике 6.15-6.22.

Табела 6.37. Подсистем МКМ (1): учешће подсклопова у укупном броју непланираних електро отказа/застоја

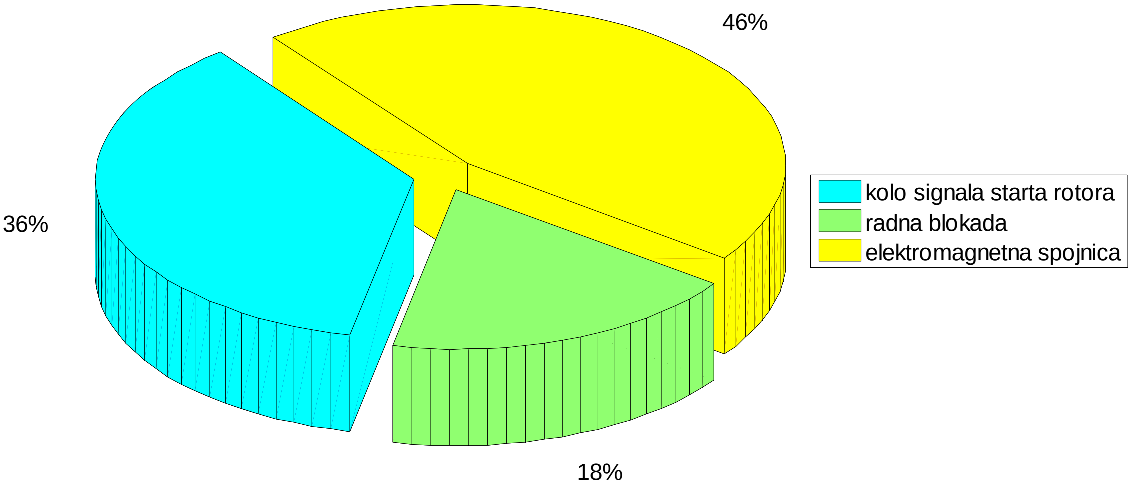
Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
1	2	3	4
Коло сигнала старта ротора	1	2	50
Радна блокада	2	1	25
Електромагнетна спојница	3	1	25
	Укупно:	**4**	**100**

Табела 6.38. Подсистем МКМ (1): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних електро отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време трајања (min)	Учешће (%)
1	2	3	4
Коло сигнала старта ротора	1	20	36.36
Радна блокада	2	10	18.18
Електромагнетна спојница	3	25	45.45
	Укупно:	**55**	**100**



Слика 6.15. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних електро застоја МКМ (1)



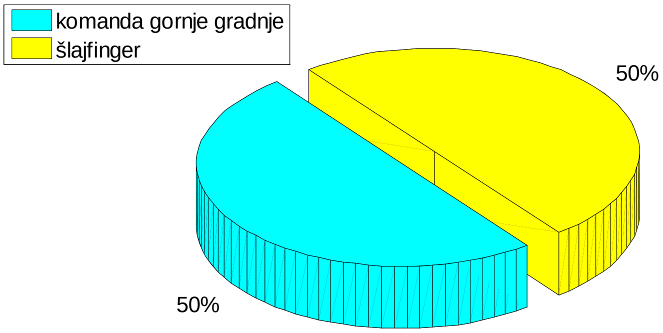
Слика 6.16. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних електро застоја МКМ (1)

Табела 6.39. Подсистем МКК (2): учешће подсклопова у укупном броју непланираних електро отказа/застоја

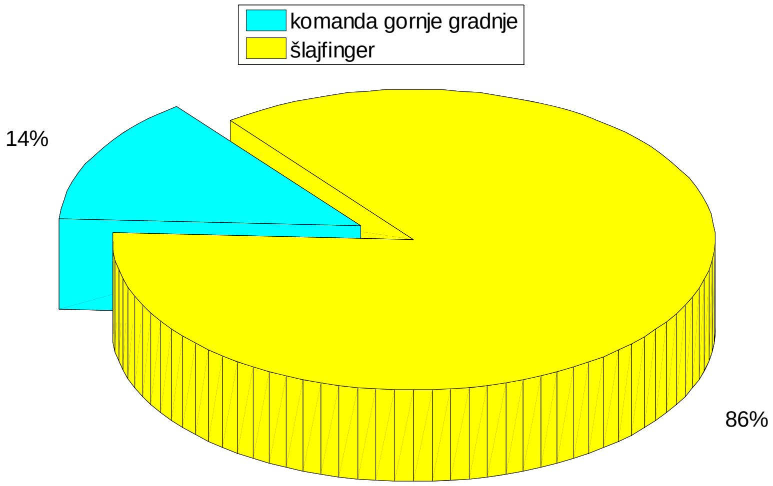
Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
1	2	3	4
Команда гоњеградње	4	2	50
Шлајфингер	5,6	2	50
	Укупно:	**4**	**100**

Табела 6.40. Подсистем МКК (2): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних електро отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време трајања (min)	Учешће (%)
1	2	3	4
Команда гоње градње	4	20	13.79
Шлајфингер	5,6	125	86.21
	Укупно:	**145**	**100**



Слика 6.17. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних електро застоја МКК (2)



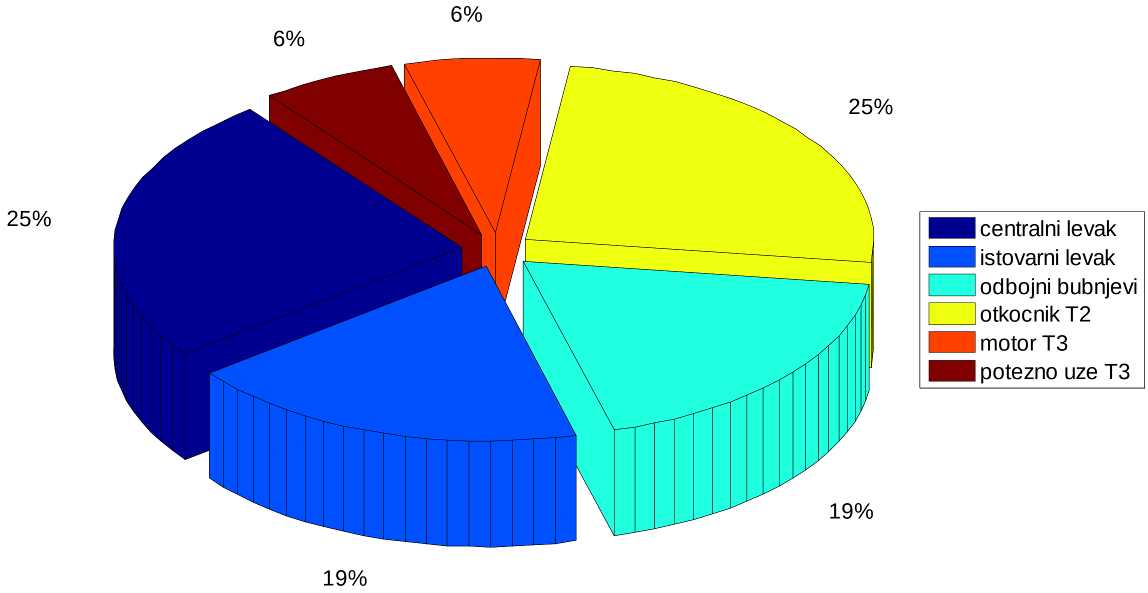
Слика 6.18. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних електро застоја МКК (2)

Табела 6.41. Подсистем МТМ (5): учешће подсклопова у укупном броју непланираних електро отказа/застоја

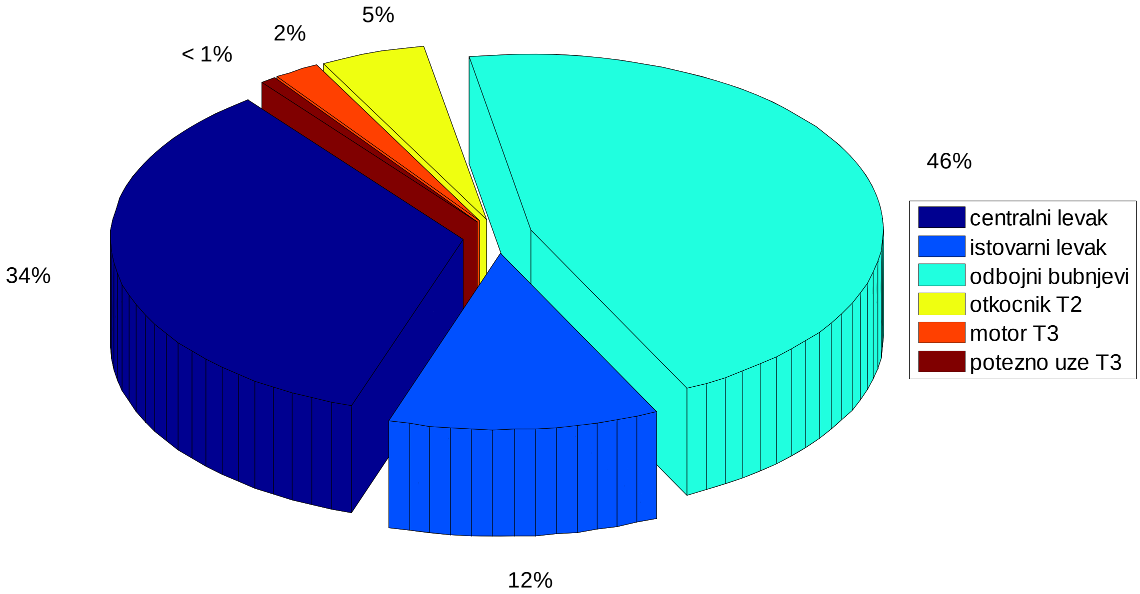
Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
Централни левак	8,9,19	4	25.00
Истоварни левак	16,17,18	3	18.75
Одбојни бубњеви	11,12,13	3	18.75
Откочник Т2	14	4	25.00
Мотор Т3	15	1	6.25
Потезно уже Т3	10	1	6.25
	Укупно:	**16**	**100**

Табела 6.42. Подсистем МТМ (5): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних електро отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време трајања (min)	Учешће (%)
Централни левак	8,9,19	250.00	34.48
Истоварни левак	16,17,18	90.00	12.41
Одбојни бубњеви	11,12,13	330.00	45.52
Откочник Т2	14	35.00	4.83
Мотор Т3	15	15.00	2.07
Потезно уже Т3	10	5.00	0.69
	Укупно:	**725**	**100**



Слика 6.19. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних електро застоја МТМ (5)



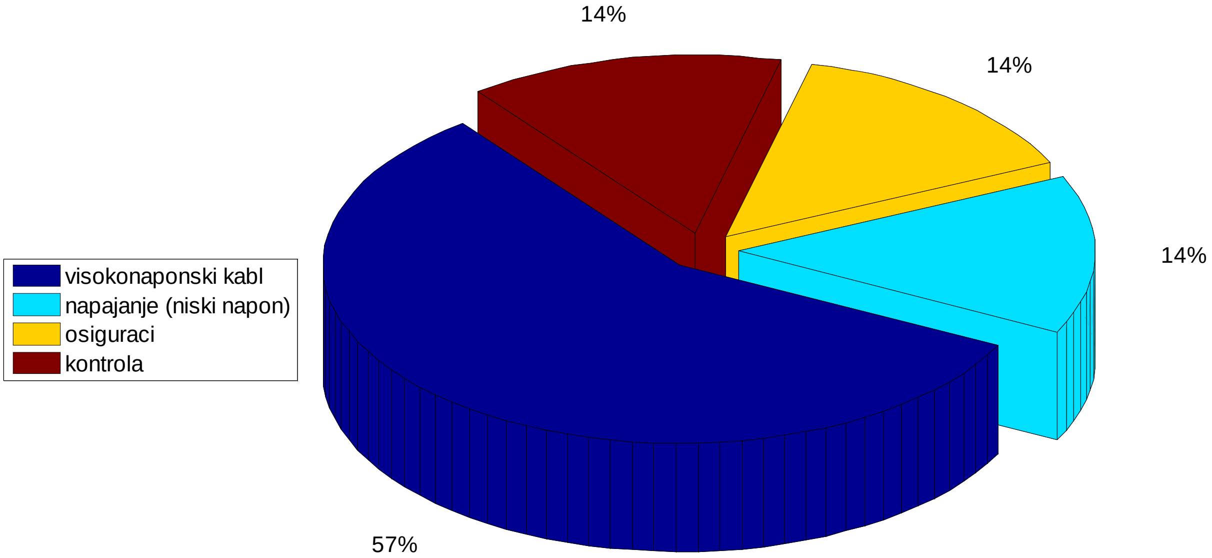
Слика 6.20. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних електро застоја МТМ (5)

Табела 6.43. Подсистем за напајање (7): учешће подсклопова у укупном броју непланираних електро отказа/застоја

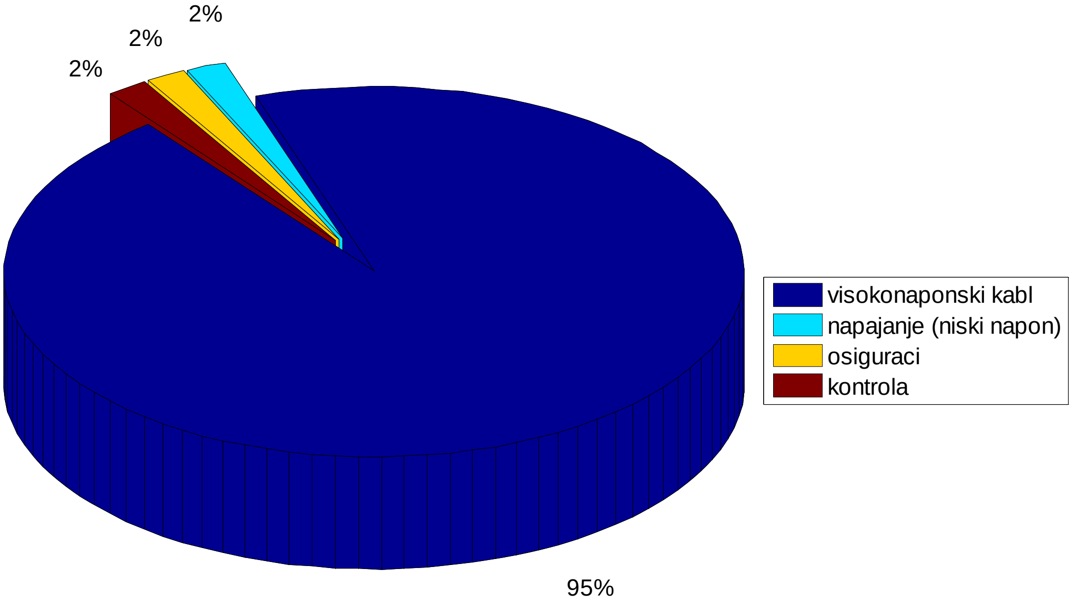
Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Број	Учешће (%)
Високонапонски кабл	22	4	57.14
Напајање	21	1	14.29
Осигурачи	20	1	14.29
Контрола	23	1	14.29
	Укупно:	**7**	**100**

Табела 6.44. Подсистем за напајање (7): учешће подсклопова у укупном времену трајања непланираних електро отказа/застоја

Целина (подсклоп)	Ознака отказа/застоја	Време трајања (min)	Учешће (%)
Високонапонски кабл	22	540	94.74
Напајање (ниски напон)	21	10	1.75
Осигурачи	20	10	1.75
Контрола	23	10	1.75
	Укупно:	**570**	**100**



Слика 6.21. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном броју непланираних електро застоја подсистема за напајање (7)



Слика 6.22. Процентуално учешће целина (подсклопова) у укупном времену трајања непланираних електро застоја подсистема за напајање (7)

Степени критичности појединих врста непланираних електро отказа/застоја дати су у табелама 6.45-6.48.

Табела 6.45. Степени критичности непланираних електро отказа МКМ (подсистем 1)

Легенда

Степен критичности (према методи Kineey)

RPN≤20 занемарљив **20<RPN≤70** низак **70<RPN≤200** средњи **200<RPN≤400** висок **RPN>400** екстремни

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватноће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Коло сигнала старта ротора	Отказ	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
3	Електромагнетна спојница	Контрола	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
2	Радна блокада	Отказ	3551.67	3	10.00	2	3	**18**

Табела 6.46. Степени критичности непланираних електро отказа МКК (подсистем 2)

Легенда

Степен критичности (према методи Kineey)

RPN≤20 занемарљив **20<RPN≤70** низак **70<RPN≤200** средњи **200<RPN≤400** висок **RPN>400** екстремни

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватноће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	Шлајфингер	Санација електричних водова	3549.83	3	120.00	6	4	**72**
4	Команда горње градње	Кратки спој	1775.75	5	10.00	2	4	**40**
6	Шлајфингер	Дислокација електричних водова	3551.75	3	5.00	1	4	**12**

Табела 6.47. Степени критичности непланираних електро отказа МТМ (подсистем 5)

Легенда

Степен критичности (према методи Kineey)

RPN≤20 занемарљив **20<RPN≤70** низак **70<RPN≤200** средњи **200<RPN≤400** висок **RPN>400** екстремни

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватноће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	Централни левак	Отказ мотора	1774.75	5	70.00	6	4	**120**
9	Централни левак	Отказ заштите мотора	3550.17	3	100.00	6	4	**72**
12	Мотор одбојних бубњева	Отказ (замена)	3550.42	3	85.00	6	4	**72**
13	Горњи мотор одбојног бубња	Отказ (замена)	3548.50	3	200.00	6	4	**72**
11	Мотор одбојног бубња	Отказ (демонтажа)	3551.08	3	45.00	5	4	**60**
14	Откочник Т2	Отказ	887.81	6	8.75	2	5	**60**
16	Мотор истоварног левка	Отказ	3551.25	3	35.00	5	4	**60**

Табела 6.47. (наставак)

17	Мотор истоварног левка	Отказ (замена)	3551.08	3	45.00	5	4	**60**
15	Мотор Т3	Отказ термичке заштите	3551.58	3	15.00	3	4	**36**
19	Команда погона централног левка	Отказ	3551.67	3	10.00	2	5	**30**
10	Потезно уже Т3	Активирање	3551.75	3	5.00	1	5	**15**
18	Кочница погона истоварног левка	Контрола	3551.67	3	10.00	2	2	**12**

Табела 6.48. Степени критичности непланираних електро отказа подсистема за напајање електричном енергијом (подсистем 7)

Легенда

Степен критичности (према методи Kineey)

RPN≤20 занемарљив **20<RPN≤70** низак **70<RPN≤200** средњи **200<RPN≤400** висок **RPN>400** екстремни

Ознака	Целина	Опис	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
22	Високонапонски кабл	Пробој	885.71	6	135.00	6	6	216
21	Нисконапонско напајање	Отказ	3551.67	3	10.00	2	9	54
20	Осигурачи	Испад	3551.67	3	10.00	2	8	48
23	Подсистем напајања	Контрола	3551.67	3	10.00	2	2	12

Сумарни приказ релевантних података за све врсте непланираних електро отказа који су се у референтном периоду јавили у свим подсистемима роторног багера, презентирани су у табели 6.49, при чему су откази наведени у опадајућем поретку вредности степена критичности. Предлог корективних мера за снижавање степена критичности пет врста непланираних електро отказа са највећом вредношћу степена критичности дат је у табели 6.50.

6.11 КРАТКИ ЗАКЉУЧЦИ – КОМЕНТАР

На основу презентираних резултата истраживања закључује се следеће:

- Метода FMECA, односно метод анализе врста (начина) отказа, њихових последица и критичности, користи се за идентификацију и анализу:
  - свих потенцијалних начина (врста) отказа различитих делова система;
  - последица које разматрани откази генеришу у анализираном систему;
  - начина елиминације отказа и/или ублажавања њихових ефеката.

Табела 6.49. Степен критичности непланираних електро отказа/застоја (ознаке отказа/застоја према табели 6.34)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив	низак	средњи	висок	екстремни
🟩 RPN≤20	🟩 20<RPN≤70	🟨 70<RPN≤200	🟧 200<RPN≤400	🟥 RPN>400

Ознака	Застој	Отказ	Целина	Врста	Подсистем	Укупан број појављивања	Укупно време трајања (min)	Просечно време између отказа (h)	Ранг вероватноће појављивања (PF)	Просечно време трајања (min)	Ранг тежине последица (FDV)	Ранг вероватоће откривања (PFR)	Ранг критичности (RPN)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
22		🟧	Високонапонски кабл	Пробој кабловске главе R045	7	4	540	885.71	6	135.00	6	6	**216**
8		🟧	Централни левак	Отказ мотора	5	2	140	1774.75	5	70.00	6	4	**120**
5		🟧	Шлајфингер	Санација електричних водова	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	4	**72**
9		🟧	Централни левак	Отказ заштите мотора	5	1	100	3550.17	3	100.00	6	4	**72**
12		🟧	Мотор одбојних бубњева	Отказ (замена)	5	1	85	3550.42	3	85.00	6	4	**72**
13		🟧	Горњи мотор одбојног бубња	Отказ (замена)	5	1	200	3548.50	3	200.00	6	4	**72**
11		🟧	Мотор одбојног бубња	Отказ (демонтажа)	5	1	45	3551.08	3	45.00	5	4	**60**
14		🟧	Откочник Т2	Отказ	5	4	35	887.81	6	8.75	2	5	**60**
16		🟧	Мотор истоварног левка	Отказ	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	4	**60**
17		🟧	Мотор истоварног левка	Отказ (замена)	5	1	45	3551.08	3	45.00	5	4	**60**
21		🟧	Нисконапонско напајање	Низак напон	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	9	**54**
20		🟧	Осигурачи	Испад	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	8	**48**
4		🟧	Команда горње градње	Кратки спој	2	2	20	1775.75	5	10.00	2	4	**40**
15		🟧	Мотор Т3	Отказ термичке заштите	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	4	**36**
1		🟧	Коло сигнала старта ротора	Отказ	1	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	**30**
19		🟧	Команда погона централног левка	Отказ	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	5	**30**
3	🟧		Електромагнетна спојница	Контрола	1	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	**24**
2		🟧	Радна блокада	Отказ	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	3	**18**
24	🟧		Нераспоређено			1	115	3549.92	3	115.00	6	1	**18**
10	🟧		Потезно уже Т3	Активирање	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	5	**15**
6		🟧	Шлајфингер	Дислокација електричних водова	2	1	5	3551.75	3	5.00	1	4	**12**
18	🟧		Кочница погона истоварног левка	Контрола	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
23	🟧		Подсистем напајања	Контрола	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	**12**
7		🟧	МТБ	Отказ	4	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	**9**

Табела 6.50. FMECA одржавања роторног багера SRs 2000x32/5+VR (непланирани електро откази/застоји)

Легенда:

Ниво критичности (према методи Kineey)

занемарљив		низак		средњи		висок		екстремни	
🟩	RPN≤20	🟩	20<RPN≤70	🟨	70<RPN≤200	🟧	200<RPN≤400	🟥	RPN>400

Група градње	Целина	Отказ				Постојеће стање					Побољшано стање				
		ознака	опис	последица	узрок	Превентивне мере	PF	FDV	PFR	RPN	Корективне мере	PF	FDV	PFR	RPN
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
НЕЛЕ*	високонапонски кабл	22	пробој кабловске главе R045	прекид напајања	појава пренапона; улаз воде у пролазни орман R045	визуелна контрола; заштита од уласка воде у орман R045	6	6	6	**216**	појачана контрола заштите од уласка воде у орман	3	6	6	**108**
											замена кабловске главе	2	6	6	**72**
											замена кабловске главе и појачана контрола заштите од уласка воде у орман	1	6	6	**36**
МТМ	централни левак	8	отказ мотора	прекид рада	нагомилани материјал око мотора који спречава хлађење	визуелна контрола; чишћење нагомиланог материјала	5	6	4	**120**	појачана контрола	4	6	4	**96**
											уградња сонде заштите од судара	3	6	4	**72**
											контрола успорења кретања мотора	2	6	4	**48**
МКК	шлајфингер (механизам за ношење каблова)	5	оштећења каблова	прекид рада	механичко оштећење механизма за намотавање и одмотавање каблова	визуелна контрола; сервис механизма за ношење каблова	3	6	4	**72**	појачана контрола	2	6	4	**48**
											ревитализација постојећег механизма за ношење каблова	2	6	3	**36**
											промена механизма за ношење каблова (уградња новог типа пример G3)	1	6	3	**18**
МТМ	централни левак	9	отказ заштите мотора	прекид рада	дотрајалост и квар електричне заштите мотора	провера реаговања заштите	3	6	4	**72**	замена постојеће заштите заштитом новог типа	2	6	3	**36**
МТМ	одбојни бубњеви	12	отказ мотора	прекид рада	нагомилани материјал на бубњевима	визуелна контрола; чишћење нагомиланог материјала	3	6	4	**72**	појачана контрола	2	6	4	**48**
											побољшање функције гребача	1	6	4	**24**
											повећање снаге погонског мотора (под условом да то дозвољава машински склоп погона)	1	6	4	**24**

*Подсистем за напајање електричном енергијом

- FMECA је техника за идентификацију, утврђивање приоритета (ранга) и елиминацију потенцијалних отказа система, пројекта или процеса, пре него што они стигну до корисника. Дакле, FMECA је техника уочавања и решавања потенцијалних проблема у функционисању система пре него што се они појаве.
- Сагласно фази животног циклуса у којој се примењују, разликују се следеће врсте FMEA/FMECA техника:
    - D-FMEA/FMECA (Design FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA пројектовања;
    - P-FMEA/FMECA (Process FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA процеса;
    - A-FMEA/FMECA (Application FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA (начина и услова) примене;
    - S-FMEA/FMECA (Service FMEA/FMECA) - FMEA/FMECA током фазе експлоатације и одржавања (када се у значајној мери промене услови рада или карактеристике подсистема/компонентни, или на сваких десет година).
- FMECA представља основни аналитички алат за примену концепта одржавања заснованог на поузданости (**R**eliability **C**entered **M**aintenance - **RCM**).

