



**УНИВЕРЗИТЕТ „Св. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“
ВО СКОПЈЕ**



**ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И
ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ**

Горан, Душан Деспиноски

**РАЗВОЈ НА МОДЕЛ ЗА КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТ
ИНТЕГРИРАН ВО ИНДУСТРИЈА 4.0 ПРИМЕНЕТ ВО
АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА**

Докторски труд

Скопје, 2023



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО
СКОПЈЕ



ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И
ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ

Горан, Душан Деспиноски

РАЗВОЈ НА МОДЕЛ ЗА КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТ
ИНТЕГРИРАН ВО ИНДУСТРИЈА 4.0 ПРИМЕНЕТ ВО
АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА

Докторски труд

Скопје, 2023

Докторанд:

ГОРАН, ДУШАН ДЕСПИНОСКИ

Тема:

РАЗВОЈ НА МОДЕЛ ЗА КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТ ИНТЕГРИРАН ВО ИНДУСТРИЈА
4.0 ПРИМЕНЕТ ВО АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА

Ментор:

Проф.д-р ВЛАДИМИР ДИМЧЕВ,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии

Комисија за одбрана:

Проф.д-р МИЛЕ СТАНКОВСКИ (претседател),

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф.д-р МАРИЈА ЧУНДЕВА БЛАЕР,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф.д-р МАРЕ СРБИНОВСКА,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии

Проф.д-р МИТЕ ТОМОВ,

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински Факултет

Научна област:

КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТ

Датум на одбрана:

Изјавувам дека докторскиот труд го изработив самостојно, дека уредно ги цитирам сите користени извори и литература и дека трудот не е користен во рамките на други универзитетски студии или за стекнување на друго звање.

Горан Деспиноски

РАЗВОЈ НА МОДЕЛ ЗА КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТ ИНТЕГРИРАН ВО ИНДУСТРИЈА 4.0
ПРИМЕНЕТ ВО АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА

– А п с т р а к т –

Во денешно време на голема конкуренција во автомобилскиот сектор, многу компании произведуваат слични производи и оттука квалитетот на производот станува клучен фактор за постигнување на конкурентска предност на пазарот. Во ова истражување, на систематичен начин е направен преглед на моменталната научна литература за менаџирање со квалитет во автомобилскиот сектор. Врз основа на наодите од прегледот на литература, идентификувани се недостатоци и слабости на моделите за менаџирање со квалитет. Главна цел на ова истражување е развој и потврда на нов модел за менаџирање со квалитет, кој ги интегрира Lean, Шест Сигма и Индустрија 4.0 во DMAIC структурата, и има за цел да ги надмине недостатоците на моменталните модели за менаџирање со квалитет. Предложениот модел дава јасни инструкции за имплементирање на поедините техники во DMAIC структурата, нагласувајќи го потенцијалот на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитет притоа земајќи ги во предвид законите кои важат во производството т.е моќта на Lean и Шест Сигма. Моделот е практично имплементиран во автомобилска компанија за производство на греачи за седишта, каде што добиените резултати покажуваат намалување на вкупната стапка на дефекти за 70 %, подобрување на вкупната ефективност на опремата за 25 %, намалување на вкупното време на производство за 51 %, намалување на залихата меѓу процесите за 49 %, намалување на бројот на линии за финална монтажа за 17 %, намалување на просторот потребен за финална монтажа за 31 % и намалување на патеката на движење на материјалите за 42 %. Резултатите добиени со овој модел се значително подобри во споредба со резултатите од сите претходно користени модели за менаџирање со квалитет во компанијата што е предмет на истражување, со што се потврдува ефективноста и ефикасноста на предложениот модел. Добиените резултати ја потврдуваат тезата дека редоследот на имплементирање на техниките во DMAIC структурата се клучен фактор за постигнување на очекувањата за квалитет и оперативен перформанс. Најпрвен, со Lean Шест Сигма се редуцираат варијациите и загубите во производството т.е се елиминираат неговите физички слабости, што е предуслов за имплементирање на Индустрија 4.0, со која што се постигнува автоматизирање, стабилизирање, стандардизирање и дополнително подобрување на процесите. Со овој редослед на имплементирање, придонесот на Lean Шест Сигма во вкупното подобрување на квалитетот изнесува 67 % наспроти оној на Индустрија 4.0 со 33 %, придонесот на Lean Шест Сигма во подобрување на вкупната ефективност на опремата изнесува 68 % додека пак на Индустрија 4.0 изнесува 32 %. Предложениот модел во иднина може да се користи како ориентир и во други автомобилски компании кои имаат за цел драстично подобрување на квалитетот во краток временски период, додека пак за академиците наодите во трудот може да послужат како основа за идни истражувања.

Клучни зборови: Дефинирање – Мерења – Анализирање – Подобрување -Контролирање (анг. DMAIC), Шест Сигма, Анализа на системите за мерење (анг. MSA), Статистичка контрола на процеси (анг. SPC), Анализа на модовите на дефекти и нивниот ефект (анг. PFMEA), Lean производство, Индустрија 4.0, Сајбер физички системи (анг. SPS).

**DEVELOPMENT OF A QUALITY CONTROLLING MODEL INTEGRATED IN INDUSTRY 4.0 AND
APPLIED TO THE AUTOMOTIVE INDUSTRY**

– A b s t r a c t –

In today's highly competitive automotive market, many companies manufacture similar products, making product quality a critical success factor, in gaining a competitive advantage in the industry. In this study, a systematic review of the latest scientific literature, on quality management, in the automotive industry was conducted. Based on the results of this research, deficiencies and weaknesses in existing quality management models were identified. The main objective of this research is to develop and validate a new quality management model that integrates Lean, Six Sigma and Industry 4.0 into the DMAIC structure and aims to overcome the weaknesses of the currently available quality models. The proposed model provides clear guidance on how to implement each technique in the DMAIC structure, and highlights the potential of Industry 4.0 in quality management, taking into account the applicable production laws and the power of Lean Six Sigma. The new model was implemented in an automotive company for the production of seat heaters, and the results show a 70 % reduction in total defect rate, a 25 % improvement in overall equipment effectiveness, a 51 % reduction in production lead time, a 49 % reduction of work-in-process, a 17 % reduction in the number of final assembly lines, a 31 % reduction of the space needed for final assembly lines, and a 42 % reduction in material movement distance. The results obtained with this model are significantly better than those obtained with the quality models previously applied in the studied company, confirming the effectiveness and efficiency of the proposed model. The obtained results confirm the thesis that the order of implementation of the techniques in the DMAIC structure is a key success factor for achieving quality objectives and operational excellence. First and foremost, Lean Six Sigma reduces process variation and waste in production, which is a prerequisite for the implementation of Industry 4.0. Next Industry 4.0 achieves automation, stabilization, standardization and further improvement of processes. In this implementation sequence, the contribution of Lean Six Sigma to total quality improvement is 67 % while the contribution of Industry 4.0 is 33 %, the contribution of Lean Six Sigma to overall equipment effectiveness is 68 %, while the contribution of Industry 4.0 is 32 %. In the future, the proposed model can be used as a reference for other automotive companies seeking drastic quality improvement in a short time, while the results of this paper can serve as a basis for further research.

Keywords: Defining – Measuring – Analyzing – Improving – Controlling (DMAIC), Six Sigma, Measurement Systems Analysis (MSA), Statistical Process Control (SPC), Analysis of Failure Modes and Their Effect (eng. PFMEA), Lean production, Industry 4.0, Cyber physical systems (eng. SPS).

Содржина

1	ВОВЕД	16
1.1	ИЗЈАВА ЗА ПРОБЛЕМОТ	17
1.2	ЦЕЛИТЕ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	17
1.3	НАУЧНО – ИСТРАЖУВАЧКО ПРАШАЊЕ	17
1.4	ЗНАЧЕЊЕТО НА ТРУДОТ	17
1.5	МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕ	17
1.6	СТРУКТУРА НА ТЕЗАТА	18
2	ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА ЗА КВАЛИТЕТ ВО АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА ...	20
2.1	ИСТОРИЈА НА НАУЧНИ МЕТОДИ ЗА ПОДОБРУВАЊЕ НА КВАЛИТЕТ	20
2.2	СЕВКУПНО УПРАВУВАЊЕ СО КВАЛИТЕТОТ	20
2.3	УПРАВУВАЊЕ СО КВАЛИТЕТ ВО АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА IATF 16949:2016 ..	21
2.4	ОСНОВНИ АЛАТКИ ВО IATF 16949:2016 КОИ ЌЕ СЕ КОРИСТАТ ВО ИСТРАЖУВАЊЕТО ..	23
3	ШЕСТ СИГМА МЕТОДОЛОГИЈА	24
3.1	ВОВЕД ВО ШЕСТ СИГМА МЕТОДОЛОГИЈАТА	24
3.2	ШЕСТ СИГМА – ФАЗА НА ДЕФИНИРАЊЕ	26
3.3	ШЕСТ СИГМА – ФАЗА НА МЕРЕЊЕ	27
3.3.1	НАБЉУДУВАНИ ВАРИЈАЦИИ ВО ПРОЦЕСОТ	28
3.3.2	АНАЛИЗА НА МЕРНИОТ СИСТЕМ - MSA СТУДИЈА	30
3.3.3	АНАЛИЗА НА ВИСТИНСКИ ВАРИЈАЦИИ НА ПРОЦЕСОТ - SPC СТУДИЈА.....	36
3.4	ШЕСТ СИГМА – ФАЗА НА АНАЛИЗИРАЊЕ.....	43
3.4.1	АНАЛИЗА ЗА ОТКРИВАЊЕ НА ИЗВОРНИТЕ ПРИЧИНИ ЗА ПОЈАВА НА ГРЕШКА	43
3.5	ШЕСТ СИГМА – ФАЗА НА ПОДОБРУВАЊЕ.....	45
3.5.1	СТРАТЕГИЈА НА ЕКСПЕРИМЕНТИРАЊЕ	45
3.5.2	АНАЛИЗА НА МОДОВИТЕ НА ДЕФЕКТИ И НИВНИОТ ЕФЕКТ	47
3.6	ШЕСТ СИГМА – ФАЗА НА КОНТРОЛИРАЊЕ	48
4	ВОВЕД ВО LEAN ПРОИЗВОДСТВО	50
5	УЛОГАТА НА ИНДУСТРИЈА 4.0 ВО МЕНАЦИРАЊЕ СО КВАЛИТЕТОТ	57
5.1	ВОВЕД ВО ИНДУСТРИЈА 4.0	57
5.2	МЕНАЦИРАЊЕ СО КВАЛИТЕТ ВО ЕРАТА НА ИНДУСТРИЈА 4.0	58
6	ИНТЕГРИРАЊЕ НА ДИСЦИПЛИНИТЕ ЗА МЕНАЦИРАЊЕ СО КВАЛИТЕТ	62
6.1	ИНТЕГРИРАЊЕ НА LEAN И ШЕСТ СИГМА	62
6.2	ПРЕДИЗВИЦИ ВО ИНТЕГРИРАЊЕТО НА ИНДУСТРИЈА 4.0 СО LEAN ШЕСТ СИГМА.....	64
7	ИНТЕГРИРАН МОДЕЛ НА LEAN ШЕСТ СИГМА И ИНДУСТРИЈА 4.0 ПРИМЕНЛИВ ВО АВТОМОБИЛСКА ИНДУСТРИЈА	67
7.1	ФАЗА НА ДЕФИНИРАЊЕ	72
7.2	ФАЗА НА МЕРЕЊЕ.....	72
7.3	ФАЗА НА АНАЛИЗИРАЊЕ	73
7.4	ФАЗА НА ПОДОБРУВАЊЕ	73
7.5	ФАЗА НА КОНТРОЛИРАЊЕ	74
8	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ – ИМПЛЕМЕНТИРАЊЕ НА LEAN ШЕСТ СИГМА И ИНДУСТРИЈА 4.0 ВО АВТОМОБИЛСКА КОМПАНИЈА ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ГРЕАЧИ ЗА СЕДИШТА.....	76
8.1	ФАЗА НА ДЕФИНИРАЊЕ	76
8.2	ФАЗА НА МЕРЕЊЕ.....	78

8.2.1	ИЗБОР НА МЕТОД ЗА ПРИБИРАЊЕ НА ПОДАТОЦИ.....	79
8.2.2	LEAN ПРОИЗВОДСТВО – МАПИРАЊЕ И АНАЛИЗА НА ТЕК НА ВРЕДНОСТИ.....	80
8.2.3	ШЕСТ СИГМА – АНАЛИЗА НА МЕРНИОТ СИСТЕМ MSA.....	87
8.2.4	ШЕСТ СИГМА - АНАЛИЗА НА ПЕРФОРМАНСИТЕ НА ПРОЦЕСОТ СО SPC СТУДИЈА.....	92
8.3	ФАЗА НА АНАЛИЗИРАЊЕ	94
8.3.1	ШЕСТ СИГМА – МАПИРАЊЕ НА ПРОМЕНЛИВИ НА ПРОЦЕСОТ	94
8.3.2	Шест Сигма – ШЕСТ СИГМА – АНАЛИЗА НА ПОДАТОЦИТЕ И УТВРДУВАЊЕ НА ИЗВОРНИ ПРИЧИНИ ЗА ПОЈАВА НА ГРЕШКИТЕ	98
8.3.3	ШЕСТ СИГМА – АНАЛИЗА НА МОДОВИТЕ НА ДЕФЕКТИ И НИВНИОТ ЕФЕКТ	99
8.4	ФАЗА НА ПОДОБРУВАЊЕ	103
8.4.1	LEAN ПРОИЗВОДСТВО – ДИЗАЈН НА НОВ ТЕК НА ВРЕДНОСТИ.....	103
8.4.2	LEAN ПРОИЗВОДСТВО – ПОТВРДА НА ДИЗАЈН НА НОВ ТЕК НА ВРЕДНОСТИ	115
8.4.3	ШЕСТ СИГМА – НАМАЛУВАЊЕ НА ВАРИЈАЦИИТЕ НА ПРОЦЕСОТ	116
8.4.4	ШЕСТ СИГМА – ПОТВРДА НА ПОДОБРЕНИОТ ПЕРФОРМАНС НА ПРОЦЕСОТ	123
8.5	КОНТРОЛНА ФАЗА И ИМПЛЕМЕНТИРАЊЕ НА ИНДУСТРИЈА 4.0 ТЕХНОЛОГИИТЕ	127
8.5.1	АЖУРИРАЊЕ НА АНАЛИЗА НА МОДОВИ НА ДЕФЕКТИ И НИВНИОТ ЕФЕКТ.....	134
8.5.2	АЖУРИРАЊЕ НА КОНТРОЛЕН ПЛАН	138
8.5.3	ШЕСТ СИГМА – ОБУКА НА ВРАБОТЕНИТЕ	139
8.5.4	ШЕСТ СИГМА – СТАТИСТИЧКА КОНТРОЛА НА ПРОЦЕСОТ	139
8.5.5	СТАНДАРДИЗИРАНИ ЗАДАЧИ И ОДРЖЛИВОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ	139
9	ЗАКЛУЧОК.....	140
10	РЕФЕРЕНЦИ.....	147

Листа на слики

Слика 3.1. Набљудувани варијации на процесот	28
Слика 3.2. SPC: UCL и LCL наспроти USL и LSL.....	37
Слика 3.3. Избор на контролен графикон според тип на податоци и големина на подгрупа	39
Слика 3.4. Варијација во подгрупите	40
Слика 3.5. Варијација помеѓу подгрупите	40
Слика 4.1. Симболи кои се користат при мапирање на тек на вредности	51
Слика 7.1. Блок-дијаграм на фаза на дефинирање на Lean Шест Сигма (DMAIC).....	72
Слика 7.2. Блок-дијаграм на фаза на мерење на Lean Шест Сигма (DMAIC)	72
Слика 7.3. Блок-дијаграм на фаза на анализирање на Lean Шест Сигма (DMAIC)	73
Слика 7.4. Блок-дијаграм на фаза на подобрување на Lean Шест Сигма (DMAIC)	73
Слика 7.5. Блок-дијаграм на фаза на контролирање на Lean Шест Сигма (DMAIC).....	74
Слика 8.1. Приказ на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација”	76
Слика 8.2. Графикон на сите чекори за производство на греачи за седишта.....	78
Слика 8.3. Графички приказ на опремата во производство - пред подобрувањата.....	80
Слика 8.4. Мапирање на виолетовиот тек на вредности	82
Слика 8.5. Линија за финална монтажа и линија за производство на кабел	84
Слика 8.6. Такт време/ време на циклус на производство пред подобрувањата	86
Слика 8.7. Патека на движење на материјалите во виолетов тек на вредности	86
Слика 8.8. Потврда на мерниот систем (Графикон со компоненти на варијација).....	89
Слика 8.9. Потврда на мерниот систем - графикон за аритметичка средина по оператори	90
Слика 8.10. Потврда на мерниот систем - графикон со опсег по оператори.....	90
Слика 8.11. Потврда на мерниот систем – графикон за мерења по оператори.....	91
Слика 8.12. Потврда на мерниот систем - интеракција помеѓу примероци и оператори.....	91
Слика 8.13. Графикон со индивидуални отчитувања - I (моментален процес).....	92
Слика 8.14. Графикон на подвижен опсег – MR (моментален процес)	93
Слика 8.15. Хистограм на способност (моментален процес).....	93
Слика 8.16. Способност на процес и перформанс на процес (моментален процес)	93
Слика 8.17. Причинско - последичен дијаграм	96
Слика 8.18. Причини за појава на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација”	98
Слика 8.19. Дизајн на виолетовиот тек на вредности	104
Слика 8.20. Интегрирана линија во форма на буквата U со ротирачки режим на производство	106
Слика 8.21. Такт време/ време на циклус на производство по балансирање на линијата.....	108
Слика 8.22. Пилот линијата пред и после интегрирање	109
Слика 8.23. Канбан транспортен и производствен круг на движење на информацијата	111
Слика 8.24. Патека на движење на материјали во новиот дизајн на виолетовиот тек	112
Слика 8.25. Графички нацрт на новите три тек на вредности (зелен, портокалов, виолетов).....	114
Слика 8.26. Интеракција на факторите и нивното влијание врз бројот на удари од игла	118
Слика 8.27. Интеракција помеѓу брзина на осовина и време на одмотување на проводник	118
Слика 8.28. Автоматизиран систем за откривање на удар од игла при процес на шиене.....	120
Слика 8.29. Електричен дијаграм на систем за детекција на удар од игла	120
Слика 8.30. Систем за сечење на проводна жица на машината за шиене	121
Слика 8.31. Автоматски систем за контрола на потрошувачката на жица	122
Слика 8.32. Графикон со тек на процес - линијата за финална монтажа	123
Слика 8.33. Графикон со индивидуални отчитувања - I (подобрен процес)	124
Слика 8.34. Графикон на подвижен опсег – MR (подобрен процес).....	124
Слика 8.35. Хистограм на способност (подобрен процес)	125
Слика 8.36. Способност на процес и перформанс на процес (подобрен процес)	125
Слика 8.37. Перформанс на процес пред и после имплементираниите подобрувања	126
Слика 8.38. Хоризонтална и вертикална интеграција на технологиите на Индустрија 4.0	128
Слика 8.39. Вертикална интеграција на ERP системот помеѓу неколку фабрики.....	129
Слика 8.40. Е-Хеијунка за планирање на производство	129

Слика 8.41. Хоризонтална интеграција на Индустрија 4.0 технологиите	130
Слика 8.42. Перформанс на процесот ОЕЕ%, ППМ	131
Слика 8.43. Е- визуелизација на сајбер физичкиот систем	134

Листа со табели

Табела 3.1. Интерпретација на стандардот Шест Сигма од Моторола	24
Табела 3.2. Шест Сигма DMAIC методологијата	25
Табела 3.3. Символи и референтни стандарди во MSA и SPC.	29
Табела 3.4. Табела со нумеричка Студија за повторливост и репродуктивност	34
Табела 3.5. Извештај за Студијата за повторливост и репродуктивност	35
Табела 6.1. Lean методологија наспроти Шест Сигма методологија	63
Табела 7.1. Интегриран модел на Lean Шест Сигма (DMAIC) и Индустрија 4.0.....	68
Табела 8.1. Оперативен перформанс на процесите	76
Табела 8.2. Калкулација на такт време на производство при мапирање на тек на вредности	81
Табела 8.3. Студија на времињата пред балансирање на линијата за финална монтажа	85
Табела 8.4. Податоци за студијата за повторливост и репродуктивност.....	87
Табела 8.5. Студијата за повторливост и репродуктивност во процесни мерења	88
Табела 8.6. Потврда на мерниот систем: Табела со студија за повторливост и репродуктивност	89
Табела 8.7. Мапирање на променливите на процесот	95
Табела 8.8. Причинско - последична матрица	97
Табела 8.9. Анализа на модови на дефекти и нивниот ефект – процес на Шиене (моментален процес)	100
Табела 8.10. Анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на Финална Монтажа (моментален процес)	102
Табела 8.11. Анализа на времињата по балансирање на линијата	107
Табела 8.12. Резултати добиени со дизајн на новиот тек на вредности	115
Табела 8.13. Фактори и нивоа при дизајнот на експерименти.....	116
Табела 8.14. Сумиран преглед на дизајн на експерименти.....	116
Табела 8.15. Резултати за број на удари од игла при различни комбинации на фактори	117
Табела 8.16. Најдобар сооднос на факторите за минимален број на удари на игла	119
Табела 8.17. Перформанс на процесот пред и после имплементираните подобрувања	127
Табела 8.18. Подобрување на вкупната стапка на дефекти со Шест Сигма техниките	127
Табела 8.19. Ажурирање на анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на шиене (подобрен процес)	135
Табела 8.20. Ажурирање на анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на финална монтажа (подобрен процес).....	137
Табела 9.1. Индивидуални постигнувања на техниките во новиот DMAIC модел.....	141
Табела 9.2.Процентуално учество на техниките на DMAIC моделот во вкупното подобрување	142
Табела А.1. Табела на константи и формула за контролни графикони ($\bar{X}$ и R графикони)	144
Табела А.2. Табела на константи и формула за контролни графикони (I, MR графикони).....	144
Табела А.3. Критериуми за евалуација на сериозноста	145
Табела А.4. Критериум за евалуација на појавата	145
Табела А.5. Критериум за евалуација на детекција	146

Листа со дефиниции и кратенки:

Индустрија 4.0	Индустрија 4.0 е четвртата индустриска револуција која се однесува на софтверско инженерство во индустриите, автоматизација и размена на податоци, вклучувајќи Сајбер-физички системи, интернет на нештата, работа и анализа на големи количини на податоци, симулации, хоризонтална и вертикална интеграција на системи и автономни работи.
Индустриски безжични сензорни мрежи	Индустриски безжични сензорни мрежи се системи кои се состојат од голема популација на безжично поврзани хетерогени сензорни јазли, кои се специјално дистрибуирани во различни полиња на интерес.
Интернет на нештата	Интернет на нештата е систем од поврзани компјутерски уреди, механички и дигитални машини, кои имаат уникатен идентификатор и можност да пренесуваат податоци преку мрежа без да е потребна интеракција од човек - човек или човек - компјутер.
Сајбер физички систем	Сајбер физички систем е систем кој интегрира сензори и сондирање, компјутери, контрола и вмрежување во физички објекти и инфраструктура, поврзувајќи ги со интернет и помеѓу себе.
Работа со голема количина на податоци	Работа со голема количина на податоци е поле што се занимава со систематична екстракција на информации, нивна анализа, или со сетови од податоци што се премногу големи или комплексни за да се обработат со традиционалните софтверски апликации за процесирање на податоците.
Машинско учење	Машинско учење е научно студирање со примена на алгоритми и статистички модели од страна на компјутерите, за да извршат одредени задачи без да користат експлицитни инструкции, користејќи го само моделот од претходните примероци и заклучоци.
Паметни фабрики	Паметни фабрики претставуваат широка категорија на индустрии што користат компјутерско-интегрирано производство, високо ниво на адаптивност, брза промена на дизајнот и дигитална информациска технологија.
Тојота систем на производство	Тојота систем на производство е интегриран социјално-технички систем развиен од Тојота, што се состои од менаџерски филозофии и практики, кои се развиени со цел ефикасно организирања на производството, вклучувајќи ја интеракцијата со добавувачите и клиентите, со таргет за намалување на загубите и трошоците.
Lean производство	Lean производство е метод на производство кој потекнува од оперативниот модел на Тојота од 1930 година. Терминот Lean е формиран во 1988 од John Krafcic и е дефиниран во 1996 од James Womach и David Jones со петте клучни принципи: концизно дефинирање на вредноста на специфичниот производ, идентификување на тек на вредности за секој производ, имплементирање на континуиран тек на вредности без прекини, имплементирање на систем клиентот да ја повлекува вредноста од производителот и тежнење кон перфекција.
Мапирање на тек на вредности (анг. VSM)	Мапирање на тек на вредности или познато како „мапирање на текот на материјалот и информациите“ е Lean метод за анализа на моменталната состојба на серија од настани кои се превземаат за даден производ или сервис, од почетокот на специјалниот процес до клиентот.

Дизајн на тек на вредности (анг. VSD)	Дизајн на тек на вредности е Lean метод за дизајн на идната состојба на серија од настани кои се превземаат за даден производ или сервис, од почетокот на специјалниот процес до клиентот.
Такт време	Такт време е просечното време на производство од почеток на еден производ до почеток на наредниот производ, кога ритамот на ова производство е подесен да одговара на побарувањата од клиентот.
Производство парче-по-парче (анг. One piece flow)	Производство парче-по-парче или континуирано производство е пристап за елиминирање на паковното производство. Кореспондира со JIT производството, канбан пристапот, келиите и континуираниот напор за подобрување што бара интегрирање на сите елементи на производниот систем.
Келија	Келија е уредување на луѓе, машини, материјали и методи со процесирачки чекори лоцирани едни до други по секвенцијален редослед, преку кои производите се процесираат во континуиран тек (или во некои случаи во конзистентни мали лотови).
Chaku-Chaku производство	На Јапонски „натовари натовари“ е ефикасен пристап на производство, во кој што сите машини кои се потребни за да произведат производ се поставени во секвенцијален редослед и блиску една до друга. Операторот едноставно го поставува производот во машината и се поместува на наредната операција. Секоја машина извршува различна етапа од производството.
Канбан систем	Канбан е систем за планирање на Lean и JIT производството, развиен од Taiichi Ohno и индустриските инженери во Тојота со цел да се подобри ефикасноста во производството. Го користи принципот за влечење на материјалите и информациите почнувајќи од процесите кои се најблиску до готовиот производ па наназад вклучувајќи ги сите претходни процеси.
Пејсмејкер процес	Процес од текот на вредност на кој се испраќа планот за производство и кој го диктира ритамот на производството на сите претходни процеси користејќи ги супермаркетите и системот на влечење на материјалите.
Порамнување на производство по модел и волумен (јапон. Heijunka)	Претставува техника за порамнување на производството по тип на производ и волумен и служи за редуцирање на нееднаквоста (јап. muda) во производството, што пак придонесува за редуцирање на загубите (јап. muda) во производството. Оваа техника е витална за намалување на залихата меѓу процесите и развивањето на ефикасност во системот за производство на Тојота и Lean.
Редуцирање на времето потребно за подесување на машините (анг. Single minute exchange of die – SMED)	Ова е еден од методите на Lean производството за редуцирање на загубите во процесот на производство. Овој метод обезбедува брз и ефикасен начин на промена на модел во производниот процес. Брзата промена на модел е клучна за редуцирање на големите производни лотови а со тоа и подобрување на текот на вредност и намалување на нееднаквоста (јап. Muda), намалување на залихите помеѓу процесите и подобрување на продуктивноста во производството. Изразот „секоја минута“ не значи дека промената на производството ќе трае само една минута туку дека треба да трае помалку од 10 минути.