6.11.1 Непланирани машински откази

На основу презентираних резултата истраживања закључује се следеће:

- У референтном периоду нису регистровани откази подсистема за дизање стреле ротора (МДС) и носеће челичне конструкције (НЧК).
- Највећа учешћа у укупном броју и времену трајања непланираних машинских отказа/застоја (НМО) има подсистем за транспорт материјала (МТМ) и она износе ≈56% и ≈50%, респективно, табеле 6.16 и 6.17, слике 6.5 и 6.6. Потом следи подсистем за копање материјала (МКМ) чије процентуално учешће у укупном броју НМО износи ≈23%, табела 6.16, слика 6.5, док је процентуално учешће у укупном времену трајања НМО ≈27%, табела 6.17, слика 6.6. Значајно је учешће подсистема за транспорт багера (МТБ): ≈18% у укупном броју НМО, табела 6.16, слика 6.5, односно ≈21% у укупном времену трајања НМО, табела 6.17, слика 6.6. Учешће подсистема за кружно кретање (МКК) у укупном броју и времену трајања НМО занемарљиво је мало (≈1%) табеле 6.16 и 6.17, слике 6.5 и 6.6.
- Највеће процентуално учешће у укупном броју застоја изазваних МТМ има транспортер Т4 (≈29%) табела 6.22, слика 6.11, потом следе: централни левак (≈20%) транспортер Т1 (≈13%) транспортер Т3 (≈10%) и транспортер Т2 (≈7%). Појединачна

процентуална учешћа свих осталих целина у укупном броју застоја изазваних МТМ мања су од 5%, табела 6.22, слика 6.11.

- Транспортер Т4 и централни левак одскачу и по процентуалном учешћу у укупном времену трајања НМО изазваних МТМ. Њихово процентуално учешће износи ≈39% и ≈32%, респективно, табела 6.23, слика 6.12. Потом следи транспортер Т3 (≈12%). Појединачна процентуална учешћа свих осталих целина МТМ у укупном времену трајања НМО изазваних МТМ мања су од 4%, табела 6.23, слика 6.12.
- Уочава се да у подсистему МТБ, табела 6.20, слика 6.9, доминантно процентуално учешће (≈51%) у укупном броју НМО имају откази/застоји који у документу „Рад и застој I БТО система“ нису једнозначно лоцирани („Гусенични ланац“). Потом следе откази/застоји изазвани гусеничним ланцем багера (≈29%) и гусеничним ланцем претоварног уређаја (≈16%).
- У односу на учешће у укупном броју, процентуална учешћа појединих целина МТБ у укупном времену трајања НМО другачије су расподељена. Највеће учешће има гусенични ланац багера (≈44%) потом откази који (према документу „Рад и застој I БТО система“) припадају неидентификованом гусеничном ланцу (≈32%) док процентуално учешће отказа изазваних гусеничним ланцем претоварног уређаја износи ≈23%, табела 6.21, слика 6.10.
- Процентуално учешће погона гусеница багера у укупном броју НМО изазваних МТБ износи ≈4%, табела 6.20, слика 6.9, док је учешће у укупном времену трајања (<1%) занемарљиво мало, табела 6.21, слика 6.10.
- Важно је уочити да у референтном периоду нису регистровани откази/застоји изазвани погоном гусеница претоварног уређаја.
- У подсистему МКМ највеће процентуално учешће у укупном броју НМО имају кашике ≈51%, табела 6.18, слика 6.7. Потом следе откази/застоји изазвани полумесецом (≈23%) и погоном ротора (≈15%) док су појединачна учешћа осталих целина (тело ротора, сливник) ≈4%. Учешће отказа целине која је у документу „Рад и застој I БТО система“ названа „сливник и полумесец“ мање је од 3%.
- У укупном времену трајања НМО изазваних МКМ највеће је учешће полумесеца (≈55%) табела 6.19, слика 6.8, потом кашика (≈29%) док „сливник и полумесец“ учествују са ≈7%. Сам сливник има процентуално учешће ≈4%, док је појединачно процентуално учешће погона и тела ротора мање од 3%.

- У референтном периоду посматрања није уочен отказ/застој са екстремном вредношћу степена критичности (RPN>400), табела 6.30. Уочен је само један отказ са високом степеном критичности. То је отказ који је последица блокирања повратне ролне транспортера Т3, што је довело до самозапаљења. Вредност степена критичности тог отказа износи RPN=243 и припада доњој четвртини интервала високих вредности степена критичности (200<RPN≤400). Средњи степен критичности (70<RPN≤200) има 40 врста уочених отказа, при чему је вредност степена критичности 21 врсте отказа ≤100. Максимална вредност степена критичности у овој групи (средњи степен критичности) износи RPN=168, што значи да не улази у последњу (највишу) четвртину интервала средњег степена критичности. Од укупно 40 врста отказа средњег степена критичности, 19 врста отказа има степен критичности у интервалу 100<RPN≤168. Низак ниво степена критичности (20<RPN≤70) има, такође, 40 врста уочених отказа, док укупан број врста уочених отказа са занемарљивим степеном критичности (RPN≤20) износи 8.
- Дистрибуција броја врста отказа по појединим класама степена критичности приказана је у табели 6.51. Уочава се да је по свим нивима степена критичности доминантно учешће подсистема за транспорт материјала (МТМ) – увек је веће од 50%. Осим тога, у том подсистему јавља се и једна врста отказа са високим степеном критичности, док код осталих подсистема нису уочени откази са високим рангом нивоа критичности. Потом, по броју врста отказа, следе подсистеми за транспорт багера (МТБ), копање материјала (МКМ) и, коначно, подсистем за кружно кретање (МКК). Интересантно је уочити, табела 3.31, да су максималне вредности степена критичности врста отказа средњег ранга (70<RPN≤200) у подсистемима МКМ (отказ 5: губитак интегритета полумесеца) МТБ (отказ 93: отказ папуча гусеничних ланаца) и

Табела 6.51. Дистрибуција ранга степена критичности и броја непланираних машинских отказа

Ранг степена критичности	Број врста отказа	Подсистем			
		МКМ (1)	МКК (2)	МТБ (4)	МТМ (5)
Занемарљив (RPN≤20)	**8**	**1**	**0**	**0**	**7**
Низак (20<RPN≤70)	**40***	**6**	**2**	**8**	**23**
Средњи (70<RPN≤200)	**40**	**7**	**1**	**11**	**21**
Висок (200<RPN≤400)	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**
Екстремни (RPN>400)	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Укупно:	**89**	**14**	**3**	**19**	**52**

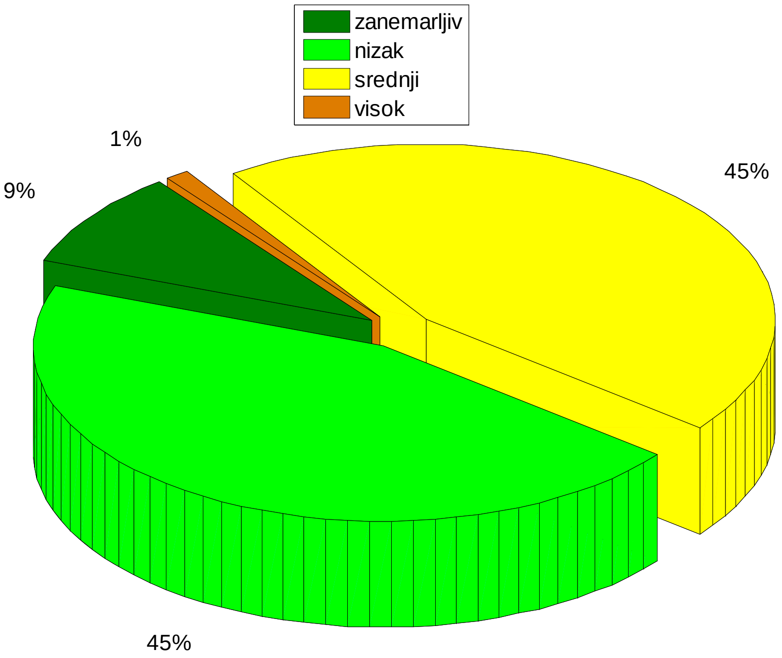
*Врста отказа 87 обухвата застоје који у документу „Рад и застој I БТО система“ нису идентификовани по месту настанка

МТМ (отказ 22: отказ погна централног левка) исте и износе 168. Максимална вредност степена критичности у подсистему МКК износи 90 (отказ 17: дислокација ролнице у шлајфингеру).

- Укупан број и процентуално учешће врста отказа рангираних према вредностима степена критичности приказани су у табели 6.52 и на слици 6.23.

Табела 6.52. Број и процентуално учешће рангова степена критичности у укупном броју врста непланираних машинских отказа

Ранг степена критичности	Број врста отказа	Учешће (%)
Занемарљив (RPN≤20)	**8**	**8,99**
Низак (20<RPN≤70)	**40**	**44,94**
Средњи (70<RPN≤200)	**40**	**44,94**
Висок (200<RPN≤400)	**1**	**1,12**
Екстремни (RPN>400)	**0**	**0,00**
Укупно:	**89**	**100**



Слика 6.23. Процентуално учешће рангова степена критичности у укупном броју непланираних машинских врста отказа

С обзиром на следеће чињенице:

- да доминантан удео (≈54%) у укупном броју врста отказа имају откази занемарљивог (≈9%) и ниског (≈45%) степена критичности;
- да откази средњег степена критичности чине ≈45% укупног броја врста отказа, при чему је максимална вредност степена критичности 168;

  - да је у референтном периоду регистрована само једна врста отказа са високим степеном критичности, при чему је вредност степена критичности (243) у доњој четвртини интервала вредности високих степена критичности;

закључује се да је општа расподела степена критичности врста непланираних машинских отказа по подсистемима багера таква да, у начелу, показује да машина поседује задовољавајућу сигурност извршења функције циља.

- Груписање истородних врста отказа довело је до смањења укупног броја врста отказа (са 89 на 60) и прерасподеле вредности степена критичности, табеле 6.30 и 6.31.
- Важно је уочити, табела 6.53, да груписање истородних врста отказа не изазива нужно повећање вредности степена критичности (врсте отказа 93,96,100,101,102, 103,104): у неким случајевима бројна вредност остаје иста (врсте отказа 91,92,94,99) док у неким случајевима долази до смањења вредности степена критичности (врсте отказа 90,95,97,98). Уколико груписање истородних врста отказа доводи до смањења вредности степена критичности, или уколико он остаје исти, онда су за наставак анализе меродавне вредности степена критичности првобитних врста отказа.

Табела 6.53. Степени критичности врста отказа након груписања истородних врста отказа

Врста отказа	RPN	Груписане врсте отказа и њихови степени критичности									
		отказ	RPN	отказ	RPN	отказ	RPN	отказ	RPN	отказ	RPN
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
90	**72**	69	**40**	70	**80**						
91	**140**	71	**140**	72	**72**	73	**36**				
92	**112**	68	**112**	74	**60**						
93	**168**	75	**144**	76	**144**	89	**120**				
94	**126**	36	**54**	37	**126**						
95	**112**	57	**72**	58	**112**	59	**120**				
96	**140**	60	**120**	61	**100**	62	**96**	63	**100**	66	**72**
97	**36**	31	**12**	32	**40**	33	**20**	34	**30**		
98	**105**	8	**108**	46	**75**	47	**45**	48	**27**		
99	**140**	50	**140**	51	**24**						
100	**42**	52	**24**	53	**12**	54	**36**	55	**40**		
101	**42**	43	**9**	44	**36**	45	**18**				
102	**54**	26	**45**	27	**9**	28	**36**				
103	**126**	39	**105**	40	**75**						
104	**140**	24	**72**	67	**84**						

- Груписање истородних врста отказа није довело до повећања максималне бројне вредности степена критичности у интервалу 70<RPN≤200 који одговара средњем нивоу степена критичности. Пре груписања, две врсте отказа (5 и 22, табела 6.30) имале су вредност степена критичности 168, док се након груписања њима придружила и врста отказа 93, са истоветном вредношћу степена критичности.
- Примена корективних мера током одржавања може допринети значајном снижењу нивоа критичности врста отказа. У табели 6.33 дати су неки од начина смањења нивоа критичности одабраних непланираних машинских отказа највишег степена критичности.

6.11.2 Непланирани електро откази

На основу изложених резултата истраживања закључује се следеће:

- У референтном периоду нису регистровани откази подсистема за дизање стреле ротора (МДС).
- Највећа учешћа у укупном броју и времену трајања непланираних електро отказа/застоја (НЕО) има подсистем за транспорт материјала (МТМ) и она износе ≈48% и ≈45%, респективно, табеле 6.35 и 6.36, слике 6.13 и 6.14. Потом следи подсистем за напајање електричном енергијом (НЕЛЕ) чије процентуално учешће у укупном броју НЕО износи ≈21%, табела 6.35, слика 6.13, док је процентуално учешће у укупном времену трајања НЕО ≈35%, табела 6.36, слика 6.14. Подсистеми за копање материјала (МКМ) и кружно кретање (МКК) имају истоветно учешће у (≈12%) укупном броју НЕО, док учешћа у укупном времену НЕО износе ≈3% и ≈9%, респективно. Подсистем за транспорт багера (МТБ) учествује са ≈3% у укупном броју НЕО, док је учешће у укупном времену трајања НЕО занемарљиво мало (<1%). Важно је уочити да процентуална учешћа нераспоређених (према документу „Рад и застој I БТО система“) електро отказа у укупном броју и времену трајања НЕО износе ≈3% и ≈7%, што указује на значај прецизне евиденције врсте и узрока отказа/застоја.
- Највеће процентуално учешће у укупном броју застоја изазваних МТМ имају централни левак и откочник Т2 (по 25%) табела 6.41, слика 6.19, потом следе: истоварни левак и одбојни бубњеви (по ≈19%) и мотор Т3 и потезно уже Т3 (по ≈6%).
- Одбојни бубњеви и централни левак одскачу по процентуалном учешћу у укупном времену трајања НЕО изазваних МТМ. Њихово процентуално учешће износи ≈46% и ≈34%, респективно, табела 6.42, слика 6.20. Потом следе истоварни левак (≈12%)

откочник Т2 (≈5%) мотор Т3 (≈2%) док је учешће потезног ужета Т3 занемарљиво мало (<1%).

- Уочава се да у подсистему НЕЛЕ, табеле 6.43 и 6.44, слике 6.21 и 6.22, доминантно процентуално учешће (≈57%) у укупном броју и укупном времену трајања НЕО имају откази изазвани пробојем високонапонског кабла (≈95%). Откази нисконапонског напајања и осигурача, као и застоји због контроле система напајања, учествују са по ≈14% у укупном броју застоја, али са свега 5% у збиру у укупном времену трајања НЕО у подсистему НЕЛЕ.
- У подсистему МКК регистроване су две врсте отказа у целинама „команда горње градње“ и „шлајфингер“ равноправне по учестаности (50%) с тим што је отказ команде горње градње доминатан (≈86%) у укупном времену трајања НЕО, табеле 6.39 и 6.40, слике 6.17 и 6.18.
- Учешћа подсистема МКМ и МТБ у укупном времену трајања НЕО нису од значаја, табела 6.36, слика 6.14.
- У референтном периоду посматрања није уочен непланирани електро отказ/застој са екстремном вредношћу степена критичности (RPN>400), табела 6.50. Уочен је само један отказ са високом степеном критичности. То је отказ који је последица пробоја високонапонског кабла, што је довело до прекида напајања. Вредност степена критичности тог отказа износи RPN=216 и припада доњој четвртини интервала високих вредности степена критичности (200<RPN≤400). Средњи степен критичности (70<RPN≤200) има 5 врста уочених отказа, при чему је вредност степена критичности четири врсте отказа RPN=72, што је на самој доњој граници интервала, док максимална вредност степена критичности (RPN=120) у овој класи припада доњој половини интервала. Низак ниво степена критичности (20<RPN≤70) има 11 врста уочених отказа, док укупан број врста уочених отказа са занемарљивим степеном критичности (RPN≤20) износи 7.
- Дистрибуција броја врста отказа по појединим класама степена критичности приказана је у табели 6.54. Уочава се да је по свим нивима степена критичности доминантно учешће подсистема за транспорт материјала (МТМ). Потом следи систем за напајање електричном енергијом (НЕЛЕ) у коме се јавља и једина врста отказа са високим степеном критичности RPN=216, што уједно представља и највећу вредност степена критичности електро отказа. Степени критичности врста отказа

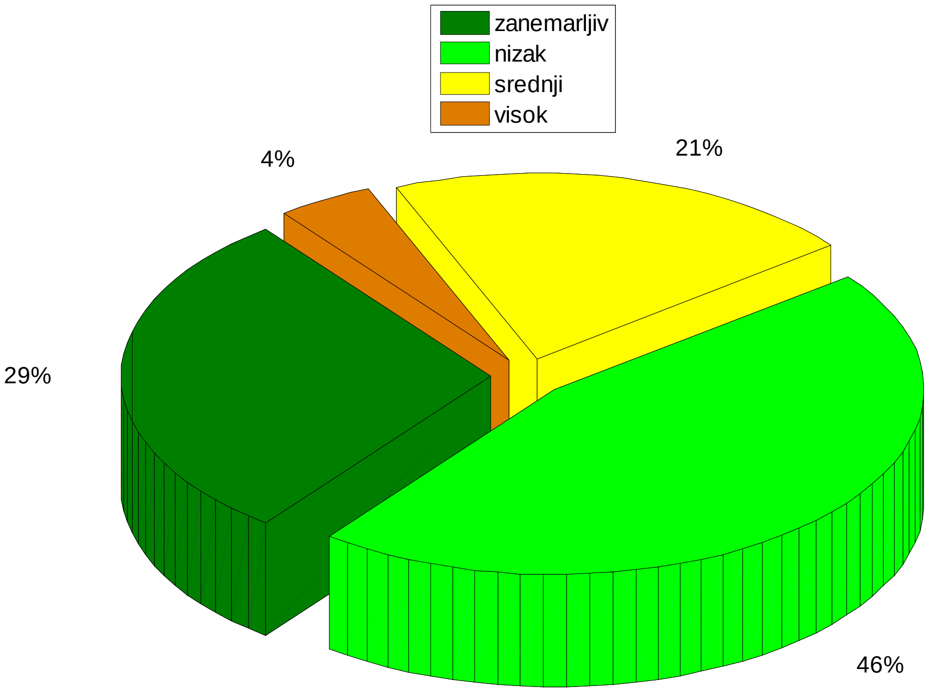
који се јављају у подсистему за копање материјала (МКМ) не прелазе ниски ниво. У подсистему за кружно кретање (МКК) јавља се једна врста отказа са средњим степеном критичности, при чему је вредност степена критичности (RPN=72) на доњој граници интервала.

Табела 6.54. Дистрибуција ранга степена критичности и броја непланираних електро отказа

Ранг степена критичности	Број врста отказа	Подсистем				
		МКМ (1)	МКК (2)	МТБ (4)	МТМ (5)	НЕЛЕ(7)
Занемарљив (RPN≤20)	7*	1	1	1	2	1
Низак (20<RPN≤70)	11	2	1	0	6	2
Средњи (70<RPN≤200)	5	0	1	0	4	0
Висок (200<RPN≤400)	1	0	0	0	0	1
Екстремни (RPN>400)	1	0	0	0	0	0
Укупно:	**24**	**3**	**3**	**1**	**12**	**4**

*Врста отказа 24 обухвата застоје који у документу „Рад и застој I БТО система“ нису једнозначно идентификовани.

- Укупан број и процентуално учешће врста отказа рангираних према вредностима степена критичности приказани су на слици 6.24 и у табели 6.55.



Слика 6.24. Процентуално учешће рангова степена критичности у укупном броју непланираних електро врста отказа

С обзиром на следеће чињенице:

- да доминантан удео (≈75%) у укупном броју врста отказа имају откази занемарљивог (≈29%) и ниског (≈46%) степена критичности;

Табела 6.55. Број и процентуално учешће рангова степена критичности у укупном броју врста непланираних машинских отказа

Ранг степена критичности	Број врста отказа	Учешће (%)
Занемарљив (RPN≤20)	**7**	**29,17**
Низак (20<RPN≤70)	**11**	**45,83**
Средњи (70<RPN≤200)	**5**	**20,83**
Висок (200<RPN≤400)	**1**	**4,17**
Екстремни (RPN>400)	**0**	**0,00**
Укупно:	**24**	**100**

  - да откази средњег степена критичности чине ≈21% укупног броја врста отказа, при чему је максимална вредност степена критичности 120, што припада доњој половини интервала;
  - да је у референтном периоду регистрована само једна врста отказа са високим степеном критичности, при чему је вредност степена критичности (216) у доњој четвртини интервала вредности високих степена критичности;

закључује се да је општа расподела степена критичности врста непланираних електро отказа по подсистемима багера таква да, у начелу, показује да машина поседује задовољавајућу сигурност извршења функције циља.

- Примена корективних мера током одржавања може допринети значајном снижењу нивоа критичности врста отказа. У табели 6.50 дати су неки од начина смањења нивоа критичности одабраних непланираних електро отказа највишег степена критичности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Annual coal report 2010, U.S. Energy Information Administration, Office of Oil, Gas, and Coal Supply Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, 2010.

[2] Annual coal report 2014, U.S. Energy Information Administration, Office of Oil, Gas, and Coal Supply Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, 2016.

[3] Coal industry across Europe, 5th edition, EURACOAL - European Association for Coal and Lignite AISBL, Brussels, 2013.

[4] J. Yamatomi, S. Okubo, Surface mining methods and equipment, Encyclopedia of Life Support Systems, Civil engineering, Vol II, Eolss Publishers Co. Ltd., Oxford, United Kingdom, 2009.

[5] B.M. Владимиров, A.N. Шендеров, Ю.T. Калашников, L.L. Хазанет, П.I. Слизкий, Г.L. Середа, Карьерныие роторные экскаваторы, Техника, Киев, 1968.

[6] L. Rasper, Der Schaufelradbagger als Gewinnungsgerät, Trans Tech Publications, Clausthal, 1973.

[7] M. Макар, Теорија багеровања роторним багерима, Рударски институт, Београд, 1990.

[8] B.S. Dhillon, Engineering Maintenance: A Modern Approach, CRC, Boca Raton, FL, 2002.

[9] AMCP 706 – 132, Engineering Design Handbook: Maintenance Engineering Techniques, US Department of Army, Washington, DC, 1975.

[10] Coal industry across Europe, 6th edition, EURACOAL - European Association for Coal and Lignite AISBL, Brussels, 2017.

[11] B. Forsmann, U. Kumar, Surface mining equipment and maintenance trends in the scandinavian countries. J. Mines Minerals Fuels August/September (1992) 266-269.

[12] K.C. Kapur, Reliability and maintainability, In: G. Salvendy (ed.), Handbook of Industrial Engineering, Wiley, New York, (1982) 8.5.1-8.5.34.

[13] S. Legutko, Development trends in machines operation maintenance, Eksploatacja i niezawodność-Maintenance and reliability 2(42) (2009) 8-16.

[14] J. Moubray, Maintenance management – a new paradigm, Maintenance 11 (1) (1996).

[15] J. Knezević, Life-cycle engineering (An outline), University of Exeter, Exeter, 1994.

[16] B.W. Niebel, Engineering Maintenance Management, Dekker, New York, 1994.

[17] T.A. Westerkamp, Maintenance Manager's Standard Manual, Prentice-Hall, Paramus, NJ, 1997.

[18] D. Stoneham, The Maintenance Management and Technology Handbook, Elsevier, Oxford, UK, 1998.

[19] E. Hartmann, D.J. Knapp, J.J. Johnstone, K.G. Ward, How to Manage Maintenance, American Management Association, New York, 1994.

[20] U. Bugaric, M. Tanasijevic, D. Polovina, D. Ignjatovic, P. Jovancic, Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 14(4) (2012) 333-341.

[21] Paulo M.S.T. de Castro, A.A. Fernandes, Methodologies for failure analysis: a critical survey. Materials and Design 25 (2005): 117-123.

[22] S. Bošnjak, M. Arsić, N. Zrnić, M. Rakin, M. Pantelić, Bucket wheel excavator: Integrity assessment of the bucket wheel boom tie-rod welded joint, Engineering Failure Analysis 18(1) (2011), 212-222.
[23] S. Bošnjak, Z. Petković, I. Atanasovska, G. Milojević, V. Mihajlović, Bucket chain excavator: Failure analysis and redesign of the counterweight boom supporting truss columns, Engineering Failure Analysis 32 (2013) 322-333.
[24] S. Bošnjak, Z. Petković, A. Simonović, N. Zrnić, N. Gnjatović, 'Designing – in' Failures and Redesign of Bucket Wheel Excavator Undercarriage, Engineering Failure Analysis 35 (2013) 95-103.
[25] S. Bošnjak, M. Pantelić, N. Zrnić, N. Gnjatović, M. Đorđević, Failure analysis and reconstruction design of the slewing platform mantle of the bucket wheel excavator O&K SchRs 630, Engineering Failure Analysis 18(2) (2011) 658-669.
[26] S. Bošnjak, Z. Petković, N. Zrnić, M. Pantelić, A. Obradović, Failure analysis and redesign of the bucket wheel excavator two-wheel bogie, Engineering Failure Analysis 17 (2010) 473-485.
[27] S. Bošnjak, Z. Petković, N. Zrnić, G. Simić, A. Simonović, Cracks, repair and reconstruction of bucket wheel excavator slewing platform, Engineering Failure Analysis 16 (2009) 1631-1642.
[28] M. Arsić, S. Bošnjak, N. Zrnić, A. Sedmak, N. Gnjatović, Bucket wheel failure caused by residual stresses in welded joints, Engineering Failure Analysis 18(2) (2011) 700-712.
[29] S. Bošnjak, D. Momčilović, Z. Petković, M. Pantelić, N. Gnjatović, Failure Investigation of the Bucket Wheel Excavator Crawler Chain Link, Engineering Failure Analysis 35 (2013) 462-469.
[30] M. Arsić, S. Bošnjak, Z. Odanović, M. Dunjić, A. Simonović, Analysis of the Spreader Track Wheels Premature Damages, Engineering Failure Analysis 20 (2012) 118-136.
[31] S. Bošnjak, M. Arsić, S. Savićević, G. Milojević, D. Arsić, Fracture analysis of the pulley of a bucket wheel boom hoist system, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 18(2) (2016) 155-163.
[32] S. Bošnjak, S. Savićević, N. Gnjatović, I. Milenović, M. Pantelić, Disaster of the bucket wheel excavator caused by extreme environmental impact: consequences, rescue and reconstruction, Engineering Failure Analysis 56(2015) 360-374.
[33] S. Bošnjak, N. Zrnić, A. Simonović, D. Momčilović, Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support, Engineering Failure Analysis 16(3) (2009) 740-750.
[34] S. Bošnjak, N. Gnjatović, S. Savićević, M. Pantelić, I..Milenović, Basic parameters of the static stability, loads and strength of the vital parts of a bucket wheel excavator's slewing superstructure. Journal of Zhejiang University – SCIENCE A (Applied Physics & Engineering) 17(5) (2016) 353-365.
[35] R.I. Winner, J.P. Pennell, H.E. Bertrand, M.M.G. Slusarczuk: The role of concurrent engineering in weapons system acquisition, Institute of Defense Analyses, Alexandria, 1988.
[36] M. Pantelic, Dynamical model for analysis of balance mass influence to bucket wheel excavator superstructure behaviour, Engineering and Automation Problems 1 (2008) 71-76.
[37] T. Smolnicki, M. Stańco, D. Pietrusiak, Distribution of loads in the large size bearing – problems of identification, Tehnički Vjesnik - Technical Gazette 20(5) (2013) 831-836.
[38] T. Smolnicki, G. Pękalski, J. Jakubik, P. Harnatkiewicz, Investigation into wear mechanisms of the bearing raceway used in bucket wheel excavators, Archives of Civil and Mechanical Engineering 17(1) (2017) 1-8.

[39] W. Durst, W. Vogt, Bucket Wheel Excavator, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 1988.

[40] Н.Г. Домбровский, Многоковшовые экскаватороы, конструкции, теория и расчет, Машиностроение, Москва, 1972.

[41] N. Nan, I. Kovacs, F. Popescu, Balance control by weighting and tensiometric measurements of bucket wheel excavators, WSEAS Transactions on Systems and Control 3(11) (2008) 927-938.

[42] G. Pajer, M. Pfeifer, F. Kurth, Tagebaugroßgeräte und Universalbagger, Veb Verlag Technik, Berlin, 1971.

[43] M.S. Sanders, B.E. Shaw, Research to determine the contribution of system factors in the occurrence of underground injury accidents, Report No. US BM OFR 26-89, US Bureau of Mines, Washington, 1988.

[44] M.S. Sanders, J.M. Peay, Human factors in mining, Report No. USBM IC 9182, US Bureau of Mines, Washington, 1988.

[45] V.A. Kotlyarevskiy, A.V. Vinogradov, S.V. Eremin, V.M. Kozhevnikov, A.A. Kostin, A.I.Kostin, S. Yu. Revenko, Avarii i katastrofy, Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy, Izdatel'stvo ASV, Moskva, 1996.

[46] Љ. Папић, З. Миловановић, Одржавање и поузданост техничких система, Истраживачки центар за управљање квалитетом и поузданошћу DQM, Пријевор, 2007.

[47] Н. Зрнић, М. Ђорђевић, Дизајн и екологија-одрживи развој производа, Машински факултет, Београд, 2012.

[48] S. Legutko, Development trends in machines operation maintenance, Eksploatacja i niezawodność-Maintenance and reliability 2(42) (2009) 8-16.

[49] J. Knezević, Systems Maintainability, Analysis, Engineering and Management, Chapman and Hall, London, 1977.

[50] D.E. Carter, B. Stilwell Baker, Concurrent Engineering, The Product Development Environment for the 1990s, Addison-Wesely Publishing Company Inc., Reading, 1992.

[51] B.S. Blanchard, W.J. Fabrucky, Systems Engineering and Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1998.

[52] В. Зељковић, Љ. Папић, Тестирање поузданости, Лола институт, Београд, 2001.

[53] Ј. Тодоровић, Инжењерство одржавања техничких система, Југословенско друштво за моторе и возила, Београд, 1993.

[54] С. Ивковић, Д. Игњатовић, П. Јованчић, М. Танасијевић, Пројектовање одржавања опреме површинских копова угља, Рударско-геолошки факултет, Београд, 2008.

[55] AMCP706-133, Engineering Design Handbook: Maintainability Engineering Theory and Practice, US Department of Defense, Washington, 1976.

[56] Љ. Папић, Конкурентно инжењерство: Оквир пројектовања за одржавање, Зборник радова друге DQM конференције Управљање одржавањем '99, Чачак (1999) 79-98.

[57] S. Bošnjak, Z. Petković, M. Đorđević, N. Gnjatović, Redesign of Bucket Wheel Excavating Device, Proceedings of the 19th International Conference on Material Handling Constructions and Logistics MHCL 2009, Belgrade (2009) 123-128.

[58] S. Bošnjak, Z. Petković, M. Dunjić, N. Gnjatović, M. Đorđević, Redesign of the vital subsystems as a way of extending the bucket wheel excavators life, Technics Technologies Education Management-TTEM 7(4) (2012) 1620-1629.

[59] S. Bošnjak, Z. Petković, M. Đorđević, N. Gnjatović, N. Zrnić, Design improvements of the bucket wheel with drive, Proceedings of the 10th Aniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineeging and Information Tehnology DEMI 2011, Banja Luka (2011) 111-116.

[60] S. Bošnjak, N. Zrnić, Dynamics, failures, redesigning and environmentally friendly technologies in surface mining systems, Archives of Civil and Mechanical Engineering 12(3) (2012) 348-359.

[61] C. Moody, Reliable Conveyor Belt Design, Proceedings of the American Mining Congress (1991) 579-582.
[62] B.S. Dhillon, Design Reliability: Fundamentals and Applications, CRC, Boca Raton, FL, 1999.
[63] С. Бошњак, Динамика роторних багера са радијалним ископом у условима стхастичке побуде изазване отпором копању, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1995.
[64] Д.П. Волков, В.А. Черкасов, Динамика и прочност многоковшовых экскаваторов и отвалообрзователей, Машиностроение, Москва, 1969.
[65] Ю.А. Ветров, Резание грунтов землеройными машинами, Машиностроение, Москва, 1971.
[66] П. Миловић, Прилог одређивању величина отпора копању материјала тла, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1987.
[67] Д. Јовановић, Истраживање оптерећења роторних багера на површнским коповима у зависности од услова одвијања процеса ископа материјала, докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1995.
[68] V. Raaz, Assessment of the digging force and optimum selection of the mechanical and operational parameters of bucket wheel excavators for mining of overburden, coal and partings, Krup Fordertechnik, Essen,1999.
[69] З. Југовић, Експлоатациона поузданост роторног багера као сложеног техничког система, Зборник радова SYM-OP-IS '83, Херцег Нови (1983) 185-190.
[70] DIN 22261-2. Bagger, Absetzer und Zusatsgeräte in Braunkohlentagebauen. Teil 2: Berechnungsgrundlagen. Deutsches Institut für Normung; 2006.
[71] ISO/IEC Guide 73. Risk Management - Vocabulary - Guidelines for use in standards, International Organization for Standardization; 2009.
[72] OHSAS 18001. Occupational Health and Safety Management Systems – Requirements. 2007.
[73] PRAM: Project Risk Analysis and Management Guide. Association for Project Management (APM), Norwich (UK), 1997.
[74] A. Osborne, Risk Management Made Easy, Andy Osborne & Ventus Publishing ApS, Bookboon, 2012.
[75] ISO 31000. Risk Management - Principles and guidelines, International Organization for Standardization; 2009.
[76] J.G. Perry, R.W. Hayes, Risk and its management in construction projects, Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part:I, Vol.78, Design and Construction, Engineering Management Group (1985) 499-521.
[77] AS/NZS 4360. Risk Management, Standards Australia and Standards New Zealand; 2004.
[78] R. Batta, S.S. Chiu, Optimal obnoxious paths on a network— transportation of hazardous materials, Operational Research 36(1) (1988) 84-92.
[79] US DOT, US Department of Transportation, Hazardous Waste Management System; Identification and Listing of Hazardous Waste; Wastes From Wood Surface Protection, 1994.
[80] E. Alp, Risk-based Transportation Planning Practice: Overall Methodology and a Case Example, INFOR (1995) 4-19.
[81] X. Zheng, M. Liu, An overview of accident forecasting methodologies, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22(4) (2009) 484-491.
[82] C.J. ReVelle, J. Cohon, D. Shobrys, Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes, Transportation Science 25 (1991) 138-145.
[83] F.F. Saccomanno, A. Chan, Economic Evaluation of Routing Strategies for Hazardous Road Shipments, Transportation Research Record 1020 (1985) 12-18.
[84] M. Abkowitz, M. Lepofsky, P. Cheng, Selecting Criteria for Designating Hazardous Materials Highway Routes, Transportation Research Record 1333 (1992) 30-35.

[85] R.A. Sivakumar, R. Batta, M.H. Karwan, Establishing Credible Risk Criteria for Transporting Extremely Dangerous Hazardous Materials, in Transportation of Dangerous Goods: Assessing the Risks, ed. By F. F. Saccomanno and K. Cassidy, Institute for Risk Research, Univ. of Waterloo, Waterloo, Canada (1993) 335-342.
[86] R.A. Sivakumar, R. Batta, M.H. Karwan, A Multiple Route Conditional Risk Model for Hazardous Material, Operations Research Letter, 13 (1995) 20-33.
[87] L.N. Aleksandrovskaya, I.Z. Aronov, A.I. Elizarov, Statisticheskie metody analiza bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem, Logos, Moskva, 2001.
[88] V.V. Bolotin, Metody teorii veroyatnostey i teorii nadyozhnosti v raschyotakh sooruzheniy, Stroyizdat, Moskva, 1982.
[89] V. V.Bolotin, Resurs mashin i konstruktsiy, Mashinostroenie, Moskva, 1990.
[90] E. Erkut, A. Ingolfsson, Transport Risk Models for Hazardous Materials: Revisited, Operations Research Letters, 33(1) (2005) 81-89.
[91] G. Scroubelos, Incidents in maintenance: their link to the tasks, special characteristics and proposed me-asures, European Agency for Safety and Health at Work, Journal MAGAZINE (ISSN 1608- 4144) (2011) 14-18.
[92] IEC/ISO 31010, Risk management - Risk assessment techniques, 2009 , https://www.iso.org /standard/51073.ht
[93] J. M. Woodruff, Consequence and likelihood in risk estimation: a matter of balance in UK health and safety risk assessment practice, Safety Science 43(5-6) (2005): 345-353.
[94] G.L.L. Reniers, W. Dullaert, B.J.M. Ale, K. Soudan, Developing an external domino prevention framework: Hazwim, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 18 (2005): 127-138.
[95] N.P. Høj, W. Kröger, Risk analyses of transportation on road and railway from a European perspective, Safety Science 40(1-4) (2002) 337-357.
[96] Y.Y. Haimes, Risk modelling, assessment, and management (3rd ed.), A John Wiley & Sons Inc. Publication, 2009.
[97] F.H. Van Duijne, D. Aken, E.G. Schouten, Considerations in developing complete and quantified methods for risk assessment, Safety Science 46(2) (2008) 245-254.
[98] J. L. Rouvroye, E. G. van den Bliek, Comparing safety analysis techniques, Reliability Engineering & System Safety 75(3) (2002) 289-294.
[99] P.K. Marhavilas, D. Koulouriotis, V. Gemeni, Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24(5) (2011) 477-523.
[100] A. Arvanitogeorgos, Risk analysis in industry, Greek Institute of Health and Safety in the Work, ELINYAE, 1999.
[101] B.M. Ayyub, Risk analysis in engineering and economics, Chapman & Hall/CRC, 2003.
[102] L. Harms-Ringdahl, Safety analysis, principles and practice in occupational safety (2nd ed.). CRC Press, 2001.
[103] P. K. Marhavilas, D. E. Koulouriotis, K. Voulgaridou, Development of a quantitative risk assessment technique and application on an industry’s worksite using real accidents’ data, Scientific Journal of Hellenic Association of Mechanical & Electrical Engineers 416 (2009) 14-20.
[104] R. Brauchler, K. & Landau, Task analysis. Part II - the scientific basis (knowledge base for the guide), International Journal of Industrial Ergonomics 22(1-2) (1998) 13-35.
[105] D.E. Doytchev, G. Szwillus,. Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: a case study from Bulgaria, Accident Analysis and Prevention 41(6) (2008) 1172-1179.

[106] B. Kirwan, A guide to practical human reliability assessment. Boca Raton: Taylor & Francis Press., 1994.

[107] T. Kontogiannis, A petri net-based approach for ergonomic task analysis and modelling with emphasis on adaptation to system changes. Safety Science, 41(10) (2003) 803-835.

[108] K. Landau, W. Rohmert, R. Brauchler, Task analysis. Part I - Guidelines for the practitioner, International Journal of Industrial Ergonomics 22(1-2) (1998) 3-11.

[109] K. Hendrick, L.Jr. Benner, Investigating accidents with STEP. Marcel Dekker Inc., New York, 1987.

[110] T. Kontogiannis, V. Leopoulos, N. Marmaras, A comparison of accident analysis techniques for safety-critical man-machine systems, International Journal of Industrial Ergonomics, 25 (2000) 327-347.

[111] W.T. Fine, W. D. Kinney, Mathematical evaluation for controlling hazards, Journal of Safety Research 3(4) (1971) 157-166.

[112] P.K. Marhavilas, D.E. Koulouriotis, Risk estimation in the constructions’ worksites by using a quantitative assessment technique and statistical information of accidents. Technika Chronika Sci. J.TCG, Scientific Journal of Technical Chamber of Greece, I(1-2) (2007) 47-60.

[113] P.K. Marhavilas, D.E. Koulouriotis, C. Mitrakas, Developing a new comprehensive risk assessment process: application in the Greek Public Electric Power Provider using occupational accidents’ data, Safety Science 50(3) (2012) 448-462.

[114] F. Henselwood, G. Phillips, A matrix-based risk assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19(5) (2006) 433-441.

[115] Y.Y. Haimes, Risk modelling, assessment, and management (3rd ed.), A John Wiley & Sons Inc. Publication, 2009.

[116] P.K. Marhavilas, D.E. Koulouriotis, A risk estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents’ data: application in an aluminum extrusion industry, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 21(6) (2008) 596-603.

[117] M.M. van der Voort, A.J.J. Klein, M. de Maaijer, A.C. van den Berg, J.R. van Deursen, N.H.A. Versloot, A quantitative risk assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 20(4-6) (2007) 375-386.

[118] K.T. Kosmowski, Methodology for the risk analysis in reliability and safety management of nuclear power plants, Gdansk University of Technology, Gdansk 2002.

[119] K.T. Kosmowski, Functional safety concept for hazardous systems and new challenges, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19 (2006) 298-305.

[120] V. Cozzani, G. Antonioni, G. Spadoni, Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19(5) (2006) 463-477.

[121] P. Trucco, M. Cavallin, A quantitative approach to clinical risk assessment: the CREA method, Safety Science 44(6) (2006) 491-513.

[122] E.R. Vaidogas, First step towards preventing losses due to mechanical damage from abnormal actions: knowledge-based forecasting the actions, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19(5) (2006) 375-385.

[123] S. Suddle, The weighted risk analysis, Safety Science 47(5) (2009) 668-679.

[124] S.I. Suddle, P.H. Waarts, The safety of risk or the risk of safety?, Safety and reliability 2 (2003) 1511-1518.

[125] D. Attwood, F. Khan, B. Veitch, Occupational accident models, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19(6) (2006) 664-682.

[126] D. Attwood, F. Khan, B. Veitch, Offshore oil and gas occupational accidents – what is important?, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19(5) (2006) 386-398.

[127] M.T. Baysari, A.S. McIntosh, J.R. Wilson, Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia, Accident Analysis and Prevention 40(5) (2008) 1750-1757.

[128] P.D. Hollywell, Incorporating human dependent failures in risk assessments to improve estimates of actual risk, Safety Science 22(1-3) (1996) 177-194.

[129] T. Kontogiannis, User strategies in recovering from errors in man-machine systems, Safety Science 32(1) (1999) 49-68.

[130] T. Kontogiannis, S. Malakis, A proactive approach to human error detection and identification in aviation and air traffic control, Safety Science 47(5) (2009) 693-706.

[131] J.W. Kim, W.D. Jung, A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16(6) (2003) 479-495.

[132] L.J. Bellamy, T.A.W. Geyer, J. Wilkinson, Development of a functional model which integrates human factors, safety management systems and wider organisational issues, Safety Science 46(3) (2008) 461-492.

[133] C. Cilingir, A. Mackhieh, Effects of performance shaping factors on human error, International Journal of Industrial Ergonomics 22 (1998) 285-292.

[134] J.P. Balkey, J.H. Phillips, Using OSHA process safety management standard to reduce human error, PVP, In: Reliability and risk in pressure vessels and piping 251, ASME, New York, 1993.

[135] E.S. Hong, I.M. Lee, H.S. Shin, S.W. Nam, J.S. Kong, Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: application to the design of shield TBM, Tunnelling and Underground Space Technology 24(3) (2009) 269-277.

[136] W.E. Vesely, F.F. Goldberg, N.H. Roberts, D.F. Haasl, Fault Tree Handbook, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1981.

[137] D. Yuhua, Y. Datao, Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18(2) (2005) 83-88.

[138] G.K. Beim, B.F. Hobbs, Event tree analysis of lock closure risks, Journal of Water Resources Planning and Management ,ASCE, 123(1997) 137-198.

[139] F.I. Khan, M.R. Haddara, Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16(6) (2003)561-573.

[140] C. Chapman, S Ward, Project Risk Management: Processes, Techniques, and Insights, Wiley, New York, 2003.

[141] T.J. Horberry, R. Burgess-Limerick, L.J. Steiner, Human Factors for the Design, Operation, and Maintenance of Mining Equipment, CRC Press, Boca Raton, 2011.

[142] M. Grech, T. Horberry, T. Koester, Human Factors in the Maritime Domain, CRC Press, Boca Raton, 2008.

[143] S. Dekker, The Field Guide to Understanding Human Error, Ashgate, Aldershot, UK, 2006.

[144] J. Patterson, Human error in mining: a multivariable analysis of mining accidents/incidents in Queensland, Australia and the United States of America using the human factors analysis, PhD thesis, Clemson University, USA, 2009.

[145] E.J. Conway, M.S. Sanders, Recommendations for Human Factors Research and Development Projects in Surface Mining, Report No. OFR 211-83, Bureau of Mines, US Department of the Interior, Washington, 1982.

[146] R.D. Huchingson, New Horizons for Human Factors in Design, McGraw-Hill, New York, 1981.