Севкупно продуктивно одржување (анг. Total productive maintainace TPM)	Севкупно продуктивно одржување е систем за одржување и подобрување на интегритетот на производството, безбедноста и квалитетот преку машините, опремата, процесите и вработените што додаваат вредност на организацијата. Овој систем се фокусира на одржување на опремата во врвна кондиција со цел да се избегнат дефектите и застоите во производството.
Jidoka	Jidoka значи интелигентна автоматизација или автоматизација со човечки допир, што во пракса подразбира дека процесот на автоматизација е способен сам по себе да ги детектира аномалиите на процесот или дефектите на производот, да го сопира производството и да го информира операторот преку системите за сигнализација Андон.
Производство во вистинско време (анг. Just-in-time)	Производство во вистинско време исто така познато како Тојота систем на производство е методологија која примарно има за цел да го намали времето на производство како и времето на реакција на добавувачите од аспект на клиентот. Оваа методологија е развиена во Јапонија во периодот 1960-1970, конкретно во Тојота.
Кајзен	Кајзен е концепт кој се однесува на бизнис активностите кои континуирано ги подобруваат сите функции и ги инволвираат сите вработени почнувајќи од генералниот директор до операторите. Кајзен е збор кој потекнува од Јапонија и значи подобрување. Со подобрување на стандардизираните програми и процеси, кајзен се стреми да ги елиминира загубите. Кајзен за прв пат е применет во Јапонија после втората светска војна и е најзабележителен во Тојота.
Андон систем	Андон е систем кој потекнува од производството и се однесува на нотификација до менаџментот, одржувањето и до другите вработени кои работат на проблемите со квалитет или процесните проблеми. Алармот може да се активира мануелно од страна на операторите или автоматски од самата опрема. Опремата може да вклучува автоматско сопирање на производството со цел да се корегира проблемот. Андон системот е еден од принципите на Jidoka за контролата на квалитет, метод кој е развиен од Тојота системот за производство.
Севкупно управување со квалитет (анг. Total quality management - TQM)	Севкупното управување со квалитет се состои од широк организациски напор за да инсталира постојана клима во која вработените континуирано ќе ги подобруваат нивните способности да испорачаат производ и сервис на време со додадена вредност за клиентот. Зборот севкупно нагласува дека секторите кои не се дел од производството (на пример продажба и маркетинг, сметководство и финансии, инженерство и дизајн итн) се обврзани да ги подобрат нивните операции. Додека пак зборот менаџментот нагласува дека извршните директори се обврзани активно да го менаџираат квалитетот преку пронаоѓање, тренирање, вработување и поставување на таргети за квалитет. Севкупното управување со квалитетот располага со широко внимание во периодот 1980-1990 пред да биде надминат од ISO 9000, Lean производството и Шест Сигма.
Точност (анг. accuracy)	Точност на мерките се однесува на близината на договорот помеѓу набљудуваните вредности и познатиот референтен стандард.
Отстапување (анг. Bias)	Отстапување е изместување на измерената вредност од вистинската вредност на популацијата.

Графикон бокс и вискер	Графикон на кој се прикажуваат податоците за медианот, горните и долните квартали, екстремните точки и оние кои отстапуваат.
Способност на процес (анг. Process capability)	Способност на процесот ја прикажува количината на варијации својствена за стабилен процес. Способноста може да се одреди користејќи податоци од контролните графикони и хистограми и често се квантификува со користење на индексите C_{pk} и P_{pk} .
Централна линија (анг. CL)	Линијата на контролниот графикон што ја претставува долготрајната или просечната вредност на дадена карактеристиката за квалитет, која е во контролирана состојба само кога се присутни вообичаени причини.
Вообичаени причини	Проблеми во самиот систем кои се секогаш присутни, кои влијаат на целото производство се додека не се пронајдат и отстранат. Тие се „вообичаени“ за сите производствени продукти. Исто така, се нарекуваат ненадејни причини, системски причини или хронични причини. Вообичаените причини се спротивни на специјалните причини.
Контролен графикон	Графички механизам за одлучување дали основниот процес е променет врз основа на земени примероци од процесот. Контролниот графикон помага да се утврди кои причини се „специјални“ за кои што треба да се испитаат можни корективни акции. Контролните графикони содржат нацрт вредности на некоја статистичка мерка за низа примероци или подгрупи, заедно со горната и долната контролна граница.
Контролни граници	Статистички пресметани линии на контролните графикони кои покажуваат како процесот се одвива и дали е во контрола. Вообичаено постои горната контролна граница и долна контролна граница. Доколку процесот е во контрола и само вообичаени причини се присутни, скоро сите точки припаѓаат во контролните граници.
Взаемна поврзаност	Мерка на линеарна врска помеѓу две променливи. Ако двете променливи растат (или опаѓаат) заедно, тоа се нарекува позитивна взаемна поврзаност. Ако една променлива се намалува а другата расте, тоа се нарекува негативна взаемна поврзаност.
C_p	Мерка за способност на процесот да произведува продукт во рамките на спецификациите. Мерењето се врши без да се земе во предвид центрирањето на процесот.
C_{pk}	Мерка за способност на процесот да произведе продукт во рамките на спецификациите. Мерењето се врши земајќи го во предвид центрирањето на процесот, и се зема во предвид помалата вредност помеѓу способноста на горната спецификациска граница и способноста на долната спецификациска граница.
Дизајн на експеримент (анг. DoE)	Истовремена примена на повеќе статистички контроли кои се занимаваат со планирање, спроведување, анализирање и толкување на контролни тестови наменети за идентификување и оценување на факторите (влезните параметри) кои влијаат на вредноста на параметрите што ни се од интерес.
Дистрибуција	Математички модел кој ја поврзува вредноста на променливата со веројатноста за појава на истата вредност во популацијата.

Хистограм	Графикон на набљудуваните фреквенции наспроти секоја вредност или ранг на вредности за збир на податоци. Хистограмот дава графички преглед на варијациите во податоците.
Контролиран процес	Процес во кој карактеристиките на квалитет кои се евалуираат се во статистичка контрола. Ова значи дека варијациите помеѓу набљудуваните примероци може да се препишат на вообичаени причини и дека нема специјални причини кои влијаат на процесот.
Индивидуален графикон	Контролен графикон за процеси каде што индивидуални мерења на процесот се нацртани за анализа. Овој графикон уште се нарекува I-графикон или X-графикон.
Средна вредност	Мерка за локацијата или за центарот на податоците. Исто така се нарекува аритметичка средина. Средната вредност се пресметува со собирање на сите набљудувања и делење со бројот на набљудувања.
Медиан	Вредност во „средина“ на група со набљудувања (непарен број на набљудувања), или аритметичката средина на две вредности во средината од група (парен број на набљудувања). Групата со набљудувања мора да биде подредена по растечки редослед.
Подвижен ранг	Мерка што се користи за да помогне во пресметувањето на варијациите во популацијата, врз основа на разликите помеѓу последователните податоци. Се споредуваат две последователни вредности на поединечни податоци и апсолутната вредност на нивната разлика се забележува во графиконот на подвижен ранг. Графиконот на подвижен ранг обично се користи во пар со графиконот за Индивидуални мерења (X).
Неусогласеност	Посебно барање што не е исполнето, како што е недостаток, дефект или несовршеност.
Нормална или Гаусова дистрибуција	Континуирана, симетрична, фреквентна распределба која е во форма на своно, за варијабилни податоци кои се основа на контролните графикони за променливи, како што се X - бар или индивидуалните графикони. За нормално распределените вредности, 99,73% од популацијата лежи во границите на ± 3 стандардни отстапувања во однос на средната вредност.
Прецизност	Прецизност на мерењата се однесува на нивната долгорочна варијација. Тоа е мерка за близината помеѓу неколку индивидуални отчитувања.
Способност на процесот	Мерка за способност на процесот да произведува излезен резултат кој ги исполнува спецификациите на процесот.
Квартал	Кварталите ги делат подредените податоци во 4 еднакви групи. Вториот квартал (Q2) е медиан на податоците.
Сличајно прибирање на примероци	Подгрупа од популација, избрано така што секој член на популацијата има еднаква веројатност да биде вклучен при изборот.
Ранг	Мерка за опсегот на податоците, пресметана како разлика помеѓу највисока вредност и најниска вредност. Ранг $R = x_{\max} - x_{\min}$

R-графикон	Контролен графикон базиран на рангот (R) на една подгрупа, кој обично се користи во пар со X-бар графиконот.
S- графикон	Контролен графикон базиран на стандардна девијација S, на една подгрупа. S-графиконот вообичаено се користи во пар со X-бар графиконот.
Специјални причини	Причини за варијација кои се појавуваат периодично на некој непредвидлив начин. Исто така се нарекуваат преносливи причини, локални грешки или спорадични проблеми. Тие се спротивни на вообичаените причини. Присуството на специјални причини укажува на процес кој е надвор од контрола.
Спецификација	Пишани или технички барања за оценување на прифатливоста на излезниот резултат од еден производствен процес.
Ширина	Количина на варијации помеѓу примероците или популацијата.
Стабилност	Процесот се смета за стабилен ако нема присутни специјални причини. Се вели дека стабилен процес е во контрола.
Стандардна девијација	Мерка за ширината на збир на податоци во однос на нивната средна вредност.
Статистичка контрола	Состојбата која го опишува процесот од кој се отстранети сите специјални причини на варијации и остануваат само вообичаени причини.
Статистичка контрола на процес (анг. SPC)	Збир на алатки за решавање проблеми кои се корисни за постигнување на стабилност на процесот и подобрување на способност преку намалување на варијациите. Вклучува користење на контролни графикони за анализа на процес, за да се идентификуваат соодветни дејства кои треба да се превземат за да се постигне и одржи состојба на статистичка контрола и да се подобри способноста на процесот.
Подгрупа	Друго име за примероци од популацијата.
Променливи податоци	Вредности на податоците кои се мерења на некоја карактеристика на процесот. Вредностите на податоците се користат за конструирање на контролните графикони. Овие квалитативни податоци се користат за X-бар, R, S и индивидуални графикони, како и за графиконите за подвижен ранг.
Варијации	Разликите помеѓу индивидуалните резултати или излезниот резултат на една машина или процес. Варијациите се класифицираат на два начина: варијации поради вообичаени причини и варијации поради специјални причини.
Студија за повторливост и репродуктивност (анг. Gage R&R)	Студијата за повторливост и репродуктивност е методологија што се користи за да се утврди количеството на варијации во мерните податоци како резултат на мерниот систем. Со споредбата на варијациите на мерниот систем со набљудуваните варијации на процесот се добива способноста на мерниот систем.

1 ВОВЕД

Истакнувањето на квалитетот во денешно време е најбитен фактор на кој се темели успехот на водечките компании во автомобилскиот сектор. Во литературата достапни се многу методи за менаџирање со квалитет, како на пример ISO 9001 и IATF 16949 стандардите, севкупното управување со квалитет (анг. Total Quality Management, TQM), континуираното подобрување (анг. Continuous Improvement, CI), методологијата планира – дејствува – проверува – извршува (анг. Plan-Do-Check-Act, PDCA), Lean, Шест Сигма, интегрираниот модел на Lean и Шест Сигма, придонесот на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот, итн. Во последно време се повеќе организации се решаваат да се насочат кон Lean и Шест Сигма како стратегија за подобрување на квалитетот, [1]. Lean Шест Сигма произлегува од две различни методологии, Lean производство и Шест Сигма методологија. Сличните карактеристики на двете методологии и нивното меѓусебно дополнување ги прави погодни да се применуваат заедно како една моќна и ефективна алатка за постигнување на одржливи резултати во квалитетот, [2].

Шест Сигма методологијата е широко прифатена дисциплина во многу индустрии, која користи систематичен пристап за редуцирање на варијациите во процесите [3], [4]. Сигма е статистичка терминологија за мерење што покажува колку даден процес отстапува од идеалната состојба, [5]. Со Шест Сигма методологијата грешките во производство се редуцираат на 3,4 дефекти на милион можности и се стремат да тежат кон 0.

Од друга страна Lean производството се стреми да ги подобри оперативните резултати и квалитетот со елиминирање на активности кои не додаваат вредност од аспект на потрошувачот, преку креирање на тек на вредности и континуирано производство на парче-по-парче. Со елиминирање на загубите, трошоците се намалуваат а квалитетот и времето на испорака се подобруваат, [6].

Главната разлика помеѓу Шест Сигма и Lean е дефинирањето на различен начин на изворните причини за појава на загубите. Додека Lean производството тврди дека загубите во процесот се поради активностите кои не додаваат вредност на финалниот производ, Шест Сигма тврди дека загубите се поради варијациите на процесот. Сепак, заедничка цел на двете методологии е да создадат производствен систем, што најефективно ќе ги исполни очекувањата на потрошувачот, со тоа што ќе се произведе квалитетен производ, [7].

Многу различни истражувачи документирале успешно имплементирање на двете методологии во различни области како што се автомобилската индустрија [8], малите претпријатија [9], производствените индустрии [10], [11] и услужните сервиси [12], [13]. Покрај успешните примери постојат и неуспешни примери при обидот да се обезбеди подобрувања во организациите со имплементирање на овие методологии. Истражувачите сметаат дека еден од можните фактори за гореспоменатите неуспеси е недостатокот на јасна визија и модел на менаџирање на проектот при имплементација на двете методологии, [14]. Дополнителен предизвик е игнорирањето на потенцијалот на Индустрија 4.0 во методологиите за подобрување на квалитет затоа што најголем дел од моменталните истражувања се насочени кон техничкиот дел на Индустрија 4.0, [15]. Во моментот нема заеднички концензус и широко прифатена методологија која ги интегрира Lean, Шест Сигма и Индустрија 4.0, [16], [17]. Многу автори укажуваат на недостатокот од практична примена на методите за подобрување на квалитетот и анализа на добиените резултати, [18].

1.1 Изјава за проблемот

Истражувањето е поврзано со реални проблеми од секојдневното производство на автомобилска компанија што произведува греачи за седишта. Најголем предизвик во компанијата е лошиот квалитет и висока стапка на дефекти од 30.000 dpmo¹ од кои што грешката „отпорност на производот надвор од спецификацијата“ се издвојува со 6.400 dpmo.

1.2 Целите на истражувањето

Главен фокус на трудот е да се идентификува нов, подобрен модел за менаџирање со квалитет, кој ќе ги користи водечките методи за квалитет Lean и Шест Сигма и ќе го земе во предвид неизбежното влијание на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот. Практичната имплементација на новиот модел ќе се направи во автомобилска компанија за производство на греачи за седишта. Се очекува моделот да ги надмине недостатоците на секоја од методологиите имплементирани поединечно и да даде драстично подобри резултати во споредба со претходно користените модели во компанијата што е предмет на истражување. По добиените резултати од имплементацијата, ќе се анализира придонесот на секоја од поедините техники врз севкупното менаџирање на квалитетот.

1.3 Научно-истражувачко прашање

Пристапот на менаџмент со квалитетот кој во себе ги интегрира методологиите Lean и Шест Сигма во опкружување на техничките решенија карактеристични за Индустрија 4.0 се очекува да ги нагласи и надопolni позитивните особини на секоја од наведените методологии доколку тие се имплементираат поединечно, а од друга страна да ги ублажи нивните недостатоци и слабости, споредено со сите претходно користени методи за подобрување на квалитетот во автомобилската индустрија која што важи за средина со голема конкуренција и агресивни промени.

1.4 Значењето на трудот

Значењето на овој труд е во систематскиот преглед на моменталната научна литература за менаџирање со квалитет во автомобилскиот сектор, во идентификување на слабостите кај постоечките методи и во предлогот и потврдата на нов модел за менаџирање со квалитетот. Моделот има за цел да обезбеди значително подобри резултати во споредба со сите претходно користени модели во компанијата што е предмет на истражување. Наодите и заклучоците во ова истражување во иднина може да послужат како најдобра практика за менаџирање со квалитет во други автомобилски компании.

1.5 Методологија на истражување

Како и во сите други истражувања, резултатите презентирани во оваа теза се потпираат на соодветна методологија за истражување. Покрај традиционалните методологии кои се користат во академските истражувања како што се квантитативност и квалитативност, во трудот се користи и акционен истражувачки пристап кој е неопходен за практичен истражувачки проект, [19].

¹ dpmo (defects per million opportunities) - Внатрешните дефекти во производство, прикажани во единица дефекти на милион можности.

Сите методологии се применуваат во различни делови од ова истражување во зависност од потребите. На пример, употребени се:

Квантитативниот метод:

- За пресметка на различни статистички мерења и при евалуација на перформансот на процесот.
- За статистичките мерења во дизајн на експерименти.
- За пресметка на процентот на добивка постигнат со новиот модел.
- За толкување на податоците и повратните информации од Индустрија 4.0 во новиот модел.

Квалитативниот метод:

- За анализа на широк опсег на прегледана литература, со цел да се предложи нов модел кој ќе ги интегрира техниките на Индустрија 4.0 со Шест Сигма и Lean.
- За анализа на перцепцијата собрана од учесниците во Lean Шест Сигма (DMAIC) и Индустрија 4.0 моделот.

Методологијата користена за акциони истражувања:

- Методологијата за акционото истражување започнува со генерирање на иновативна идеја која е проследена со припрема на план за практична примена на идеата и потоа следи извршување на задачите зададени во акциониот план, [19].

1.6 Структура на тезата

Глава 1 дава општ вовед и ја опишува целта на ова истражување, проблемите што треба да се решат и методологиите што ќе се користат.

Глава 2 дава преглед на литература за квалитет, ја опишува позадината на Свкупното управување со квалитетот (анг. TQM) и стандардите за квалитет во автомобилската индустрија.

Глава 3 дава преглед на литературата за Шест Сигма (DMAIC) методологијата, со теоретски приказ на секоја фаза поединечно: дефинирање, мерење, анализирање, подобрување и контролирање. Во фазата на дефинирање прикажани се алатките кои се користат за решавање на проблеми, изјава за проблем, изјава за цел, опсег на проектот, контролните точки за евалуација на статусот на проектот и мапирање на процесот. Во фазата на мерење опишана е анализата на мерните системи, техниките на статистичка контрола на процесот и контролните графикони. Во фазата на анализирање прикажани се алатките за анализа на изворни причини за појава на дефекти, тестирање на статистичка хипотеза и анализа на варијации. Во фазата на подобрување опишана е стратегијата на експериментирање, дизајн на експерименти, анализа на модови на дефекти и нивниот ефект и потврда на имплементирани корективни мерки. Во фазата на контролирање, даден е приказ на ажурирани модови на дефекти и нивниот ефект, ажуриран контролен план, статистичка контрола на процесите и стандардизација на подобрувањата.

Глава 4 дава теоретски опис на Lean производството и алатките кои се користат: мапирање на тек на вредности (VSM), дизајн на идната состојба на процесите (VSD), дефинирање на такт време на производство, креирање на континуиран тек на производство, креирање на ќелии, дефинирање на супермаркети и систем на повлекување на материјали (Kanban), креирање на пејсмејкер процес, порамнување на производството по модел и волумен (Heijunka), свкупно продуктивно одржување

(TPM), минимално време потребно за промена на модел и подесување на машини (SMED), континуирано подобрување (Kaizen), 5C и стопирање на производство секогаш кога има проблем со квалитетот (Jidoka).

Во Глава 5 е прикажана улогата на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот. Даден е теоретски опис на техниките на Индустрија 4.0 и прикажано е како тие придонесуваат во менаџирањето со квалитетот. Опишани се сајбер физичкиот систем, интернет на нештата, работата со голема група на податоци, безжичните сензорски мрежи, машинското учење, вештачката интелигенција, радио фреквентната идентификација, е-канбан, проширена и виртуелна реалност и 3Д принтањето.

Глава 6 дава преглед на моменталната истражувачка литература за интергирање на дисциплините за менаџирање со квалитет. Прикажани се различни модели за интегрирање на Lean и Шест Сигма и предизвиците кои произлегуваат од обидот за нивно интегрирање. Дополнително, прикажани се ограничувањата кои произлегуваат од обидот за интегрирање на Индустрија 4.0 во дисциплините за менаџирање со квалитет. Како заклучок кој произлегува од оваа глава се јавува потребата за развој на нов модел што ќе ги интегрира Индустрија 4.0 со Lean и Шест Сигма, со цел да се постигне подобрување при севкупното управување со квалитетот.

Во Глава 7 е претставен новиот модел кој ја користи DMAIC структурата за да ги интегрира Индустрија 4.0 со Lean и Шест Сигма. Новиот модел има јасен сет на инструкции наменети за академските истражувачи и практичарите во автомобилскиот сектор за да дизајнираат ефикасен процес на континуирано подобрување на квалитетот. Во оваа глава е сумиран придонесот на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитет.

Во Глава 8 е прикажан експерименталниот дел од ова истражување, со имплементирање на новиот модел за контрола на квалитет во автомобилската компанија што е предмет на истражување. Направена е споредба на резултатите пред и после имплементацијата на моделот со што се потврдува неговата ефективност и ефикасност. Во фазата на дефинирање е прикажан методот по кој се одбира потенцијал за подобрување во проектот. Потоа се дава изјава за целта на проектот, се дефинира опсег на проектот и се врши мапирање на процесите. Во фазата на мерење со помош на Индустрија 4.0 се прибираат податоци и се врши анализа со цел да се постават основните линии за перформансот на процесот (Lean методологијата) и за варијациите на процесот (Шест Сигма). Во фазата на анализирање се анализираат поставените основни линии и изворните причини за појава на проблемите. Во оваа фаза се даваат разумни предлози за подобрување на процесот. Во фазата на подобрување се генерираат потенцијалните решенија и се одредува приоритет при имплементирање на активностите за дизајн на нов тек на вредности и за намалување на варијации на процесот. Со помош на Индустрија 4.0 се прибираат резултати од тестирањата и се врши потврда на имплементирањето корективни акции. Во фазата на контролирање даден е детален опис на техниките на Индустрија 4.0 и нивната хоризонтална и вертикална интеграција во компанијата што е предмет на истражување. Во оваа фаза е прикажан дизајнот на сајбер физичкиот систем, виртуелниот модел на новиот тек на вредности (VSD), начинот на прибирање на информации во реално време од физичкиот систем, споредбата на резултатите од физичкиот систем со виртуелниот модел и интеракцијата помеѓу физичкиот и виртуелниот систем.

Глава 9 го сумира придонесот на овој истражувачки труд кој се однесува на давање на извештај за предложениот модел на Lean Шест Сигма (DMAIC) и Индустрија 4.0 и потврда на неговата ефективност и ефикасност при менаџирањето со квалитетот.

2 ПРЕГЛЕД НА ЛИТЕРАТУРА ЗА КВАЛИТЕТ ВО АВТОМОБИЛСКАТА ИНДУСТРИЈА

2.1 Историја на научни методи за подобрување на квалитет

Историјата на научни методи за подобрување на квалитетот на производите и процесите започнува со др. Walter A. Shewhart во 1920 година со претставување на научниот метод за севкупно управување со квалитетот (анг. Total Quality Management, TQM), статистичката контрола на процесите и употребата на контролни графикони. Овој метод во 1950 година е прифатен и адаптиран од Edward Deming со претставување на моделот за системско размислување, варијациите, психологијата и научното размислување (анг. Plan-Do-Check-Act, PDCA). Во ист период од страна на Јапонските компании предводени од Тојота развиен е систем за подобрување на квалитетот и процесите познат како Тојота систем на производство (анг. Toyota Production System, TPS). Овој систем користи методологија на намалување на загубите во процесот преку елиминирање на активности кои не додаваат вредност, од аспект на купувачот. TPS го привлекува вниманието на светот кон крајот на 80-те години од минатиот век поради исклучително добрите резултати на Јапонските автомобилски компании, [20]. Во 1990 година методот широко е прифатен под терминот Lean производство кој произлегува од книгата „*Машините кои го менуваат светот*“ од James Womak, [21]. Во 1985 од страна на Mario-Perez-Wilson и компанијата Моторола претставен е Шест Сигма моделот за подобрување на квалитетот. Овој модел се стреми да го подобри квалитетот на производите со редуцирање на варијациите во процесот. Комбинацијата на Lean принципите и Шест Сигма формира нова Lean Шест Сигма методологија, што се стреми да го постигне нивото на квалитетот на Шест Сигма од 3,4 дефекти на милион можности, со редуцирање на варијациите на процесот и елиминирање на загубите во него, [7]. Во 2012 година Германската влада ја претставува стратегијата за севкупен технолошки развој на индустријата позната како Индустрија 4.0, [22].

2.2 Севкупно управување со квалитетот

Севкупното управување со квалитет (анг. TQM) се смета за „мајка“ на сите понови методологии за подобрување на процесите. Со севкупното управување со квалитетот започнува движењето за квалитет, а идејата за континуирано подобрување влегува во свеста на менаџментот. TQM се базира на 14^{те} точки на Деминг и ја прифаќа филозофијата која вклучува 4 главни области:

1. Одговорност на Менаџментот за континуирано подобрување.
2. Фокус на работните процеси за да се постигнат подобрувања.
3. Употреба на статистика за мерење на перформансите на процесот.
4. Вклучување на вработените и нивно овластување при носење на одлуки.

Основа на TQM е да се намалат грешките настанати за време на процесот на производство или сервисни услуги, да се зголеми задоволството на клиентите, да се рационализира ланецот на набавки, да се стреми кон модернизација на опремата и да обезбеди работникот да има највисоко ниво на обука, [23].

Филозофиите на севкупното управување со квалитет произлегуваат со спојување на приодите препорачани од Edward Deming, Juran [24], Ishikawa [25], Feigenbaum [26], Taguchi и Crosby [27] често познати како „гуруа за квалитет“. Dean и Bowen [28] и Jonston [29] забележале дека TQM се користи за разни производи и услуги кои се сметаат за важни за потрошувачите. Jonston [29] тврди дека основната теорија на TQM е да се

концентрира на менаџментот на луѓето (лидерство, тимска работа) и подобрување на процесот. Anderson [30] забележал дека TQM го зема во предвид циклусот PDCA на Деминг (планира – дејствува – проверува - извршува), Imai [31] нагласува дека TQM е сличен на растечкиот јапонски пристап за континуирано подобрувања познат како Кајзен.

Литературата класифицира дека TQM има две димензии: 1) социјална или мека; и 2) техничка или тешка. Според Prajago [32] социјалната или мека димензија ја поттикнува примената на TQM во сервисните услуги, како на пример во раководството, фокусот кон луѓето и обуките. Како поддршка на ова тврдење, Bou-Liusag и други [33] додаваат дека и социјалните и техничките димензии се меѓусебно поврзани и се поддржуваат.

Голем број други научници како Mehra и Ranganathan [34] и Kumar [13] тврдат дека холистичкиот пристап на TQM ги интегрира сите функции и се фокусира на потребите на клиентите и целите на организацијата. TQM се фокусира на квалитетот, продуктивноста и конкурентноста. Agus [35] и Kumar [36] забележале дека TQM е успешен во сите аспекти, во финансиите, перформансите и квалитетот од аспект на клиентот. Сепак, забележани се некои критики и загриженост од различни научници (Hackman и Wageman [37], Powell [38], Narasimhan [39], Mehra и Ranganathan [34]) за усвојување на TQM. Тие објаснуваат дека овие критики се поврзани со недостатокот од структуриран пристап при подобрувањето на процесите, потешкотии во мерењето на резултатите, високи трошоци и време потребно за имплементирање на TQM. Многу автори во литературата тврдат дека по околу дваесет години, бизнисот бара нешто ново и затоа TQM еволуира во Шест Сигма, уште една методологија за подобрување на квалитетот.