[147] A.C. Lawrence, Human error as a cause of accidents in gold mining, J. Safety Res. 6(2) (1974) 78-88.
[148] B.J. Bell, A.D. Swain, A Procedure for Conducting a Human Reliability Analysis for Nuclear Power Plants, Sandia National Laboratories, Albuquerque (prepared for the United States Department of Energy) 1983.
[149] М. Пантелић, Унапређење концепције одржавања путем оперативног управљања сигурношћу багерских јединица на површинским коповима, докторска дисертација, Технички факултет у Чачку, Чачак, 2009.
[150] C. Perrow, The limits of safety: the enhancement of a theory of accidents, Journal of Contingencies and Crisis Management 2 (1994) 212-220.
[151] S. French, T. Bedford, S.J.T. Pollard, E. Soane, Human reliability analysis: A critique and review for managers, Safety Science 49 (2011) 753-763.
[152] Evaluation of Human Reliability Analysis Methods Against Good Practices, Final report, U.S. Nuclear Regulatory Commission - Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, 2006.
[153] B.S. Dhillon, Y. Liu, Human error in maintenance: a review, Journal of Quality in Maintenance Engineering, 12(1) (2006) 21-36.
[154] E. Chiodo, F. Gagliardi and M. Pagano, Human reliability analyses by random hazard rate approach, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 23(1) (2004) 65-78.
[155] H. Kumamoto, Satisfying Safety Goals by Probabilistic Risk Assessment, Springer, London, 2007.
[156] T.L. Regulinski, W.B. Askren, Mathematical Modeling of Human Performance Reliability, Proceedings of the Annual Symposium on Reliability (1969) 5-11.
[157] B.S. Dhillon, Human Reliability: With Human Factors,Pergamon, New York, 1986.
[158] B.S. Dhillon, Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety, Springer, London, 2008.
[159] D. Meister, Comparative Analysis of Human Reliability Models, Report No. AD 734-432, Springfield, 1971.
[160] T.P. Omdahl (Ed.), Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) Dictionary, American Society for Quality Control (ASQC) Press, Milwaukee, 1988.
[161] Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry, SEMATECH, Austin, 1992.
[162] Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis for Automotive, Aerospace and General Manufacturing Industries, Dyadem Press, Richmond, 2003.
[163] Procedure: Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA), Sydney Water's Business Management Information System, Sydney, 2010.
[164] U.D. Kumar, J. Crocker, T. Chitra, H. Saranga, Reliability and six sigma, Springer, New York, 2006.
[165] Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Reliability Analysis Center, New York, 1993.
[166] M. Rausand, A. Høyland, System reliability theory, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.
[167] R. McDermott, R. Mikulak, M. Beauregard, The basics of FMEA, Taylor & Francis Group, New York, 2009.
[168] K.M. Blanche, A. B. Shrivastava, Defining failure of manufacturing machinery and equipment, In Proceedings from the Annual Reliability and Maintainability Symposium (1994) 69-75.
[169] E.J. Henley, H. Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
[170] A. Villemeur, Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Industriels, Eyrolles, Paris, 1988.

[171] S. Bošnjak, M. Arsić, N. Gnjatović, I. Milenović, D. Arsić, Failure of the bucket wheel excavator buckets, Engineering Failure Analysis 84 (2018) 247-261.
[172] L.N. Bol'shev, N.V. Smirnov: Tablitsy matematicheskoy statistiki, Nauka, Moskva, 1983.
[173] O. Illiashenko, E. Babeshko, Choosing FMECA-based techniques and tools for safety analysis of critical systems, Information & Security, 28 (2012) 275-285.
[174] G.Q. Huang, J. Shi, K.L. Mak, Failure mode and effect analysis (FMEA) over the WWW, Int J Adv Manuf Technol 16 (2000) 603-608.
[175] G. Cândeaa, S. Kifora, C. Constantinescu, Usage of case-based reasoning in FMEA-driven software, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 – “Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution, Procedia CIRP 25 (2014) 93-99.
[176] I. Khuankrue, F. Kumeno, Ohashi Y., Y. Tsujimura, Applying fuzzy rule-based system on fmea to assess the risks on project-based software engineering education, Journal of Software Engineering and Applications 10 (2017) 591-604.
[177] J. Worlitz, D. Haschke, M. Peplowsky, S. Peplowsky, R. Woll, FMEA software comparison, Conference: 20th QMOD Conference on Quality and Service Sciences, Helsingør-Denmark (2017) 121-135.
[178] Benchmark FMEA Software, FMEA KONKRET, Issue 09/2017.

12. ДОКАЗ О ПРИМЕНИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Као валидан доказ, у Прилогу 2 дата је потврда корисника о примени. Осим тога, као доказ научног потенцијала техничког решења, у Прилогу 3 дат је рад публикован у часопису са SCI листе (категорија М22).

13. ЛИСТА РАНИЈЕ ПРИХВАЋЕНИХ ТЕХНИЧКИХ РЕШЕЊА

1. Петковић, З., **Бошњак, С.**: Систем механизације навоза за брод масе 1800 t, рађено за предузеће „Shipyard Bomex 4M“ - Зрењанин, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
2. Петковић, З., **Бошњак, С.**, **Гњатовић, Н.**, Ђорђевић, М.: Лабораторијска станица за идентификацију локалног дејства точкова, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
3. **Бошњак, С.**, Петковић, З., **Гњатовић, Н.**, Миленовић, И., Михајловић, В., Милојевић, Г.: Редизајн обртне платформе роторног багера SRs 1200, рађено за ПД РБ „Колубара“ д.о.о. - Огранак „Колубара - Површински копови – Барошевац“ - Лазаревац, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2012.
4. **Бошњак, С.**, Петковић, З., Ђорђевић, М., **Гњатовић, Н.**: Ревитализација роторног багера SchRs 350, рађено за ПД РБ „Колубара“ д.о.о. - Огранак „Колубара - Површински копови – Барошевац“ - Лазаревац, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2011.
5. **Бошњак, С.**, Лучанин, Б., Петковић, З., Милованчевић, М., Огњановић, М., Обрадовић, А., Зрнић, Н, Гашић, В., **Гњатовић, Н.**, Ђорђевић, М.: Редизајн и унапређење подструтура роторних багера „РБ Колубара“, рађено за ПД РБ „Колубара“ д.о.о. - Огранак „Колубара - Површински копови – Барошевац“ - Лазаревац, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
6. **Бошњак, С.**, Петковић, З. **Гњатовић, Н.**: Редизајн обртне платформе роторног багера Orenstein&Koppel SchRs 630-25/6, рађено за ПД РБ „Колубара“ д.о.о. - Огранак „Колубара - Површински копови – Барошевац“ - Лазаревац, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
7. **Бошњак, С.**, Петковић, З., Ђорђевић, М.: Унапређење конструкције кашика и тела ротора багера FAM SRs 1201.24/4, рађено за „Колубара метал“ д.о.о. - Вреоци, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
8. Петковић, З., **Бошњак, С.**: Портална дизалица за опслуживање отвореног складишта лима, рађено за „Shipyard Bomex 4 M“ - Зрењанин, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
9. Арсић, М., **Бошњак, С.**, Ракин, М., Вељовић, А.: Оцена интегритета и процена века заварених конструкција роторног багера применом испитивања без разарања и механике лома, рађено за ПД РБ „Колубара“ д.о.о. - Огранак „Колубара - Површински копови – Барошевац“ - Лазаревац, Институт за испитивање материјала, Београд, 2009.
10. Арсић, М., **Бошњак, С.**, Ракин, М., Младеновић, М.: Оцена поузданости заварених конструкција роторног багера на основу хипергеометријске расподеле грешака утврђених испитивањем заварених спојева методом једноструког избора, рађено за ПД РБ «Колубара » д.о.о. - Огранак „Колубара - Површински копови – Барошевац“ - Лазаревац, Институт за испитивање материјала, Београд, 2009.

14. ЛИТЕРАТУРА

[1] U. Bugaric, M. Tanasijevic, D. Polovina, D. Ignjatovic, P. Jovancic, *Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure*, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, 14(4) (2012) 333-341.

[2] S. Bošnjak, M. Arsić, N. Zrnić, M. Rakin, M. Pantelić, *Bucket wheel excavator: Integrity assessment of the bucket wheel boom tie-rod welded joint,* Engineering Failure Analysis, 18(1) (2011) 212-222.

[3] M. Arsić, S. Bošnjak, Z. Odanović, M. Dunjić, A. Simonović, *Analysis of the spreader track wheels premature damages*, Engineering Failure Analysis, 20 (2012) 118-136.

[4] S. Bošnjak, M. Arsić, S. Savićević, G. Milojević, D. Arsić, *Fracture analysis of the pulley of a bucket wheel boom hoist system*, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, 18(2) (2016) 155-163.

[5] S. Bošnjak, N. Zrnić, *Dynamics, failures, redesigning and environmentally friendly technologies in surface mining systems*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 12(3) (2012) 348-359.

[6] P.M.S.T. de Castro, A.A. Fernandes, *Methodologies for failure analysis: a critical survey*, Materials and Design, 25 (2005) 117-123.

[7] *Coal industry across Europe*, 6th edition, EURACOAL - European Association for Coal and Lignite AISBL, Brussels, 2017.

[8] H. Hartman, J. Mutmansky, *Introductory mining engineering*, second ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2002.

[9] J. Yamatomi, S. Okubo, *Surface mining methods and equipment*, in: K. Horikawa, Q. Guo (Eds.), Encyclopedia of Life Support Systems, Civil engineering, Vol. II, Eolss Publishers Co. Ltd., Oxford, 2009, pp. 155–170.

[10] *Annual coal report 2014*, U.S. Energy Information Administration, Office of Oil, Gas, and Coal Supply Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, 2016.

[11] W. Durst, W. Vogt, *Bucket Wheel Excavator*, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 1988.

[12] B. Schlecht, *Investigation and optimization of the dynamic behavior of bucket wheel drives*, Final report of the research project 16575 BR funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany, 2014.

[13] E. Rusiński, J. Czmochowski, P. Moczko, D. Pietrusiak, *Surface Mining Machines - Problems of Maintenance and Modernization*, Springer International Publishing AG, Cham, 2017.

[14] E. Rusiński, J. Czmochowski, A. Iluk, M. Kowalczyk, *An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture*, Engineering Failure Analysis, 17(1) (2010) 179–191.

[15] S. Bošnjak, N. Zrnić, A. Simonović, D. Momčilović, *Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support*, Engineering Failure Analysis, 16(3) (2009) 740-750.

[16] S. Bošnjak, S. Savićević, N. Gnjatović, I. Milenović, M. Pantelić, *Disaster of the bucket wheel excavator caused by extreme environmental impact: consequences, rescue and reconstruction*, Engineering Failure Analysis, 56 (2015) 360–374.

[17] T.J. Horberry, R. Burgess-Limerick, L.J. Steiner, *Human factors for the design, operation, and maintenance of mining equipment*, CRC Press, Boca Raton, 2011.

[18] D. Komljenovic, W. Groves, V. Kecojevic, Injuries in U.S. mining operations – A preliminary risk analysis, Safety Science, 46(5) (2008) 792–801.

[19] S. Bošnjak, Z. Petković, N. Zrnić, M. Pantelić, A. Obradović, *Failure analysis and redesign of the bucket wheel excavator two-wheel bogie*, Engineering Failure Analysis, 17(2) (2010) 473-485.

[20] B.S. Dhillon, *Applied reliability and quality: fundamentals, methods and applications*, Springer, London, 2007.

[21] P.K. Marhavilas, D. Koulouriotis, V.Gemeni, *Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(5) (2011) 477–523.

[22] S. Legutko, *Development trends in machines operation maintenance*, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, 42(2) (2009) 8–16.

[23] P. Kumar, R.K. Srivastava, *Development of a condition based maintenance architecture for optimal maintainability of mine excavators*, IOSR-JMCE, 11 (3) (2014) 18–22.

[24] P. Kumar, A. Kumar, *Methods for risk management of mining excavator through FMEA and FMECA*, IJES 5(6) (2016) 57–63.

[25] S. Radosavljević, P. Dašić, M. Radosavljević, *Appendix specifics of risk management in mining*, Metalurgia International, 18 (8) (2013) 59–68.

[26] M. Rausand, A. Høyland, *System reliability theory*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.

[27] Y. Wang, C. Deng, J. Wu, Y. Wang, Y. Xiong, *A corrective maintenance scheme for engineering equipment*, Engineering Failure Analysis, 36 (2014) 269–283.

15. ПРИЛОЗИ

15.1 ПРИЛОГ 1: УГОВОР

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Број: 1482/1 29.06.2017.
Датум:
Краљице Марије 16, 11120 Београд 35

ЈАВНО ПРЕДУЗЕЋЕ „ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ
Број E04.04-15264/56 269-17
14.06.2017. год.
БЕОГРАД, Царице Милице 2

а/а 110601 – 10 година
по реализацији уговора

УГОВОРНЕ СТРАНЕ:

Јавно предузеће „Електропривреда Србије“ Београд, ул. Царице Милице бр.2, Огранак РБ Колубара, Светог Саве бр.1, Лазаревац матични број: 20053658, ПИБ: 103920327, текући рачун: 160-125756-41 Banca Intesa, а.д. Београд, које у име и за рачун ЈП ЕПС заступа Жељко Вујиновић, Финансијски директор Огранка РБ Колубара, по Пуномоћју број 12.01.64515/1-15 од 30.10.2015. године (у даљем тексту: Корисник услуге)

и

Универзитет у Београду, Машински факултет из Београда, ул. Краљице Марије бр. 16, матични број 07032501, ПИБ 100209517, текући рачун 840-1876666-10 код УЈП, филијала Палилула, кога заступа проф. др Радивоје Митровић (у даљем тексту: Пружалац услуге)
заједно са

„Институт за истраживања и пројектовања у привреди“ д.о.о. Београд, ул. Ватрослава Лисинског бр.12-а, матични број 17380427, ПИБ 100211379, кога заступа Нада Станојевић

(у даљем тексту заједно: Уговорне стране)
закључиле су

УГОВОР О ПРУЖАЊУ УСЛУГЕ

УВОДНЕ ОДРЕДБЕ

Имајући у виду:

- да је Наручилац – огранак РБ Колубара, Светог Саве бр. 1, Лазаревац (у даљем тексту: Корисник услуге) спровео, отворени поступак јавне набавке, сагласно члану 32. Закона о јавним набавкама („Службени гласник РС“ број 124/2012, 14/2015 и 68/2015), (у даљем тексту: Закон) за јавну набавку услуге: „Услуга израде студија минимизација ризика у процесу одржавања бегерских јединица на површинским коповима “, број ЈН/4000/0622/2016
- да су Позив за подношење понуда и конкурсна документација у вези предметне јавне набавке објављени на Порталу јавних набавки дана 14.03.2017. године, као и на интернет страници Корисника услуге;
- да Понуда Понуђача (у даљем тексту: Понуда Пружаоца услуге) у отвореном поступку јавне набавке за јавну набавку услуге: „Услуга израде студија минимизација ризика у процесу одржавања бегерских јединица на површинским коповима“, број ЈН/4000/0622/2016, која је заведена код Наручиоца под бројем 0104050600-Е-04.04-191583/1-17 од 13.04.2017. године, у потпуности одговара захтеву Корисника услуге из позива за подношење понуда и Конкурсне документације ;
- да је Корисник услуге, на основу Понуде Пружаоца услуге број 13/17 од 11.04.2017.године и Одлуке о додели Уговора бр. Е-04.04-121030/6-17 од 31.05.2017.године, изабрао Пружаоца услуге за реализацију услуге: „Услуга израде студија минимизација ризика у процесу одржавања бегерских јединица на површинским коповима“, број ЈН/4000/0622/2016.

ПРЕДМЕТ УГОВОРА

Члан 1.

Овим Уговором о пружању услуге (у даљем тексту: Уговор) Пружалац услуге се обавезује да за потребе Корисника услуге изврши и пружи услугу: „Услуга израде студија минимизација ризика у процесу одржавања бегерских јединица на површинским коповима“, (у даљем тексту: Услуга) у свему према захтевима и условима конкурсне документације Наручиоца, прихваћене техничке спецификације и понуде пружаоца услуга.

ЦЕНА

Члан 2.
Цена Услуге из члана 1. овог Уговора износи [redacted].135.000,00 (словима: [redacted]милионастотридесетпетхиљада) динара без ПДВ-а.
На цену Услуге из става 1. овог члана обрачунава се припадајући порез на додату вредност у складу са прописима Републике Србије.
У цену су урачунати сви трошкови везани за реализацију Услуге.
Цена је фиксна односно не може се мењати за све време извршења Услуге.

НАЧИН ПЛАЋАЊА

Члан 3.

Корисник услуге се обавезује да Пружаоцу услуга плати извршену Услугу Платним налогом, на следећи начин:
Уговорне стране су сагласне да се плаћање предметних услуга врши у року који не може бити дужи од 45 дана од дана пријема исправног рачуна на писарницу Корисника услуга.
Записник о пруженим услугама (без примедби), потписан од стране овлашћеног лица пружаоца услуге и овлашћеног лица Корисника услуга задуженог за стручни надзор, представља основ за фактурисање и обавезан је пратећи документ уз рачун.
Рачун мора да гласи на: Јавно предузеће „Електропривреда Србије“ Београд, Царице Милице 2, Огранак РБ Колубара, Лазаревац, Светог Саве 1, ПИБ (103920327), МБ (20053658) и бити достављен на адресу Корисника услуге: ЈП ЕПС Београд - Огранак РБ Колубара, Дише Ђурђевић бб,11560 Вреоци са обавезним прилозима.
Пружалац услуге је обавезан да се у испостављеном рачуну позове на број и датум уговора као и на број ЈН.
У испостављеном рачуну, изабрани понуђач је дужан да се придржава тачно дефинисаних назива из конкурсне документације и прихваћене понуде (из Обрасца структуре цене). Рачуни који не одговарају наведеним тачним називима, ће се сматрати неисправним. Уколико, због коришћења различитих шифрарника и софтверских решења није могуће у самом рачуну навести горе наведени тачан назив, изабрани понуђач је обавезан да уз рачун достави прилог са упоредним прегледом назива из рачуна са захтеваним називима из конкурсне документације и прихваћене понуде.

Члан 4.

Адресе Уговорних страна за пријем писама и поште, су следеће:

Корисник услуге: ЈП ЕПС Београд – Огранак РБ Колубара, Комерцијални сектор, Дише Ђурђевић бб, 11560 Вреоци

Пружалац услуге: Универзитет у Београду, Машински факултет, ул. Краљице Марије бр.16, 11120 Београд,

заједнички са:
„Институт за истраживања и пројектовања у привреди“ д.о.о. ул. Ватрослава Лисинског бр.12-а, 11000 Београд

ОБАВЕЗЕ КОРИСНИКА УСЛУГЕ

Члан 5.

Корисник услуге се обавезује да Пружаоцу услуге изврши исплату цене Услуге из члана 2. у складу са извршеним активностима из Прилога 3 овог Уговора, на начин и у роковима утврђеним чланом 3. овог Уговора.

Члан 6.

Корисник услуга се обавезује да, пре почетка реализације Уговора, решењем именује лице овлашћено за надзор над пружањем услуга и о томе писаним путем извести Пружаоца услуга.

Члан 7.

Корисник услуге је дужан да Пружаоцу услуге током целокупног периода реализације предмета овог Уговора, учини доступним све релевантне податке, документацију и информације којима располаже, као и пресек стања података, документације и иформација којима располаже у моменту закључења овог Уговора, а које су у вези са извршењем овог Уговора.

Корисник услуге има право да затражи од Пружаоца услуга сва неопходна образложења материјала које Пружалац услуге припрема у извршењу Услуге која је предмет овог Уговора, као и да затражи измене и допуне достављених материјала, како би се на задовољавајући начин остварио циљ овог Уговора.

ОБАВЕЗЕ ПРУЖАОЦА УСЛУГЕ

Члан 8.

Пружалац услуге је дужан да услуге које су предмет овог Уговора извршава уредно, квалитетно, од свог материјала, својим средствима, сопственим потрошним материјалом и својом радном снагом у складу са правилима струке важећим за ту врсту послова и у свему према Техничкој спецификацији која је саставни део овог Уговора

Пружалац услуге је дужан да пружи Услугу Кориснику услуге у складу са својим целокупним знањем и искуством које поседује и обезбеди сва обавештења Кориснику услуге о унапређењима и побољшањима, иновацијама и техничким достигнућима, која се односе на предмет овог Уговора.

Пружалац услуге је дужан да у року од 3 (словима:три) дана благовремено затражи од Корисника услуге све потребне информације, разјашњења, документацију и друге релевантне податке неопходне за извршење овог Уговора.

Уколико Пружалац услуге не поступи у складу са претходним ставом овог члана, сматраће се да је благовремено прибавио све потребне податке за извршење Услуге у целости.

Пружалац услуга се обавезује да омогући Кориснику услуга сталан надзор над пружањем услуга и контролу рокова и квалитета пружених услуга.

Пружалац услуга се обавезује да, пре почетка реализације Уговора, решењем именује лице овлашћено за праћење реализације уговора, тј. за потписивање Записника о пруженим услугама и о томе писаним путем извести Корисника услуга.

Пружалац услуге се обавезује да, на захтев Корисника услуге, презентира и стручно образложи све анализе, предлоге и решења, акта и друга документа које је припремио у реализацији Услуге по овом Уговору, пред овлашћеним лицима за надзор Корисника услуге, као и о другим питањима која захтевају усклађеност решења.

Пружалац услуге се обавезује да израђене студије достави наручиоцу и то:
- три примерка у штампаној форми
- један примерак у електронској форми.

Члан 9.

Уговорне стране су у обавези да по потреби предузму и друге обавезе које се покажу као нужне од значаја за реализацију предмета овог Уговора.

РОК И ДИНАМИКА ПРУЖАЊА УСЛУГЕ

Члан 10.

Рок за извршење Услуга из члана 1. Уговора износи 12 (словима: дванаест) месеци од дана ступања Уговора на снагу.

СРЕДСТВО ФИНАНСИЈСКОГ ОБЕЗБЕЂЕЊА

Члан 11.

Пружалац услуге је обавезан да Кориснику услуге достави:

1) бланко сопствену **меницу за добро извршење посла** која је:
- издата са клаузулом „без протеста“ и „без извештаја“ потписана од странезаконског заступника или лица по овлашћењу законског заступника, и оверена службеним печатом, на начин који прописује Закон о меници ("Сл. лист ФНРЈ" бр.104/46, "Сл. лист СФРЈ" бр. 16/65, 54/70 и 57/89 и "Сл. лист СРЈ" бр. 46/96, Сл. лист СЦГ бр. 01/03 Уст. повеља)
- евидентирана у Регистру меница и овлашћења кога води Народна банка Србије у складу са Одлуком о ближим условима, садржини и начину вођења регистра меница и овлашћења („Сл. гласник РС“ бр. 56/11 и 80/15) и то документује овереним захтевом пословној банци да региструје меницу са одређеним серијским бројем, основ на основу кога се издаје меница и менично овлашћење,

2) Менично писмо – овлашћење којим Пружалац услуге овлашћује Корисника услуге да може наплатити меницу на износ од [redacted].500,00 динара, са роком важења минимално 30 (словима: тридесет) дана дужим од коначног рока за извршење услуге, с тим да евентуални продужетак коначног рока за извршење услуге има за последицу и продужење рока важења менице и меничног овлашћења.
- овлашћење којим законски заступник овлашћује лица за потписивање менице и меничног овлашћења за конкретан посао, у случају да меницу и менично овлашћење не потписује законски заступник понуђача;

3) фотокопију важећег Картона депонованих потписа овлашћених лица за располагање новчаним средствима Пружаоца услуге код пословне банке, оверену од стране банке на дан издавања менице и меничног овлашћења (потребно је да се поклапају датум са меничног овлашћења и датум овере банке на фотокопији депо картона),

4) фотокопију ОП обрасца.

5) Доказ о регистрацији менице у Регистру меница Народне банке Србије (фотокопија Захтева за регистрацију менице од стране пословне банке која је извршила регистрацију менице или извод са интернет странице Регистра меница и овлашћења НБС)

6) Овлашћење којим законски заступник овлашћује лица за потписивање менице и меничног овлашћења за конкретан посао, у случају да меницу и менично овлашћење не потписује законски заступник Понуђача;
Меница може бити наплаћена у случају да изабрани понуђач не буде извршавао своје уговорне обавезе у роковима и на начин предвиђен уговором.

ИЗВРШИОЦИ

Члан 12.