2.3 Управување со квалитет во автомобилската индустрија IATF 16949:2016

Стандардот за системи за управување со квалитет во автомобилската индустрија IATF 16949:2016, е стандард кој е развиен од страна на Интернационалната автомобилска работна група (анг. International Automotive Task Force - IATF). Овој стандард е краен производ на многуте напори за стандардизација во историјата на автомобилската индустрија. Со стандардизирањето на системите за управување со квалитет во автомобилската индустрија, меѓународните добавувачи на автомобили повеќе не мора да ги задоволуваат многубројните национални стандарди за квалитет на автомобилите, кои честопати биле контрадикторни и доведувале до прекумерни ревизии. Овој стандард на автомобилската индустрија се однесува на сите внатрешни и надворешни добавувачи на:

1. Производни или сервисни делови.
2. Материјали за во производство.
3. Монтажи.
4. Греење, заварување, фарбање или други завршни услуги, кои директно се поврзани со делови од автомобилската индустрија.

IATF 16949:2016 е надограден модел кој потекнува од стандардот ISO/TS 16949:2009, и е настанат со спојување на специфичните барања од автомобилскиот сектор во САД, Италија, Германија, Англија и Франција со стандардот ISO 9001 и основниот стандард на системи за управување со квалитет ISO 9000. Меѓутоа, за разлика од ISO/TS 16949:2009, стандардот IATF 16949:2016 не ги вклучува барањата од ISO 9001:2015 туку упатува на нив. Поради оваа причина, секоја компанија која бара

сертификат за IATF 16949:2016 мора да добие копии од двата стандарди, IATF 16949:2016 и ISO 9001:2015, за да осигури дека тие се запознаени со сите важечки барања.

ISO 9001:2015 е основа на IATF 16949:2016 стандардот, и затоа мора да се има негово основно познавање, со цел целосно да се разбере IATF стандардот. Стандардот ISO 9001:2015 има за цел да обезбеди барања за една организација да воспостави, документа и одржува систем за управување со квалитет, се со цел да обезбеди конзистентност на своите процеси, [40]. Денес, имплементацијата на ISO 9001:2015 стандардот е виртуелен предуслов за водење бизнис во земјите членки на ЕУ. Покрај ISO 9001:2015 стандардот, овие се три примарно дополнителни стандарди:

- ISO 9000:2015, Системи за управување со квалитет - Основи и термини. Овој стандард, кој е замена за стандардот ISO 9000:2005, дава објаснувања на термините и дефинициите кои се користат во сите стандарди на системите за управување со квалитет развиени од ISO/TS 176. ISO 9000:2015 не е стандард кој се сертифицира, но може да биде од голема корист за компанија која започнува постапка за сертификација на ISO 9001:2015.
- ISO 9004:2018, Системи за управување со квалитет - Насоки за подобрување на перформансите. Овој стандард обезбедува инструкции надвор од ISO 9001:2015 стандардот, во насока кон развивање на сеопфатен систем за управување со квалитет се со цел подобрување на севкупната ефикасност на организацијата, [41].
- ISO 19011:2018, Упатство за аудит на системите за менаџирање. Овој стандард е замена на стандардот ISO 19011:2011 и дава упатства за аудит на системите за менаџирање. Стандардот ги вклучува принципите на аудитање, менаџирање на аудит програмите и спроведување на аудитите. По ова упатство се водат поединците кои ги менаџираат програмите за аудит, аудиторите и тимовите кои се вклучени во аудитот, [42].

За целосно да се разбере IATF 16949:2016 стандардот, исто така е важно да се разбере историјата на стандарди во автомобилската индустрија. За тоа потребно е да се направи осврт на неговиот претходник ISO/TC 16949. На ISO/TC 16949 му претходат четири национални автомобилски деривати на ISO 9000. Во САД, големата тројка Chrysler, Ford и General Motors го развиваат QS-9000. Во Германија, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), со придонес од мнозинството на производители и добавувачи, го развиваат VDA 6.1 стандардот. Во Франција, Fédération des Industries des Équipements for Véhicules (FIEV) и Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA) го развиваат Evaluation Aptitude Qualité Fournisseur (EAQF). Во Италија, Associazione Nazionale Fra Industrie Automobilistiche (ANFIA) го развиваат стандардот ANFIA Valutazione Sistemi Qualità (AVSQ). Постоенето на четирите стандарди за квалитет во автомобилската индустрија создавало потешкотии за меѓународните добавувачи, кои биле подложени на спротивставени барања и повеќекратни аудити за регистрација. Првиот обид за решавање на овие проблеми е во 1994 година, кога германската и француската автомобилска индустрија се согласуваат за взаемно признавање на резултатите од аудитите на системите за квалитет VDA 6.1 и EAQF. Во 1996 година е постигнат ограничен реципрочен договор, според кој производителите на автомобили со QS-9000, VDA 6.1, EAQF и AVSQ стандардите, меѓусебно си ги признаваат интерните аудити. Реципрочниот договор, заедно со признанието дека 85 проценти од четирите стандарди содржат исти барања, доведува до понатамошни дискусии за усогласување и формирање на Интернационална автомобилска работна група (анг. International Automotive Task Force - IATF), која првично се состои од

американски, германски, француски, италијански и британски производители на автомобили. Резултат на овие усогласени напори е ISO/TC 16949:1999 стандардот. ISO/TS 16949:1999 ги содржи сите барања на ISO 9001:1994 стандардот, со дополнителни специфични барања од автомобилскиот сектор кои произлегуваат од QS-9000, VDA 6.1, EAQF и AVSQ. Процесот на ревизија на ISO/TC 16949 започнал во 2001 година. ISO/TC 16949 е ревидиран во согласност со ISO 9001:2000 во 2002 година. Јапонски производители на автомобили, кои не учествувале во изготвувањето на ISO/TC 16949:1999, учествуваат во оваа ревизија. Ниту еден од националните стандарди за квалитет во автомобилската индустрија не е ревидиран за да се усогласи со ISO 9001:2000. Со оглед на овие фактори, заедно со ефикасноста да се има само еден меѓународен стандард за квалитет на автомобилите, ISO/TC 16949:2002 ги заменува сите национални стандарди за квалитет на автомобилите. ISO/TC 16949:2009 претставува продолжение на оваа успешна приказна во новата генерација на производство на автомобилски производи и услуги. Верзијата од 2009 година во суштина ги содржи истите специфични барања од автомобилскиот сектор кои се наоѓаат во ISO/TC 16949:2002, но со надграден основен текст за да одговара на ажурирањата кои се направени во ISO 9001:2008.

2.4 Основни алатки во IATF 16949:2016 кои ќе се користат во ова истражување

За потребите на докторското истражување ќе се користат три референтни прирачници на кои се повикува стандардот за управување со квалитет во автомобилската индустрија IATF 16949:2016, и тоа:

- Анализа на модовите на дефекти и нивниот ефект (анг. Failure Mode And Effect Analyze - FMEA). Овој референтен прирачник ја опишува аналитичката методологија што се користи за да се осигура дека потенцијалните проблеми се разгледани и се опфатени во процесот на развој на производ/процес познат под името *напредно планирање на квалитетот на производот* (анг. Advance Product Quality Planning - APQP). Аналитичката метода презентирана во FMEA прирачникот е применлива за секој производ или процес, но главно се фокусира на апликациите застапени во автомобилската индустрија и нејзините добавувачи, [43].
- Статистичка контрола на процес (анг. Statistical Process Control - SPC). Овој референтен прирачник служи за донесување на одлуки кои ќе и овозможат на организацијата да утврди дали процесот правилно функционира, [44]. SPC е методологија која се користи главно за следење и контрола на однесувањето на производниот процес, но може да се користи за секој процес кој има мерлив излезен резултат. Главна цел на оваа алатка е да обезбеди континуирано подобрување на квалитетот на производите и услугите и продуктивноста на работната сила. Стандардот ја објаснува постапката на земање на примероци за мерење, процесот на избор на контролни графיקони, табели со константи и формули, термини, симболи и референци.
- Анализа на системите за мерење (анг. Measurement System Analyze - MSA). Овој референтен прирачник служи за валидација на мерната опрема, [45]. Главна цел на овој прирачник е да даде упатства за спроведување на анализа на мерниот систем и да увери дека мерењата што се прават се точни. Дополнително дава акцент на изучување на релацијата помеѓу мерниот систем и неговата околина, со цел мерниот систем да генерира само податоци со прифатлив квалитет.

3 ШЕСТ СИГМА МЕТОДОЛОГИЈА

3.1 Вовед во Шест Сигма методологијата

Шест Сигма, како што е дефинирано од Dave [46] и Antony [47] е пристап за подобрување на бизнисот, кој ги идентификува дефектите или грешките во бизнис процесите. Овој пристап ги идентификува и елиминира изворните причини за настанување на дефектите со цел да се постигнат подобрувања на процесот. Henderson и Evans [48], Antony и Banuelas [49], Kuei и Madu [50] и Horel [51] коментираат дека фокусот на Шест Сигма е да се намалат варијациите на процесот, со примена на статистичко размислување и методи. Hoerl [52] и Antony [47] го потврдиле фактот дека за разлика од другите методологии силата на Шест Сигма е тоа што создава јасен фокус за мерливи и квантитативни добивки. Тие тврдат дека преку анализа на оперативните процеси може да се идентификуваат дефекти и да се испитаат како и зошто се појавуваат. Heckl [53] го поддржува ова тврдење и вели дека дефинирање-мерење-анализирање-подобрување-контролирање моделот е многу сличен со чекорите за решавање на проблеми на PDCA (анг. plan-do-check-act) циклусот на Deming, но исто така забележува дека статистичката контрола на процесот има голем акцент во DMAIC структурата.

Од статистички аспект, постигнување на Шест Сигма нивото на квалитет значи дека при мерење на квалитетот на секој производ во даден процес, нема да има повеќе од 3,4 дефекти на 1.000.000 можности, [54]. „Можност“ се дефинира како било каква шанса за појава на неусогласеност или за неисполнување на бараните спецификации. Во Табела 3.1 е прикажан „сигма“ моделот, каде што од 1 σ до 6 σ подобрувањето на квалитетот е очигледно. Колку се зголемува бројот на сигма толку се намалува стапката на дефекти на 1.000.000 можности.

Табела 3.1. Интерпретација на стандардот Шест Сигма од Моторола

Сигма	Дефекти на милион можности (dpmo)	Добри (%)	Лоши (%)
1 σ	690.000	30,9 %	69,1 %
2 σ	308.537	69,1 %	30,9 %
3 σ	66.807	93,3 %	6,7 %
4 σ	6.210	99,38 %	0,62 %
5 σ	233	99,997 %	0,023 %
6 σ	3,4	99,9997 %	0,00034 %

Шест Сигма DMAIC методологијата ги таргетира постоечките процеси за постигнување на постепени подобрувања. DMAIC методологијата е докажано еден од најдобрите методи за решавање на проблеми кој е користен до сега, затоа што го мотивира тимот да користи податоци при решавањето на проблемите, [55]. Во Табела 3.2 се презентирани фазите за имплементирање на Шест Сигма DMAIC моделот, како и алатките кои се користат во овие фази.

Табела 3.2. Шест Сигма DMAIC методологијата

Дединарање	Опфат на проектот (Big Y)	Мерливо
	Заштеда на трошоци	
	Лидер и членови на тимот	
	Други подобрувања?	Брзи придобивки
Мерење	Мапирање на процесот на високо ниво	
	Мапирање на процесот на ниско ниво	
	Причинско-последична матрица	Идентификување на фактори кои влијаат на процесот – Fishbone /Ishikawa дијаграм
	Бокс нацрт	Идентификување на точките кои се издвојуваат
	FMEA	Идентификување на критични влезни параметри. Влезни параметри рангирани според приоритет на ризици SEV, DEC, OCC = RPN
	MSA	Повторливост (EV), Репродуктивност (AV) Студија за повторливост и репродуктивност, %P/T, % R&R
	Основна способност на процесот	Нормална дистрибуција
		Определување на аритметичка средина
		Срк, Ррк, 6-Pack, I-MR, Хистограм
		P-Value (.05) P High Keep Guy; P Low Ho Go
Анализирање	FMEA преглед на ажурирањата	
	Хипотетички тестирања	Парето анализа
		Дефинирање на X/Y
		t-test, ANOVA, Chi square, Тест на регресија
		Но (нулта хипотеза), На алтернативна хипотеза
	Проучување на повеќе варијабили	Хипотеза на корелација
		Нацрт на основен ефект, Нацрт на интеракција
		Six-Pack, Извори на варијации
	Утврдување на X-те што имат најголемо влијание на Y	
Подобрување	Проба за потврда	Идентификација на грешки во анализата
	План за имплементација	Идентификација на грешки во анализата
		Поставување на акции
	Финализирање на FMEA	
	Промена на менаџментот	Следење на акциите
		Способност на Six-Pack
	Потврда дека се е во ред	Модел за тестирање на регресија
Контролирање	Споредба со поглавјето	
	Метрици за мерење на ефективноста	
	Идентификување на дополнителни подобрувања	
	Мониторингот/ Избегнување на трошоците	
	Одобрување на проектот	

Примена на Шест Сигма во автомобилската индустрија - Автомобилските производители се идеален кандидат за имплементирање на Шест Сигма методологијата со цел подобрување на квалитетот. Овие индустрии произведуваат комплексни производи кои се резултат на многу меѓусебно поврзани производни процеси, [56].

Во последните неколку децении, производните индустрии учат како да се имплементираат и како да не се имплементираат стратегиите за подобрување на квалитетот, благодарение на студиските истражувања спроведени во автомобилските компании. Како резултат на тоа, многу од нив сега имплементираат докажани технологии и стратегии за подобрување на нивната вкупна стапка на продуктивност. Шест Сигма сега е популарна дури и кај Fortune 500 компаниите, како што се Visteon, TRW Automotive Holdings, Tenneco Automotive, PACCAR, Navistar International, Lear, Johnson Controls, Goodyear Tire & Rubber, General Motors, Ford Motor Company, Federal-Mogul, Delphi, Dana, Cooper Tire and Rubber, Brunswick, Autoliv, ArvinMeritor и многу други.

3.2 Шест Сигма - Фаза на дефинирање

Фазата на дефинирање е првата фаза од процесот на подобрување на Шест Сигма методологијата. Во оваа фаза проектниот тим дава изјава за проблемот, изјава за целта, го дефинира опсегот на проектот, ги одредува контролните точки во проектот, врши мапирање на процесот и го дефинира приоритетот на можностите за подобрување преку Парето анализа.

Изјавата за проблемот во фазата на дефинирање вообичаено се пишува за да се дефинира проблемот, сериозноста на проблемот, локацијата како и финансиското влијание врз компанијата. Изјавата треба да биде јасна, концизна и добро напишана. При пишување на изјавата може да се користат следните инструкции:

- Се дефинира проблемот – Членовите во тимот го дефинираат проблемот со конкретни одредби. Презентираат факти како на пример тип на производ и грешката што се појавува.
- Се идентификува каде се појавува проблемот – Овде треба да се идентификува каде се појавува или манифестира проблемот, колку што е можно попрецизно, затоа што ова покасно ќе помогне тимот да се фокусира кон подобрувањата.
- Се дефинира големината на проблемот – Големината на проблемот треба да се опише во мерлива терминологија (на пример број на дефекти, ефикасност во проценти итн).
- Се опишува какво е влијанието на проблемот врз организацијата – Описот на влијанието на проблемот врз организацијата треба да биде колку што може попрецизен.

Изјавата за целта ги дефинира подобрувањата што тимот сака да ги постигне. Овде не треба да се претпоставува за причините на проблемите, ниту да се вклучува решение на проблемите. Изјавата треба да има краен рок за спроведување, да е изводлива и да го постави фокусот. Треба да биде паметна т.е конкретна, мерлива, да може да се постигне, релевантна и временски дефинирана (анг. Specific, Measurable, Achievable, Relevant and Timely - SMART).

Опсегот на проектот помага подобро да се разбере почетокот и крајот на процесот и дава увид за ограничувањата во проектот. Дефинирањето на опсегот ќе го избистри фокусот на проектниот тим и ќе ги постави очекувањата од проектот. Немање на соодветно дефиниран опсег може да резултира со губење на интерес за проектот. Без дефиниран опсег тимот може да се фокусира на тривијални подрачја и да ги испушти

навистина битните. Избраниот процес може да е преголем за тимот да се справи со него. Постојат два типа на дефинирање на опсег на проектот:

- Опсег кој ја дефинира должината на проектот – Ова дефинирање на опсегот се фокусира на должината на процесот, на пример од прием на налог за производство па се до испорака на производот. Најчесто овде се фиксираат почетната и крајната точка на опсегот.
- Латерален Опсег – Овде се дефинира ширината т.е. распространетоста на опсегот. На пример, опсегот ги опфаќа сите дистрибутери од северниот регион.

Контролните точки во проектот ги одредуваат временските рокови за завршување на секоја фаза. Тоа е прелиминарен план со датуми за комплетирање на фазите во Шест Сигма DMAIC процесот. Временските рокови за завршување на проектот треба да бидат агресивни, но сепак реални. Контролните точки на проектот вклучуваат и детален проектен план заедно со документиран комуникациски план.

Мапирање на процесот е графичка репрезентација на процесот, која го покажува редоследот на задачите со користење на модифицирана верзија на стандардни симболи за графички приказ (Галовеј, 1994). Тоа е алатка која им помага на луѓето да направат анализа, да ги согледаат недостатоците и да разговараат за подобрување на процесот. Мапирањето на процесите е прв чекор и предуслов за спроведување на анализата на модовите на дефекти и нивниот ефект (анг. FMEA) а подоцна и креирање на контролен план за контрола на квалитетот.

Парето анализата е процес на рангирање на можностите и се користи за да се дефинира која од многуте потенцијални можности за подобрување е приоритетна и ќе биде опсег на Шест Сигма анализата. Парето анализата е позната по тоа што „издвојува неколку витални од многуте тривијални можности“. Како алатка за анализа се користи во различни фази од Шест Сигма, секогаш за утврдување на приоритет на различни можности.

3.3 Шест Сигма - Фаза на мерење

Во фазата на мерење се врши евалуација и разбирање на моменталната состојба на процесот. Ова вклучува собирање на податоци кои се мерливи од аспект на квалитетот, цена или продуктивност. Важно е да се направи листа на сите клучни влезни и излезни променливи на процесот. Одлуката за тоа кои податоци и во која мера ќе се соберат е многу важна и од тоа ќе зависи квалитетот на деталната анализа и разбирањето на перформансот на моменталниот процес. Податоците може да се обезбедат со анализа на историски прибрани податоци, но ова секогаш не е доволно од причина што историските податоци може да се некомплетни, методот на чување на записите може да се променил со текот на времето и често пати посакуваната информација може да не е воопшто зачувана. Поради ова често пати е неопходно да се соберат податоците преку студија на обсервација.

Во оваа фаза најпрво се прави анализа на мерниот систем (анг. MSA). Најчесто користена алатка за анализа на мерен систем со променливи податоци е студијата за повторливост и репродуктивност на мерниот систем (анг. Gage Repatability & Reproducibility - GR&R).

Откако ќе се потврди точноста на податоците добиени од мерниот систем следно е да се пресмета способноста на моменталниот процес со примена на статистичка контрола на процесот (анг. SPC). За анализа на способност на процесот се користат

контролни графикони како на пример хистограм, графикон со подвижен ранг, индивидуален графикон, Парето графикони итн.

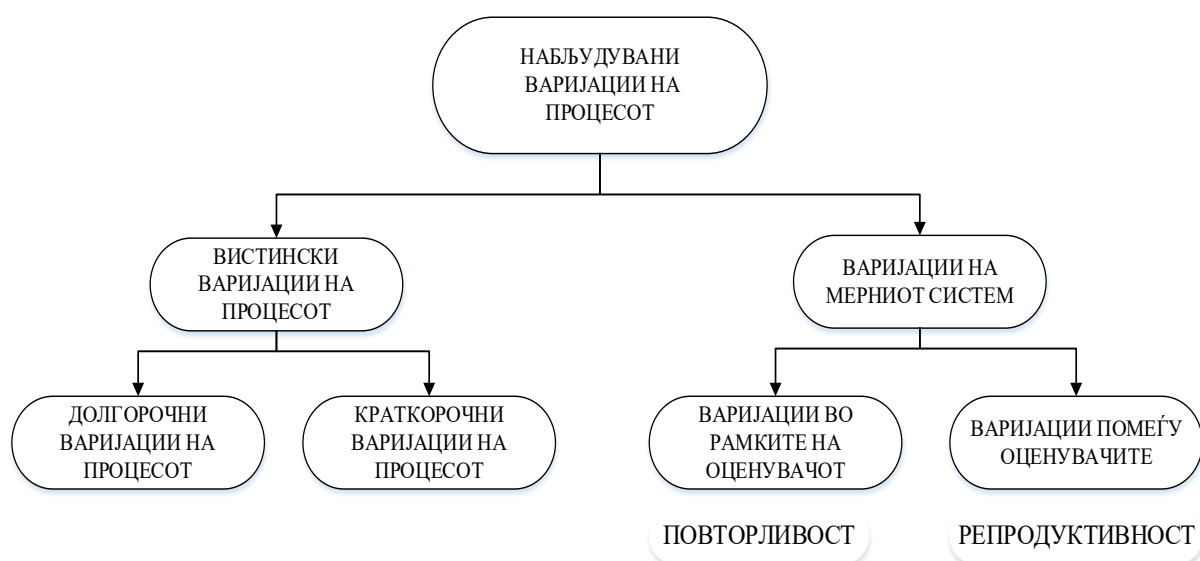
На крајот од фазата на мерење во Шест Сигма, доколку е неопходно тимот треба да го дополни поглавјето на проектот и да ги преиспита целите на проектот и подрачјето на делување. Во некои случаи тимот може веднаш да предложи брзи препораки за подобрувања, како на пример елиминација на очигледни активности кои не додаваат вредност или елиминирање на извори на варијации на процесот.

3.3.1 Набљудувани варијации во процесот

Генерално, во секоја активност што вклучува мерења, набљудуваните варијации² на процесот (анг. observed process variations σ_{opv}^2) се резултат на вистинските варијации на процесот (анг. actual process variations σ_{apv}^2) и варијациите на мерниот систем (анг. measurement system variations σ_{ms}^2) кој се користи, [57].

$$\sigma_{opv}^2 = \sigma_{apv}^2 + \sigma_{ms}^2 \quad (1)$$

На Слика 3.1 се прикажани можните извори на набљудуваните варијации на процесот.



Слика 3.1. Набљудувани варијации на процесот

За да се фокусираме на вистинските варијации на процесот, мора најпрвен да се идентификуваат и издвојат варијациите на мерниот систем од варијациите на процесот. За идентификување на варијациите на мерниот систем служи студијата за анализа на мерниот систем MSA, а за анализа на вистинските варијации на процесот служи студијата за статистичка контрола на процесот SPC.

Во Табела 3.3 се прикажани симболите со референтните стандарди, кои се користат во MSA и SPC студиите.

² ISO 3534-2: 2006 - Варијација е разлика помеѓу вредностите на дадена карактеристика. Варијацијата често се изразува како варијанса на стандардната девијација
Варијација е варирање на излезниот резултат на еден процес. Изворите на варијации може бидат поради вообичаени причини и специјални причини [44]

Табела 3.3. Символи и референтни стандарди во MSA и SPC.

σ - стандардна девијација на популацијата. (ISO 3534-2: 2006)	$\sigma = \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \mu)^2}{N}}$	X_i се индивидуалните отчитувања, μ е аритметичката средина на популација, N е бројот на отчитувања во популација.
s - стандардна девијација од примерок. (ISO 3534-2: 2006)	$s = \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$	X_i се индивидуалните отчитувања, $\bar{X}$ е аритметичката средина на примерокот, n е бројот на отчитувања од примерок.
σ^2 - варијации на популација. (ISO 3534-2: 2006)	$\sigma^2 = \sum_i^n \frac{(X_i - \mu)^2}{N}$	X_i се индивидуалните отчитувања, μ е аритметичката средина на популација, и N е бројот на отчитувања.
σ_{opv}^2 - набљудувани варијации на процесот. (MSA, AIAG, 2010)	$\sigma_{opv}^2 = \sigma_{apv}^2 + \sigma_{ms}^2$	σ_{apv}^2 се вистинските варијации на процесот, а σ_{ms}^2 се варијациите на мерниот систем.
σ_{apv}^2 - вистински варијации на процесот. (MSA, AIAG, 2010)	$\sigma_{apv}^2 = (R_p \cdot K_3)^2$	R_p е аритметичка средина од опсегот на секој примерок, а K_3 е коефициент што зависи од број на примероци во GRR.
σ_{ms}^2 - варијации на мерниот систем. (MSA, AIAG, 2010)	$\sigma_{ms}^2 = \sigma_{rep}^2 + \sigma_{rpd}^2$	σ_{rep}^2 се варијации на повторливост, а σ_{rpd}^2 се варијации на репродуктивност.
σ_{rep}^2 - варијации на повторливост. (MSA, AIAG, 2010)	$\sigma_{rep}^2 = EV = \bar{R} \cdot K_1$	$\bar{R}$ е аритметичка средина на опсегот помеѓу оценувачите, K_1 е константата што зависи од бројот на мерења во GRR.
σ_{rpd}^2 - варијации на репродуктивност. (MSA, AIAG, 2010)	$\sigma_{rpd}^2 = (\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)^2 - \frac{(EV)^2}{nr}$	$\bar{X}_{DIFF}$ е максималната разлика на аритметичките средини на оценувачите, K_2 е константата што зависи од бројот на оценувачи во GRR, EV се варијации на опремата, n е број на примероци и r е број на мерења.
$\hat{\sigma}$ - стандардна девијација на карактеристика на процес. (SPC, AIAG, 2005)	Стандардната девијација за краток временски период $\hat{\sigma}_c$ се пресметува по методот на Walter A. Shewhart и ги зема во предвид само варијациите во подгрупите. За долг временски период се пресметува по формулата $\hat{\sigma}_p$ и ги зема во предвид вкупните варијации во процесот (во и помеѓу подгрупите).	
$\hat{\sigma}_c$ - Shewhart метод за стандардна девијација ги зема во предвид само варијациите во подгрупите. (SPC, AIAG, 2005)	$\hat{\sigma}_c = \bar{R}/d_2$	$\bar{R}$ е аритметичка средина од опсезите во подгрупите, а d_2 е коефициент што зависи од големината на подгрупата.

$\hat{\sigma}_p$ - стандардна девијација на карактеристика на процес, за пресметка на вкупните варијации во процесот (во и помеѓу подгрупите). (SPC, AIAG, 2005)	$\hat{\sigma}_p = s = \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$	X_i се индивидуалните отчитувања, $\bar{X}$ е аритметичката средина и n е бројот на сите отчитувања.
---	--	--

3.3.2 Анализа на мерниот систем - MSA студија

Пред да започнеме со теоретскиот приказ на MSA студијата ќе дадеме краток опис на терминологијата што се користи при анализа на мерниот систем, согласно референтниот стандард JCGM 200:2008 - International vocabulary of metrology VIM. Описот на терминологијата што не е покриен со стандардот JCGM 200:2008, а се користи во MSA студијата, ќе го дадеме согласно референтниот прирачник [45], кој пак за терминологија и симболи се повикува на стандардите ISO International vocabulary of metrology VIM, ASTM E691-99, ASTM E177-90a и ASTM E456-96.

Резолуција е најмалата промена на вредноста на мерената величина што ќе предизвика распознавање и индикација кај мерната опрема. Генерално се практикува правилото една десетина за резолуција на еден мерен систем. Ова правило значи дека резолуцијата на мерната опрема треба да е една десетина од спецификацијата или варијациите на процесот што треба да се мерат. Со други зборови мерната опрема треба да има 10 пати поголема резолуција отколку карактеристиката што се мери. Идеата е да се избери мерна опрема што е способна да детектира варијации присутни во дадена карактеристика.

Референтна вредност на мерената величина (анг. referent quantity value) е вредност на мерената величина која се користи како основа за споредба со вредностите на мерените величини на примероци со исти карактеристики. Референтна вредност може да биде вистинската вредност на мерената величина, при што е непозната во тој случај, или конвенционална вредност на мерената величина при што е позната вредност. Референтната вредност заедно со мерната неодреденост упатува на материјали (сертифициран референтен материјал), мерни уреди, референтна мерна процедура и споредба со мерен стандард.