Извршиоци су ангажована лица од стране Пружаоца услуге.
Пружалац услуге уз потписане примерке уговора доставља Кориснику услуге:
- Списак извршилаца, са наведеним квалификацијама свих извршилаца и прецизно дефинисаним активности које обављају у извршавању Услуге. На списак извршилаца сагласност даје надзорни орган Корисника услуге.

Уколико се током извршења Услуге, појави оправдана потреба за заменом једног или више извршилаца, као и на образложен захтев Корисника услуге Пружалац услуге је дужан да извршиоца замени другим извршиоцима са најмање истим стручним квалитетима и квалификацијама, уз претходну писану сагласност Корисника услуге (стручни надзор).

Ако Пружалац услуге мора да повуче или замени било ког извршиоца Услуге за време трајања овог Уговора, све трошкове који настану таквом заменом сноси Пружалац услуге.

Члан 13.

Пружалац услуге и извршиоци који су ангажовани на извршавању активности које су предмет овог Уговора, дужни су да чувају поверљивост свих података и информација садржаних у документацији, извештајима, предрачунима, техничким подацима и обавештењима, до којих дођу у вези са реализацијом овог Уговора и да их користе искључиво за обављање те Услуге.

Информације, подаци и документација које је Корисник услуге доставио Пружаоцу услуге у извршавању предмета овог Уговора, Пружалац услуге не може стављати на располагање трећим лицима, без претходне писане сагласности Корисника услуге.

Члан 14.

Пружалац услуге је дужан да колективно осигура своје запослене (извршиоце) у случају повреде на раду, професионалних обољења и обољења у вези са радом.

Пружалац услуге је дужан да поседује полису осигурања од одговорности из делатности за штете причињене трећим лицима .

ИНТЕЛЕКТУАЛНА СВОЈИНА

Члан 15

Пружалац услуге потврђује да је носилац права интелектуалне својине и да ће предмет овог Уговора извршавати уз поштовање обавеза које произилазе из важећих прописа који регулишу права интелектуалне својине у Републици Србији.

Накнаду за коришћење права интелектуалне својине, као и одговорност за евентуалну повреду заштићених права интелектуалне својине трећих лица, сноси у целости Пружалац услуге.

Корисник услуге има право трајног и неограниченог коришћења свих Услуга које су предмет овог Уговора, без предметних, просторних и временских ограничења, као и без икакве посебне накнаде.

На све што није предвиђено овим Уговором, а тиче се предмета Уговора, примењиваће се одредбе Закона о ауторским и сродним правима ("Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012) и ЗОО.

ЗАКЉУЧИВАЊЕ И СТУПАЊЕ УГОВОРА НА СНАГУ

Члан 16.

Овај Уговор се сматра закљученим када га потпишу овлашћени представници Уговорних страна, а ступа на снагу када Пружалац услуге у складу са роковима из члана 11. овог Уговора достави средство финансијског обезбеђења.

Члан 17.

Овај Уговор се закључује и важи до обостраног испуњења уговорених обавеза уговорних страна.

НАДЗОР НАД ПРУЖАЊЕМ УСЛУГА И КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА

Члан 18.

Пружалац услуга се обавезује да омогући Кориснику услуга сталан надзор над пружањем услуга и контролу рокова и квалитета пружених услуга.
Корисник услуга се обавезује да, пре почетка реализације Уговора, решењем именује лице овлашћено за надзор над пружањем услуга и о томе писаним путем извести Пружаоца услуга.
Лице овлашћено за надзор пуноправно заступа Наручиоца и у његово име и за његов рачун предузима све радње у вези са предметом овог Уговора: позива Пружаоца услуга услед указане потребе Наручиоца за предметним услугама, присуствује извршењу услуга, врши контролу рокова, количине и квалитета уграђених пружених услуга, потписује Записник о извршеним услугама и сву пратећу документацију, и у вези са тим овлашћује се да Пружаоцу услуга наложи отклањање евентуално уочених недостатака, прати реализацију Уговора и др.
Наручилац је дужан да на сва питања која се односе на уговорене услуге даје одговоре Пружаоцу услуга посредством лица овлашћеног за надзор у року у којем се тражи одговор.
Закашњење лица овлашћеног за надзор у давању одговора, повлачи за собом право Пружаоца услуга на продужење рока за пружање услуга.

КВАЛИТАТИВНИ И КВАНТИТАТИВНИ ПРИЈЕМ

Члан 19.

Квантитативни и квалитативни пријем Услуге врши решењем именовано лице за надзор над пружањем уговорених услуга, у присуству овлашћеног представника Пружаоца услуга.
О извршеним услугама и њиховом квантитативном и квалитативном пријему сачињава се Записник о пруженим услугама који се потписује од стране овлашћених представника обе уговорне стране.
Квантитативни и квалитативни пријем Услуге врши се у присуству овлашћених представника Корисника услуге у Организационој целина „Колубара-Метал“ – Вреоци.

У случају да се приликом пријема Услуге утврди да стварно стање не одговара обиму и квалитету, Корисник услуге је дужан да рекламацију записнички констатује и исту одмах достави Пружаоцу услуге у року од 2 (два) дана.
Пружалац услуге се обавезује да недостатке установљене од стране Корисника услуге приликом квантитативног и квалитативног пријема отклони у року од 2 (два) дана од момента пријема рекламације о свом трошку.

ВИША СИЛА

Члан 20.

У случају више силе – непредвиђених догађаја ван контроле Уговорних страна, који спречавају било коју Уговорну страну да изврши своје обавезе по овом Уговору – извршавање уговорених обавеза ће се прекинути у оној мери у којој је Уговорна страна погођена таквим догађајем и за време за које траје немогућност извршења уговорних Услуга услед наступања непредвиђених догађаја, под условом да је друга Уговорна страна обавештена, у року од најдуже 3 (словима:три) радна дана о наступању више силе.

У случају наступања више силе, Пружалац услуге има право да продужи рок за извршење услуга за оно време за које је настало кашњење у извршавању уговорних Услуга, проузроковано вишом силом.

Свака Уговорна страна сноси своје трошкове, који настану у периоду трајања више силе, односно за период мировања Уговора услед дејства више силе, за који се продужава рок важења Уговора.

Уколико виша сила траје дуже од 90 (словима:деведесет) дана, било која Уговорна страна може да раскине овај Уговор у року од 30 (словима:тридесет) дана, уз доставу писаног обавештења другој Уговорној страни о намери да раскине Уговор.

НАКНАДА ШТЕТЕ

Члан 21.

Пружалац услуге је у складу са ЗОО одговоран за штету коју је претрпео Корисник услуге неиспуњењем, делимичним испуњењем или задоцњењем у испуњењу обавеза преузетих овим Уговором.

Уколико Корисник услуге претрпи штету због чињења или нечињења Пружаоца услуге и уколико се Уговорне стране сагласе око основа и висине претрпљене штете, Пружалац услуге је сагласан да Кориснику услуге исту накнади, тако што Корисник услуге има право на наплату накнаде штете без посебног обавештења Пружаоца услуге уз издавање одговарајућег обрачуна са роком плаћања од 15 (словима:петнаест) дана од датума издавања истог.

Ниједна Уговорна страна неће бити одговорна за било какве посредне штете и/или за измаклу корист у било ком виду, које би биле изван оквира непосредних обичних штета, а које би могле да проистекну из или у вези са овим Уговором, изузев уколико је у питању груба непажња или поступање изван професионалних стандарда за ову врсту услуга на страни Пружаоца услуге.

Наведена ограничавања/искључивања одговорности се не односе на одговорност било које Уговорне стране када се ради о кршењу обавеза у вези са чувањем пословних тајни, као и у вези са поштовањем права интелектуалне својине из члана 15. овог Уговора.

УГОВОРНА КАЗНА

Члан 22.

У случају да Пружалац услуге, својом кривицом, не изврши/ не пружи о року уговорене Услуге, Пружалац услуге је дужан да плати Кориснику услуге уговорне пенале, у износу од 0,2% од вредности услуге која није извршена, за сваки започети дан кашњења, у максималном износу од 10% од вредности услуге из члана 2. овог Уговора без пореза на додату вредност.

Плаћање пенала у складу са претходним ставом доспева у року од 10 (словима: десет) дана од дана издавања рачуна од стране Корисника услуге за уговорне пенале.

Уколико Корисник услуге услед кашњења из става 1. овог члана, претрпи штету која је већа од износа тих пенала, има право на накнаду разлике између претрпљене штете у целости и исплаћених пенала.

РАСКИД УГОВОРА

Члан 23.

Свака Уговорна страна може једнострано раскинути овај Уговор пре истека рока, у случају непридржавања друге Уговорне стране, одредби овог Уговора, неотпочињања или неквалитетног извршења Услуге која је предмет овог Уговора, достављањем писане изјаве о једностраном раскиду Уговора другој Уговорној страни и уз поштовање отказног рока од 15 (словима:петнаест) дана од дана достављања писане изјаве.
Корисник услуге може једнострано раскинути овај Уговор пре истека рока услед престанка потребе за ангажовањем Пружаоца услуге, достављањем писане изјаве о једностраном раскиду Уговора Пружаоцу услуге и уз поштовање отказног рока од 15 (словима: петнаест) дана од дана достављања писане изјаве.
Уколико било која Уговорних страна откаже овај Уговор без оправданог, односно објективног и доказаног разлога, друга Уговорна страна има право да на име неоправданог отказа наплати уговорну казну из члана 22. овог Уговора, у висини од 10% од укупне вредности Уговора, у свему у складу са ЗОО, одговорност за штету због неиспуњења, делимичног испуњења или задоцњења у испуњењу обавеза преузетих овим Уговором.

ПРИМЕНА ПРОПИСАНИХ МЕРА ЗА БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ

Члан 24.

Пружалац услуге је дужан да све послове које обавља у циљу реализације овог уговора, обавља поштујући прописе и ратификоване међународне конвенције о безбедности и здрављу на раду у Републици Србији. Пружалац услуге је дужан да поштује и акте које донесе Корисник услуга, односно Уговорне стране закључе из области безбедности и здравља на раду у складу са прописима, ради реализације овог уговора.
Пружалац услуге је одговоран за предузимање свих мера безбедности и здравља на раду, које је полазећи од специфичности послова које су предмет овог уговора, технологије рада и стеченог искуства, неопходно спровести како би се заштитили запослени код Пружаоца услуге, трећа лица и имовина.
У случају било каквог кршења обавезе наведене у ставу 1. и 2. овог члана Наручилац може раскинути овај уговор.

Члан 25.

Права и обавезе Уговорних страна у вези са безбедности и здрављем на раду дефинисане су у Прилогу о безбедности и здрављу на раду, који је саставни део овог уговора.

Члан 26.

Пружалац услуге је дужан да Кориснику услуга и/или његовим запосленима надокнади штету која је настала због непридржавања прописаних мера безбедности и здравља на раду од стране Пружаоца услуге, односно његових запослених, као и других лица које ангажовао Пружалац услуге, ради обављања послова који су предмет овог уговора.
Под штетом, у смислу става 1. овог члана, подразумева се нематеријална штета настала услед смрти или повреде запосленог код Корисника услуга, штета настала на имовини Корисника услуга, као и сви други трошкови и накнаде које је имао Корисник услуга ради отклањања последица настале штете.

Пружалац услуге је дужан да поседује полису осигурања од одговорности из делатности за штете причињене трећим лицима.

Члан 27.

Пружалац услуге је дужан да, у складу са законом, обустави послове на радном месту уколико је забрану рада на радном месту или забрану употребе средства за рад издало лице одређено, у складу са прописима, од стране Корисника услуге да спроводи контролу примене превентивних мера за безбедан и здрав рад, док се не отклоне његове примедбе у вези са повредом безбедности и здравља на раду.

Пружалац услуге нема право на накнаду трошкова насталих због оправданог обустављања послова на начин утврђен у ставу 1. овог члана, нити може продужити рок за извршење послова, због тога што су послови обустављени од стране лица одређеног, у складу са прописима, од стране Корисника услуга за спровођење контроле примене превентивних мера за безбедан и здрав рад.

ЗАВРШНЕ ОДРЕДБЕ

Члан 28.

Овај Уговор и његови Прилози од 1 до 6 из члана 34. овог Уговора, сачињени су на српском језику.

На овај Уговор примењују се закони Републике Србије.

У случају спора меродавно право је право Републике Србије, а поступак се води на српском језику.

Члан 29..

Ниједна Уговорна страна нема право да неку од својих права и обавеза из овог Уговора уступи, прода нити заложи трећем лицу без претходне писане сагласности друге Уговорене сране.

Члан 30.

Неважење било које одредбе овог Уговора неће имати утицаја на важење осталих одредби Уговора, уколико битно не утиче на реализацију овог Уговора.

Члан 31.

Уговорне страна током трајања овог Уговора, сходно члану 115. Закона, могу у писаној форми путем Анекса извршити измене и допуне овог Уговора и то: уколико после закључења Уговора наступе околности које отежавају испуњење обавезе једне стране, или ако се због њих не може остварити сврха Уговора у тој мери да је очигледно да уговор више не одговара очекивањима уговорних страна и да би по општем мишљењу било неправично одржати га на снази такав какав је, под условом да се у време закључења уговора те околности нису могле узети у обзир, нити су се могле избећи или савладати.

Члан 32.

Све неспоразуме који могу настати из овог Уговора, Уговорне стране ће настојати да реше споразумно, а уколико у томе не успеју Уговорне стране су сагласне да сваки спор настао из овог Уговора буде коначно решен од стране стварно надлежног суда у Београду.

Члан 33.

На односе Уговорних страна, који нису уређени овим Уговором, примењују се одговарајуће одредбе ЗОО и других закона, подзаконских аката, стандарда и техничких норматива Републике Србије, примењивих с обзиром на предмет овог Уговора.

Члан 34.

Саставни део овог Уговора чине:
Прилог број 1: Техничка спецификација;
Прилог број 2 Понуда
Прилог број 3: Структура цене из Понуде;
Прилог број 4: Прилог о безбедности и здрављу на раду;
Прилог број 5: Споразум о сарадњи у примени прописаних мера за безбедност и здравље запослених
Прилог број 6: Споразум о заједничком извршењу услуге

Члан 35.

Овај Уговор се закључује у 6 (словима:шест) примерака од којих свака Уговорна страна задржава по 3 (словима:три) идентична примерка Уговора.

КОРИСНИК УСЛУГЕ

Финансијски директор
РБ Колубара

Жељко Вујиновић

ЈАВНО ПРЕДУЗЕЋЕ ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ БЕОГРАД
102

ПРУЖАЛАЦ УСЛУГЕ

Универзитет у Београду,
Машински факултет из Београда

Проф. др Радивоје Митровић
декан

ПРИПРЕМА УГОВОРА	56
име и презиме	својеручни потпис
извршилац ВЕСНА ЂУК	Весна Ђук
непосредни руководилац МИЛАН МАРИЋ	Марић
директор сектора / самосталне службе / организационе целине у Огранку	
ОВЕРА ИСПРАВНОСТИ УГОВОРА	
име и презиме	својеручни потпис
правна	
економско финансијска	

3.1 Врста и обим услуга

ПРОЈЕКТНИ ЗАДАТАК

Назив: **СТУДИЈА МИНИМИЗАЦИЈА РИЗИКА У ПРОЦЕСУ ОДРЖАВАЊА БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА**

УВОД

Сигурност техничких система, багерских јединица, се може разматрати са два аспекта. Први и најважнији аспект је заштита оператора (човека) од повреда у току рада система. Други аспект је заштита система од оштећења проузрокованих деловањем спољашњих узрока. Предност у проучавању даје се сигурности оператора. Потреба за снижавањем трошкова експлоатације техничког система, уз остваривање захтеваног нивоа сигурности, захтева и континуалан развој дисциплине анализе поузданости и сигурности

Ризик, као комбинација учестаности или вероватноће појављивања и последица одређеног „опасног” догађаја, има два аспекта: квантитативни (израчунат на основу познате вероватноће појављивања догађаја и последица) и квалитативни (повезан са људском перцепцијом, тј. зависи од емотивног стања особе). Област људских фактора постоји јер људи чине разне врсте грешака у коришћењу техничкух система. Људска грешка се дефинише као неуспех да се изврши одређени задатак (или обављања забрањене радње) који би могао довести до нарушавања редовног пословања или оштећења опреме и имовине.

ОПШТЕ ПОСТАВКЕ

Анализа ризика има основни значај при тражењу одговора на следећа питања:

1. Шта се погрешно може догодити?
2. Ако се нешто погрешно догоди, која је вероватноћа тог догађаја и које су његове последице?

Због мноштва података, због њихове боље прегледности, лакшег закључивања, давања оцена и корективних мера развијена је метода Анализа врста, последица и критичности отказа (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA). То је средство рационализације путем систематизације према принципу: „увек је боље и економичније утврдити узроке и спречити отказе него их касније откривати и отклањати, односно сносити трошкове последица отказа“.

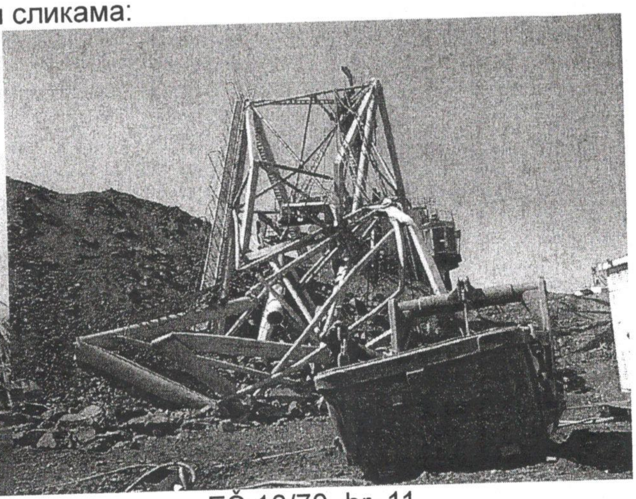
Неизвршење или погрешно извршење функције персонала може имати следеће последице:

- настанак почетног догађаја хаварије, нерасположивост целина багерске јединице у процесу експлоатације, што треба узети у обзир у анализи почетних догађаја при конструкцији стабла догађаја,
- нерасположивост целина багерске јединице после одржавања и ремонта, што треба узети у обзир при анализи поузданости система сигурне заштите,
- реализација сценарија настанка хаварија, који претходно нису разматрани и крајњих стања багерске јединице са тешким последицама при протицању хаварије, што се узима у обзир при конструкцији стабла догађаја у оквиру анализе крајњих стања.

Нежељене последице код одржавање рударске опреме могу бити катастрофалне, те се смањивањем улагања у одржавање не сме довести у опасност поузданост рада тих система и изазвати опасности од хаварија, пожара и др., али и нежељених застоја, јер су непланирани застоји у оваквој индустрији изузетно скупи.

На Површинским коповима ЕПС-а су се дешавале разне хаварије на багерским јединицама и неке од њих видимо на доњим сликама:

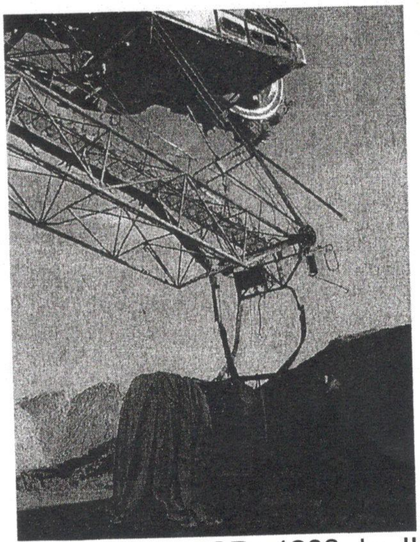
Роторни багер SchRs 1760, G-IX
Огромна хаварија



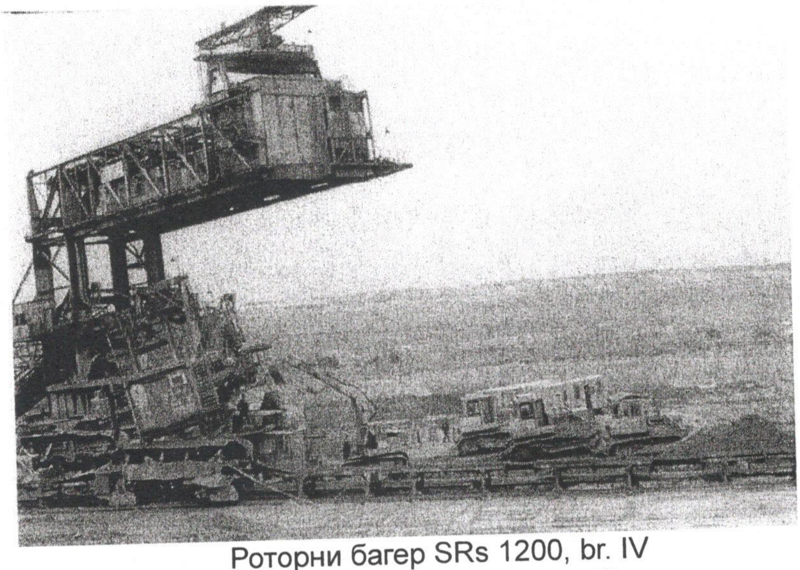
EŠ 10/70, br. 11
Хаварија катарке

Роторни bager SRs 1200, br. VI
Хаварија вучних ламела катарке

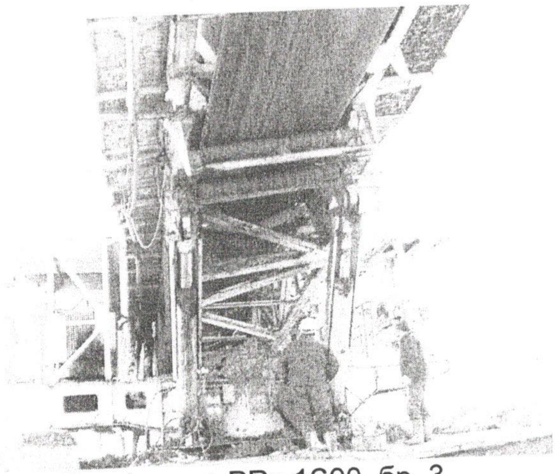
Bandwagen BRs/ARs 1600, br. 4
Хаварија носача штела гусеничног механизма



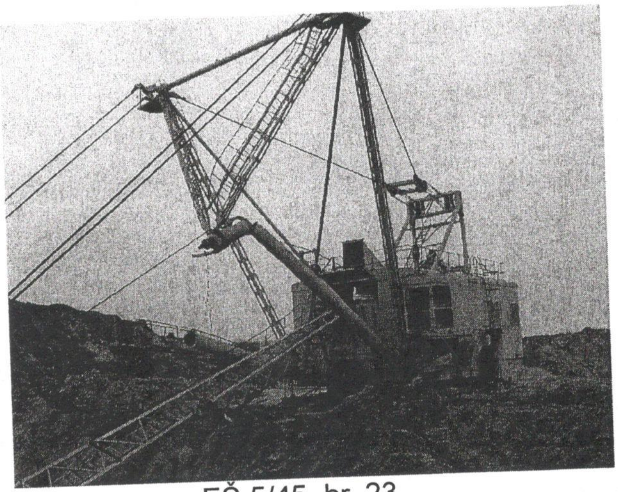
Роторни багер SRs 1200, br. III
Хаварија кабине руковаоца



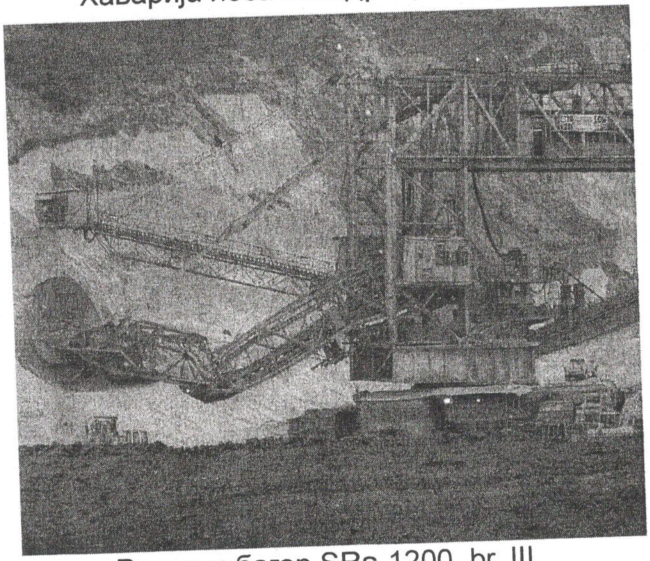
Роторни багер SRs 1200, br. IV
Хаварија носача траке III



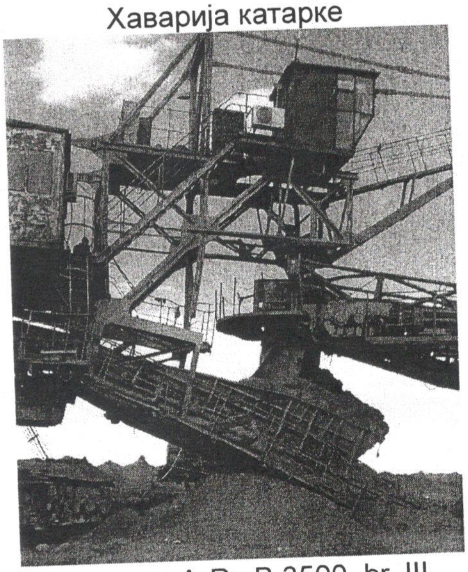
Bandwagen BRs 1600, бр. 3
Хаварија носача хидроцилиндра



EŠ 5/45, br. 23
Хаварија катарке



Роторни багер SRs 1200, br. III
Хаварија катарке



Одлагач A_2Rs B.3500, br. III
Хаварија носача пријемног бункера

ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ

Да се не би дешавале овакве и сличне хаварије морало би се извршити давање процене ризика што представља спровођење свих неопходних анализа и оцена идентификованих ризика, с циљем одређивања неопходних третмана за њихово превазилажење што би и чинило срж Студије минимизација ризика у процесу одржавања багерских јединица на површинским коповима.

Њена економска оправданост се види ако се уради једна финансијска анализа коштања једне хаварије:

Ако би се анализирала једна од приказаних хаварија у погледу цене коштања на примеру роторни багер СРс 1200, бр. III – Хаварија катарке:

- **Директни трошкови Дт** који подразумевају трошак рада, делова, материјала, механизације за поправку и довођење катарке и багера у исправно стање.
  Дт ~ 1 000 000,00 [€] – ***Извор: рачуни и фактуре Колубаре Метал која је радила поправку***
- **Индиректни трошкови Ит** који представљају трошкове за непостигнуту производњу у времену застоја багера. ***По Европским нормама индиректан трошак на јаловинском систему је 8 000,00 [€/час].*** Застој на овом багеру, који је радио на јаловини, је био годину дана односно 8 760 час.
  Ит ~ 50 000 000,00 [€]

Укупни трошкови ове хаварије су Ут = Дт + Ит ~ 51 000 000,00 [€]

Ова Студија би требала да уради приказ на који начин се врши анализа експлатационе поузданости и анализу сигурности у фази експлоатације багерских јединица. Такође, путем статистичке анализе сигурности и помоћу анализе врсте, последице и критичности отказа у току одржавања багерских јединица би требало да се дође до приказа могућег предхаварискoг догађаја што би нам омогућило да унапред делујемо и спречимо могућу хаварију.

ЗАКЉУЧАК

Дуго времена, свуда у свету па и код нас расправе су биле оријентисане ка постизању најважнијих карактеристика напретка (повишење ефективности, повећање јединичних капацитета, повећање брзина) без узимања у обзир ризика настанка хаварија и катастрофа код багерских јединица. Ово је довело до тога да су се практично и развијене земље показале неприпремљеним за тешке социјалне, економске и еколошке последице растућих, по броју и тежини последица, хаварија и катастрофа.

Концепција одржавања на основу сигурности уважава, првенствено, степен ризика, односно могуће штете изазаване врстама отказа у току рада багерских јединица. Методе анализе сигурности и оцене ризика имају за циљ идентификацију и квантифиакцију подручја са потенцијално могућим настанком стања хаварија багерских јединица. Добро спроведена оцена ризика је предуслов за избор адекватне концепције одржавања багерских јединица.

Концепт управљања ризиком путем контролне карте сигурности багерских јединица погодан је и за само управљање одржавањем, при чему се врсте отказа (почетни догађаји у анализи стабла догађаја) посматрају кроз призму стања хаварије која се није догодила, а могла се догодити.

Свака хаварија много кошта. Види се из економске анализе да су индиректни трошкови енормно велики. У овим приказаним хаваријама срећом није било људских жртава а може се рећи да су били на самој граници могућег трагичног дешавања. Колико год да знамо да су кључне активности одржавања багерских јединица на расположивости и економичности морамо да обратимо велику пажњу и на сигурност.

Време је да се у ЕПС-у неко озбиљно овиме бави. Студија би требала да буде основа даљем развоју и унапређењу одржавања багерских јединица а све у циљу минимизације ризика и смањена дешавања у виду хаварија а самим тим и енормно великим трошковима одржавања.

На основу могућих хаварија која се дешавају на нашим површинским коповима на багерским јединицама, потребно је урадити једну свеобухватну студију која би допринела минимизацији ризика догађаја истих.

Основни циљ овог истраживања је унапређење постојеће и развој савремене концепције одржавања багерских јединица на површинским коповима а све у функцији сигурности.

Концепција одржавања багерских јединица која ће се истраживати и предложити треба да омогући научно засновано и у пракси верификовано доношење одлуке о неопходним задацима одржавања и временским моментима њиховог спровођења.

САДРЖАЈ ПРОЈЕКТНОГ ЗАДАТКА:

- **СИСТЕМ ОДРЖАВАЊА БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА**
  - Технолошка опрема на површинским коповима.
  - Одржавање багерских јединица.
  - Реинжењеринг багерских јединица.
  - Сигурност багерских јединица.

ОДРЖАВАЊЕ И ЖИВОТНИ ЦИКЛУС БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА

- Функција одржавања.
- Задатак одржавања и инжењерство животног циклуса.
- Пројектовање за одржавање.

- **АНАЛИЗА ЕКСПЛОАТАЦИОНЕ ПОУЗДАНОСТИ БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА**
  - Приказ једног објекта истраживања.

- Извршити испитивања за оцену поузданости.
- Карактеристике поузданости објекта истраживања.
- Коментар.
- **СИГУРНОСТ ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА КАО САСТАВНИ ДЕО ПРОБЛЕМА ЕФЕКТИВНОСТИ**
- Поставка проблема.
- Основни појмови у области сигурности техничких система.
- Основни показатељи (индикатори) сигурности техничких система.
- Друштвено-економски проблеми обезбеђења сигурности техничких система.
- Основни принципи обезбеђења сигурности техничких система.
- Кратак приказ развоја статистичких метода анализе сигурности.
- Статистичка анализа сигурности у оцени ризика.
- Веза индивидуалног и конструкционог ризика.
- **УПРАВЉАЊЕ РИЗИЦИМА У ПРОЦЕСУ ОДРЖАВАЊА**
- Поступци, процене, приоритети.
- Методе примене за превенцију.
- Врсте екстерних утицаја и однос према њима.
- Стандарди.
    - **АНАЛИЗА ВРСТА, ПОСЛЕДИЦА И КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗА У ТОКУ ОДРЖАВАЊА БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА**
- 1 Шта је FMECA? (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA).
- 2 Зашто (се спроводи) FMECA?
- 3 Метода FMECA и животни циклус техничког система.
- 4 Поступак FMECA.
- 5 Основне концепције методе FMECA.
- 6 FMECA одржавања (увод, тим, полазне поставке, испоручиоци и крисници, циљеви).
- 7 Разлике између FMECA procesa i FMECA одржавања.
- 8 Коришћење модела FMECA одржавања (попуњавање колона, опрема, вероватноћа појављивања отказа, тежина последице отказа, вероватноћа откривања отказа, превентивне мере).
- 9 Примена FMECA одржавања.
- 10 FMECA одржавања објекта истраживања.
- **СТАТИСТИЧКА АНАЛИЗА СИГУРНОСТИ У ФАЗИ ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА**
- **Улога статистичке анализе сигурности у фази експлоатације техничких система.**
- Оцена ризика хаварије на основу методе стабла догађаја.
- Анализа сигурности техничких система на основу резултата издвајања претходника хаварија.
- **УТИЦАЈ ПОУЗДАНОСТИ ПЕРСОНАЛА НА ЕКСПЛОАТАЦИОНУ СИГУРНОСТ БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА**
- Квалитативна анализа поузданости персонала.
- Квантитативна анализа поузданости персонала.
- **АНАЛИЗА СИГУРНОСТИ У ФАЗИ ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ БАГЕРСКИХ ЈЕДИНИЦА**
- Скрининг.
- Конструкција стабала догађаја (Стабла догађаја за почетне догађаје - врсте грешака оператора, врсте грешака одржаваоца, врсте отказа механизма).
    - **ИНФОРМАТИЧКА ПОДРШКА**
    - **ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА**

3.2. Рок извршења услуга

Рок за извршење Услуга износи максимално 12 (словима: дванаест) месеци од дана ступања Уговора на снагу.

3.3. Место извршења

Локација Пружаоца услуге и локација Наручиоца ЈП ЕПС Београд – Огранак РБ Колубара, Организациона целина „Колубара-Метал“ – Вреоци.

3.4. Квалитативни и квантитативни пријем

Контролу квалитета предметних услуга и проверу да ли су исте извршене у складу са карактеристикама захтеваним у техничкој спецификацији у погледу обима и квалитета, извршиће овлашћено лице Корисника услуга задужено за стручни надзор у присуству овлашћеног представника Пружаоца услуга, што ће бити Записнички констатовано.

Студија се уз писмену белешку доставља у три штампана и једном електронском примерку (CAD фајлови, pdf).

15.2 ПРИЛОГ 2: ПОТВРДА КОРИСНИКА

ЈП ЕПС
Огранак РБ Колубара, Лазаревац
Колубара Метал, Вреоци

Универзитет у Београду
Машински факултет
БЕОГРАД
Краљице Марије 16

На захтев проф. др Срђана Бошњака, достављамо

ПОТВРДУ

о успешној примени техничког решења „Минимизација ризика у експлоатацији и одржавању роторних багера“ (аутори: проф. др Срђан Бошњак, доц. др Милорад Пантелић, проф. др Мирјана Мисита, доц. др Небојша Гњатовић, истраживач-сарадник, Александар Стефановић) које је настало током реализације студије под називом „Минимизација ризика у процесу одржавања багерских јединица на површинским коповима“. Наведено техничко решење примењује се од септембра 2018. године.

Технички директор Колубара Метал

Драган Максимовић, *дипл.маш.инж.*

18. новембар 2019.
Вреоци

15.3 ПРИЛОГ 3: РАД ПУБЛИКОВАН У ЧАСОПИСУ СА SCI ЛИСТЕ (категорија: M22)

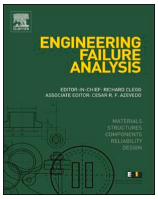
(https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104289)

Engineering Failure Analysis xxx (xxxx) xxxx

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Failure Analysis

journal homepage: www.elsevier.com/locate/engfailanal



Service FMECA of a bucket wheel excavator

Milorad P. Pantelić[a], Srđan M. Bošnjak[b,*], Mirjana Z. Misita[b], Nebojša B. Gnjatović[b], Aleksandar Z. Stefanović[b]

[a] *University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Serbia*
[b] *University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia*

ARTICLE INFO

Keywords:
Bucket wheel excavator
Service FMECA
Mechanical failures
Electrical failures

ABSTRACT

Surface mining systems (SMSs) are among the most significant 20th century achievements in mining industry, whose significance to miners is comparable to the invention of dynamite in the 19th century. However, problems of SMS risk assessment are very scarce in relevant literature. For this reason, this paper aims to establish a consistent risk quantification approach for bucket wheel excavators (BWEs), the backbones of these systems. Based on the original structural scheme of a BWE, the risk parameters assessing criteria stemming from multidecadal experience and the database of recorded standstills (in the considered case, one hour of SMS downtime generates indirect financial losses of ≈15000€), a study was conducted applying the Service FMECA technique to the BWE SRs2000 (one of the best-selling models from "Takraf"), with the following conclusions: (a) the material conveying subsystem is the highest contributor in the total number of mechanical and electrical failures, as well as in total downtime; (b) during the monitoring period, there were no extreme risk level failures. Besides, corrective actions for reducing risk levels of the most critical mechanical and electrical failure modes are given in the paper. The presented approach for risk quantification for a BWE can be successfully applied to other SMS subsystems, notably spreaders.

1. Introduction

The invention and wide application of the surface mining systems (SMSs) present one of the most significant achievements in the field of mining in the 20th century. Their significance and influence can be compared to the impact that the invention of dynamite has had on the miners of the 19th century [1]. Thanks to numerous technical-technological and economic superiorities, as well as the advantages from the standpoint of safety of the personnel and machines, surface exploitation of coal has gained primacy over underground exploitation [2–4].

The surface exploitation of minerals, primarily coal, requires the use of high-capacity machines, with a relatively low specific energy of excavation. A bucket wheel excavator (BWE), being a machine for excavation and the first in line in an SMS chain, has a dominant influence on the performance of the said system. Thanks to the intensive development in the past 100 years (the first BWE was put in exploitation in 1916 in the "Bergwitz" open pit (OP) in Germany, [5]), BWEs have gained significant advantages over the bucket chain excavators, forcing them out of use in SMSs almost entirely.

The BWEs, machines of extreme size and weight (for example, the BWE Bagger 293, 225 m long and 96 m tall, with a mass of 14200 t [6], is the biggest self-propelled machine in existence), are intended for perennial exploitation, which stresses the importance of their reliability, safety and maintenance, as well as modernization [7]. The extremely harsh regimes of exploitation (24/7),

---

[*] Corresponding author.

E-mail addresses: milorad.pantelic@ftn.kg.ac.rs (M.P. Pantelić), sbosnjak@mas.bg.ac.rs (S.M. Bošnjak), mmisita@mas.bg.ac.rs (M.Z. Misita), ngnjatovic@mas.bg.ac.rs (N.B. Gnjatović), astefanovic@mas.bg.ac.rs (A.Z. Stefanović).

https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104289
Received 17 January 2019; Received in revised form 4 September 2019; Accepted 4 November 2019
1350-6307/

Please cite this article as: Milorad P. Pantelić, et al., Engineering Failure Analysis, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104289

accompanied by the loading of a pronounced dynamic and stochastic character [8], are a fertile ground for the emergence of various kinds of failures [9], which, in extreme cases, can generate catastrophic consequences, i.e. a total collapse of the machine [9–11].

Apart from serious risks to personnel health and safety [12,13], the consequences of failure of the machines which make up an SMS are very high financial losses. In the case of BWEs, the financial losses due to the halt in production caused by the failure of a fundamental SMS machine frequently surpass the financial losses caused by direct material damage, depending on the machine's capacity and the type of the material being excavated (coal or overburden) [9,14]. For example, one hour of downtime of the overburden system (theoretical capacity of the BWE being $Q_{\mathrm{SchRs630}} = 4100\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$) in the OP "Tamnava East Field" (the mining basin “Kolubara”, Serbia) leads to an indirect financial loss of $DTC_{\mathrm{TE}} = 9232$ € [15].

From the reliability standpoint, the machines that form an SMS are serially coupled, which means that the failure of a single machine causes the downtime of the entire system. Apart from that, the intended exploitation lifespan of BWEs is 40 years (the average age of the BWEs in the “Kolubara” mining basin is 29 years), with the tendency to expand it by an additional 20 years through revitalization and modernization. The presented facts point to the exceptional importance of maintenance of the surface mining machines. However, even with the intensive development of the methods for reliability analysis of the technical plants and systems since the 1950s [16], as well as the procedures for the analysis of their failures and safety [17], and maintenance conceptions [18], the referent literature is characterized by an almost-complete absence of topics of risk assessment of BWEs as well as other subsystems of an SMS. The authors have managed to find only three papers [19–21] which consider the above-mentioned issue. Furthermore, even though the titles of the papers [19,20] contain the term “mining excavator”, the subjects of the research are not BWEs (machines for continuous excavation), but the excavators with a single bucket, which are the auxiliary machinery on the surface mines, not the backbone of SMSs. Finally, it is important to observe that there are still no technical regulations (e.g. recommendations, standards) dealing with the risk assessment of surface mining machines. Because of the stated facts, the aim of this study is to establish a consistent approach to the risk quantification of BWEs, taking into account all their structural and exploitation specificities. Research was conducted using a technique called the Service Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (S-FMECA) which, among others, serves as one of the fundamental analytical tools for forming the optimal maintenance conception [22,23]. The presented risk assessment approach for BWEs can also be successfully applied to other subsystems of an SMS, first and foremost, spreaders.

2. Subject of the research

The excavation of overburden within the first (I) excavator-conveyor-spreader (ECS) system of the OP “Tamnava West Field” (mining basin “Kolubara”, Fig. 1) is performed by a BWE SRs 2000x32/5 (theoretical capacity of $Q_{\mathrm{SRs2000}} = 6600\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$) with the loading unit VR92 (LU VR92), which is the subject of the research (Fig. 2). It is a very complex technical system whose subsystems (SuS), from a reliability standpoint, are serially connected (Figs. 3 and 4).

The BWE performs its fundamental function – the excavation of soil material – through a simultaneous operation of the subsystems 1 and 2 (Figs. 3 and 4). The positioning of the bucket wheel, with the goal of achieving the requested cutting parameters, is realised with subsystems 3 and 4. Additionally, subsystem 4 enables BWE travelling i.e. changing the working position of the whole machinery (BWE + LU). Conveying of the excavated material is achieved by subsystem 5 which, at the analysed excavator, consists of four belt conveyors. Receiving and transferring of all the loads the machine is subjected to, is realised by subsystem 6, while the power supply is provided by subsystem 7. The ground, which is subsystem 8, represents the working environment (terrace), as well as the machine support (the so-called ‘planum’). Control, safety, alarm and lubrication devices are treated as parts of the subsystem in which they fulfil their function.

Finally, having in mind the fact that the exploitation conditions for the I system in the OP “Tamnava West Field” and the ECS analysed in the paper [15] (OP “Tamnava East Field”) are quite similar (both systems belong to the OP “Tamnava”, a part of the mining basin “Kolubara”), in the first approximation it can be assumed that the indirect financial losses caused by the standstills of the considered system are proportional to the theoretical capacities of the basic machines – BWEs. In this case, a single hour of standstill of the I system in the OP "Tamnava West Field" generates the indirect financial loss of

$$DTC_{\mathrm{TW}} = DTC_{\mathrm{TE}} \times Q_{\mathrm{SRs2000}}/Q_{\mathrm{SchRs630}} = 9232 \times 6600/4100 \approx 14861€.$$

3. Reliability and effectiveness related indicators of a bucket wheel excavator

During the monitoring period (February to August 2018), there have been a total of $NS_{\mathrm{BWE}} = 2797$ standstills of the BWE, with a total downtime of $DT_{\mathrm{BWE}} = 44545$ min (Tables 1 and 2, Fig. 5). The average downtimes for the particular standstill types are given in Table 3, whilst the average downtime for all standstill types was

$$T_{\mathrm{DT,BWE,A}} = DT_{\mathrm{BWE}}/NS_{\mathrm{BWE}} = 44545/2797 = 15.9\ \mathrm{min}.$$

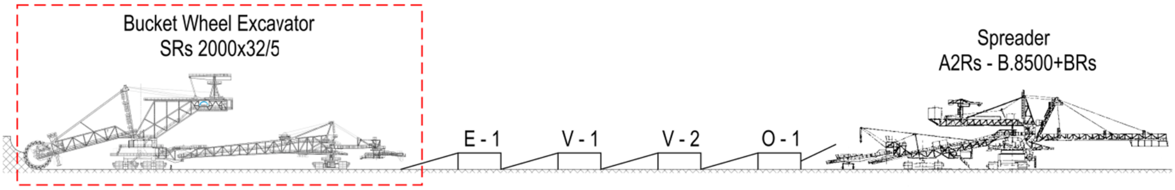


Fig. 1. Technological scheme of the I ECS system in the OP “Tamnava West Field”: E-1 - terrace conveyor 1 ($l = 2858$ m); V-1 ($l = 1677$ m), V-2 ($l = 1436$ m) – intermediate belt conveyors 1 and 2; O-1 ($l = 1047$ m) – discharge belt conveyor 1.

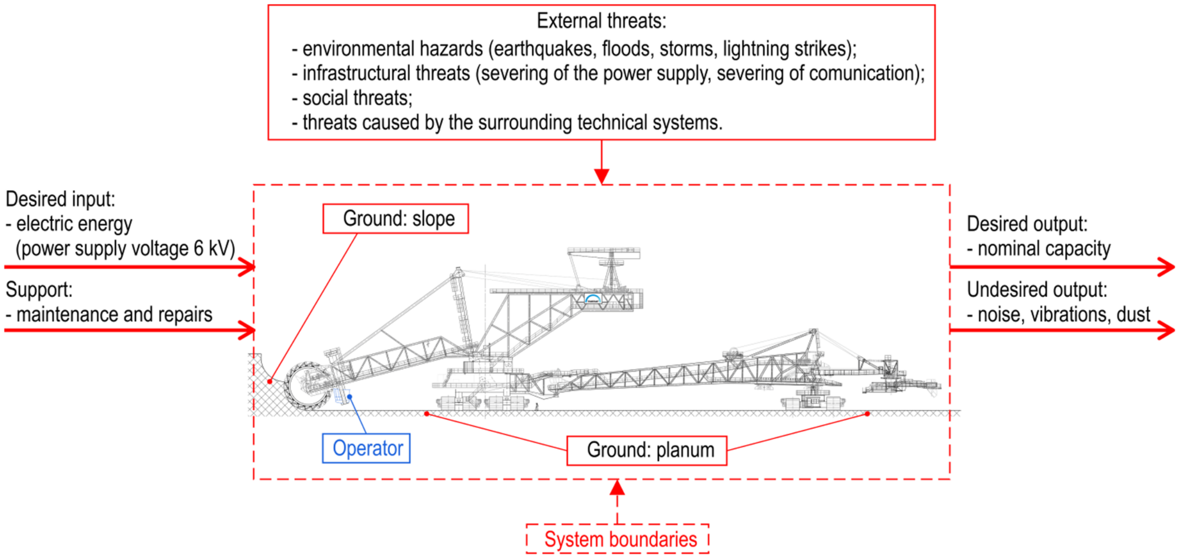


Fig. 2. BWE SRs 2000x32/5 + VR92 as a technical system – the subject of the research.

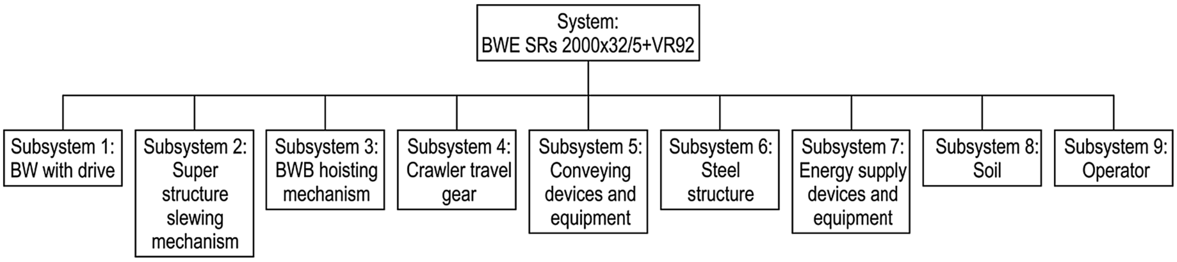


Fig. 3. Subsystems of the BWE SRs 2000x32/5 + VR92 – the first hierarchical level.