Вистинска вредност на мерената величина (анг. true quantity value) се смета за единствена и непозната вредност при описот на грешка на мерење. Пристапот на мерна неодреденост е да препознае дека поради природата на сума од некомплетни детали за мерената величина, не постои единствена вистинска вредност на мерената величина. Друг пристап, кој се одвојува комплетно од концептот за вистинска вредност, се потпира на концептот за метролошка компатибилност на мерениот резултат како начин за проценка на валидноста на мерениот резултат. Само во специјални случаи кога станува збор за основни константи се смета дека мерената величина има единствена вистинска вредност.

Грешка на мерење (анг. measurement error) е вредноста на мерената величина минус референтната вредност. Концептот за грешка на мерење може да се користи и во двата случаи: 1) кога постои единствена референтна вредност за споредба што е случај при калибрација кога се користи мерен стандард и вредност на мерена величина со

занемарливо мала мерна неодреденост, или кога е дадена конвенционална вредност на мерената величина при што грешката на мерење е позната, 2) кога мерената величина е претставена со единствена вистинска вредност на мерената величина или сет од висински вредности со занемарлив опсег при што грешката на мерење е позната. Грешка на мерењето не треба да се поистоветува со производна грешка или пропуст.

Систематска грешка на мерење (анг. systematic measurement error) е дел од грешка на мерење, што останува константна или варира на предвидлив начин при повторливи мерења. Референтна вредност за систематска грешка може да биде вистинската вредност, вредноста на мерената величина по мерен стандард со занемарлива мерна неодреденост, или конвенцијална вредност на мерената величина. Систематската грешка и причините за нејзината појава може да бидат познати или непознати. Во случај на позната систематска грешка може да се аплицира корекција за да се компензира грешката. Систематската грешка е еднаква на грешката на мерење минус случајната грешка на мерење.

Случајна грешка на мерење (анг. random measurement error) е дел од грешка на мерење, што варира на непредвидлив начин при повторливи мерења. Референтна вредност за случајна грешка е аритметичката средина што се добива од бесконечен број на повторливи мерења на ист објект. Збир од случајни мерни грешки при повторливи мерења формираат дистрибуција што може да се сумира во однос на очекувањата. Случајната грешка е еднаква на грешката на мерење минус систематската грешка.

Точност (анг. measurement accuracy) е близината на повторување на вредностите на мерената величина и референтната вредност на објектот. Концептот на точност нема нумеричка вредност. Мерената величина е поточна, кога таа има помала грешка на мерење. Терминот точност не треба да се поистоветува со вистинска вредност на мерената величина, ниту со прецизност на мерење.

Отстапување (анг. measurement bias) е растојанието помеѓу аритметичката средина од неколку мерења и вистинската вредност. Тоа е проценка на систематска грешка на мерењето. Количината за која што мерниот уред е континуирано надвор од целта.

Стабилност или поместување (анг. stability) е вкупната варијација во мерењата, добиена со мерен систем, користен при мерење на иста карактеристика на еден ист референтен примерок, во продолжен временски период. Стабилност е промена на отстапување со текот на времето. Проблеми со стабилноста најчесто се јавуваат поради амортизација на мерната опрема, фактори од средината и опкружувањето, неконзистентност на перформансот на операторите и несоодветна процедура за користење на мерната опрема.

Линеарност (анг. linearity) е разлика на отстапувањата во различен дел од очекуваниот оперативен (мерен) опсег на мерниот инструмент. Во еден дел од мерниот опсег на инструментот може да има едно отстапување, во друг дел од мерниот опсег на инструментот друго отстапување. Линеарноста може да се смета како промена на отстапувањето во различниот дел од опсегот кај мерниот инструмент. Проблемите со линеарноста често се резултат на несоодветно одржување на мерната опрема или несоодветна калибрација.

Прецизност (анг. measurement precision) е блискост помеѓу мерните резултати или покажувања добиени со повторени мерења на ист или слични објекти под дефинирани услови. Прецизноста најчесто нумерички се изразува со стандардна девијација, варијанса или коефициент на варијација под дефинирани услови на мерење.

Всушност, прецизноста најчесто се користи за да се опише очекуваната варијација на повторливите мерења во даден опсег на мерење.

Услови за повторливост на мерењето (анг. repeatability condition of measurement) се однесуваат на условите на мерењето кои вклучуваат иста мерна процедура, исти оператори, ист мерен систем, исти работни услови, иста локација, како и повторени мерења на ист или слични примероци во краток временски период.

Мерна повторливост (анг. measurement repeatability) е мерна прецизност за дадено множество на повторливи услови на мерење.

Услови за репродуктивност на мерењето (анг. reproducibility condition of measurement) се услови кои вклучуваат различни локации, оператори, мерни системи и повторени мерења на ист или слични примероци.

Мерна репродуктивност (анг. measurement reproducibility) е мерна прецизност за кои важат условите за репродуктивност.

Студија за повторливост и репродуктивност (анг. Gage Repeatability & Reproducibility - GRR) е комбинирана проценка на повторливост и репродуктивност на мерниот систем.

Способност на мерниот систем (анг. capability of measurement system) е краткорочна проценка на варијациите на мерниот систем. Способност на мерниот систем е случајна грешка на мерниот систем во краток временски период. Тоа е комбинација од грешки кои се дефинирани од линеарност, униформност, повторливост и репродуктивност.

Перформанси на мерниот систем (анг. performance of measurement system) е долгорочна проценка на варијациите на мерниот систем. Перформансите на мерниот систем, исто како и перформансите на процесот, се ефект на вкупните извори на варијации за одреден временски период. Ова утврдува дали нашиот систем е во статистичка контрола (на пример, стабилен и конзистентен, варијациите се резултат само на вообичаени причини), во целта (не е пристрасен), и имаат прифатливи варијации (GRR) во опсегот на очекувани резултати.

Сензитивност на мерниот систем е коефициент што ја покажува реакцијата на мерниот систем на промената на вредноста на мерената величина. Сензитивноста зависи од вредноста на мерената величина. Промената на вредноста на мерената величина мора да биде голема во споредна со резолуцијата на мерниот систем.

Конзистентност е разликата во варијациите на мерењата земени во тек на одреден временски период. Може да се разгледува како повторливост во текот на времето.

Униформност е промена на повторливоста во еден нормален оперативен опсег. Таа претставува хомогеност на повторливост.

Мерниот систем се состои од мерен инструмент или уред и често содржи и други компоненти како оператор(и) кои го користат и услови специфични за времето кога инструментот се користи. Постојат и други фактори кои влијаат на однесувањето на мерниот систем, како на пример подесувањата и калибрација, [57]. Целта на најголемиот број на студии за утврдување на способноста на мерниот систем е:

1. Да се утврди колку од вкупните набљудувани варијации се резултат на мерниот инструмент.
2. Да се изолираат компонентите на варијации на мерниот систем.

3. Да се процени дали мерниот инструмент е способен т.е дали е соодветен за планираната апликација.

Варијациите на мерниот систем се состојат од варијации на повторливост (анг. repeatability - σ_{rep}^2) и варијации на репродуктивност (анг. reproducibility - σ_{rpd}^2):

$$\sigma_{ms}^2 = \sigma_{rep}^2 + \sigma_{rpd}^2 . \quad (2)$$

Вообичаени алатки кои се користат за анализа на мерниот систем се: калибрациски сертификати, графикон со компоненти на варијации, атрибутивна анализа на мерниот систем и студија за повторливост и репродуктивност. Која алатка ќе се избере за спроведување на анализата на мерниот систем најмногу зависи од карактеристиките на мерниот систем. Студијата за повторливост и репродуктивност е стандардна алатка за анализа на мерниот систем наменет за променливи податоци.

Вообичаена пракса во студијата за повторливост и репродуктивност е да се споредат варијациите на мерната опрема со спецификацијата на производот кој што се мери. Овој сооднос е познат како процент во однос на толеранциите (анг. percentage to tolerance), и се пресметува по формулата:

$$P/T \% = \frac{6 \cdot \sigma_{ms}}{USL - LSL} \cdot 100\% . \quad (3)$$

каде што: USL (анг. upper specification limit) е горната спецификациска граница, LSL (анг. lower specification limit) е долната спецификациска граница.

Друга мерка што се користи во студијата за повторливост и репродуктивност е споредба на варијациите на мерната опрема со набљудуваните варијации на процесот. Овој сооднос е познат како процент на повторливост и репродуктивност (анг. percentage of repeatability and reproducibility), и се пресметува по формулата:

$$R\&R \% = \frac{\sigma_{ms}}{\sigma_{ppv}} \cdot 100\% . \quad (4)$$

Одличен мерен систем треба да ги има двата соодноси (P/T% и R&R%) помали од 10 %. Адекватен систем треба да ги има двата соодноси помали од 30%, при што е потребно подобрување на системот.

Следна мерка која се користи во студијата за повторливост и репродуктивност е број на различни категории (анг. Number of distinct categories Ndc) и служи за да се идентификува способноста на мерниот систем да детектира разлики на мерената карактеристика. Скалата на мерниот инструмент има задоволителен број на различни категории тогаш кога варијациите на мерениот производ се многу поголеми од варијациите на мерната скала. Препорачан број на различни категории е ≥ 5 , [45].

$$Ndc = 1,41 \cdot [\sigma_{ppv}/\sigma_{ms}] . \quad (5)$$

При спроведување на студијата за повторливост и репродуктивност треба да се земат во предвид препораките на референтниот прирачник MSA [45]: минималниот број на мерења да биде поголем од 30 (број на примероци · број на оператори · број на мерења), избраните примероци треба да претставуваат 80% од опсегот на очекуваните варијации на процесот со цел да се валидира мерниот систем во целиот оперативен опсег (линеарност), мерниот инструмент треба да се калибрира и со референтен примерок да се проверува функционалноста на мерната опрема како нормална процедура и мерењата да се спроведуваат по случаен редослед.

Нумеричката студија за повторливост и репродуктивност е прикажана во Табела 3.4, каде што со А, Б и В се означени оценувачите, а од 1 до 10 примероците кои се мерат.

Табела 3.4. Табела со нумеричка Студија за повторливост и репродуктивност

	Оценувач Мерење	Примерок										Аритметичка средина
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	А											
2												
3												
4	Аритметичка средина											$\bar{X}_a =$
5	Опсег											$\bar{R}_a =$
6	Б 1											
7	2											
8	3											
9	Аритметичка средина											$\bar{X}_b =$
10	Опсег											$\bar{R}_b =$
11	В 1											
12	2											
13	3											
14	Аритметичка средина											$\bar{X}_c =$
15	Опсег											$\bar{R}_c =$
16	Аритметичка средина на примерок											$\bar{\bar{X}} =$ $R_p =$
17	$\bar{\bar{R}} = ([\bar{R}_a] + [\bar{R}_b] + [\bar{R}_c]) / [\text{број на оценувачи}]$											$\bar{\bar{R}}$
18	$\bar{X}_{DIFF} = [Max \bar{X}] - [Min \bar{X}]$											
19	$UCL_R = [\bar{\bar{R}}] \cdot [D_4]$											

Значењата на симболите во Табела 3.4 се следни:

- $\bar{X}_a$ претставува аритметичка средина од аритметичките средини на повторени мерења за секој примерок, мерени од оценувачот А. $\bar{X}_b$ и $\bar{X}_c$ соодветно за оценувачите Б и В.
- $\bar{R}_a$ е аритметичка средина од опсегот на секој примерок, мерени од оценувачот А а $\bar{R}_b$ и $\bar{R}_c$ соодветно за оценувачите Б и В.
- $\bar{\bar{X}}$ е аритметичка средина од $\bar{X}_a$, $\bar{X}_b$ и $\bar{X}_c$.
- R_p е опсегот на аритметичките средини, добиени при повторени мерења на секој примерок, од секој оценувач.
- $\bar{\bar{R}}$ е аритметичка средина од опсегот помеѓу оценувачите $\bar{R}_a$, $\bar{R}_b$ и $\bar{R}_c$.
- $\bar{X}_{DIFF}$ е разлика помеѓу минималната и максималната аритметичка средина помеѓу $\bar{X}_a$, $\bar{X}_b$ и $\bar{X}_c$.
- UCL_R е горната контролна граница на индивидуалните опсези, потребна за исцртување на графиконот за опсег R (овој графикон се користи за графичка анализа на студијата за повторливост и репродуктивност). D_4 е константа која зависи од бројот на повторени мерења во студијата. При 3 повторени мерења по примерок, вредноста на D_4 изнесува 2,58.

Извештајот за студијата за повторливост и репродуктивност е прикажан во Табела 3.5.

Табела 3.5. Извештај за Студијата за повторливост и репродуктивност

Извештај за студијата за повторливост и репродуктивност			
Име и бр. на делот:	Мерен инструмент:	Дата :	
Карактеристики:	Студија Бр.:	Изработил:	
Спецификации:	Студија вид:		
Од табелата 3.4 $\bar{R}$	$\bar{X}_{DIFF}$	R_p	
Анализа на мерењата			Вкупна варијација (TV) %
Повторливост - Варијација на опрема (EV):			EV %= 100 · [EV/TV]
$EV = \bar{R} \cdot K_1$	Мерење	K_1	
	2	0,8862	
K_1 зависи од бројот на мерења во студијата	3	0,5908	
Репродуктивност - Варијации на оценувач (AV)			AV %= 100 · [AV/TV]
$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)^2 - (EV^2 / (nr))}$			
K_2 зависи од бројот на оценувачи			
n = примероци	Оценувачи	2	
г= број на мерења	K_2	0,7071	0,5231
Студија за повторливост и репродуктивност:	1	K_3	GRR %= 100 · [GRR/TV]
	2	0,7071	
	3	0,5231	
Варијација од примерок до примерок (PV):	4	0,4467	PV %= 100 · [PV/TV]
	5	0,403	
	6	0,3742	
Вкупна варијација (TV):	7	0,3534	Ndc = 1,41 · [PV/GRR]
	8	0,3375	
	9	0,3249	
	10	0,3146	

Во Табела 3.5 се прикажани следните формули:

- Повторливост или варијации поради опремата EV (анг. equipment variations):

$$EV = \bar{R} \cdot K_1 . \quad (6)$$

каде: ($\bar{R}$) е аритметичка средина од опсегот помеѓу оценувачите, K_1 е константата што зависи од бројот на мерења што се користат во студијата за повторливост и репродуктивност и е еднаков на инверзниот коефициент d_2^* (коефициент кој зависи од бројот на примероци во подгрупата), [45].

- Репродуктивност или варијации поради оценувач AV (анг. appraiser variations):

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)^2 - \frac{(EV)^2}{nr}} . \quad (7)$$

каде што: $(\bar{X}_{DIFF})$ е максималната разлика на аритметичките средини на оценувачите, K_2 е константата што зависи од бројот на оценувачи во студијата и е еднаков на инверзниот коефициент d_2^* , n е број на примероци и r е број на мерења.

- Варијации поради повторливост и репродуктивност (GRR), што е исто со σ_{ms} , се пресметуваат по формулата:

$$GRR = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2} \quad (8)$$

- Варијации од примерок до примерок PV (анг. part-to-part variations) претставуваат вистинските варијации на процесот, без варијациите на мерниот систем и е исто со σ_{app} . Се пресметуваат по формулата:

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (9)$$

каде што: (R_p) е опсегот на аритметички средини на примероците, K_3 е константа што зависи од бројот на примероци што се користат во студијата за повторливост и репродуктивност и е еднаков на инверзниот коефициент d_2^* .

За графичка анализа на студијата за повторливост и репродуктивност се користат следните графикони: графикон со компоненти на варијации, графикон за аритметичка средина $\bar{X}$ и графикон за опсег R. Толкувањето на овие графикони е прикажано во експерименталниот дел од трудот, во поглавје 8.2.3.

3.3.3 Анализа на вистински варијации на процесот - SPC студија

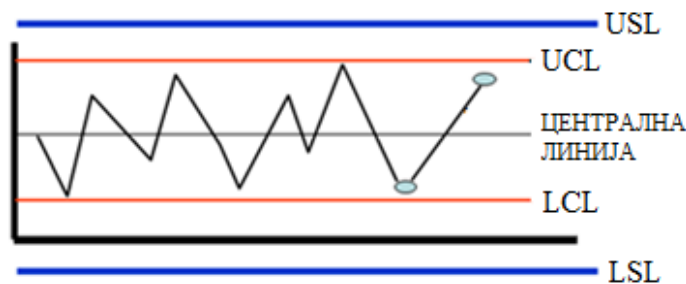
Статистичка контрола на процесот е процедура за контрола на производни процеси заснована на статистички методи. За да се управува со било кој процес и да се намалат варијациите во него, тие треба да се следат до изворот што ги предизвикува. Постојат два типа на изворни причини на варијациите, вообичаени и специјални. Вообичаените причини се однесуваат на многуте извори на варијации кои постојано делуваат на процесот. Вообичаените причини во рамките на еден процес создаваат стабилна и повторлива дистрибуција во текот на времето. Ако се присутни само вообичаени причини за варијации и тие не се менуваат, излезниот резултат од процесот ќе биде предвидлив. Овој процес се нарекува „во статистичка контрола“. Специјални причини се однесуваат на било кој фактор што предизвикува варијации кои влијаат на само еден дел од излезниот резултат на процесот. Тие често се наизменични и непредвидливи. Ако се присутни специјални причини за варијации, излезниот резултат на процесот нема да биде стабилен и предвидлив со текот на времето.

За анализа на статистичката контрола на процесот и идентификување на вообичаените и специјалните причини на варијации се користат контролните графикони. Во нив се внесуваат мерењата на карактеристиките на процесот. Некои од вообичаените контролни графикони за променливи податоци се: графикон за аритметичка средина ($\bar{X}$), за опсег (R), за индивидуални отчитувања (I) и за подвижен опсег (анг. MR - moving range). Постојат две фази при проучувањето на статистичката контрола на процесот со помош на контролните графикони, и тоа:

1. Првата е да се идентификуваат и елиминираат специјалните причини за варијации во процесот. Целта е да се стабилизира процесот. Стабилен и предвидлив процес се вели дека е во статистичка контрола.

2. Втората фаза се занимава со предвидување на идните мерења, со што се потврдува стабилност на процесот. Во оваа фаза, анализата на податоци и реакцијата при појава на специјални причини се прави во реално време.

За анализа на статистичката контрола на процесите со помош на контролните графикони предуслов е да се разбере разликата помеѓу спецификациските граници (анг. Upper Specification Limit - USL, Lower Specification Limit - LSL) наспроти контролните граници (анг. Upper Control Limit UCL, анг. Lower Control Limit LCL). Контролните граници се пресметуваат врз основа на стандардната девијација на самиот процес (врз основа на Шест Сигма $\pm 3\sigma$), каде што 99,73 % од варијациите во процесот се очекува да припаднат помеѓу горната и долната контролна граница. Спецификациските граници помагаат да се разбере како процесот се однесува во однос на барањата на клиентот. Доколку во графиконот наместо контролни граници се постават само спецификациски граници, тогаш нема да се добие контролен графикон туку алатка за инспекција дали процесот е во спецификација или не, и во тој случај нема да може да се предвиди идното однесување на процесот (Слика 3.2).



Слика 3.2. SPC: UCL и LCL наспроти USL и LSL

Стандардната девијација во контролните графикони е креирана за да се идентификува присуството на специјални причини во процесот. При нормална дистрибуција на процесот 68 % од варијациите се очекува да припаднат во $\pm 1\sigma$, 95 % од варијациите во $\pm 2\sigma$, и 99,73 % од варијациите на процесот да припаднат во $\pm 3\sigma$ (UCL, LCL). Терминот „надвор од контрола“ се користи кога правилото на стандардна девијација е нарушено. Присуството на специјални причини се сигнализира со една или повеќе мерни точки надвор од контролните граници, или невообичаени трендови на мерни точки во рамките на контролните граници.

Невообичаените трендови се првото предупредување за состојба што треба да се корегира. Такви трендови се:

- 1 точка надвор од контролните граници (UCL, LCL).
- 7 последователни точки по ред на иста страна од централната линија.
- 6 последователни точки со тренд на зголемување или намалување.
- 14 последователни точки што наизменично се качуваат нагоре или надолу.
- 2 од 3 последователни точки да се надвор од 2σ границата, од иста страна на централната линија.
- 4 од 5 последователни точки да се надвор од 1σ границата, од иста страна на централната линија.
- 15 последователни точки да се во 1σ границите, од било која страна на централната линија.
- 8 последователни точки да се надвор од 1σ границите, од било која страна на централната линија.

Специјалните причини може да влијаат на локацијата на процесот (аритметичка средина, медијан) или на ширината/варијацијата на процесот (опсег, стандардна девијација), или и на двете. Аритметичката средина се користи во статистиката за контрола на локацијата, а опсегот за контрола на ширината на процесот. Бидејќи контролните граници во статистиката за локација зависат од статистиката за ширината на процесот, за утврдување на стабилност на процесот треба прво да се анализира статистиката за ширина на процесот. Графиконот со статистиката за ширина на процесот се анализира посебно од графиконот со статистиката за локација, но споредбата на двата контролни графикони понекогаш може да даде дополнителен увид за специјалните причина што влијаат на процесот. Процесот не може да се каже дека е стабилен и во статистичка контрола, освен ако и двата графикони се без точки надвор од контролните граници, и без невообичаени шеми на распределба на точките. Поради ова, контролните графикони за променливи податоци обично се изготвуваат и анализираат во парови, еден графикон за локација на процесот, друг графикон за ширина на процесот. Во зависност од бројот на примероци во подгрупата кои се мерат, постојат следните парови на графикони за променливи податоци, [58]:

- Графиконите за аритметичка средина и опсег ($\bar{X}$, R) претставуваат пар на контролни графикони кои се користат за процеси кои имаат големина на подгрупа помеѓу два и десет примероци. Графиконот за аритметичка средина покажува како аритметичката средина се менува со текот на времето, а графиконот за опсег покажува како опсегот на подгрупите се менува со времето.
- Графикони за аритметичка средина и стандардна девијација ($\bar{X}$, s) се многу слични на популарните графикони за аритметичка средина и опсег, разликата е во тоа што стандардната девијација се пресметува од аритметичката средина на стандардна девијација во првиот графикон и од аритметичката средина на опсегот во вториот графикон. Обично се препорачува овој пар од графикони во однос на графиконите за аритметичка средина и опсег, кога големината на примероци во подгрупата е поголема ($n > 10$), или кога големината на примерокот е променлива од подгрупа во подгрупа, [58].
- Графиконите за индивидуални отчитувања и подвижен опсег ($\bar{X}$, MR) се користат кога само единечно мерење е достапно во секоја временска точка ($n=1$). Бидејќи е вклучен подвижниот опсег, точките кои се цртаат на графиконот за опсег се поврзани. Подвижен опсег се пресметува по формулата:

$$\overline{MR} = \frac{(MR_2 + MR_3 + \dots + MR_k)}{k - 1} . \quad (10)$$

Каде што MR_i е опсег помеѓу менталната и претходната вредност:

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}|, i = 2 \dots k . \quad (11)$$

Пресметки на Стандардната девијација на X графиконот е со формулата:

$$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2 . \quad (12)$$

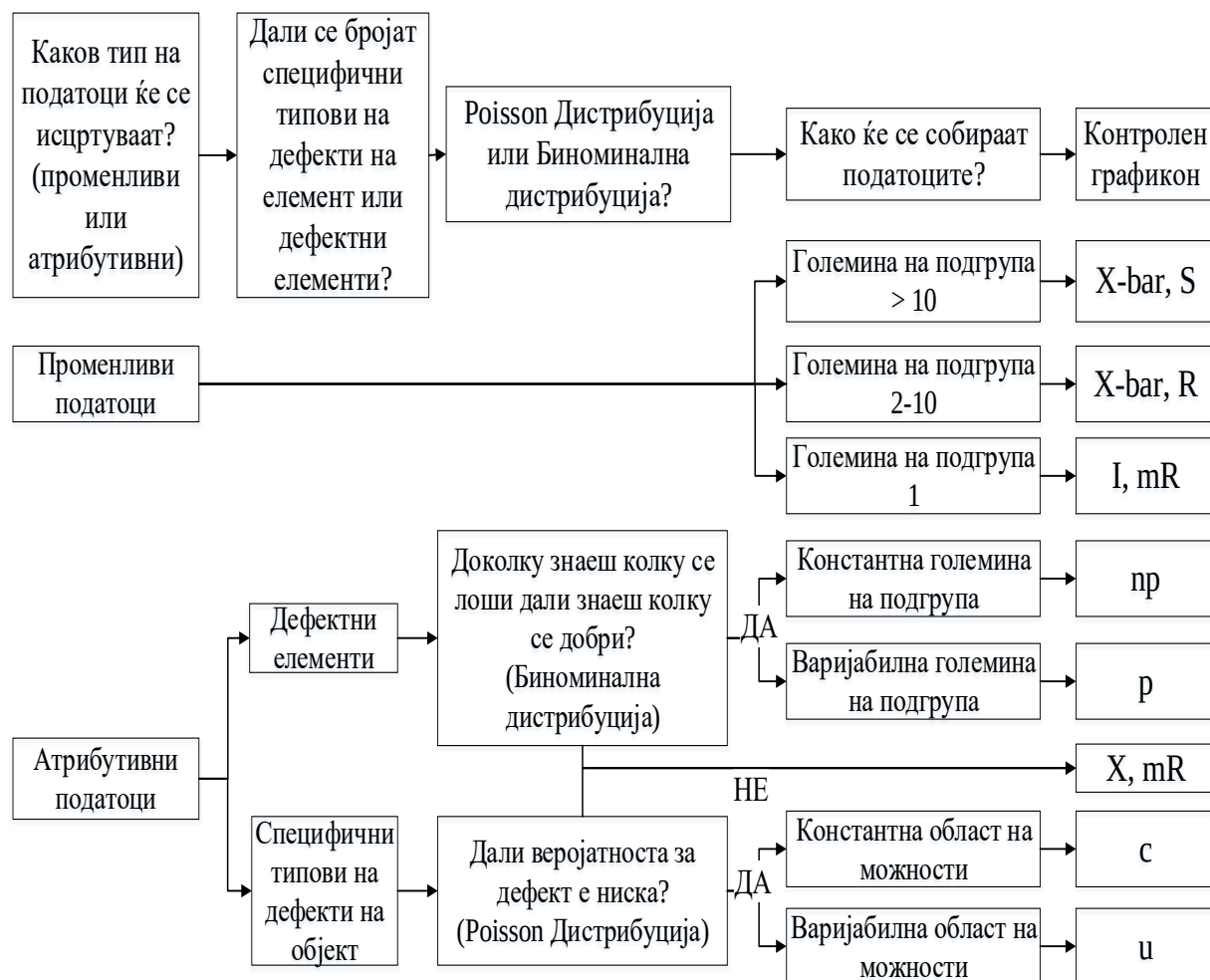
Централна линија

Контролни граници:

$$CL_X = \bar{X} . \quad UCL_X = \bar{X} + E_2 \cdot \bar{R} . \quad LCL_X = \bar{X} - E_2 \cdot \bar{R} . \quad (13)$$

$$CL_R = \bar{R} . \quad UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} . \quad LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} . \quad (14)$$

Критериумите за избор на контролни графикони според типот на податоци и големината на подгрупата се прикажани на Слика 3.3, [58].



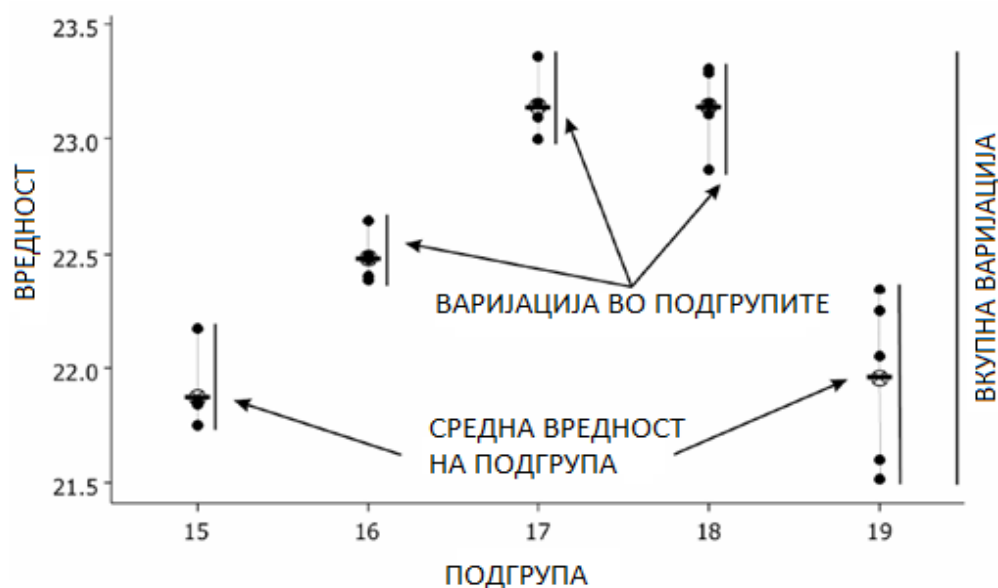
Слика 3.3. Избор на контролен графикон според тип на податоци и големина на подгрупа

Студијата за способност на процесот претставува нумеричка анализа на статистичка контрола на процесот, која се спроведува за да се утврди каков е перформансот на процесот во однос на спецификациите. За да се направи анализа на способност на процесот и перформанс на процесот, потребно е најпрвин да се разберат различните варијации во процесот, и тоа:

- **Неодделиви варијации на процесот** – Оној дел од варијациите на процесот кој се должи само на вообичаени причини.
- **Варијација во подгрупите (σ_c)** – Ова е варијација која се должи само на варијацијата во подгрупите (Слика 3.4). Ако процесот е во статистичка контрола оваа варијација е добра проценка само на неодделивите варијации на процесот. Се пресмета со Shewhart методот за стандардна девијација во подгрупите $\hat{\sigma}_c$. По која од двете формули прикажани подолу ќе се пресметува стандардната девијација во подгрупите, зависи од тоа кој пар на графикони ќе се користи за анализа на варијациите на процесот (Слика 3.3):

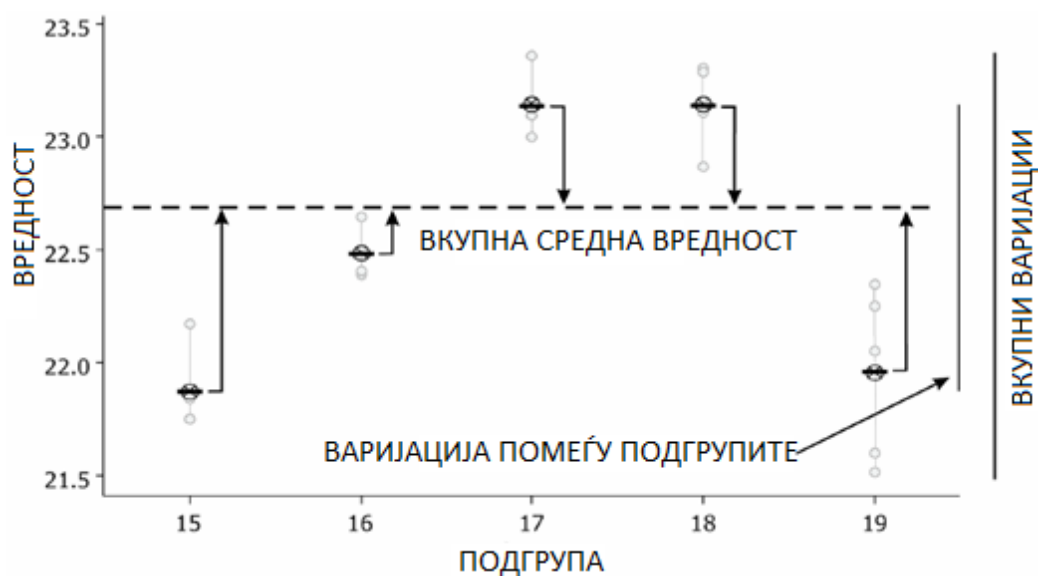
$$\hat{\sigma}_c = \bar{R}/d_2 \quad \text{или} \quad \hat{\sigma}_c = \bar{s}/c_4 \quad (15)$$

каде што $\bar{R}$ е аритметичка средина од опсезите на подгрупите, d_2 е коефициент кој зависи од бројот на примероци во подгрупата (види во додаток А, Табела А.1), $\bar{s}$ е аритметичка средина од стандардните девијации на подгрупите и c_4 е коефициент кој зависи од бројот на примероци во подгрупата.



Слика 3.4. Варијација во подгрупите

- **Варијации помеѓу подгрупите** – Ова е варијација која се должи на варијација помеѓу подгрупите (Слика 3.5). Ако процесот е во статистичка контрола оваа варијација треба да е 0.



Слика 3.5. Варијација помеѓу подгрупите

- **Вкупни варијации на процес (σ_p)** – Ова е варијација која се должи на двете, варијација во подгрупите (σ_c) и варијација помеѓу подгрупите. Доколку процесот не е во статистичка контрола тогаш вкупната варијација на процесот ќе ги вклучи ефектите од специјалните и вообичаените причини. Оваа варијација може да се пресмета со стандардната девијација на примероци s , користејќи ги сите индивидуални отчитувања добиени од детален контролен графикон или студија на процес:

$$\hat{\sigma}_p = s = \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}} . \quad (16)$$

каде што X_i е индивидуално отчитување, $\bar{X}$ е аритметичка средина од индивидуалните отчитувања, n е вкупниот број на индивидуални отчитувања.

Способност на процес C_p дава анализа на ширината на процесот (варијациите на процесот) во однос на спецификацијата, без да се земе во предвид локацијата на процесот. Колку е помала ширината на процесот во однос на спецификацијата, толку процесот е посposобен да ги исполни очекувањата на клиентот кои се зададени со спецификацијата. C_p ги зема во предвид само варијациите во подгрупите $\hat{\sigma}_c$, и се среќава во литературата и како способност за краток временски период (анг. short term capability):

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \hat{\sigma}_c} = \frac{USL - LSL}{6 \cdot (\bar{R}/d_2)} . \quad (17)$$

Индекс на способност на процес C_{pk} ги зема во предвид способноста на процесот и локацијата на процесот. C_{pk} и C_p секогаш треба да се анализираат заедно, при што C_{pk} секогаш е помало или еднакво на C_p . Доколку C_{pk} вредноста е значително помала од соодветната C_p вредност, тоа укажува на можност за подобрување на процесот со негово центрирање. C_{pk} се пресметува како минимум од CPU или CPL, каде што:

$$CPU = \frac{USL - \bar{X}}{3 \cdot \hat{\sigma}_c} = \frac{USL - \bar{X}}{3 \cdot (\bar{R}/d_2)} . \quad (18)$$

$$CPL = \frac{\bar{X} - LSL}{3 \cdot \hat{\sigma}_c} = \frac{\bar{X} - LSL}{3 \cdot (\bar{R}/d_2)} . \quad (19)$$

Перформанс на процес P_p , исто како и способност на процес, дава анализа на ширината на процесот во однос на спецификациите, со таа разлика што ги зема во предвид вкупните варијации во процесот $\hat{\sigma}_p$ (варијациите во и помеѓу подгрупите), а не само варијациите во подгрупите. Едноставно кажано, единствена разлика помеѓу способност на процес и перформанс на процес е начинот на пресметување на стандардната девијација. Оттука перформанс на процес се среќава во литературата и како способност за долг временски период (анг. long term capability). P_p не зависи од локацијата на процесот, и се пресметува со формулата:

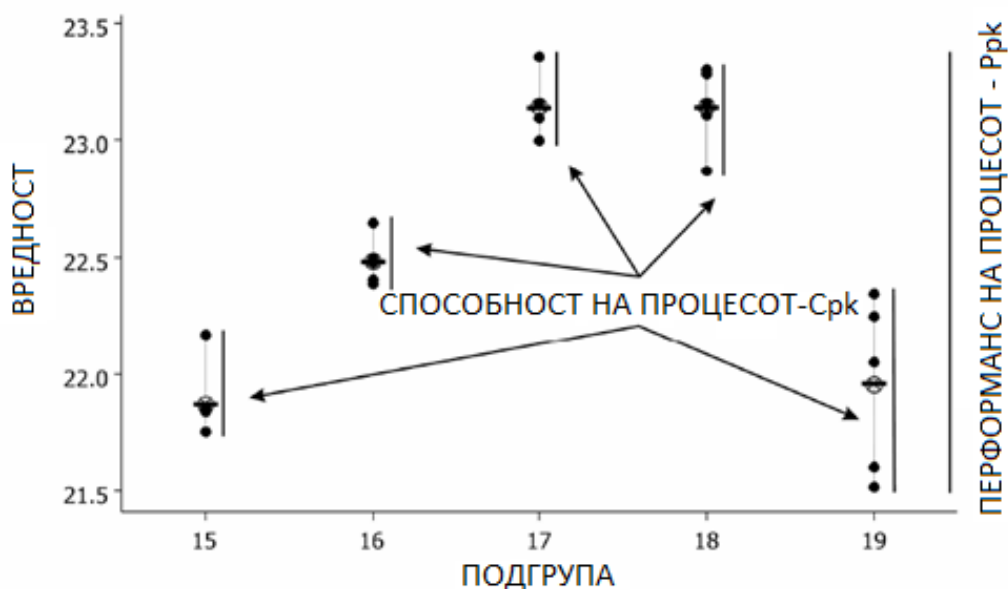
$$P_p = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \hat{\sigma}_p} = \frac{USL - LSL}{6 \cdot s} = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}} . \quad (20)$$

Индекс на перформанс на процес P_{pk} ги зема во предвид перформансот на процесот и локацијата на процесот. P_{pk} и P_p секогаш треба да се анализираат заедно, при што P_{pk} секогаш е помало или еднакво на P_p . Доколку P_{pk} вредноста е значително помала од соодветната P_p вредност, тоа укажува на можност за подобрување на процесот со негово центрирање. P_{pk} се пресметува како минимум од PPU или PPL каде што:

$$PPU = \frac{USL - \bar{X}}{3 \cdot \hat{\sigma}_p} = \frac{USL - \bar{X}}{3 \cdot s} = \frac{USL - \bar{X}}{3 \cdot \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}} . \quad (21)$$

$$PPL = \frac{\bar{X} - LSL}{3 \cdot \hat{\sigma}_p} = \frac{\bar{X} - LSL}{3 \cdot s} = \frac{\bar{X} - LSL}{3 \cdot \sqrt{\sum_i^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}} . \quad (22)$$

Ако процесот е во статистичка контрола, варијациите помеѓу подгрупите се 0, и тогаш способноста на процесот ќе биде многу блиску со перформансот на процесот ($C=P$). Големата разлика меѓу способност и перформанс на процесот укажува на варијации помеѓу подгрупите и присуство на специјални причини во процесот. На Слика 3.6 е прикажана споредба помеѓу индексот на способност на процесот и индексот на перформанс на процесот.



Слика 3.6. Споредба на C_{pk} наспроти P_{pk}

3.4 Шест Сигма - Фаза на анализирање

Фазата на анализирање е најтешкиот чекор во Шест Сигма анализата. Додека првата половина од проектот се фокусира на тимско собирање на податоци (анализа на мерниот систем, статистичка контрола на процесите, анализа на способност на процесот и анализа на изворните причини за појава на проблемот), втората половина се фокусира на елиминирање на „многуге тривијални“ причини и идентификување на главните извори на проблемот. Може да се сумира дека фазата на анализирање во Шест Сигма методологијата врши детална анализа на изворните причини за појава на грешка. Анализата на изворните причини започнува со анализирање на процесот и формирање на теории со користење на субјективни и објективни алатки како што се: „5-why“ анализа, 8D извештај (анг. 8 disciplines for problem solving), мапирање на променливи на процесот, дијаграм на причини и последици, матрица со причини и последици, Парето дијаграм за рангирање на причините за појава на грешка, PDCA циклус (анг. Plan, Do, Check, Act) и анализа на модови на грешки и нивниот ефект. Потоа следуваат чисто математички анализи за да се тестираат теориите дека овие потенцијални изворни причини се навистина одговорни за појавата на грешките: Анализата со регресија (анг. regression analysis), статистичко тестирање на хипотези (анг. statistical hypothesis testing), анализа на варијации (анг. analyze of variance ANOVA) и Chi Square техниката.

3.4.1 Анализи за откривање на изворните причина за појава на грешки

Анализата на изворните причини со користење на субјективни и објективни алатки најпрвен започнува со мапирање на променливите на процесот, за да се проверат сите потенцијални причини кои може да доведат до појава на грешката. Мапирањето на променливите на процесот според Шест Сигма методологијата, всушност треба да се направи како што е реално во моментот, а не како што би требало да биде во иднина. Прв чекор при мапирањето на променливите на процесот е да се идентификуваат сите чекори во процесот на производство каде што може да настане грешката. Во мапирањето на променливите на процесот треба да се вклучат сите процеси, оние кои додаваат вредност на производот како и оние кои не додаваат вредност. Следен чекор е графичко презентирање на влезните променливи X's и излезниот резултат Y за сите чекори во процесот на производство каде што може да настане грешката. Откако ќе се набројат сите влезни променливи X's за секој процес поединечно, потребно е тие да се класифицираат како контролирани и неконтролирани (се однесува на контрола на влезните променливи во процесот). Како главен излезен резултат што се очекува од мапирањето на променливите на процесот е да се испорача комплетна листа со сите влезни променливи X's во процесот. Врз основа на таа листа ќе се темелат идните активности во проектот: анализа на изворните причини, креирање на матрицата за причини и последици, анализа на модовите на грешки и нивниот ефект, првични идеи за потребите на контролниот план, идентификување на студиите за способност на процесот, спроведување на едноставни експерименти како и посложени експерименти (дизајн на експерименти).

Потоа, со помош на алатките дијаграм и матрица со причини и последици се сортираат причините кои се со најголемо влијание за појава на грешката и на овие причини им се дава приоритет при имплементирањето на корективните акции. Дијаграмот на причини и последици (познат како Ишикава дијаграм или дијаграм на рибин скелет т.е. анг. fishbone diagram) не се фокусира само на симптомите, туку тој помага да се идентификуваат причините за појава на проблемот. Врз основа на податоците добиени од мапирањето на променливите на процесот, во овој дијаграм се пополнуваат потенцијалните причини за појава на проблемот, класифицирани во 5

групи: материјали, луѓе, методи, машини и околина. Матрицата со причини и последици е едноставна матрица која служи за да ги квантифицива барањата на клиентот според нивната важност. Прв чекор при креирање на матрицата е да се поврзат X 's (влезните променливи) со Y (излезниот резултат), добиени со мапирање на променливи на процесот. Нареден чекор е да се процени зависноста на секоја влезна променлива X 's со излезниот резултат Y . Рангирањето во матрицата со причини и последици е според следниот критериум:

- Рангирање со 1: Во случај кога X незначително влијае на Y .
- Рангирање со 3: Во случај кога X значително влијае на Y .
- Рангирање со 9: Во случај кога X директно и силно влијае на Y .

По субјективното и објективно идентификувањето на можните изворни причини следува математичкото тестирање на теориите. Анализата со регресија овозможува да се утврди дали постои релација помеѓу две променливи. Оваа анализа може да се користи за да се утврди дали една променлива или независна променлива, може да се примени за предвидување на друга променлива или зависна променлива. Колку е поцврста релацијата помеѓу променливите како на пример модификацијата на процесот со стапката на дефекти, толку е поголема точноста при предвидување на стапката на дефекти со конкретна модификација на процесот.

Статистичко тестирање на хипотези се однесува на процесот на користењето на статистичката анализа за да се утврди дали набљудуваните разлики помеѓу две или повеќе примероци се поради случајни причини како што се тврди во нултата хипотезата (анг. null hypothesis H_0), или се резултат на вистински разлики помеѓу примероците како што се тврди во алтернативната хипотеза (анг. alternative hypothesis H_a). Нултата хипотеза тврди дека нема разлика во параметрите (средна вредност, варијации и дефекти на милион можности), во две или повеќе популации на примероци. Алтернативната хипотеза тврди дека набљудуваните разлики или релации помеѓу две популации на примероци се реални и не се резултат на случајност или пак грешка при процесот на собирање на примероците. Тестирањето на статистичката хипотеза е процес на користење на разни статистички алатки со цел да се анализираат податоците и на крај едната хипотеза ја прифаќаме а другата ја отфрламе. Од практичен аспект со наоѓањето на статистички докази дека нултата хипотеза е грешна, се отфрла нултата хипотеза и се прифаќа алтернативната хипотеза.

Chi Square анализата е статистичко тестирање на хипотези која проверува дали разликата помеѓу очекуваните и набљудуваните резултати е значителна и дали е поради случајност или има некоја причина што прави зависност. Ниска вредност на chi square значи дека постои корелација помеѓу две групи на податоци. Chi square статистиката може да се користи само на броеви. Не може да се користи за проценти, пропорции, средни вредности и слични статистички вредности. Се пресметува по формулата:

$$X_c^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (23)$$

каде што: c означува степен на слобода, O е набљудуваната вредност, E е очекуваната вредност. Симболот за сума во формулата означува дека треба да се направи калкулација за секој поединечен податок во групата со податоци.

Анализа на варијации е статистичка техника со која се тестираат три или повеќе групи со податоци. Како и кај останатите тестирања на хипотези и кај ANOVA има нулта хипотеза и алтернативна хипотеза. Се користи за анализа на варијациите на средните

вредности од различни групи на популацијата, составени од континуирани податоци. Оваа анализа користи две компоненти на варијации:

- Варијации помеѓу групите на популацијата, со фокус на разликата на средните вредности помеѓу различните групи.
- Варијации во групите (понекогаш познати под името грешка во групата), со фокус на варијациите предизвикани поради различните отчитувања на индивидуалните примероци во групата.

3.5 Шест Сигма - Фаза на подобрување

Фазата на подобрување во Шест Сигма ги истражува можните корективни акции за идентификуваните причини за појава на грешка. Оваа фаза се фокусира на развивање на идеи како да се отстранат изворите на варијации во процесот. Фазата започнува со тестирање и стандардизација на потенцијалните решенија. Оваа фаза влучува:

- Идентификување на начини за отстранување на причините за појава на варијациите.
- Потврда на критичните влезни променливи.
- Поставување на оперативни параметри (горна и долна спецификациска граница).
- Оптимизирање на критични влезови и/или подобрување на процес за да се постигне намалување на дефекти.

3.5.1 Стратегија на експериментирање

За навистина да се разбере релацијата *причина-и-последица* на некој процес, мора намерно да се менуваат влезните променливи во процесот и да се посматраат варијациите на излезот од процесот. Со други зборови, потребно е да се извршат експерименти врз системот, [59]. Постојат неколку пристапи при утврдување на влијанието на влезните променливи т.е фактори на резултатот на излезните променливи и тоа: еден по еден фактор во исто време (анг. one factor at time - OFAT), стратегија на најдобро нагаѓање (анг. best guess approach) и дизајн на експерименти (анг. design of experiments - DoE).

Еден по еден фактор во исто време е традиционален пристап што најголем дел од нас го учеле, и тоа е пристап што се залага за промена на само еден фактор во исто време додека сите останати фактори се фиксирани. Кога се применува овој пристап може да бидеме сигурни дека варијациите се резултат на причинско последична релација. Но овој пристап има многу недостатоци:

- Најчесто не е можно другите променливи да се држат фиксирани.
- Не е можно да се земе во предвид ефектот на взаемна зависност т.е интеракција на влезните фактори.
- Не е можно да се земе во предвид експерименталната грешка, вклучувајќи ги и мерните варијации.

Следен пристап е стратегија на најдобро нагаѓање, која што се заснова на пристапот проба-грешка (анг. trial-error). Многу пати функционира задоволително добро, затоа што експериментаторите што ја користат имаат големо техничко, теоретско и практично познавање за системот што го проучуваат. Користејќи го своето знаење експериментаторите избираат т.е. нагаѓаат кој е најдобриот сет од факторите за даден процес. Врз база на резултатите од еден тест со менување на еден или повеќе фактори се прави следниот тест и така може да се експериментира до бесконечност. Оваа стратегија

има најмалку два недостатоци. Прво, да претпоставиме дека првиот тест не дава задоволителни резултати. Потоа експериментаторот треба да направи друго нагаѓање со променето ниво на факторите. Ова може да трае долго време без каква било гаранција за успех. Второ, да претпоставиме дека првото нагаѓање дава прифатлив резултат. Во ваков случај експериментаторот го прекинува тестирањето, иако нема гаранција дека е најдено најдоброто решение.

Трет пристап е дизајн на експерименти (анг. Design of Experiments - DoE) кој има голема улога во фазата на подобрување на Шест Сигма методологијата. Се користи за верифицирање на причини-и-последиви помеѓу сите критични карактеристики за квалитет и идентификување на виталните критични фактори со кои ќе се анализира процесот. Дизајн на експерименти се состои од серија на планирани и научни експерименти кои служат за тестирање на повеќе влезни променливи и нивниот ефект врз една или повеќе излезни променливи. Овој пристап го организира експериментот на начин што ги менува влезните променливи (X) за да види која од нив, или пак комбинација од повеќе променливи, значително влијае на излезната променлива (Y). Дизајн на експерименти се преферира во однос на пристапот еден по еден фактор во исто време, затоа што ги вклучува и интеракциите помеѓу влезните фактори. Овој пристап дава одговор на следните прашања: кој фактор најмногу влијае на излезната променлива, дали некои од факторите се взаемно зависни т.е се во интеракција и кое подесување на факторите го дава најдобриот резултат на излезната променлива. Следните концепти на дизајн на експерименти се од особено значење во Шест Сигма:

- Блокирање – Тоа е техника која се користи за да се подобри прецизноста со која се прави споредба помеѓу факторите. Често блокирањето се користи за да се елиминира или редуцира влијанието на непријатните фактори (анг. nuisance factors). Непријатни фактори се оние кои можат да влијаат врз одзивот и за кои не сме директно заинтересирани.
- Репликација – Под репликација подразбираме независно спроведен тест за секоја комбинација од факторите. Повторувањето има две важни особини. Прво му овозможува на експериментаторот да направи процена за експерименталната грешка. Оваа процена на грешката станува основна мерна единица за одредување дали забележаните разлики во податоците се навистина статистички различни. Второ, ако сакаме да ја одредиме вистинската средна вредност на одзивот за едно ниво на фактори во експериментот, репликацијата му овозможува на експериментаторот да добие попрецизна процена на овој параметар. На пример, ако σ^2 е варијацијата од една индивидуална опсервација и ако има n реплики, варијантата на средната вредност на примерокот σ_y^2 ќе биде:

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{n} . \quad (24)$$

Рандомизацијата е фундаменталната основа врз која почива примената на статистичките методи во експерименталниот дизајн. Рандомизација значи случајно одредување на местото каде што се наоѓа експерименталниот материјал и на редоследот по кој се вршат индивидуалните тестови на експериментот. Статистичките методи бараат опсервациите (или грешките) да бидат независно распределени, случајни варијабли. Со адекватна рандомизација на експериментот се овозможува намалување на можните екстерни фактори.

3.5.2 Анализа на модовите на дефекти и нивниот ефект

Анализата на модовите на дефекти и нивниот ефект е аналитичка методологија која се користи за да се осигура дека потенцијалните проблеми се разгледани и се опфатени во APQR процесот на развој на производ/процес. Највидливиот резултат на FMEA алатката е документирање на колективното знаење од повеќе функционалните тимови. Еден од најважните фактори за успешно имплементирање на FMEA програмата е временската рамка. Тоа треба да биде дејствување „пред настанот“, а не „по фактот“. FMEA е жив документ и треба да се ревидира и ажурира во следните ситуации: промена на дизајн, промена на материјал, промена на процес, релокација на опрема, при континуирано подобрување, при имплементирање на анализа на вредности и инженерски вредности (анг. Value Analyze Value Engineering - VAVE), при поплаки од клиент и при намалување на загуби.

За анализа на ризиците во процесите се користи PFMEA студија (анг. Process Failure Mode And Effect Analyze - PFMEA). PFMEA е основен документ по кој подоцна се креира контролен план во производство, при што и двата документи мора да кореспондираат со графиконот за тек на процесите (анг. Process Flow Chart - PFC). Графиконот за тек на процеси треба да ги вклучи сите производни операции, од обработка на поединечни компоненти до нивна монтажа и испорака на готов производ, примање на репро-материјали, транспорт на материјали, складирање, транспортери, означување на производи/репроматеријали, итн. PFMEA треба да ги анализира сите чекори во процесот на производство, сите излези од поедините чекори (карактеристики на производот, спецификациски барања) како и влезовите (карактеристики на процесот, извори на варијации). Концептот за креирање на PFMEA документ е: идентификување на потенцијални модови на дефекти, идентификување на потенцијални последици, идентификување на потенцијални причини, идентификување на контролни механизми, идентификување и проценка на ризици, препорака на акции и резултати по имплементирање на акциите.

Идентификување на потенцијални модови на дефекти: модови на дефекти се дефинирани како начин при кој производот или процесот може да не успее да го исполни дефинираниот дизајн или барањата на процесот. Претпоставката е направена така што грешката може, но и не мора да се случи. Неопходна е концизна и разбирлива дефиниција на грешката, со цел правилно да се фокусира анализата. Потенцијалните модови на грешки треба да се опишат во технички термини а не како симптоми забележани од страна на клиентот.

Идентификување на потенцијални ефекти: потенцијални ефекти од грешките се дефинираат како ефекти од грешки согледани од страна на клиентот. Клиент може да биде внатрешен (следниот процес што го користи производот) или надворешен т.е крајниот корисник на производот. Доколку има повеќе ефекти за еден потенцијален мод, тогаш секој ефект се анализира поединечно.

Идентификување на потенцијални причини: Потенцијални причини за појава на грешки се дефинираат како индикација за тоа како може да дојде до грешка, опишани во смисла на нешто што може да се корегира или контролира подоцна. Идентификувањето на изворните причини за појава на грешка, со доволно детали, овозможува дефинирање на соодветни контролни и акциони планови. Доколку има повеќе причини за појава на една иста грешка, тогаш секоја причина се анализира поединечно.

Идентификување на контролни механизми: Контролните механизми се оние активности кои ја спречуваат или откриваат причината за појава на грешка. При

развојот на контролните механизми важно е да се идентификува што се случува погрешно и како да се спречи или открие. Контролните механизми кои се фокусираат на превенција се најисплатливи.

Идентификување и проценка на ризик: Проценката на ризикот е еден од најважните чекори во FMEA процесот. Ризикот се проценува во однос на три аспекти:

- Сериозност (анг. severity), тоа е проценка на нивото на влијание на грешката врз клиентот. Бидејќи за еден потенцијален мод на грешка може да имаме неколку потенцијални ефекти од грешката, и тие да имаат различна вредност за сериозност. За тој потенцијален мод на грешка, сериозност ќе ја има највисоката вредност од повеќето потенцијални ефекти од грешката.
- Појава (анг. occurrence), тоа е колку често причината за појава на грешка може да настане. Тоа е веројатност дека конкретна причина за појава на грешка ќе се случи. Потребно е да се користи конзистентен систем за рангирање на појавата. Доколку имаме на располагање статистички податоци од сличен процес, тогаш овие податоци треба да се искористат при рангирањето на појавата. Во други случаи може да се направи субјективна проценка на рангирањето на појавата врз основа на стекнатото знаење за процесот.
- Детекција (анг. detection), тоа е проценка колку добро контролата на производот или контролата на процесот може да ја детектира причината за појава на грешка, или самата грешка. Со цел да се постигне ниско рангирање на детекцијата, генерално треба да се подобри планираната контрола за детекција. Кога ќе се идентификува дека има повеќе од една контрола за потенцијална причина за појава на грешка, препорачливо е да се вклучи поединечно рангирање на секоја контрола. Најниско рангираната контрола треба да се впише во колоната за детекција.