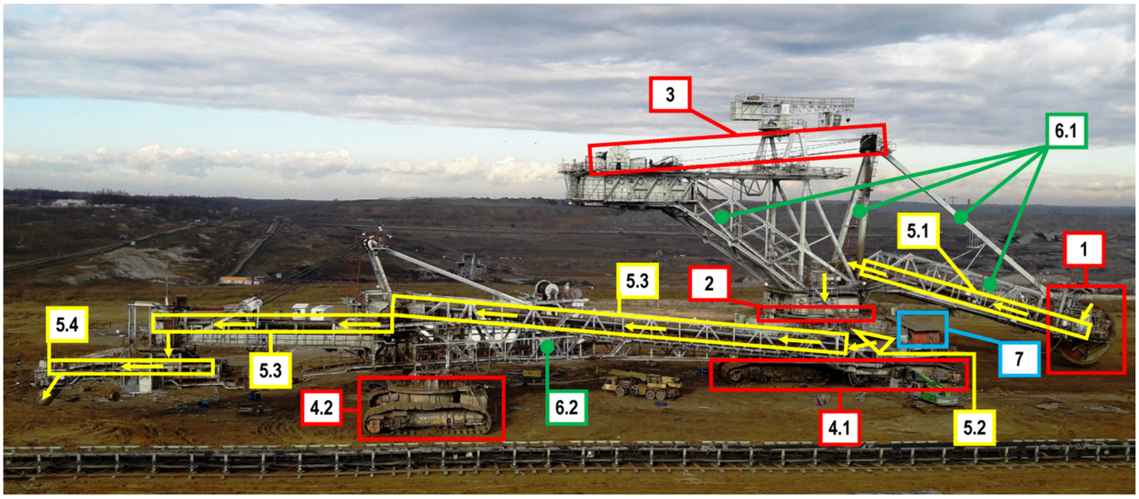


Fig. 4. BWE SRs 2000x32/5 + VR92 (total mass 2234 t): 1-bucket wheel with drive (SuS 1); 2-slewing mechanism (SuS 2); 3-bucket wheel boom hanging system (SuS 3); 4.1-BWE crawlers (part of the SuS 4); 4.2 LU crawlers (part of the SuS 4); 5.1-belt conveyor (BC) of the bucket wheel boom (BC 1, part of SuS 5); 5.2-intermediate belt conveyor (BC 2, part of the SuS 5); 5.3-belt conveyor of the LU (BC 3, part of the SuS 5); 5.4-discharge belt conveyor(BC 4, part of the SuS 5); 6.1-BWE load carrying structure (part of the SuS 6); 6.2-LU load carrying structure (part of the SuS 6); 7-power cable reel (part of the SuS 7).

Table 1
Number of standstills.

Month[a]	Technological	Electrical	Mechanical	Third party	Organizational	Meteorological conditions	Extraordinary conditions	Total
2	301	2	37	7	6	4	0	357
3	440	2	40	1	4	0	0	487
4	361	8	74	0	1	2	0	446
5	326	1	53	0	5	3	0	388
6	255	3	27	0	3	0	1	289
7	294	5	30	1	0	0	0	330
8	434	12	45	7	1	1	0	500
Total	2411	33	306	16	20	10	1	2797

[a] 2-February; 3-March; 4-April; 5-May; 6-June; 7-July; 8-August.

The total available working time of the ECS system in the monitoring period was $T_{\mathrm{ECS}} = 305220$ min, while the total downtime of the considered system amounted to $DT_{\mathrm{ECS}} = 136655$ min. Therefore, the participation of standstills caused by the BWE in the total downtime of the ECS system was

$$(DT_{\mathrm{BWE}}/DT_{\mathrm{ECS}}) \times 100 = (44545/136655) \times 100 = 32.6\%.$$

The total time the BWE spent in a standby regime was

$$SB_{\mathrm{BWE}} = DT_{\mathrm{ECS}} - -DT_{\mathrm{BWE}} = 136655 - -44545 = 92110 \text{ min},$$

while its availability (AV_{BWE}) and time efficiency (U_{BWE}) [24] were

$$AV_{\mathrm{BWE}} = [(T_{\mathrm{ECS}} - -DT_{\mathrm{BWE}})/T_{\mathrm{ECS}}] \times 100 = [(305220 - -44545)/305220] \times 100 = 85.4\%,$$

$$U_{\mathrm{BWE}} = [(T_{\mathrm{ECS}} - -DT_{\mathrm{BWE}} - -SB_{\mathrm{BWE}})/(T_{\mathrm{ECS}} - -DT_{\mathrm{BWE}})] \times 100=$$

$$= [(305220 - -44545 - -92110)/(305220 - -44545)] \times 100 = 64.7\%.$$

4. Mechanical and electrical failures

Data on the number of mechanical and electrical failures (MFs and EFs, respectively), as well as the downtimes caused by them (MDs and EDs respectively), which occurred in the BWE subsystems during the monitoring period, are presented in Tables 4 and 5, as well as in Figs. 6 and 7.

During the monitoring period, a total of 89 MF modes and 24 EF modes were registered in the database (Appendix, Tables A.1 and A.2). Basic data of the representative MF and EF modes are given in Tables 6 and 7.

5. The S-FMECA of mechanical and electrical failures

From the standpoint of exploitation and maintenance, SMSs are characterized by numerous specificities compared to other industrial systems. The conditions for maintenance of the SMSs are pronouncedly heavy due to the operations being conducted "in situ" which, on its own, significantly prolongs the duration of the interventions and calls for a specific organization of the maintenance system. Based on the perennial experience, the criteria for measuring risk parameters (Tables 8–10), which are in full accordance with the exploitation and maintenance conditions of the SMS in the "Kolubara" mining basin, have been formed [25].

The frequency of the occurrence parameter (*O*) for the i-th failure mode (Table 8) is quantified on the basis of the mean time between failures (*MTBF*) [24],

$$MTBF_{\mathrm{i}} = (T_{\mathrm{ECS}} - DT_{\mathrm{i}} - SB_{\mathrm{BWE}})/NF_{\mathrm{i}},$$

Table 2
Duration of standstills.

Month[a]	Technological	Electrical	Mechanical	Third party	Organizational	Meteorological conditions	Extraordinary conditions	Total
	min							
2	1930	165	2010	95	85	70	0	4355
3	3460	15	2625	95	90	0	0	6285
4	2465	260	6130	0	10	10	0	8875
5	1980	115	6365	0	95	20	0	8575
6	1855	35	1590	0	60	0	15	3555
7	2025	460	1250	35	0	0	0	3770
8	5605	565	2790	40	30	100	0	9130
Total	19,320	1615	22,760	265	370	200	15	44,545

[a] 2-February; 3-March; 4-April; 5-May; 6-June; 7-July; 8-August.

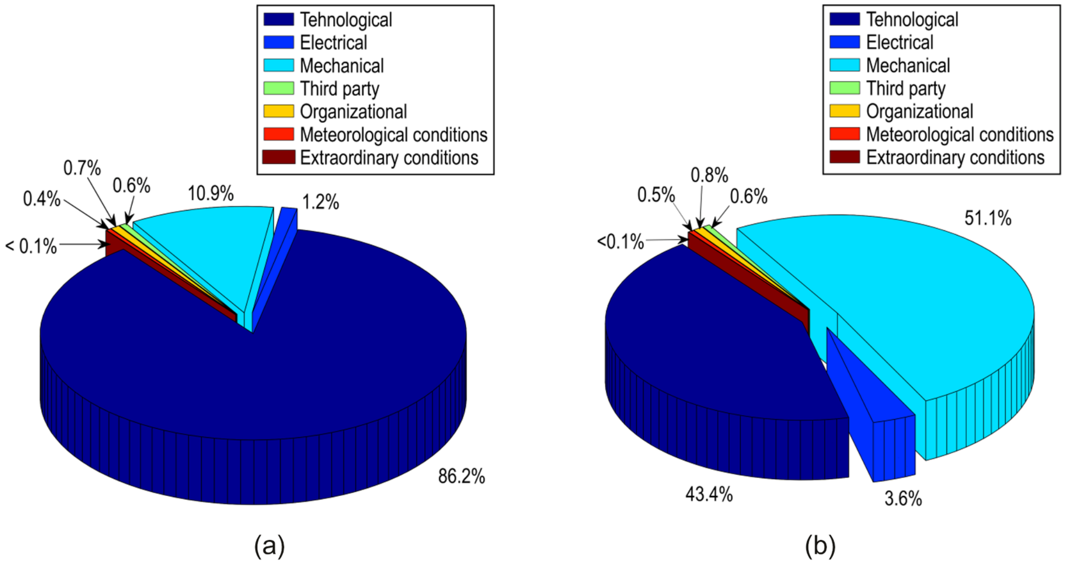


Fig. 5. Percentage participation of the standstill types in the total number of standstills (a) and the total downtime (b) of the BWE.

Table 3
Average downtimes.

Standstill type						
Technological	Electrical	Mechanical	Third party	Organizational	Meteorological conditions	Extraordinary conditions
min						
8.0	48.9	74.4	16.6	18.5	20.0	15.0

Table 4
Distribution of MFs and MDs.

Subsystem	Number of MFs	MDs (min)
1	71	6230
2	3	235
4	55	4720
5	171	11,320
Unassigned[a]	6	255
Total	306	22,760

[a] Due to a missing exact failure identification in the database.

Table 5
Distribution of EFs and EDs.

Subsystem	Number of EFs	EDs (min)
1	4	55
2	4	145
4	1	5
5	16	725
7	7	570
Unassigned[a]	1	115
Total	33	1615

[a] Due to a missing exact failure identification in the database.

where NF_i is the total number of occurrences, while DT_i represents the total downtime caused by the i-th failure mode (Tables 6 and 7).

The quantification of the severity parameter (S) is done according to the average downtime

$$DT_{A,i} = DT_i/NF_i,$$

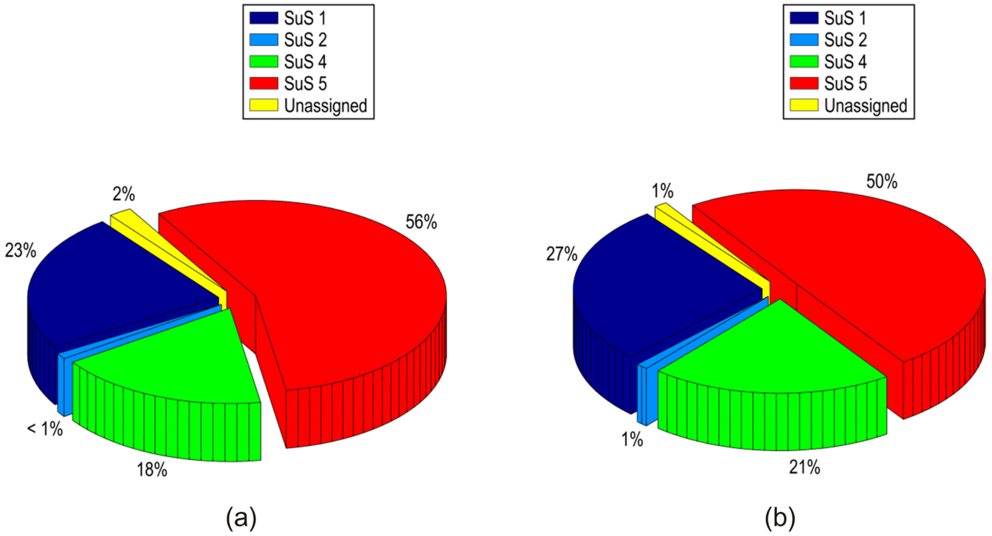


Fig. 6. Percentage participation of the subsystems in the total number of MFs (a) and the total MDs (b) of the BWE.

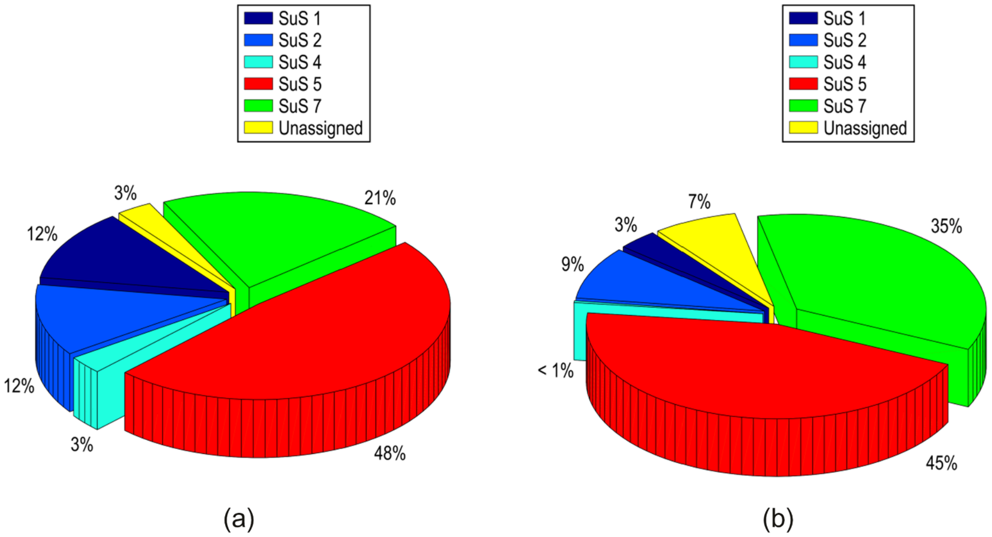


Fig. 7. Percentage participation of the subsystems in the total number of EFs (a) and the total EDs (b) of the BWE.

Table 6
Basic data of the representative MF modes.

Designation (i)	Item	Description	Subsystem	Total number (NF_i)	Total downtime (DT_i) (min)
30	Return idler of the BC 3	Idler blockage, followed by self-ignition	5	1	20
5	Ring chute	Loss of integrity of the segment	1	7	2800
22	Central chute	Failure of the drive unit	5	5	1700
80	BWE crawler	Damage of the track wheel	4	2	315
81	BWE crawler	Failure of the safety plate welded joint and dislocation of the pin	4	11	530
…	…	…	…	…	…
43	BC 1	Belt slippage	5	1	5

as well as according to the state of the SMS after the occurrence of the i-th failure mode. In this way, the influence of the considered failure mode on the performance and safety of the SMS, the term-plan for task completion, the reputation of the business/ production system, as well as the influence on the quality of financial management, are all taken into account (Table 9).

Table 7
Basic data of the representative EF modes.

Designation (i)	Item	Description	Subsystem	Total number (NF_i)	Total downtime (DT_i) (min)
22	High voltage cable	Arcing fault of the cable head R045	7	4	540
8	Central chute	Motor failure	5	2	140
5	Central mechanism for electrical cables guiding	Damage of the electrical cables	2	1	120
9	Central chute	Failure of the motor electrical protection	5	1	100
12	Deflection pulley of the BC 3	Failure of the drive unit	5	1	85
…	…	…	…	…	…
6	Central mechanism for electrical cable guiding	Dislocation of the electrical cables	2	1	5

Table 8
Occurrence (O) rankings for an SMS.

$MTBF$ (h)	O	Description
< 2	10	extremely high
2–10	9	decidedly high
11–100	8	very high
101–400	7	high
401–1000	6	average high
1001–2000	5	average low
2001–3000	4	low
3001–6000	3	very low
6001–10000	2	decidedly low
> 10000	1	extremely low

Having in mind the diverse nature and mechanisms of occurrence and development of certain types of failures, there is a difference between failures accompanied by side effects which are relatively easy to detect (for example: noise, vibrations and wear), and those which occur suddenly and without forewarning. For that reason, the length of the period during which the mentioned effects occur i.e. the so-called "forewarning period", the level of coverage of the machine by the "planned preventive maintenance" (PPM) measures as well as the efficiency of the applied procedures for technical diagnostics, all present the basis for the quantification of the detectability parameter (D, Table 10).

By applying the criterion for the assessment of risk parameters (Tables 8–10), the values of risk parameters were determined, and the risk priority number (RPN) calculated,

$$RPN = O \times S \times D,$$

for all modes of mechanical and electrical failures observed during the monitoring period (Appendix, Tables A.1 and A.2). The S-FMECA working sheets for failures with the highest risk levels are presented in Tables 11 and 12.

6. Discussion and final remarks

Based on the results presented in Section 3, the following conclusions can be drawn:

- The levels of availability and time efficiency of the analyzed BWE, 85.4% and 64.7%, respectively, are insignificantly lower than the corresponding indicators for the same class of excavators which operate in the OPs "Profen" and "Schleenhain" (Germany) [26].
- Technological standstills – TSs have the highest frequency of occurrence (2411 standstills, i.e. 86.2% of the total number of BWE standstills, Table 1, Fig. 5a), followed by mechanical standstills – MSs (306 standstills, i.e. 10.9%) and electrical standstills – ESs (33 standstills, i.e. 1.2%). The frequencies of other types of standstills (third party, organizational, meteorological and extraordinary conditions) are very low (percentage participations are less than 1%).
- The longest total downtime occurs at the MSs (22760 min, i.e. 51.1% of the total BWE downtime, Table 2, Fig. 5b), followed by the TSs (19320 min, i.e. 43.4%) and the ESs (1615 min, i.e. 3.6%). Percentage participations of other types of standstills in the total BWE downtime are very low, less than 1%.
- The average downtime of all standstill types is 15.9 min, whereby the longest average downtime is attributed to the MSs (74.4 min, Table 3), and the shortest to the TSs (8.0 min).

The analysis of the data on the MFs and EFs of the BWE subsystems, Section 4, points to the following conclusions:

- The highest participation in the total number of MFs and total MDs is that of the SuS 5 and it is equal to ≈56% and ≈50%, respectively

Table 9
Severity (*S*) rankings for an SMS.

The state of the SMS and downtime	*S*	Description of severity	Description of consequences
Inability to perform all functions	10	Catastrophic	Irreparable damage (destruction); fatalities; drastic negative effects on the business reputation of the company
Inability to perform most of the functions	9	Critical	A very high level of damage; serious safety violation; severe injuries; serious harm to the company's public image
Inability to fully perform several functions, followed by minimal operating performances; downtime ≥ 8 h	8	Very high	Significant performance deterioration, significant but repairable damage; significant violation of safety; possible operator injury, required sick leave; public reputation of the company harmed
Inability to fully perform a certain function, with others being performed above minimum levels; 4 h ≤ downtime < 8 h	7	High	The SMS is not fully operational, reparable failure; no significant safety violation; possible operator injury, required sick leave; loss of reputation within the industry
Ability to perform all functions, followed by performance deterioration; 1 h ≤ downtime < 4 h	6	Moderately high	The SMS is in operational state, but at a reduced performance level, repairable failure; no safety violations; possible operator injury, no sick leave needed; loss of reputation within the industry
Ability to perform all functions, followed by a slight performance deterioration; 0.5 h ≤ downtime < 1 h	5	Moderate	The system is fully operational, with the appearance of reparable damage, it is safe but requires adjustments; degraded working environment which causes dissatisfaction of the operator, sometimes requiring first aid
Ability to perform all functions, requires adjustments; downtime < 0.5 h	4	Low	The system is fully operational, with the appearance of minor physical damage, it is safe but requires adjustments; operation is accompanied by side effects (occasional vibrations, noise) which can lead to discomfort/unpleasantness/upset the operator
Ability to perform all functions, requires adjustments	3	Very low	The system is fully operational, with insignificant physical damage, reliable, requires adjustments; operation is accompanied by side effects (occasional vibrations, noise) which can lead to discomfort/unpleasantness/upset the operator; no pronounced losses in production
Ability to perform all functions, requires minor adjustments;	2	Minor	The system is fully operational, no signs of physical damage, it is safe, requires negligible adjustments; operation is accompanied by side effects (occasional fluttering, low-level noise) unlikely to be noticed by the operator
All functions are being performed within the designed boundaries	1	Very minor	The system is fully operational, the failure has no effects on the system performance, not noticed by the operator; the safety of property and personnel is unaffected; no financial losses

Table 10
Detectability (*D*) rankings for SMS.

Possibility of defect detection	*D*	Description
PPM will not or cannot detect the existence of a defect	10	Almost impossible
PPM has a very remote chance of detecting the existence of a defect	9	Very remote
PPM has a remote chance of detecting the existence of a defect	8	Remote
PPM has a very low chance of detecting the existence of a defect	7	Very low
PPM has a low chance of detecting the existence of a defect	6	Low
PPM has a moderate chance of detecting the existence of a defect	5	Moderate
PPM has a moderately high chance of detecting the existence of a defect	4	Moderately high
PPM has a high chance of detecting the existence of a defect	3	High
PPM has a very high chance of detecting the existence of a defect	2	Very high
PPM will almost certainly detect the existence of a defect	1	Almost certain

(Fig. 6), followed by the SuS 1, whose percentage participation in the total number of MFs is equal to ≈23%, while its percentage participation within the total MDs is equal to ≈27%. The participation of the SuS 4 is also noteworthy: ≈18% of the total number of MFs and ≈21% of the total MDs. The participation of the SuS 2 in the total number of MFs and total MDs is negligibly small (≈1%).

- The highest contribution to the total number of EFs and total EDs is that of the SuS 5 and it is equal to ≈48% and ≈45%, respectively (Fig. 7), followed by the SuS 7, whose percentage participation in the total number of EFs equals ≈21%, while its percentage participation in the total EDs is ≈35%. The SuS 1 and SuS 2 have an equal contribution to the total number of EFs (≈12%), while their participations in the total EDs equal ≈3% and ≈9%, respectively. The contribution of the SuS 4 to the total number of EFs is ≈3%, and it is negligibly small within the total EDs (< 1%). It is important to observe that the percentage participations of the unassigned EFs in the total EDs equal ≈3% and ≈7%, respectively, which underlines the importance of the unambiguous identification of failures within a database.

During the monitoring period, no MF modes with an extreme value of risk level were observed (Table 11, Table A1), and only a single MF mode with a high risk level: MF mode 30. This MF mode is a consequence of the blockage of the return idler of BC 3, which

Table 11
The S-FMECA worksheet of the most critical MF modes.

Subsystem	Item	Failure				Pre-action							Post-action				
		Designation	Description	Consequence	Cause(s)	Current controls, prevention	*MTBF* (h)	*O*	DT_A (min)	*S*	*D*	*RPN*[a]	Corrective actions	*O*	*S*	*D*	*RPN*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	Return idler of the BC 3	30	Idler blockage	Self-ignition	Bearing blockage	Visual control	3551.50	3	20.00	9	9	243	Increased visual control of functionality	3	9	3	81
													Periodic application of technical diagnostics	3	9	2	54
													Continuous monitoring	3	9	1	27
1	Ring chute	5	Loss of integrity of the segment	Irregular operation; loss of capacity	Faults in mounting and joining; improper material	Visual control; material test certificate provided by the supplier	500.74	6	400.00	7	4	168	Increased supervision of mounting and increased visual control	5	7	2	70
													Re-attestation of the material and increased visual control	4	7	2	56
													Re-attestation of the material, increased supervision of mounting and increased visual control	2	7	2	28
5	Central chute	22	Failure of the drive unit	Reduced material flow; loss of capacity	Impeded material flow through the chute	Visual control; cleaning	704.70	6	340.00	7	4	168	Increased visual control and cleaning	6	7	2	84
													Use of special coating for reducing the material adherence and increased visual control	3	7	2	42
4	BWE crawler	80	Damage of the track wheel	Irregular motion, increased motion resistance, increased unevenness of load distribution	Improper material; faults in track wheel production; improper preparation of the ground surface	Visual control; material test certificate provided by the supplier	1773.29	5	157.50	6	5	150	Increased visual control	5	6	3	90
													Prescribed ground surface preparation and increased visual control	3	6	3	54
													Prescribed ground surface preparation, increased visual control, re-attestation of the material and increased supervision of the manufacturing process	2	6	3	36
4	BWE crawler	81	Failure of the safety plate welded joint and dislocation of the pin	Irregular motion, disconnection of the crawler chain	Faults in mounting; improper material	Visual control; material test certificate provided by the supplier	322.09	7	48.18	5	4	140	Increased supervision of mounting and increased visual control	5	5	4	100
													Increased supervision of mounting, increased visual control, re-attestation of the material	3	5	3	45

[a] Risk level: negligible (RPN ≤ 20); low (20 < RPN ≤ 70); medium (70 < RPN ≤ 200); high (200 < RPN ≤ 400); extreme (RPN > 400).