Критериумите за проценка и рангирање на сериозност, појава и детекција се дадени во Табела А.3 - Табела А.5 во додаток.

Препорачани акции и резултати: Намерата на препорачаните акции е да се намали севкупниот ризик и веројатноста за појава на грешките. Овие акции се однесуваат на намалување на сериозноста, на појавата и на детекцијата. По имплементирање на корективните акции потребно е да се потврди нивната ефективност.

3.6 Шест Сигма - Фаза на контролирање

Контролната фаза е последната фаза во Шест Сигма анализата. Фокусот во оваа фаза е да се осигура дека акциите имплементирани во Фазата на подобрување од Шест Сигма се одржливи. За да се постигне одржливост на резултатите потребно е стандардизирање на моменталните најдобри практики, обуки на вработените согласно новите стандарди и континуирана потврда на способноста на процесот со примена на SPC студија.

Стандардизирањето на моменталните најдобри практики вклучува ажурирање на графиконот за тек на процесот, на PFMEA анализата, на контролниот план и на работните упатства. Стандардизираната работа е предуслов за континуирано подобрување, доколку нема стандард неможе да се постигне подобрување.

Обуката на вработените за новите имплементирани стандарди ги вклучува сите засегнати во процесот. Една од најпознатите и најчесто прифатените програми за обука која за прв пат била имплементирана во автомобилката индустрија од страна на Тојота е обука во рамките на индустријата (анг. Training Within Industry - TWI). Оваа програма

е креирана од страна на министерството за одбрана на САД, за време на втората светска војна. До крајот на втората светска војна над 1,6 милиони работници во над 16.500 фабрики добиле сертификација за спроведена обука по оваа програма. Програмата продолжува и по втората светска војна во Европа и Азија, каде што помогнала при нивна реконструкција. Обука во рамките на индустријата е Lean пристап за обучување и е користена со децении од страна на Тојота и други производители низ светот.

За следење на способноста на подобрениот процес и предвидување на неговото однесување во иднина се користи SPC студијата. Процесните чекори каде се предвидува SPC контрола, типот на мерна опрема што ќе се користи, бројот на примероци и фреквенцијата на мерење се дефинирани во ажурираниот контролен план.

4 ВОВЕД ВО LEAN ПРОИЗВОДСТВО

Терминот Lean производство потекнува од придавката „Танок” (анг. Lean), со значење да се постигне поголема додадена вредност за клиентот, со помалку ресурси, труд, опрема, време, простор во фабриката, материјал и капитал, [60]. James Womack и Daniel Jones за прв пат го користат терминот Lean во книгата *„Машините кои го менуваат светот”*, при описот на производниот систем на Тојота, [21]. Според нив Lean производството се состои од 5 принципи: дефинирање на вредност на производот од аспект на клиентот, мапирање на тек на вредности на сите активности потребни за да се испорача производ до клиентот, дефинирање на континуиран тек на производство, имплементирање на систем за повлекување на материјалите од клиентот наназад спрема претходните производни процеси и стремење кон перфекција.

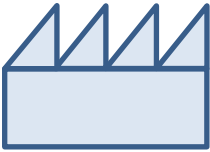
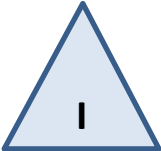
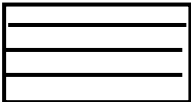
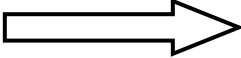
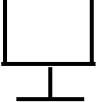
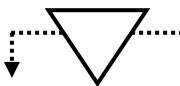
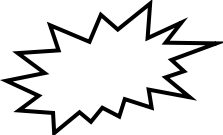
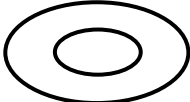
Според Liker [20] производниот систем на Тојота се фокусира на дефинирање на долгорочна стратегија во организацијата, на подобрување на производните процеси, на развој на вработените и партнерите и на континуирано решавање на проблемите. Техниките за подобрување на производните процеси вклучуваат креирање на континуирано производство за да се намалат или елиминираат активностите кои не додаваат вредност, систем на повлекување на материјали во производството според побарувачката на следниот процес (јап. Kanban), контрола на квалитет на самата работна станица (јап. Jidoka), систем за планирање на производството по волумен и модел (јап. Heijunka), визуелизација и откривање на проблемите (анг. Lean Performance Management System - LPMS), стандардизирање на работните задачи како предуслов за континуирано подобрување и користење на проверени технологии.

Според Mike Rother и John Shook постојат четири чекори за имплементирање на Lean производство во една организација: креирање на фамилии на производи според сличноста на производните процеси и заеднички користената опрема, мапирање на моменталниот тек на вредности (анг. Value Stream Mapping - VSM), дизајн на новиот тек на вредности (анг. Value Stream Design - VSD) и креирање на работен план за имплементирање на идниот тек на вредности, [61]. Клучните прашања кои треба да се одговорат при дизајнот на идниот тек на вредности се: колку изнесува такт времето на производството, каде може да се имплементира континуиран тек на производство и ќелии, каде ќе се постават супермаркети и систем на повлекување на материјали со цел контрола на производството на претходните процеси, на кој процес во ланецот на производство ќе се испраќа план за производство (анг. racemaker process), како ќе се порамнува планот за производство по модел и волумен, на кој временски интервал ќе се испраќаат планот за производство на пејсмејкер процесот и кои подобрувања на процесот се неопходни за идниот тек на вредности да функционира според новиот дизајн (редуцирање на времето потребно за промена на модел, севкупно продуктивно одржување, визуелизација, стандардизација, уреди за избегнување на грешки, интелигентна автоматизација, Андон системи, итн.).

Во продолжение на трудот е дадено појаснување на терминологијата што се користи во Lean производството [20], [61], [6].

Мапирање на тек на вредности е графички приказ на последователните работни процеси во производство. Мапирањето на тек на вредности ги вклучува активностите што додаваат вредност на производот но и оние што не додаваат вредност а се присутни во моменталниот процес на производство. Мапирањето секогаш треба го следи патот на производот од клиентот наназад во производството, се до репроматеријал. При мапирањето се врши исцртување на текот на материјалот, на текот на информациите и

на текот на процесот. Симболите кои се користат при мапирањето се прикажани на Слика 4.1.

			
Симбол за добавувач/ клиент	Испорака со камион	Мануелна информација	Електронска информација
			
Залиха меѓу процесите	Оди и види	Процес	Податоци на процес
			
ФИФО залиха	Движење на материјалот со туркање	Движење на готов производ кон клиентот	Порамнување на производство по модел и волумен
			
Физичко повлекување на материјалот	Канбан карта за производство	Канбан при паковно производство	Супермаркет
			
Канбан карта за повлекување	Локација за чување на канбан карти	Сигнален Канбан	Неделен распоред за производство
			
Оператор	Безбедносна залиха	Кајзен сигнал за рапидно подобрување	Топка за секвентно повлекување

Слика 4.1. Симболи кои се користат при мапирање на тек на вредности

Дизајн на идната состојба на процесите го прикажува саканиот или идниот тек на вредности. Врз основа на оваа визија се поставуваат приоритети како да се стигне до посакуваната идна состојба.

Такт времето го усогласува ритмот на производство со ритмот на продажба, особена на пејсмејкер процесот. Такт времето се пресметува со делење на нарачката на клиентот во една смена (во парчиња) со расположивото време за производство во таа смена. Производството во согласност со такт времето звучи едноставно но бара фокус на следните точки: брза реакција при појава на проблеми, елиминирање на изворните причини за појава на застој на машините и намалување на времето потребно за промена на модел.

Залиха помеѓу процесите (анг. work in process - WIP) е залиха на материјали или информации која што чека да се процесира помеѓу процесите/машините. Симболот за залиха при VSM мапирањето е прикажан на Слика 4.1.

Континуиран тек на производство или производство парче-по-парче (анг. one piece flow) е модел на производство каде што секој производ веднаш се процесира од една операција на друга, без стагнација помеѓу процесите. Ова е најефикасен начин на производство и е потребно многу креативност за да се постигне. Симболот за континуиран тек на производство во VSM мапирањето е процесната кутија и е прикажан на Слика 4.1. Доколку во идната состојба воведеме повеќе континуирани тека на производство тогаш две или повеќе процесни кутии од сегашната состојба треба да се комбинираат во една процесна кутија на идната состојба.

Келија претставува уредување на оператори, машини, материјали и методи со чекори на производство подредени еден до друг во последователен редослед, преку кои производот се процесира во континуиран тек на производство. Келијата најчесто е подредена во форма на буквата U или L.

Супермаркети се стандардизирани локациски места наменети за чување на залиха помеѓу процесите. Честопати во текот на вредности има места каде што не е можно континуирано производство и во тој случај е неопходно пакетно производство. Постојат неколку причини за појава на пакетно производство:

- Некои процеси се дизајнирани да работат побрзо или побавно во однос на другите, или треба да опслужуваат повеќе фамилии на производи.
- Некои процеси се локациски одалечени едни од други и производството парче-по-парче е нереално.
- Некои процеси се нестабилни за да се спојат со други процеси во континуиран тек на производство.

При планирањето на пакетно производство треба да се избегне поединечно испраќање на план за производство на секој процес, затоа што планот е само претпоставка што навистина ќе му треба на наредниот процес во дадено време. Наместо поединечно планирање на секој процес, контролата на производството може да се прави според реалната потреба на наредниот процес. За да се постигне ова се поставуваат супермаркети и се имплементира Канбан систем на повлекување на материјали, таму каде што производството парче-по-парче е прекинато. Симболот за супермаркети при VSM мапирањето е прикажан на Слика 4.1.

Канбан на Јапонски значи визуелна карта или запис. Денес тој се користи како визуелен сигнал за повлекување на материјали во производството. Следните терминологији се поврзани со Канбан системот: Канбан табла (локација наменета за чување на Канбан визуелните карти); Канбан карта за повлекување (сигнал кој го

дефинира типот на производ/материјал и количеството што наредниот процес го повлекува од супермаркет на претходниот процес); Канбан карта за производство (сигнал кој дефинира кој производ и во која количина треба да се произведе); доставувач на материјал претставува дисциплиниран и предвидлив тек на снабдувањето на материјали во производство. Пред да одлучиме да користиме супермаркети и систем за повлекување на материјали, треба да сме сигурни дека сме имплементирале континуиран тек на производство секаде каде што тоа е можно. Супермаркетите и залихата меѓу процесите се едни од загубите на Оно³, затоа не сакаме да ги имплементираме освен ако тоа не е навистина неопходно. Канбан симболите кои се користат при VSM мапирањето се прикажани на Слика 4.1.

Пејсмејкер процес е процес во ланецот на производство кој служи за да се испраќа планот за производство на само едно место, а името го добива од улогата што ја има да го диктира ритамот на целото производство. Доколку во производството има поставено супермаркети и Канбан систем за повлекување на материјали тогаш е доволно планот за производство да се испраќа само до пејсмејкер процесот. Од селекцијата на пејсмејкер процесот ќе зависи кои елементи од текот на вредности ќе бидат дел од вкупното време потребно за исполнување на нарачката од клиентот. На пример доколку за пејсмејкер се избере процес што е блиску до финалниот производ, тогаш вкупното време на производство од иницирање на налог до испорака ќе биде пократко. Производството од пејсмејкер процесот до финален производ треба да се одвива во континуиран тек т.е. после пејсмејкер процесот не треба да има супермаркети и систем за повлекување на материјали. Поради ова пејсмејкер процесот е најчесто последниот процес од текот на вредности.

Порамнување на производството по модел значи рамномерна и конзистентна дистрибуција на планот за производство на различни модели на производи до пејсмејкер процесот. Во минатото се сметало дека најдобро планирање на производството е во долги лотови на ист модел, со цел да се избегне времето потрошено за промена на модел. Овој начин на планирање на производството креира проблеми кај останатите процеси од текот на вредности. Производството на целиот волумен на ист модел одеднаш не оди во прилог на клиентот кој можеби ќе има потреба од друг модел наместо оној што се произведува во моментот. Тоа придонесува до зголемување на вкупното време потребно за производство на нарачката од клиентот и потреба од зголемена залиха на готов производ во обид да се има на располагање оној модел што ќе го посака клиентот. Колку е подобро порамнето производството по модел на пејсмејкер процесот, толку е пократко времето потребно за исполнување на нарачката од клиентот и помала е залихата на готов производ што придонесува за намалување на просторот наменет за супермаркети. Но треба да се има во предвид дека порамнет план по модел бара вложен труд во поглед на почести измени на производ и подесување на машините, како и чување на залиха од компоненти за сите модели покрај линиите и машините за да се намали времето потребно за промена на модел. Овој вложен труд се компензира со елиминирање на голема количина на загуби во текот на вредности. Симболот за порамнување на производство е прикажан на Слика 4.1.

³ 7-те загуби на Оно се категории на непродуктивни производни практики, идентификувани од Таичи Оно, творецот на производниот систем на Тојота. 7-те загубите на Оно се идентификувани како: непотребен транспорт, прекумерни залихи на полупроизвод и готов производ, непотребно движење на операторите, непотребно време на чекање, прекумерно производство, непотребно процесирање и дефектни производи.

Порамнување на производство по волумен се добива со ослободување на мали, конзистентни лотови за производство до пејсмејкер процесот. Многу компании се потпираат на план за производство на големи лотови, што придонесува до појава на следните проблеми:

- Се губи чувството за такт време и повлекување на материјали, на кои што реагира текот на вредности.
- Обемот на работа во текот на времето варира и предизвикува пикови и падови (јап. *mura*), што пак од друга страна е причина за појава на преоптоварување на машините, луѓето и супермаркетите (јап. *muri*). Сето ова е причина за појава на загубите во текот на вредности (јап. *muda*).
- Тешко може да се набљудува дали производството е напред во однос на планот или заостанува.
- Кога се ослободува голем лот за производство, секој процес во текот на вредности може сам да генерира план за производство. Ова придонесува за зголемување на вкупното време потребно за исполнување на нарачката на клиентот.
- Реакцијата во случај на промена на барањата на клиентот станува многу комплицирана, што може да се види од мапирањето на текот со информации.

Конзистентниот временски интервал на кој што се ослободува план за производство до пејсмејкер процесот е познат како „замавнување” (анг. *pitch*) и често се пресметува зависно од количината на готов производ во едно пакување. Ова е основната единица за пресметка на планот за производство за една фамилија на производи. На пример ако такт времето е 30 s, количината во едно пакување на готов производ е 20 парчиња, временскиот интервал за ослободување на налог за производство изнесува 10 минути ($30\text{ s} \cdot 20\text{ парчиња}$). Со други зборови на секои 10 минути треба да се даде инструкција до пејсмејкер процесот да произведе едно пакување на готов производ.

Производство на секој модел во секој интервал (анг. *every part every interval* ЕРЕИ). Со намалување на времето потребно за промена на модел, процесите можат да одговорат на потребата за почеста промена на модел, што за возврат ќе придонесе за намалување на залихата во супермаркетите. Терминот „секој модел секој интервал” опишува колку често процесот може да се менува со цел да се произведат сите модели. Првична цел на многу фабрики е најбараните производи од клиентот да се произведуваат секој ден.

Редуцирање на времето потребно за промена на модел и подесување на машините (анг. *Single Minute Exchange Of Die*⁴ - SMED). Главниот ефект со редуцирање на времето потребно за подесување на машините не е зголемување на продуктивноста на производството, туку намалување на залихата во супермаркетите помеѓу процесите. При промена на модел, активностите за подесување на машините се делат на екстерни и интерни. Екстерни активности се оние што можат да се направат додека машината работи, а интерните активности само кога машината мирува. Вообичаено при промена на налог 25 % од времето се троши на барање на информации/објекти, 10 % на промена на алат/темплет, 20 % на позиционирање на

⁴ Редуцирање на времето потребно за промена на производ и подесување на машините за првпат е студирано од Шигео Шинго при промена на алат и сетирање на преса. Од тука потекнува терминологијата SMED (*single minute exchange of die*), каде што “die” е алат за преса.

производот и 45 % на подесување на машините. Целта на SMED е што е можно повеќе активности да се префрлат од интерни во екстерни, а потоа да се редуцираат сите колку што е можно повеќе.

Севкупно продуктивно одржување (анг. TPM) е континуиран метод за подобрување кој се фокусира на перформансите на опремата во процесот. Секој вработен во производство е одговорен за севкупната ефективност на опремата (анг. Overall Equipment Effectiveness - OEE %) што е концептуално поразлично од минатото каде што само тимот од одржување бил одговорен за опремата. Според TPM, операторите се „сопственици на машините“, обучени и овластени за следење и континуирано подобрување на нивните перформанси. Инженерите и одржувачите ги обезбедуваат клучните услуги за оперативното работење и постигнување на ефикасност во производството, мерено преку OEE %. Менаџментот е одговорен за воспоставување на структура за постигнување на целите на TPM.

Кајзен на јапонски значи „промена на подобро“, која може да се толкува како напор за континуирано подобрување. Кајзен блиц (анг. Blitz) е брза анализа на специфични ситуации кои треба да резултираат со брзи подобрувања. Ова обично се имплементира во области каде што постои сериозна закана за организацијата.

5S се однесува на петте дисциплини за одржување на ефикасно и ефективно работно место, подеднакво применети во фабрики, канцеларии итн. 5S алатката обично се користи за ефикасно елиминирање на загубите, со следните чекори: сортирање и отстранување на сите непотребни предмети (јап. Seiri), поставување на сите потребни предмети да се лесно достапни (јап. Seiton), чистење и контролирање на опкружувањето (јап. Seiso), стандардизирање на перформансот (јап. Seiketsu), одржливост на резултатите и континуирано подобрување (јап. Shitsuke). Оваа алатка е од особена важност за севкупното превентивно одржување, за елиминирање на загубите и за „Кајзен настаните“.

Избегнување на грешки (јап. Poka Yoke) е метод за дизајнирање на производи, машини, алатки и процеси на таков начин што појавата на дефекти е физички невозможна. На пример, машината може да биде проектирана така што нема да прифати дефектни производи од претодните процеси.

Jidoka може да се опише како „интелигентна автоматизација“ или „автоматизација со човечки допир“, [62]. Овој тип на автоматизација ја одделува работата на операторите од работата на машините, преку надградба на машините со механизми кои ќе детектираат абнормалности во производството. Според Шигео Шинго постојат дваесет и три фази помеѓу рачно и целосно автоматизирано работење. За да се целосно автоматизира, машините мора да бидат способни да ги детектираат и да ги корегираат сопствените оперативни проблеми. Сепак, деведесет проценти од придобивките на целосната автоматизација може да се постигне со имплементирање на интелигентна автоматизација, што е ценовно многу поисплатливо. За имплементирање на Jidoka, не само што треба да се корегира дефектот на производот на самата станица каде што е откриен, туку е потребно и да се открие изворната причина за појава на дефектот а потоа и да се промени процесот за да се отстрани можноста за повторно појава на истата грешка. Интелигентната автоматизација како принцип ги извршува следните четири важни чекори, [63]:

- *Ги детектира абнормалностите:* Ова вклучува поставување на механизам за детекција во критичните точки на производната линија, за да ги идентификува грешките или дефектите во производството.

- *Ја запира производната секвенца:* После детекцијата на било каква абнормалност се запира специфичната секвенца од производниот процес. Понекогаш се запира и целиот произведен процес во случај кога грешката е со голема веројатност да предизвика последователна реакција и да ги инволвира и другите процеси.
- *Итна корекција на ситуацијата:* Машините опремени со автоматски систем за само-корегирање испраќаат сигнал до процесорскиот систем за идентификација на проблемот и добиваат повратен сигнал за корективна акција.
- *Анализа на изворната причина за појава на грешка и имплементација на корективни мерки:* Прегледот на системот е критична функција на интелигентната автоматизација и вклучува истражување на сите инциденти и грешки од минатото, со цел да се идентификува што ги предизвикало и како да се спречи нивно повторување во иднина.

5 УЛОГАТА НА ИНДУСТРИЈА 4.0 ВО МЕНАЦИРАЊЕ СО КВАЛИТЕТОТ

5.1 Вовед во Индустрија 4.0

Позната како четврта индустриска револуција, Индустрија 4.0 станува најактуелна тема во последните неколку години, [64]. Индустрија 4.0 е иницирана од Германската влада во 2011 како најважна стратегија до 2020, [65]. Интернационалниот еквивалент на Индустрија 4.0 во САД е „Конзорциум на индустриски интернет (анг. Industrial Internet Consortium)”, во Кина е „Интернет плус иницијатива (анг. Internat Plus Initiative)” [66], а во Швetsка е „Индустрија 2025”, [67].

Во последно време индустријата почна да ги интегрира интернетот и компјутерските системи во индустриските системи, претставувајќи го интернетот на нештата, интелигентното производство, работата со големи количини на податоци и нивна анализа, сајбер-физичките системи и сензорите како основа на Индустрија 4.0, [68]. Растечка напредна дигитализација и автоматизација во индустријата креира дигитален ланец на вредности кој ги елиминира границите помеѓу дигиталниот и физичкиот свет, [69]. Овие нови концепти со голем степен на автоматизација и интеграција ја модифицираат реалноста во производството, создавајќи интеракција на човек-со-човек, на човек-со-машина, на производството со побарувачката, на физичкиот со дигиталниот свет, овозможувајќи голема флексибилност во производството, [70]. Во продолжение е даден опис на главните технологии и терминологиите кои се користат во Индустрија 4.0.

Сајбер физичкиот систем (анг. Cyber Physical System - CPS) е концепт на интеграција помеѓу физичкиот и дигиталниот свет со аналитички инструменти кои имаат за цел да ја подобрат ефикасноста во индустријата, [71]. Конвергирањето помеѓу физичкиот и виртуелниот систем во индустриите може да се подели на четири фази. Во првата фаза постои само физичкиот простор и се зависи од физичките акции, во втората фаза се креира виртуелниот простор и почнува подобрувањето, во третата фаза почнува интеграцијата помеѓу физичкиот и виртуелниот простор и во четвртата фаза се случува тотална интеграција на начин на кој што акцијата во едниот простор ќе предизвика настан во другиот простор. Оваа тотална интеграција се вика дигитален близнак систем (анг. Digital Twin System – DTS) и се состои од четири елементи: физички систем (анг. Physical System – PS), виртуелен систем (анг. Virtual System – VS), дигитален близнак систем во производството (анг. Shop Floor Digital Twin System – SDTS) и сервисен систем во производството (анг. Shop Floor Service System – SSS). DTS ги менаџира податоците на физичкиот систем и прави споредба со виртуелниот систем, потоа дава повратна информација до сервисниот систем на производството каде што се врши интеракција со системите на индустрискиот менаџмент (ERP системот и извршниот систем на производството). По споредбата на резултатите DTS генерира акции за физичкиот систем. На овој начин податоците во DTS системот патуваат во сите насоки, генерирајќи акции што се рефлектираат и во двата системи, физичкиот и виртуелниот, [72].

Интернет на нештата е систем од меѓусебно поврзани компјутерски уреди, механички и дигитални машини, објекти и луѓе кои поседуваат уникатна идентификација и имаат способност да пренесуваат податоци преку мрежа без интеракција на човек-со-човек или на човек-со-компјутер. Од практичен аспект, дефиницијата за интернет на нештата претставува стандардизација и директна дигитална идентификација на физичките објекти преку користењето на безжични мрежи, [73]. Една од технологиите што го овозможува постоењето на дигиталниот близнак систем е интернет на нештата. Во работатата на интернет на нештата

учествуваат традиционалните технологии како што се безжичните сензорски мрежи, контролните системи и автоматиката. Интернет на нештата им овозможува на корисниците да можат да ги обноват, складираат, пренесуваат и процесираат податоците и постојано да одржуваат конекција помеѓу виртуелниот и физичкиот свет, [74].

Сензорите се основни уреди кои овозможуваат постоење на интернет на нештата, со тоа што овозможуваат дигитализацијата од физички аспект да се имплементира во секој систем. Тие евалуираат од обични сензори до интелигентни сензори, предизвикувајќи револуција во прибирањето на податоците од физичките системи, нивната анализа и дистрибуција до интелигентните системи, [75].

Паметните фабрики овозможуваат извршување на флексибилни производни процеси и имаат способност многу брзо да ги надминат комплексните предизвици кои се појавуваат во реалноста, [76]. Таков тип на решение кое води до оптимизација на процесите се поврзува со растечкиот тренд на автоматиката и се истакнува по интеграцијата на хардвер, софтвер и механика.

Работа со големи количини на податоци (анг. Big data) главно вклучува прибирање на процесни податоци од производството во реално време со помош на сензорите и нивна анализа, [77]. Концептот на работа со голема количина на податоци создава можност индустријата да генерира производи кои се со повисока додадена вредност, [78]. Додека работата со голема количина на податоци го екстрахира знаењето од податоците добиени од физичките системи, вештачката интелигенција и машинското учење го процесираат ова знаење за носење на најдобра одлука во однос на акциите што треба да ги превземе системот, [79]. Имплементирањето на работа со голема количина на податоци е застапено во различни сфери, и тоа: во финансиите, во здравството, во комуникациите, безбедноста и индустриското производство, [80].

5.2 Менаџирањето со квалитет во ерата на Индустрија 4.0

Најголем дел од истражувачките трудови досега се фокусираат на технолошкиот аспект на Индустрија 4.0. Во продолжение ќе дадеме увид на идентификуваниот потенцијал на Индустрија 4.0 поврзан со Lean производството и менаџирањето со квалитет. Повеќе автори укажуваат на неопходноста на интегрирање на овие дисциплини [81], [82], [83].

Според истражувањата на Julian Muller [84] спроведени во 204 компании, најголемо е влијанието на Индустрија 4.0 врз активностите поврзани со планирање на производството, следливост на материјали и полупроизводи, логистика и менаџирање со рекламации.

Davies [85] тврди дека перформансот на Lean и Шест Сигма може да се подобри со примена на сајбер физичкиот систем на Индустрија 4.0, кој овозможува пристап на оперативните податоци во реално време. Според истражувањата на Pereira [86], CPS може да биде од помош при поедноставување на употребата на Lean алатките како што се Андон системот, е-Канбан и другите техники за повлекување и контрола на материјалите во производството. Во однос на одржувањето на опремата, CPS е способен да прибере информации битни за одржувањето и автоматски да испрати сигнал до тимот одговорен за опремата. Функционирањето на Jidoka (контрола на квалитет на самата работна станица) исто така може да се подобри со сајбер физичкиот систем.

Xu и Chen [87] предлагаат рамка која ги користи интернет на нештата за да го поддржи динамичкото планирање на производството. Овој систем е способен да реагира

на динамичките промени што се однесуваат на планот за производство и расположливите ресурси, овозможувајќи им на корисниците да го сетираат новиот план додека производството е во тек. Kukushkin [88] опишува нов концепт за планирање и анализа на производните линии со користење на модел за симулација.

Според Witkowski [89] моделот кој користи работа со голема количина на податоци ќе помогне да се складираат и анализираат податоци кои се битни за квалитетот. Анализата на овие податоци е корисна за носење на одлуки, каде што и покрај големиот волумен, разновидност и брзина на менување тие детално се анализираат, се визуелизираат и им се презентираат на менаџерите. Lugert [90] и Wagner [91] го подржуваат потенцијалот на работа со голема количина на податоци за подобрување на текот на вредности. Многу автори сметаат дека работата со голема количина на податоци има главна улога во подобрување на текот на вредности и одржувањето на опремата, дозволувајќи му на текот на вредности да се адаптира динамички.

Demircioglu [92] претставува модел кој ги интегрира техниките за машинско учење и Шест Сигма контролните графикони, со што се овозможува точна класификација на дефектите и брза имплементација на корективни акции. Hohmann [93] ги опишува особените на машините за самостојно учење и предвидување на идното однесување на процесот како замена на Шест Сигма статистичките техники. Според него компјутерите со јаки перформанси ќе го превземат дизајнот на експерименти (анг. DoE) и на тој начин ќе постигнат дизајн на параметрите на машините со намален број на извршени експерименти. Тој тврди дека машините ќе ја превземат работата на статистичка контрола на процесот, анализата во реално време и корективните акции.

Kuo, Ting и Chen [94] тврдат дека интегрирањето на Индустрија 4.0 го подига квалитетот во индустриското производство. Тие предлагаат модел за автоматско предвидување на работата на машините кој користи сензори, вештачка интелигенција и симулација. Овој модел ја предвидува работната способност на машините и дијагностицира дефекти на производот настанати како резултат на грешки во машините. Од аспект на контрола на квалитетот, сензорите испраќаат паралелни информации во реално време до централниот систем за работа со голема количина податоци и до паметните машини. Овие информации се анализираат и врз основа на нив се носи соодветна одлука за да се избегнат дефектите, грешките во системот или застоите на машините. Според Foidl [81] контролата на квалитетот може да има огромна корист доколку технологијата со безжични сензори е значително раширена во производните погони, при што инженерите за квалитет ќе можат да соберат повеќе мерења и да ги детектираат дефектите што обично би поминале незабележано. Овој модел исто така овозможува 100 % мерења на сите произведени парчиња, со што нема да има потреба од контрола на квалитетот со метод на мерење на случајно избрани примероци и статистичка контрола, бидејќи 100 % контрола на производите може да стане реалност. Оваа промена е фундаментална затоа што секој поединечен дефектен производ ќе се идентификува и ќе се изолира од останатите, што е основен постулат на Lean алатката Jidoka. Според Radu Godina и Joao Matias [95] со безжичните сензорни мрежи се добива континуирано мерење на различни карактеристики на самите линии во производство, а не во некои локациски оддалечени лаборатории.

Според Wang [96] неколку карактеристики на Индустрија 4.0 се битни за подобрување на квалитетот на производот: меѓусебна поврзаност, интеграција и работата со голема количина на податоци. Меѓусебната поврзаност се однесува на способноста на производите да комуницираат во производниот систем. Преку радио фреквентната идентификација (анг. RFID) и читање на информациите за производите,

производниот систем може да ги пренесе овие информации на сајбер-физичкиот систем и да симулира и повторува сценарија се додека не постигне оптимална шема на производството во однос на продуктивноста и квалитетот. Машините кои се поврзани меѓусебно добиваат информации кога произведениот дел ќе помине од една фаза на производство на наредната, така што машините во секој момент се спремни да го примат производот и да го процесираат.

Според истражувањето на Demartini [97] спроведено на 29 научни труда, во периодот од 2016 до 2018, студиите кои го истражуваат учеството на Индустрија 4.0 во областа на менаџирање со квалитет може да се сместат во следните кластери: дигитално трансформирање на податоците, одржливост, Lean размислување, перформанс и интелигентни технологии. Првиот кластер на студии ја истражува поврзаноста на менаџирањето со квалитет и дигиталното трансформирањето на податоците, преку дигиталниот близнак систем. Овде спаѓаат студиите на De Carolis [98], Cattaneo [99], Emmer [100], Nienke [101], Schluter и Sommerhoff [102]. Дигитален близнак систем може да менаџира голема количина на податоци добиени од процесни параметри, однесување на процесот, структура и модели на процесот, и да ги прави овие податоци достапни на машините и корисниците во моментот кога им се потребни. Студиите во вториот кластер се фокусираат на интернет на нештата, сајбер физичкиот систем и вештачката интелигенција и нивниот придонес за постигнување на одржливост преку оптимизација на квалитетот на процесите и производите, повисока продуктивност, понизок шкарт и грешки, намалување на загубите и преку автономно оптимизирање на производните линии. Овој кластер го сочинуваат студиите на Kiel [103]; Muller, Kiel и Voigt [16]; Schluter и Sommerhoff [102]. Интернет на нештата како технологија овозможува креирање на одржлива вредност со подобрување на конекцијата во синџирот на снабдување во производство. Сајбер физичкиот систем придонесува за постигнување на одржливост при менаџирање со квалитет преку самостојното компјутеризирање, складирање на податоците, интеракција со околината и мониторинг на критичните процесни варијации. Преку вештачката интелигенција може да се спроведе квалитетна анализа што содржи способност за креирање на знаење и резонирање како и можност за автоматско планирање. Третиот кластер на студии се фокусира на технологиите кои го поддржуваат Lean размислувањето како дел од менаџирањето со квалитет. Овде спаѓаат студиите на Eleftheriadis и Myklebust [104]; Jayaram [83]; Mrugalska и Wyrwicka [105]. Во нив се истражува придонесот на интернет на нештата, сајбер физичкиот систем и дигиталниот близнак систем за добивање на флексибилно производство и замена на традиционалниот метод на статистичка контрола и прибирање на податоците со системот за интелигентно следење на виталните процесни параметри (анг. vital process parameters VPP). VPP системот може да предвиди непосакувано однесување на процесот и да предложи корекции во реално време. Cattaneo [99] тврди дека Индустрија 4.0 има голем потенцијал да го поддржи Lean со визуелизација на информациите, со техниките за решавање на проблеми и со инволвирање на вработените. Во четвртиот кластер кој се однесува на перформансот при менаџирањето со квалитет се вклучени студиите на Brauner [106]; Dossou и Nachidi [107]; Emmer [100]; Le, He и Zhu [108]; Štofova, Szaryszova и Vilamova [109]; Szabó [110]. Овие студии се фокусираат на технологиите на Индустрија 4.0 кои служат за евалуација на клучните индикатори за перформанс на процесот. И на крај, петиот кластер на студии ги истражува интелигентните технологии како што се сајбер физичкиот систем, интернет на нештата и работата со голема количина на податоци и нивниот придонес во подобрување на квалитетот на податоците, и менаџирањето со истите. Во него се вклучени студиите на Kiel [103]; Stojanovic [111], Brauner [106], Le [108]; и Song [112]. Овие студии се фокусираат на развој на ефективни стандарди за менаџирање со податоците и предлагаат модел кој ги следи статичките и

динамичките атрибути за појава на грешни податоци, спроведувајќи квантитативна анализа и контрола на трошоците и ризиците поврзани со грешните податоци.

Albers et al. (2016, p. 262) во неговите студии го сумира влијанието на Индустрија 4.0 врз квалитетот и покажува дека компаниите што користат Индустрија 4.0 имаат зголемена продуктивност за 50%, кај 80% од овие компаниите е забележана зголемена ефикасност, додека пак 45 % од компаниите веруваат дека индустрија 4.0 го подобрува задоволството кај потрошувачите со тоа што ги елиминира дефектните производи.

6 ИНТЕГРИРАЊЕ НА ДИСЦИПЛИНИТЕ ЗА МЕНАЦИРАЊЕ СО КВАЛИТЕТ

6.1 Интегрирање на Lean и Шест Сигма

Lean Шест Сигма (анг. Lean Six Sigma - LSS) е пристап за подобрување на процесите кој ги интегрира Lean принципите и Шест Сигма методологија [113]. Lean Шест Сигма иницијативите се засноваат на постоечките системи за квалитет како што се севкупно менаџирање со квалитет, Lean и Шест Сигма, [114]. Овој пристап се стреми да го подобри перформансот на организациите со систематично отстранување на оперативните загуби и редуцирање на варијациите во процесите.

Во денешно време, развојот на програмите за квалитет е се поголем, при што се повеќе организации се решаваат да се насочат кон Lean Шест Сигма како стратегија за подобрување на бизнис операциите и перформансите, [1].

Во текот на годините имплементирани се многу програми за подобрување на квалитетот во компаниите и потврдено е дека ова е основно барање за развојот на бизнис оперативните процеси и организациските перформанси. Но исто така, многу организации не успеваат да ги постигнат посакуваните перформанси при имплементирањето на програмите за квалитет, [115]. Постојат неколку главни причини зошто организациите не успеваат да ги постигнат посакуваните перформанси. Прво е тоа што организациите само се фокусираат на програмите за квалитет [116], [117], [118], [119]. Второ е тоа што мерењето на организациските перформанси не е целосно и не ги опфаќа програмите за квалитет и организациските работни опкружувања, [120]. Дополнително, иницијативите за квалитет не се интегрирани во насока на подобрување на организациските перформанси [121], [122], [123], [116], [124]. Овие проблеми се предизвикани поради недостаток на целокупно знаење и разбирање кај лидерите и менаџерите во компаниите, при идентификувањето и донесувањето на стратегиски одлуки за оптимизација и усогласување на целите за квалитет со барањата на пазарот, стратегискиот менаџмент, културата и работната средина. Ова доведува до нов тренд кај компаниите, за интегрирање на Шест Сигма со Lean производството, со цел истовремено подобрување на квалитетот, бизнис операциите и перформансите на компаниите.

И двете техники Lean производство и Шест Сигма се покажале како многу ефикасни во текот на последните децении, постигнувајќи драматични подобрувања од аспект на цената на производот, квалитетот и времето потребно за производство, со фокус на перформансите на процесите. Lean производството го оптимизира текот на вредностите и се стреми да ги елиминира загубите, додека Шест Сигма го потенцира квалитетот преку елиминирање на варијациите во сите процеси на компанијата. Lean производството и Шест Сигма се пристапи кои се надополнуваат, оттука нивната интеграција и дава на организацијата поголема ефикасност што помага да се постигнат супериорни перформанси многу побрзо отколку при имплементација на секоја од дисциплините поединечно, [2].

Главните разлики помеѓу Lean и Шест Сигма се прикажани во Табела 6.1. Во суштина Lean производството и Шест Сигма имаат иста цел, двете методологии се стремат да ги елиминираат загубите и да го креираат најефикасниот можен систем, но имаат различен пристап за постигнување на оваа цел. Едноставно кажано, главната разлика помеѓу овие две методологии е различниот начин на идентификување на изворните причини за појава на загубите. Додека Lean производството тврди дека загубите во процесот се резултат на активностите кои не додаваат вредност на финалниот производ, Шест Сигма тврди дека загубите се резултат на варијациите на процесот, [7].

Табела 6.1. Lean методологија наспроти Шест Сигма методологија

	Шест Сигма	Lean производство
Цел	Испорака на вредност за клиентите	Испорака на вредност за клиентите
Фокус	Фокус на конкретни проблеми	Фокус на целиот тек на вредности
Теорија	Да ги намали варијациите на процесот	Да ги елиминира загубите во тек на вредности
Принципи за имплементација	1. Дефинирање 2. Мерење 3. Анализа 4. Подобрување 5. Контролирање	1. Дефинирање на вредноста од аспект на клиентот 2. Идентификување на тек на вредности 3. Имплементирање континуиран тек 4. Методологија на повлекување на материјали (анг. Pull) 5. Стремење кон совршеност
Очекувања	1. Се вреднуваат податоци и бројки 2. Излезниот резултат од процесот ќе се подобри доколку варијациите на сите влезни параметри се намалат	1. Отстранувањето на загубите ќе го подобри перформансот на бизнисот 2. Многу мали подобрувања се подобри отколку само анализирање на системот
Примена	Главна во производствен процес	Во сите бизнис процеси
Пристап за обука	Изучување на генерички пристап за решавање на проблемите, потпирајќи се на статистика	Наставни принципи врз основа на најдобри практики, особено од Тојота

Во научната литература во моментот се прикажани повеќе модели за интегрирање на Lean и Шест Сигма. Според Souraj [125], Шест Сигма и Lean техниките треба да се користат паралелно, со цел да се зголеми нивното влијание. Обидот да се работи на двете методологии паралелно не е секогаш успешен, затоа што се аплицираат посебно за решавање на проблеми. Компаниите што го применуваат овој модел се соочуваат со проблеми во давањето приоритет на една од иницијативите во однос на алокацијата на ресурсите, селектирањето на правилната методологија и оправдувањето на финансиските придобивки.

Mader [126] предлага LSS модел што го користи мапирањето на тек на вредности како почетна точка за подобрување на процесот, од каде што произлегуваат проектите за подобрување. По изборот на проект се носи одлука која од методологиите е подобра и во која фаза од DMAIC моделот ќе се примени. Како и да е со овој модел не се постигнува планираната интеграција затоа што е предлог за два раздвоени пристапа.

Други компании ги применуваат Lean и Шест Сигма одвоено и последователно една по друга. LSS моделот кој е предложен од Crawford [127] презентира дека Шест Сигма може прва да се примени за подобрување на ефикасноста на процесот а потоа следи Lean за да ја подобри ефикасноста на системот. Со овој модел двете методологии се испртани симултано за да се постигне идеата за интеграција. Snee [128] предлага дека Lean алатките можат да бидат многу ефективни во првата фаза од подобрувањето на процесот, каде што целта е да се елиминираат загубите и да се поедностави процесот

пред да се започне со справување со покомплицирани проблеми со оптимизација и контрола на процесните чекори.

Според Hines [129] во некои организации каде што се применуваат Lean техниките со години, Шест Сигма се фокусира на проблемите со варијациите на производот и се смета како корисно дополнување на Lean затоа што ги напаѓа варијациите на начин компатибилен на Lean пристапот. Но оваа рамка ја користи Шест Сигма само како алатка заедно со Lean и ја нарушува моќта на DMAIC пристапот.

Според Bandell [130] потребно е понатамошно дефинирање на предложените модели кој ги содржат стратегиските карактеристики на Lean, Шест Сигма, интегрирањето на луѓето и системите, инволвираност и партиципирање, развивање на агенти кои се носители на промените, фокус кон резултати и интегрирано развивање и тренинг.

6.2 Предизвици во интегрирањето на Индустрија 4.0 со Lean Шест Сигма

Постоечката академска литература покажува неминовно влијание на Индустрија 4.0 во Lean Шест Сигма и менаџирањето со квалитетот, но исто така укажува на фактот дека постојат предизвици за нивно интегрирање. Според [131] наодите со предизвици може да се групираат во 4 категории:

1. Интегрирањето на Индустрија 4.0 со Lean принципите и методологиите за менаџирање со квалитет е сеуште во почетна фаза [132], [133]. Концептот Индустрија 4.0 да го подобри менаџирањето со квалитет бара понатамошни истражувања посебно во делот на интегрирање на Индустрија 4.0 во Lean и Шест Сигма [15], [16], [17]. Според Muller [84] сеуште недостигаат јасни докази како Индустрија 4.0 може да се користи за подобрување на Lean и менаџирањето со квалитетот. Јасно произлегува дека во постоечката литература може да се најдат многу поединечни примери, но севкупен преглед недостасува. Pereira [86] тврди дека и покрај големиот број на истражувања за интегрирање на Индустрија 4.0 со Lean Шест Сигма сепак потенцијалот за нивно интегрирање е сеуште нејасен. Сепак придонесот кон поефикасно производство и креирање на вредност во индустријата е еден од централните концепти на Индустрија 4.0, и бара понатамошно истражување за интегрирањето на дисциплините на Индустрија 4.0, менаџирањето со квалитет и Lean производството, [134].
2. Во моменталната научна литература има значително побројни студии за интегрирање на Индустрија 4.0 со Lean принципите споредбено со интегрирање на Индустрија 4.0 и менаџирањето со квалитет [84]. Според Demartini [97] недостига знаење на темата поврзана со интегрирање на Индустрија 4.0 и менаџирањето со квалитет. Академските истражувања главно се фокусираат на техниките за пребарување на податоци во Шест Сигма [135], како и Машинското учење и вештачките неурални мрежи [93], [95]. Останатите трудови се фокусираат на придонесот на Индустрија 4.0 во контролата на квалитет, што претставува само една фаза од Шест Сигма DMAIC структурата.
3. Неколку автори укажуваат на потценувањето на моќта на Lean Шест Сигма и законите кои важат во производството при имплементирањето на Индустрија 4.0. Ruttimann и Stockli [67] тврдат дека моменталните искуства во постоечката литература укажуваат на нефокусирани активности на Индустрија 4.0 кои со голема веројатност нема да успеат да ги исполнат очекувањата во менаџирањето со квалитетот поради нејасни разбирања на физичките

можности на производните процеси. И покрај огромниот потенцијал на сајбер физичките системи, безжичните мрежи, машинското учење, интернет на нештата, вештачката интелигенција и алгоритмите значајно да го подобрат перформансот во индустриите, сепак ниедна од овие технологии не може да ги надмине физичките органичувања во производните процеси. Според Liker [136] ефектот добиен со Индустрија 4.0 е да го мултиплицира перформансот во производството, независно дали тој е добар или лош. Sanders [137] тврди дека многу грешки се направени во изминатите години при имплементацијата на разни технологии, креирајќи многу проблеми во различни компании. Lean Шест Сигма принципите и концептот мора темелно да се исцрпат за да се добие значителен бенефит од новите технологии на Индустрија 4.0.

4. Многу автори укажуваат на недостатокот од практична имплементација на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот и анализа на добиените резултати. Досегашните истражувања за Индустрија 4.0 главно се фокусираат на технолошките функционалности и потенцијали, наместо на резултатите од практичната имплементација во индустријата, што бара да се комбинираат економските и технолошките перспективи, [103].

Многу автори укажуваат на нејасниот модел на интегрирање на Lean и Шест Сигма. Според Albliwi [138] кој во периодот од 2000 до 2013 извршил преглед на објавената литература за LSS во 42 врвни академски журнаli, ограничувањата за имплементирање на LSS во производство ги сумирал во следните групи:

- Недостаток на јасен патоказ за имплементирање на LSS, која стратегија треба да се имплементира прва, Lean или Шест Сигма [139], [140] [141], [14].
- Отсуството на јасни инструкции за LSS во раната фаза на имплементација [140], [142], [143].
- Недостаток на наставна програма за стандардизација на LSS [144], [145], [2].
- Недостаток на разбирање на LSS алатките и техниките [140], [146], [143].
- Ограничен број на практично имплементирани примери на LSS во производниот сектор [147], [148].

Заклучокот во неговото истражување е дека недостига одржлива рамка за интегрирање на LSS во производството и укажува на тоа дека идните истражувања треба да се насочат кон изнаоѓање на одржлива рамка.

Bendell [130] смета дека моменталната литература на интегрирање на Шест Сигма и Lean е ограничена и незадоволителна при истражувањето на комбинираниот модел, но дека сепак овие две техники може ефективно да се комбинираат во една. Според него обидите да се комбинираат Lean и Шест Сигма се повеќе филозофски насочени. Овие обиди даваат примери на некомпатибилност и конфликт што резултира со под просечни подобрувања. Тој ги критикува обидите за комбинирање дека се не ефективни затоа што ја земаат едната методологија како доминантна а другата како подредена, игнорирајќи го фактот дека секоја од нив има уникатни карактеристики и придобивки.

Mader [126] тврди дека различните модели на Lean Шест Сигма кои се развиени во различни организации се разликуваат значително и дека сеуште е потребно градење на заедничко знаење за оваа проблематика.

Proudlove [149] смета дека е можно интегрирање на Lean и Шест Сигма без да се контрадикторни овие принципи еден на друг, но дека нема заеднички консензус како да се направи тоа и нема широко прифатена интегрирана методологија. Од ова произлегува дека детален опис на интегрирањето е сеуште потребен.

Да сумираме, истражувањето во моменталната научна литература укажува на неколку главни предизвици за брзо и ефикасно имплементирање на Lean Шест Сигма методологијата и постигнување на најзините барања за квалитет од 3,4 дефекти на милион можности. Прво, немање јасна визија и детално развиен модел кој што ќе ги интегрира Lean и Шест Сигма. Втор предизвик е неизбежното влијание на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитет и немање на јасно дефиниран модел за интегрирање на Индустрија 4.0 во DMAIC структурата на Lean Шест Сигма. Трето е занемарување на моќта на Lean Шест Сигма и законите кои важат во производството при имплементирањето на Индустрија 4.0. И последно е недостаток од практична имплементација на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитет.

7 ИНТЕГРИРАН МОДЕЛ НА LEAN ШЕСТ СИГМА И ИНДУСТРИЈА 4.0 ПРИМЕНЛИВ ВО АВТОМОБИЛСКА ИНДУСТРИЈА

Во оваа глава е предложен иновативен модел кој ги интегрира Lean, Шест Сигма и Индустрија 4.0 користејќи ја DMAIC структурата (Табела 7.1). Овој модел има за цел да обезбеди сет на јасни инструкции наменети за истражувачи и практичари од автомобилскиот сектор, за дизајнирање на ефикасен процес на континуирано подобрување на квалитетот и севкупниот оперативен перформанс, [131]. Главните цели на овој модел може да се категоризираат како:

1. Увид за придонесот на Lean Шест Сигма во подобрување на физичката стабилност и способност на производството.
2. Суштинско разбирање на релацијата помеѓу Lean Шест Сигма алатките и различните технологии на Индустрија 4.0.
3. Анализа и проценка на технологиите на Индустрија 4.0 кои можат да ги дигитализираат Lean Шест Сигма алатките, а со тоа и да го подобрат менаџирањето со квалитет и перформансот во производството.
4. Сумирани придобивки од Индустрија 4.0 во однос на подобрување на оперативниот перформанс и квалитетот во производство.

Моделот има повторлив и непрекинат циклус на подобрување на оперативниот перформанс применувајќи ги следните фази од DMAIC структурата:

- Фаза на дефинирање на проблемот и селектирање на област за подобрување.
- Фаза на мерење каде што се идентификуваат варијациите на процесот и активностите кои не додаваат вредност во текот на вредности.
- Фаза на анализирање на изворните причини за појава на проблемите.
- Фаза на подобрување каде што се идентификуваат најдобрите решенија за елиминирање на изворните причини на варијации на процесите и загуби во текот на вредности.
- Фаза на контролирање каде што се стандардизираат подобрувањата, се контролира перформансот на процесот, се постигнува одржливост на резултатите и се бара потенцијал за континуирано подобрување.

Во првата колона од моделот се прикажани фазите на Lean Шест Сигма и Индустрија 4.0 моделот (дефинирање, мерење, анализирање, подобрување, контролирање). Во втората колона е прикажано дали активностите се однесуваат на Шест Сигма, на Lean или и на двете методологии заедно. Во третата колона се прикажани Lean и Шест Сигма активностите. Некои од овие активности, како на пример Lean алатките во фазата на подобрување, се предуслов за да се почне со имплементација на Индустрија 4.0 и да се постигне максимален интензитет при подобрувањето на квалитетот и севкупниот перформанс. Во последната колона се прикажани технологиите на Индустрија 4.0 кои ги дигитализираат Lean Шест Сигма алатките со што ги намалуваат дополнително варијациите на процесот и загубите во текот на вредности.

Табела 7.1. Интегриран модел на Lean Шест Сигма (DMAIC) и Индустрија 4.0

Lean Шест Сигма		Активности	Технологии на Индустрија 4.0 кои ги дигитализираат Lean Шест Сигма методите и ги намалуваат варијациите на процесот
МЕРЕЊЕ	ДЕФИНИРАЊЕ LEAN ШЕСТ СИГМА	• Дефинирање на опсег на проект. • Финансиска придобивка. • Дали има брзи придобивки?	• Индустрија 4.0 ги собира податоците во реално време, ги снима, групира и анализира со цел да се идентификува подрачје за подобрување и опсег на Lean Шест Сигма анализата.
	ШЕСТ СИГМА	• Прибирање на податоци. • Мапирање на променливи во процесот. • Анализа на мерен систем (MSA). • Статистичка контрола на процесот (SPC): способност на процесот; Cp, Ppk, графикон за индивидуални отчитувања, хистограм на способност. • Анализа на ризици FMEA.	• Машинското учење и вештачката интелигенција генерираат контролни графикони со кои се потврдува мерниот систем (MSA) и се предвидува идното однесување на процесот (SPC). Со ова се елиминираат мануелните инспекции и грешките предизвикани од човечки фактор. Овие модели дефинираат приоритетни акции при анализа на ризиците (FMEA).
	LEAN – МАПИРАЊЕ НА ТЕК НА ВРЕДНОСТИ	• Прибирање на податоци. • Мапирање на тек на вредности. • Анализа на моменталната состојба и идентификување на активности кои не додаваат вредност. • Дефинирање на акции за дизајнот на идниот тек на вредности (VSD).	• Индустрија 4.0 автономно ги пресметува индикаторите за перформанс на процесот. • RFID открива проблеми во реално време во текот на вредности: голема залиха на материјали, долга патека на движење на материјалите, паковно производство, време на чекање поради дефекти на машина, несинхронизирани процеси и недостаток на материјали. • Виртуелната реалност го заменува класичното мапирање на тек на вредности, ги елиминира комплицираните интеракции со многу симболи и го забрзува дизајнот на новиот тек на вредности.
	АНАЛИЗА ШЕСТ СИГМА	• Анализа на податоците. • Субјективна анализа на изворните причини: PDCA; 5-why; Дијаграм и матрица со причини-и-последици; FMEA; Корелациска матрица. • Тестирање со хипотеза; ANOVA; Тестирање на регресија. • Утврдување на X-те (влезни параметри) што имаат најголемо влијание на Y (резултатот).	• Машинското учење и симулацијата вршат тестирања по методот проба-грешка и ги потврдуваат или негираат хипотезите за појава на варијации. • Машинско учење го редуцира бројот на експерименти во методот дизајн на експерименти (DoE), ги идентификува параметрите кои влијаат на резултатот и дефинира нивна точна вредност. Со ова се редуцира бројот на тестови и времето потребно за анализа на варијациите. Главен бенефит од Индустрија 4.0 во оваа фаза е елиминирање на зависноста од експерти.

ПОДОБРУВАЊЕ		
LEAN – ДИЗАЈН НА ТЕК НА ВРЕДНОСТИ (ПОРАМНУВАЊЕ НА ПЛАН ЗА ПРОИЗВОДСТВО - HEIJUNKA, ПРОИЗВОДСТВО ПАРЧЕ ПО ПАРЧЕ, СИСТЕМ НА ПОВЛЕКУВАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛИ)	• Креирање на фамилија на производи според сличност на процесите и заеднички користената опрема. • Калкулација на потребната опрема согласно новите фамилии на производи. • Дефинирање на такт време. • Креирање на континуирано производство на парче-по-парче. • Поставување на супермаркети и систем за повлекување на материјали - Канбан систем. Дефинирање на стандардно ниво на залиха (минимално и максимално ниво) за да се контролира производството на претходниот процес. • Дефинирање на пејсмејкер процес на кој се праќа планот за производство и го диктира ритмот на производство. • Порамнување на планот за производство по волумен и модел (Heijunka). • Припрема на тек на вредности за да може да функционира согласно новиот дизајн:	• Сајбер физичкиот систем учествува во дизајнот на нов и подобрен тек на вредности. • Работа со голема количина на податоци и анализа на информации во реално време го подобрува квалитетот на предвидување на нарачките од клиентот. Камерите со е-Канбан систем поставени во магацините кај клиентот автоматски иницираат план за производство во ERP. • Вертикалната комуникација (ERP – пајсмејкер) го порамнува производството по волумент и модел (Heijunka) со примена на методот секој модел/секој интервал (анг. every part every interval), без да има интервенција од човек. • Хоризонталната комуникација (M2M) испраќа е-Канбан информации од пејсмејкер процесот до супермаркетот за повлекување на потребните материјали. Супермаркетот, користејќи ги безжичните сензорни мрежи, испраќа информација до претходниот процес да почне со производство и да ги надополни повлечените материјали. Со дигитализирање на повлекување на материјалите во текот на вредности, се елиминира губењето на Канбан карти, се елиминираат застоите во производство и се намалува залихата на материјали (анг. bullwhip ефект). • Возилата со автоматизирано наведување автономно и по потреба ги дополнуваат супермаркетите со материјали. На овој начин се намалува залихата и се елиминираат празните и непотребни движења на доставувачот на материјали. • RFID го следи движењето на материјалите во реално време и идентификува застои во процесите. • Компјутерите обезбедуваат пристап до информациите во реално време и автоматски креираат работни инструкции.
LEAN – БРЗО СЕТИРАЊЕ НА МАШИНИ (SMED)	- имплементирање на систем за брзо подесување на машините при промена на модел SMED; Вкупно продуктивно одржување (TPM); 5S; Poka Yoke; Jidoka. • Имплементирање на подобрувања во процесот со цел намалување на варијациите во процесот.	• Проширената реалност го редуцира времето на пребарување, монтирање и подесување на алатите на машините. • Работата со голема количина на податоци со помош на статистичката анализа ги идентификува активности кои не додаваат вредност при промена на алат и дефинира акции за подобрување.
LEAN -5S		RFID овозможува точна локализација на објектите со што се намалува времето за нивно пребарување.