Table 12
The S-FMECA worksheet of the most critical EF modes.

Subsystem	Item	Failure				Pre-action							Post-action				
		Designation	Description	Consequence	Cause(s)	Current controls, prevention	*MTBF* (h)	*O*	DT_A (min)	*S*	*D*	*RPN*[a]	Corrective actions	*O*	*S*	*D*	*RPN*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
7	High voltage cable	22	Arcing fault of the cable head R045	Power outage i.e. cessation of BWE operation	Appearance of overvoltage; water penetrating into the E-house	Visual control; the E-house waterproofing	885.71	6	135.00	6	6	216	Increased monitoring of the E-house waterproofing	3	6	6	108
													Replacing the cable head	2	6	6	72
													Replacing the cable head and increased monitoring of the E-house waterproofing	1	6	6	36
5	Central chute	8	Motor failure	Cessation of BWE operation	Piling of material (around the motor) that prevented cooling	Visual control; removing the piled-up material	1774.75	5	70.00	6	4	120	Increased visual control	4	6	4	96
													Installation of the protective probe	3	6	4	72
													Control of motor shaft deceleration	2	6	4	48
2	Central mechanism for electrical cable guiding	5	Damage of the electrical cables	Cessation of BWE operation	Mechanical damage of the mechanism for electrical cables winding/unwinding	Visual control	3549.83	3	120.00	6	4	72	Increased visual control	2	6	4	48
													Revitalization of the existing mechanism for electrical cables winding/unwinding	2	6	3	36
													Modernization of the mechanism for electrical cables winding/unwinding (installation of a new type)	1	6	3	18
5	Central chute	9	Failure of the motor electrical protection	Cessation of BWE operation	Aging and failure of the electrical protection of the motor	Checkout the protection response	3550.17	3	100.00	6	4	72	Replacing the existing protection with a new type	2	6	3	36
5	Deflection pulley of the BC 3	12	Failure of the drive unit	Cessation of BWE operation	Piling of material on the pulley	Visual control; removing the piled-up material	3550.42	3	85.00	6	4	72	Increased visual control	2	6	4	48
													Improving scrapper performance	1	6	4	24
													Increasing the drive power	1	6	4	24

[a] Risk level: negligible ($RPN \leq 20$); low ($20 < RPN \leq 70$); medium ($70 < RPN \leq 200$); high ($200 < RPN \leq 400$); extreme ($RPN > 400$).

Table 13
Distribution of the number and risk level of the MF modes.

Risk level	Number of MF modes	Participation in the total number of MF modes	Subsystem			
		%	1	2	4	5
Negligible (*RPN* ≤ 20)	8	8.99	1	0	0	7
Low (20 < *RPN* ≤ 70)	40[a]	44.94	6	2	8	23
Medium (70 < *RPN* ≤ 200)	40	44.94	7	1	11	21
High (200 < *RPN* ≤ 400)	1	1.12	0	0	0	1
Extreme (*RPN* > 400)	0	0.00	0	0	0	0
Total	89	100.00	14	3	19	52

[a] The type of failure denoted as "87" includes all failures in the database which have not been identified by their location of appearance.

Table 14
Distribution of the number and risk level of the EF modes.

Risk level	Number of EF modes	Participation in the total number of EF modes	Subsystem				
		%	1	2	4	5	7
Negligible (*RPN* ≤ 20)	7[a]	29.17	1	1	1	2	1
Low (20 < *RPN* ≤ 70)	11	45.83	2	1	0	6	2
Medium (70 < *RPN* ≤ 200)	5	20.83	0	1	0	4	0
High (200 < *RPN* ≤ 400)	1	4.17	0	0	0	0	1
Extreme (*RPN* > 400)	0	0.00	0	0	0	0	0
Total	24	100.00	3	3	1	12	4

[a] The type of failure denoted as "24" includes all failures in the database which have not been identified by their location of appearance.

caused it to self-ignite. The *RPN* value of the said MF mode is 243 and belongs to the lowest quarter of the interval of high risk level (200 < *RPN* ≤ 400). The medium risk level range (70 < *RPN* ≤ 200) contains 40 MF modes (Table 13), of which the *RPN* value for 21 MF modes is ≤ 100. The maximum *RPN* value in this group (medium risk level) equals 168, which is considerably lower than the *RPN* upper limit for medium risk level. The low risk level (20 < *RPN* ≤ 70) has also 40 registered MF modes, while the total number of the observed MF modes with a negligible risk level (*RPN* ≤ 20) is eight.

It is important to observe (Table 13) that in all the risk levels of MF modes the dominant participation is that of the SuS 5 – it is always higher than 50%. Also, it is the subsystem with the only detected MF with a high risk level.

As with the MF modes, during the monitoring period, no EF modes with an extreme value of risk level were observed (Table 12, Table A.2). Only a single EF mode with a high risk level was observed: EF mode 22. This EF mode is a consequence of an arcing fault of the high-voltage cable head, which led to power outage. The *RPN* value of the said EF mode is 216 and belongs to the lowest quarter of the high risk level interval (200 < *RPN* ≤ 400). The medium risk level (70 < *RPN* ≤ 200) has five observed EF modes (Table 14), four of which have *RPN* value that equals 72. That *RPN* value is at the lower threshold of the interval, while the maximum *RPN* value in this class (1 2 0) belongs to the lower half of the interval. The low risk level (20 < *RPN* ≤ 70) was observed at 11 EF modes, while the total number of the observed EF modes with the negligible risk level (*RPN* ≤ 20) is seven.

The only registered EF mode with a high risk level occurs within the SuS 7 (Table 14). In all other risk levels of EF, the dominant participation is that of the SuS 5.

By applying the appropriate corrective actions (Tables 11 and 12), the risk levels of the most critical MF and EF modes have been reduced to low (20 < *RPN* ≤ 70) or even negligible levels (*RPN* ≤ 20), as is the case with the EF mode 5.

Finally, regardless of the immanent limitations and imperfections, as is the case with every method, the S-FMECA technique represents a fundamental tool for improving the level of not only the reliability of an SMS, but also its safety. Namely, the data obtained by applying the S-FMECA technique serve as a base for the statistical analysis of the SMS safety because the causes of the potential heavy damage or, in some cases, total collapse of the machinery, are the same or similar to the causes of faults and failures observed by S-FMECA.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgement

This work is a contribution to the Ministry of Education, Science and Technological Development of Serbia funded project TR 35006.

Appendix

(See Tables A1 and A2)

Table A1
Basic FMECA worksheet of all mechanical failure modes.

Designation (i)	Item	Description	Subsystem	Total number (NF_i)	Total downtime (DT_i) (min)	*MTBF* (h)	*O*	DT_A (min)	*S*	*D*	*RPN*[a]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Bucket wheel chute	Fracture of the wear plates	1	2	100	1775.08	5	50.00	5	3	75
2	Bucket wheel chute	Failure of the wear plates' welded joints	1	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	90
3	Bucket wheel	Failure of the welded joint of the cover	1	1	55	3550.92	3	55.00	5	5	75
4	Ring chute	Failure of the welded joints	1	2	275	1773.63	5	137.50	6	4	120
5	Ring chute	Loss of integrity of the segment	1	7	2800	500.74	6	400.00	7	4	168
6	Buckets teeth	Fracture, replacement required	1	26	1420	135.70	7	54.62	5	2	70
7	Buckets teeth	Wear	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	2	36
8	BCs and transfer points	Rubber deflectors failure	5	4	375	886.40	6	93.75	6	3	108
9	Buckets	Capacity reduction due to extreme incrustation	1	9	280	394.13	7	31.11	5	3	105
10	Bucket wheel	Soiling of the bucket wheel body	1	1	100	3550.17	3	100.00	6	3	54
11	Bucket wheel drive	Failure of the lubrication system	1	10	95	355.02	7	9.50	2	3	42
12	Ring chute	Inspection	1	7	350	506.57	6	50.00	5	2	60
13	Bucket wheel	Inspection	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	12
14	Bucket wheel drive	Inspection	1	1	75	3550.58	3	75.00	6	2	36
15	Slewing mechanism drivetrain	Unalignment between the drive shafts	2	1	40	3551.17	3	40.00	5	3	45
16	Slewing mechanism drivetrain	Rubber seals damage	2	1	75	3550.58	3	75.00	6	3	54
17	Central mechanism for electrical cables guiding	Idler dislocation	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	5	90
18	BC 1 drivetrain	Seal failure	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	36
19	BC 4 drivetrain	Brake pin dislocation	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	27
20	BC 4 drivetrain	Gearbox failure	5	1	320	3546.50	3	320.00	7	4	84
21	BC 1 drivetrain	Inspection	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	30
22	Central chute	Failure of the drive unit	5	5	1700	704.70	6	340.00	7	4	168
23	Central chute drive	Inspection	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	3	45
24	Central chute	Failure of the scraper's welded joints	5	1	110	3550.00	3	110.00	6	4	72
25	Deflection pulley	Failure of the scraper segment	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	24
26	BC 1	Idler chain breakage	5	3	50	1183.67	5	16.67	3	3	45
27	BC 2	Idler chain breakage	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	9
28	Transfer point BC 3 - BC 4	Idler chain breakage	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	36
29	LU	Failure of the feed garlands	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	36
30	Return idler of the BC 3	Idler blockage, followed by self-ignition	5	1	20	3551.50	3	20.00	9	9	243
31	BC 1	Belt misalignment	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	12
32	BC 2	Belt misalignment	5	3	65	1183.58	5	21.67	4	2	40
33	BC 3	Belt misalignment	5	2	15	1775.79	5	7.50	2	2	20
34	BC 4	Belt misalignment	5	2	25	1775.71	5	12.50	3	2	30
35	BC 4	Idler chain breakage	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	12
36	BC 2	Belt wear	5	1	70	3550.67	3	70.00	6	3	54
37	BC 4	Belt wear, replacement needed	5	7	2710	500.95	6	387.14	7	3	126
38	BC 1	Belt damage	5	4	85	887.60	6	21.25	4	3	72
39	BC 3	Failure of the belt splice	5	3	1100	1177.83	5	366.67	7	3	105
40	BC 4	Belt damage	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	75
41	BC 3	Belt tensioning inspection	5	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	24
42	BC 4	Insufficient belt tensioning	5	2	145	1774.71	5	72.50	6	2	60
43	BC 1	Belt slippage	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	9
44	BC 3	Belt slippage	5	7	55	507.27	6	7.86	2	3	36
45	BC 4	Belt slippage	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	3	18
46	Discharge chute	Rubber deflectors failure	5	3	105	1183.36	5	35.00	5	3	75

(continued on next page)

Table A1 (*continued*)

Designation (i)	Item	Description	Subsystem	Total number (NF_i)	Total downtime (DT_i) (min)	*MTBF* (h)	*O*	DT_A (min)	*S*	*D*	*RPN*[a]
47	BC 4	Rubber deflectors failure	5	2	30	1775.67	5	15.00	3	3	45
48	Transfer point BC 3 - BC 4	Rubber deflectors failure	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	3	27
49	BC 4	Inspection	5	7	90	507.19	6	12.86	3	2	36
50	BC 4	Failure of the rope clamps	5	20	945	176.80	7	47.25	5	4	140
51	BC 1	Failure of the rope clamps	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	24
52	BC 1	Rope breakage	5	7	65	507.25	6	9.29	2	2	24
53	BC 3	Rope breakage	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	12
54	BC 4	Rope breakage	5	4	50	887.75	6	12.50	3	2	36
55	BCs	Ropes and clamps breakages	5	2	50	1775.50	5	25.00	4	2	40
56	Drive pulley	Failure of the protection cover	5	2	40	1775.58	5	20.00	3	3	45
57	Discharge chute	Chute blockage	5	5	55	710.18	6	11.00	3	4	72
58	Central chute	Chute blockage	5	25	645	141.64	7	25.80	4	4	112
59	Transfer point BC 3 - BC 4	Chute blockage	5	4	125	887.44	6	31.25	5	4	120
60	BC 2	Soiling of the belt	5	7	260	506.79	6	37.14	5	4	120
61	BC 1	Soiling of the return pulley scraper	5	2	85	1775.21	5	42.50	5	4	100
62	BCs	Soiling of the deflection pulleys	5	4	120	887.46	6	30.00	4	4	96
63	BC 3	Soiling of the belt scraper	5	2	80	1775.25	5	40.00	5	4	100
64	BCs Scrapers	Failure	5	2	105	1775.04	5	52.50	5	3	75
65	Central chute	Scraper failure	5	2	715	1769.96	5	357.50	7	4	140
66	Deflection pulley of the BC 3	Scraper failure	5	4	60	887.71	6	15.00	3	4	72
67	Central chute	Fracture of the chute girder	5	1	440	3544.50	3	440.00	7	4	84
68	BWE crawler	Failure of the safety plate welded joint	4	8	250	443.46	6	31.25	5	4	120
69	BWE crawler	Dislocation of the track wheel axle	4	3	30	1183.78	5	10.00	2	4	40
70	BWE crawler	Pin dislocation	4	3	65	1183.58	5	21.67	4	4	80
71	BWE crawler	Failure of the bogie axle	4	1	95	3550.25	3	95.00	6	3	54
72	BWE crawler	Failure of the track wheel axle	4	1	120	3549.83	3	120.00	6	4	72
73	LU crawler	Failure of the safety plate welded joint and dislocation of the pin	4	1	20	3551.50	3	20.00	3	4	36
74	LU crawler	Failure of the safety plate welded joint	4	2	35	1775.63	5	17.50	3	4	60
75	BWE crawler	Failure of the crawler pad welded joints	4	5	1025	706.95	6	205.00	6	3	108
76	LU crawler	Failure of the crawler pad welded joints	4	6	945	589.38	6	155.83	6	3	108
77	BWE crawler	Chain breakage	4	1	270	3547.33	3	270.00	7	3	63
78	BWE crawler	Failure of the crawler beam	4	3	170	1183.00	5	56.67	5	4	100
79	BWE crawler	Pin failure	4	1	40	3551.17	3	40.00	5	4	60
80	BWE crawler	Damage of the track wheel	4	2	315	1773.29	5	157.50	6	5	150
81	BWE crawler	Failure of the safety plate welded joint and dislocation of the pin	4	11	530	322.09	7	48.18	5	4	140
82	BWE crawler	Two-wheel bogie dislocation	4	1	10	3551.67	3	10.00	2	4	24
83	BWE crawlers	Chain dislocation	4	1	480	3543.83	3	480.00	7	4	84
84	BWE crawler	Four-wheel bogie dislocation	4	1	90	3550.33	3	90.00	6	4	72
85	BWE crawler drivetrain	Improper brake setting	4	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	30
86	Deflection pulley	Improper scraper positioning	5	1	30	3551.33	3	30.00	4	3	36
87	Unassigned mechanical failures[b]	–	–	6	255	591.26	6	42.50	5	1	30
88	Ring and bucket wheel chute	Failure of the screw joints	1	2	450	1772.17	5	225.00	6	4	120
89	BWE crawler	Plastic deformation of the crawler pad	4	2	210	1774.17	5	105.00	6	4	120
			Total:	306	22,760						

---

[a] Risk level: negligible (RPN ≤ 20); low (20 < RPN ≤ 70); medium (70 < RPN ≤ 200); high (200 < RPN ≤ 400); extreme (RPN > 400).

[b] Due to a missing exact failure identification in the database.

Table A2
Basic FMECA worksheet of all electrical failure modes.

Designation (i)	Item	Description	Subsystem	Total number (NF_i)	Total downtime (DT_i) (min)	*MTBF* (h)	*O*	DT_A (min)	*S*	*D*	*RPN**
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Bucket wheel starter circuit	Malfunction	1	2	20	1775.75	5	10.00	2	3	30
2	Safety switch	Malfunction	1	1	10	3551.67	3	10.00	2	3	18
3	Electromagnetic clutch	Inspection	1	1	25	3551.42	3	25.00	4	2	24
4	Superstucture control unit	Short circuit	2	2	20	1775.75	5	10.00	2	4	40
5	Central mechanism for electrical cables guiding	Damage of the electrical cables	2	1	120	3549.83	3	120.00	6	4	72
6	Central mechanism for electrical cables guiding	Dislocation of the electrical cables	2	1	5	3551.75	3	5.00	1	4	12
7	BWE travelling mechanism	Motor malfunction	4	1	5	3551.75	3	5.00	1	3	9
8	Central chute	Motor failure	5	2	140	1774.75	5	70.00	6	4	120
9	Central chute	Failure of the motor electrical protection	5	1	100	3550.17	3	100.00	6	4	72
10	Safety device of the BC 3	Activation	5	1	5	3551.75	3	5.00	1	5	15
11	Deflection pulley of the BC 2	Failure of the motor, dismantling required	5	1	45	3551.08	3	45.00	5	4	60
12	Deflection pulley of the BC 3	Failure of the drive unit	5	1	85	3550.42	3	85.00	6	4	72
13	Upper motor of the BC 3 deflection pulley	Failure, replacement required	5	1	200	3548.50	3	200.00	6	4	72
14	BC 2 drivetrain brake	Failure of the ELDRO thruster	5	4	35	887.81	6	8.75	2	5	60
15	BC 3 drive	Failure of the motor thermal protection	5	1	15	3551.58	3	15.00	3	4	36
16	Discharge chute drive	Motor malfunction	5	1	35	3551.25	3	35.00	5	4	60
17	Discharge chute drive	Motor failure, replacement required	5	1	45	3551.08	3	45.00	5	4	60
18	Brake of the discharge chute drivetrain	Inspection	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	12
19	Central chute control unit	Malfunction	5	1	10	3551.67	3	10.00	2	5	30
20	Fuses	Failure	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	8	48
21	Low voltage power supply	Low voltage levels	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	9	54
22	High voltage cable	Arcing fault of the cable head R045	7	4	540	885.71	6	135.00	6	6	216
23	Powe supply subsystem	Inspection	7	1	10	3551.67	3	10.00	2	2	12
24	Unassigned	–	–	1	115	3549.92	3	115.00	6	1	18
Total				33	1615						

[**] Due to a missing exact failure identification in the database.

* Risk level: negligible (RPN ≤ 20); low (20 < RPN ≤ 70); medium (70 < RPN ≤ 200); high (200 < RPN ≤ 400); extreme (RPN > 400).

References

[1] H. Hartman, J. Mutmansky, Introductory Mining Engineering, second ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2002.

[2] J. Yamatomi, S. Okubo, Surface mining methods and equipment, in: K. Horikawa, Q. Guo (Eds.), Encyclopedia of Life Support Systems, Civil engineering, Vol. II Eolss Publishers Co., Ltd., Oxford, 2009, pp. 155–170.

[3] Annual coal report 2014, U.S. Energy Information Administration, Office of Oil, Gas, and Coal Supply Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, 2016.

[4] Coal industry across Europe, sixth ed. EURACOAL - European Association for Coal and Lignite AISBL, Brussels, 2017.

[5] W. Durst, W. Vogt, Bucket Wheel Excavator, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 1988.

[6] B. Schlecht, Investigation and optimization of the dynamic behavior of bucket wheel drives, Final report of the research project 16575 BR funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany, 2014.

[7] E. Rusiński, J. Czmochowski, P. Moczko, D. Pietrusiak, Surface Mining Machines - Problems of Maintenance and Modernization, Springer International Publishing AG, Cham, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47792-3.

[8] S. Bošnjak, N. Zrnić, Dynamics, failures, redesigning and environmentally friendly technologies in surface mining systems, Arch. Civ. Mech. Eng. 12 (3) (2012) 348–359, https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.06.009.

[9] S. Bošnjak, M. Arsić, N. Zrnić, M. Rakin, M. Pantelić, Bucket wheel excavator: Integrity assessment of the bucket wheel boom tie-rod welded joint, Eng. Fail. Anal. 18 (1) (2011) 212–222, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.09.001.

[10] E. Rusiński, J. Czmochowski, A. Iluk, M. Kowalczyk, An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture, Eng. Fail. Anal. 17 (1) (2010) 179–191, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.06.001.

[11] S. Bošnjak, S. Savićević, N. Gnjatović, I. Milenović, M. Pantelić, Disaster of the bucket wheel excavator caused by extreme environmental impact: consequences, rescue and reconstruction, Eng. Fail. Anal. 56 (2015) 360–374, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.01.002.

[12] T.J. Horberry, R. Burgess-Limerick, L.J. Steiner, Human Factors for the Design, Operation, and Maintenance of Mining Equipment, CRC Press, Boca Raton, 2011.

[13] D. Komljenovic, W. Groves, V. Kecojevic, Injuries in U.S. mining operations – A preliminary risk analysis, Saf. Sci. 46 (5) (2008) 792–801, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.01.012.

[14] S. Bošnjak, M. Arsić, S. Savićević, G. Milojević, D. Arsić, Fracture analysis of the pulley of a bucket wheel boom hoist system, Eksploat. Niezawodn. 18 (2) (2016) 155–163 https://doi.org/10.17531/ein.2016.2.1.

[15] U. Bugaric, M. Tanasijevic, D. Polovina, D. Ignjatovic, P. Jovancic, Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure, Eksploat. Niezawodn. 14 (4) (2012) 333–341 http://ein.org.pl/sites/default/files/2012-04-10.pdf.

[16] B.S. Dhillon, Applied Reliability and Quality: Fundamentals, Methods and Applications, Springer, London, 2007.

[17] P.K. Marhavilas, D. Koulouriotis, V. Gemeni, Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: on a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009, J. Loss Prevent. Proc. 24 (5) (2011) 477–523, https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004.

[18] S. Legutko, Development trends in machines operation maintenance, Eksploat. Niezawodn. 42 (2) (2009) 8–16 http://ein.org.pl/sites/default/files/2009-02-02.pdf.

[19] P. Kumar, R.K. Srivastava, Development of a condition based maintenance architecture for optimal maintainability of mine excavators, IOSR-JMCE 11 (3) (2014) 18–22 https://pdfs.semanticscholar.org/bc52/7709e914f644e825bb5bcf2ca5a8922965ce.pdf.

[20] P. Kumar, A. Kumar, Methods for risk management of mining excavator through FMEA and FMECA, IJES 5 (6) (2016) 57–63 http://www.theijes.com/papers/v5-i6/J0506057063.pdf.

[21] S. Radosavljević, P. Dašić, M. Radosavljević, Appendix specifics of risk management in mining, Metal. Int. 18 (8) (2013) 59–68 https://www.academia.edu/9834401/Appendix_specifics_of_risk_management_in_mining.

[22] M. Rausand, A. Høyland, System Reliability Theory, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.

[23] Y. Wang, C. Deng, J. Wu, Y. Wang, Y. Xiong, A corrective maintenance scheme for engineering equipment, Eng. Fail. Anal. 36 (2014) 269–283, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.10.006.

[24] B.S. Dhillon, Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety, Springer, London, 2008.

[25] M. Pantelić, L. Papić, J. Aronov, Maintainability and safety engineering of excavator units [in Serbian], The Research Center of Dependability and Quality Management, Prijevor, 2011.

[26] L. Živković, M. Lazić, D. Polovina, Comparative analysis of the effectiveness work of the bucket wheel excavator SRs 2000 in opencast mines EPS and MIBRAG [in Serbian], in: Proc. of the 11th International opencast mining conference “OMC 14”, Yugoslav opencast mining comittee, Belgrade, 2014, pp. 463–471. https://www.jukom.org.rs/OMC-2014.pdf.