ПОДОБРУВАЊЕ		
LEAN –ВКУПНО ПРОДУКТИВНО ОДРЖУВАЊЕ (TPM)	LEAN – КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТ НА САМАТА СТАНИЦА (JIDOKA)	LEAN – ВИЗУЕЛИЗАЦИЈА
-II-	• Индустрија 4.0 прибира податоци за машините во реално време, идентификува критични машини, ги предвидува дефектите, креира план за одржување, го намалува времето на реакција и стапката на технички дефекти. • Сензорите за звук и вибрации детектираат абнормалности кај машините во текот на нивното работење. • Работата со голема количина на податоци и анализата на најдобрите практики од минатото помагаат во дизајнот на новата опрема со цел намалување на работниот трошок (резервни делови, дефекти на машини, време на подесување). • Уредите за следење на потрошувачката на електрична енергија по машините идентификуваат амортизирани делови и го подобруваат превентивното/предвидливото одржување. • Со Виртуелната реалност и Проширената реалност се креираат детални планови за одржување на опремата. • Работата со голема количина на податоци ја намалува залихата на резервни делови. Овие системи го мерат времето помеѓу дефектите и времето потребно за нивно отстранување (анг. Machine time to repair, machine time between failures). • Со 3Д принтање се произведуваат резервни делови со што се намалува залихата на резервни делови и трошоците за испорака на истите.	1. Контрола на квалитет на самата работна станица - Машините надоградени со сензори и софтвер за машинско учење автоматски ги избегнуваат дефектите, ги корегираат абнормалностите и обезбедуваат оптимален квалитет на производот. 2. Андон системот за сигнализација на проблеми – Дигиталното информирање на операторите и инженерите при појава на проблем го подобрува времето на реакција. 3. Одвојување на работата на операторите од работата на машините - Машинското учење овозможува автономно оперирање на машините со што операторите може да опслужат повеќе машини (Chaku-Chaku производство). 4. Решавање на изворната причина за појава на проблеми - Аналитичките технологии на Индустрија 4.0 ги класифицираат податоците, ги тестираат со методите проба-грешка и дизајн на експерименти и брзо дефинираат корективни акции.
		• Дигиталните дисплеи и CPS помагаат во визуелизацијата на процесите во реално време: план за испораки, план за производство, Е-канбан, приказ на OEE%, дрто, шкарт, итн. • Електронски - Андон системот со безжичните сензори и автоматизираната контрола на квалитет, самостојно генерира меилови со ескалации за итна реакција.

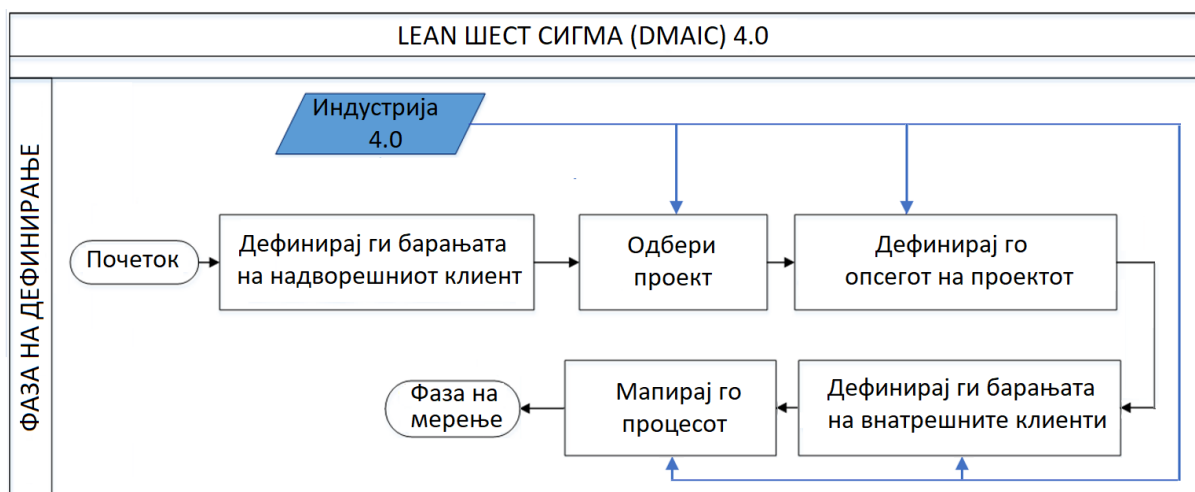
КОНТРОЛИРАЊЕ	ШЕСТ СИГМА	- Стандардизирање на подобрувањата како основа за идни подобрувања: - Ажурирање на документацијата за анализа на ризиците (FMEA). - Ажурирање на контролниот план. - Ажурирање на работните инструкции. - Ажурирање на студиите за стандардни времиња - Такт време/ време на циклус на производство. - Тренинзи и дефинирање на одговорности и овластувања. - Мерење и контрола на постигнатите резултати. - Идентификување на можност за дополнително подобрување. - Имплементирање на дополнителните подобрувања.	- Индустрија 4.0 ги автоматизира мануелните контролни инспекции за квалитет, врши 100 % мерење на сите производи и исцртува контролни графикони кои се многу сензитивни и ги детектираат најмалите поместувања на процесот при појава на специјални причини, што не би се приметиле со класичниот метод на земање на мерни примероци по случаен избор. Системот ги блокира во карантин сите дефектни производи. - Техниките за процесни пребарувања можат да откријат и следат информации од дигиталните дневници кои запишуваат настани, со што помагаат во намалување на варијациите на процесот.
	LEAN – ДИЗАЈН НА ТЕК НА ВРЕДНОСТИ	Континуирано следење на процесот и избегнување на трошоците.	- CPS и Интернет на нештата динамички го контролираат новиот дизајн на тек на вредности, прибираат податоци во реално време, ги споредуваат овие податоци со процесните индикатори дефинирани во виртуелниот модел и забрзано ги имплементираат корективните акции за оптимизирање на текот на вредности. Динамичкиот модел на тек на вредности е значително пофлексибилен и побрз од стохастичниот модел при неочекувани промени на нарачките од клиентот. - Системите со камери го следат ротирањето на операторите на повеќе машини и го споредуваат со виртуелниот модел и во случај на девијации на стандардното време тие реагираат. - Индустрија 4.0 ги подобрува Lean праксите во производството преку контрола на транспортот и залихите на материјали и контрола на вкупното време потребно за производство.
	LEAN ШЕСТ СИГМА – СТАНДАРДИЗАЦИЈА		- Електронските дисплеи помагаат при стандардизирање на процесите со прикажување на стандардните оперативни процедури, инженерските цртежи, работните инструкции, контролните планови, ергономските движења и стандардите за брза промена на модел (точна позиција на материјалите во ќелиите). - Виртуелната реалност помага за тренинг на вработените во производството и ги стандардизира на активностите.

Може да сумираме дека со предложениот модел, главниот придонес на Индустија 4.0 при дигитализација на Lean Шест Сигма алатките е во: елиминирање на мануелните активности и пропратните човечки грешки, намалување на времето потребно за имплементација на LSS проектите, прибирање на податоците во реално време и нивна точност, намалување на ресурсите, намалување на зависност од експерти во областа, автономно и динамичко оптимизирање на дизајнот на тек на вредности (VSD), намалување на времето на реакција при појава на девијации и постигнување на одржливи резултати.

Во рамки на докторската теза, изработени се блок-дијаграми со детален опис на активностите на Lean, Шест Сигма и Индустија 4.0 во фазите на DMAIC структурата. Блок - дијаграмите се прикажани во поглавјата 7.1 - 7.5.

7.1 Фаза на дефинирање

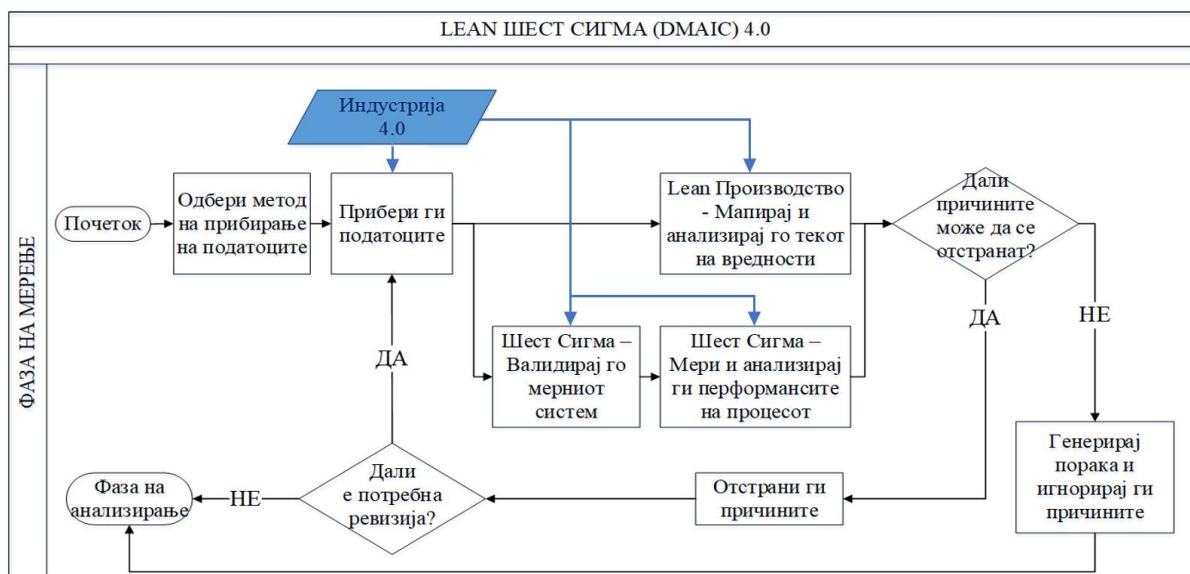
Фазата на дефинирање на новиот модел е прикажана на Слика 7.1. Во оваа фаза со технологиите на Индустрија 4.0 се прибираат податоци, се групираат и анализираат со цел да се идентификува област за подобрување во производниот процес. Со Индустрија 4.0 проблемот се детектира многу побрзо, што влијае на времетраењето на неговото елиминирање.



Слика 7.1. Блок - дијаграм на фаза на дефинирање на Lean Шест Сигма (DMAIC)

7.2 Фаза на мерење

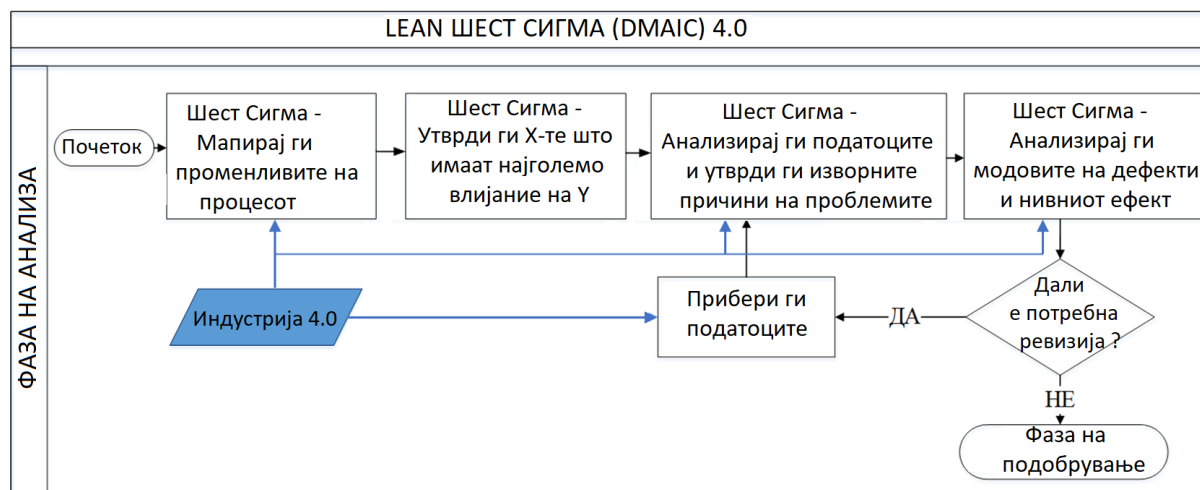
Фазата на мерење на новиот модел е прикажана на Слика 7.2. Во оваа фаза со помош на Индустрија 4.0 се дефинира метод за прибирање на податоците. Од аспект на Шест Сигма со помош на сајбер физичкиот систем, интернет на нештата и сензорските мрежи се прави анализа на перформансот на процесот т.е потврда на мерната опрема и статистичка контрола на процесот. Со машинското учење и вештачките неуронски мрежи се креираат контролни графикони за анализа на мерниот систем (MSA) и предвидување на способност на процесот (SPC), а потоа се анализираат ризиците во процесот (FMEA). Од аспект на Lean со вертикалната и хоризонталната комуникација помеѓу процесите автоматски се мапира текот на вредности.



Слика 7.2. Блок - дијаграм на фаза на мерење на Lean Шест Сигма (DMAIC)

7.3 Фаза на анализирање

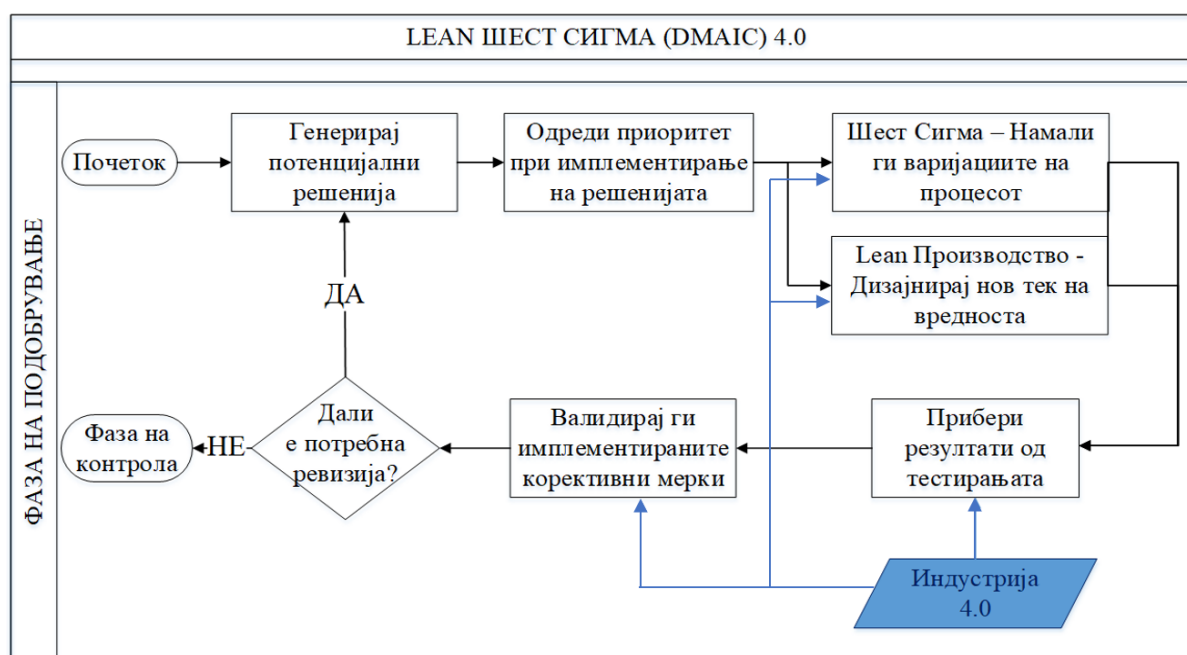
Фазата на анализирање на новиот модел е прикажана на Слика 7.3. Во оваа фаза со Индустрија 4.0 автоматски се мапираат променливите на процесот, а потоа со работа со голема количина на податоци, машинското учење и со инспекција со камери се прави анализа на изворните причини за појава на варијации во процесот. Со машинското учење се класифицираат причините за варијации по тип, а потоа со дизајн на експерименти и симулација се дефинираат точните вредности на променливите. Со Индустрија 4.0 во оваа фаза се намалува зависноста од експертите при анализа на причините за појави на дефекти.



Слика 7.3. Блок - дијаграм на фазата на анализирање на Lean Шест Сигма (DMAIC)

7.4 Фаза на подобрување

Фазата на подобрување на новиот модел е прикажана на Слика 7.4.



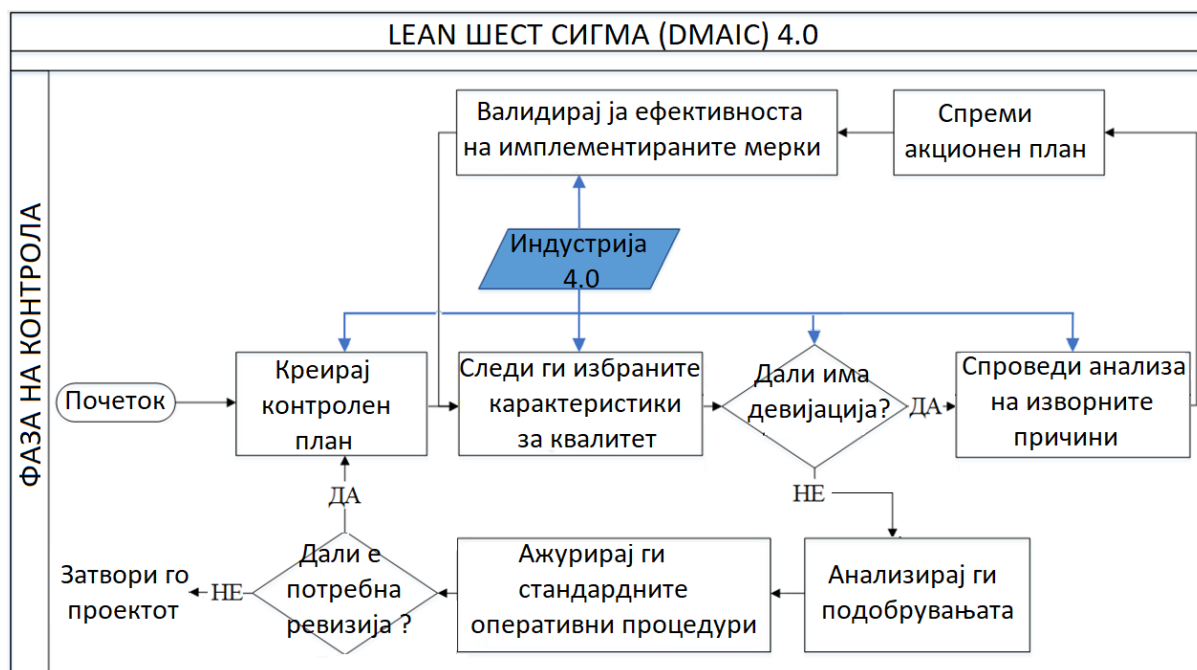
Слика 7.4 - Блок - дијаграм на фазата на подобрување на Lean Шест Сигма (DMAIC)

Во фазата на подобрување се генерираат потенцијални решенија и се одредува приоритет за нивно имплементирање. Со технологиите на Индустрија 4.0 како на пример, вештачката интелигенција, машинското учење и аналитиката за предвидување се намалуваат варијациите во процесот и се креира динамички тек на вредности. Со помош на вертикалната комуникација (ERP - пејсмејкер процес) се контролира производниот план по модели и волумен, а со хоризонталната комуникација се овозможува динамички и автоматски адаптивен план за производство. Со Индустрија 4.0 се прибираат податоците и се врши потврда на ефективността на имплементираните корективни мерки.

7.5 Фаза на контролирање

Фазата на контролирање на новиот модел е прикажана на Слика 7.5. Во оваа фаза се креира виртуелен модел во сајбер физичкиот систем на Индустрија 4.0, согласно новиот дизајн на тек на вредности. Податоците добиени од физичкиот систем во реално време се споредуваат со виртуелниот модел и во случај на девијации автономно се генерираат инструкции за нивно елиминирање. Вака поставениот динамички тек на вредности е флексибилен и брзо реагира на неочекуваните промени наспроти стохастичниот модел на тек на вредности. Информациите се споделуваат во реално време до бизнис единиците за поддршка на производството што придонесува до брза реакција при појава на девијации. Сето ова води до елиминирање на загубите во производство, подобрена контрола на транспортот на полупроизводи и готов производ, намалено време на производство, намалена залиха на материјали и намалена стапката на дефекти.

Со RFID системот се постигнува идентификација и следливост на репроматеријалот и готовиот производ во процесот, без да се користи мануелен начин на баркод скенирање. Индустрија 4.0 дополнително овозможува електронско ажурирање на работните упатства, техничките цртежи и инспекциските планови со што се постигнува подобрена контрола на документацијата во производството.



Слика 7.5. Блок - дијаграм на фаза на контролирање на Lean Шест Сигма (DMAIC)

Во глава 7 се прикажани некои важни препораки кои треба да се земат во предвид при имплементацијата на новиот DMAIC модел кој ги комбинира Lean, Шест Сигма и Индустрија 4.0:

- Новиот модел да ја користи DMAIC структурата како основна рамка.
- При имплементацијата на моделот да се применат најдобрите алатки како што се наидува на проблеми.
- Да се користат Lean, Шест Сигма и Индустрија 4.0 симултано, а не паралелно.
- Да се користат техниките во балансиран сооднос, а не некоја техника да биде надредена а некоја подредена.
- Да се користи мапирање на текот на вредности како фокус платформа.
- Да се инволвира детално колективно знаење.
- Да се избегне под просечно подобрување на процесите и моделот да биде ориентиран кон резултати.
- При имплементација на моделот да се користи инфраструктура на добро тренирани луѓе кои ја претставуваат организацијата.
- Да се обезбеди критериум за избор на проект кој има големо влијание на квалитетот и перформансот.
- Да се обезбеди структура за поддршка од менаџментот.

Очекуваните придобивки од имплементирањето на новиот модел се следни:

1. Детален опис на редоследот на имплементација на процесните чекори.
2. Интегрирање на Lean алатките од индустриското инженерство со статистичките алатки на Шест Сигма.
3. Дигитализирање на Lean Шест Сигма алатките.
4. Надминување на ограничувањата добиени при имплементирање на секоја од техниките поединечно (Lean, Шест Сигма, Индустрија 4.0), со што различните методологии ќе се надополнуваат една со друга.
5. Комбинирање на трите техники за да се добие континуирано подобрување.
6. Потенцирање на моќта на Lean Шест Сигма и законите кои важат во производството при имплементирање на Индустрија 4.0.
7. Подобрување на оперативниот перформанс во производството и севкупното управување со квалитет.
8. Автоматизирано прибирање на точни податоци во реално време со Индустрија 4.0, нивна анализа и брза реакција во случај на отстапки преку Сајбер физичкиот систем.
9. Индустрија 4.0 овозможува различните процеси да го снабдуваат со податоци когнитивниот алгоритам во реално време.
10. Значително побрза оптимизација на процесите благодарение на DMAIC моделот и информацискиот систем.
11. Трансформирање на организацијата од функционално ориентирана по сектори во процесно ориентирана и мулти-функционална организација.

8 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ – ИМПЛЕМЕНТИРАЊЕ НА LEAN ШЕСТ СИГМА И ИНДУСТРИЈА 4.0 ВО АВТОМОБИЛСКА КОМПАНИЈА ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ГРЕАЧИ ЗА СЕДИШТА

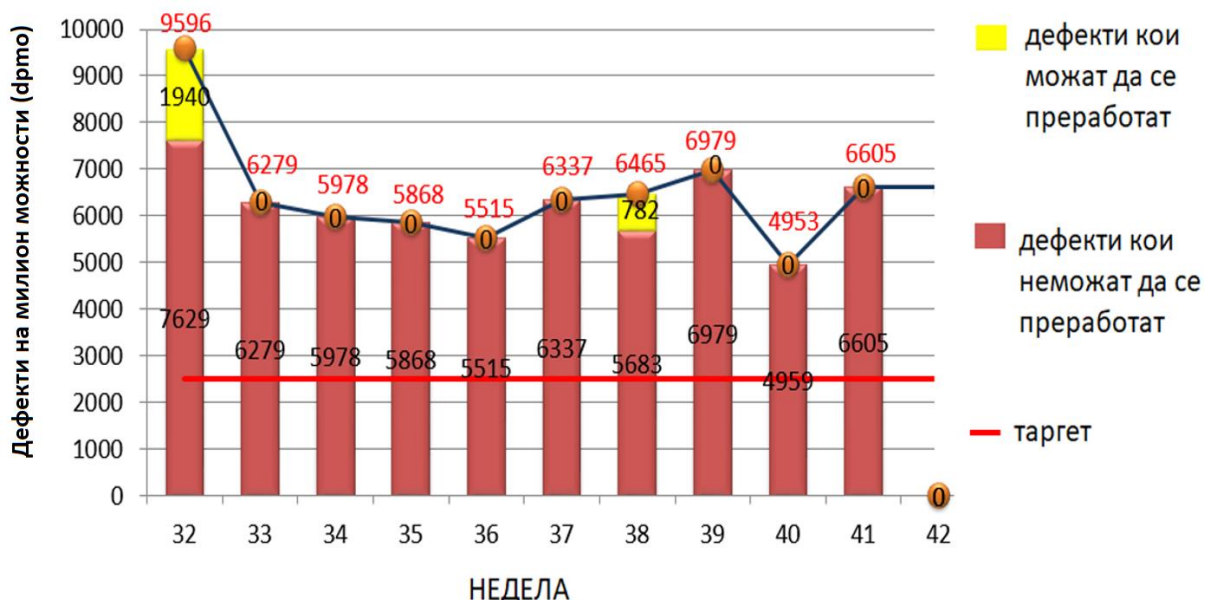
8.1 Фаза на дефинирање

Потврдата на ефективност и ефикасност на ново предложениот модел започнува со неговата практична имплементација во автомобилската компанија за производство на греачи за седишта, која е предмет на ова истражување и се соочува со висока стапка на дефекти. Собраните податоци во периодот од 2017 и 2018 год. (Табела 8.1) покажуваат дека вкупната стапка на дефекти изнесува 30.000 (dpmo), вкупното време на производство изнесува 2,83 денови, залихата на полупроизвод помеѓу процесите изнесува 23.200 парчиња, ОЕЕ% е 78 % и искористеноста на просторот изнесува 0,125 (m²/ месечен волумен на производство).

Табела 8.1. Оперативен перформанс на процесите

	Вкупна стапка на дефекти (dpmo)	Вкупно време на производство (денови)	Залиха меѓу процесите (парчиња)	Вкупна ефективност на опремата ОЕЕ (%)	Искористеност на просторот (m ² / волумен на производство)
Перформанс	30.000	2,83	23.200	78	(5.000 m ² / 40.000)

Од 30.000 (dpmo) колку што изнесува вкупната стапка на дефекти, на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација“ припаѓаат 6.400 (dpmo), што одговара на способност на процесот $C_{pk} = 0,83$ (Слика 8.1).



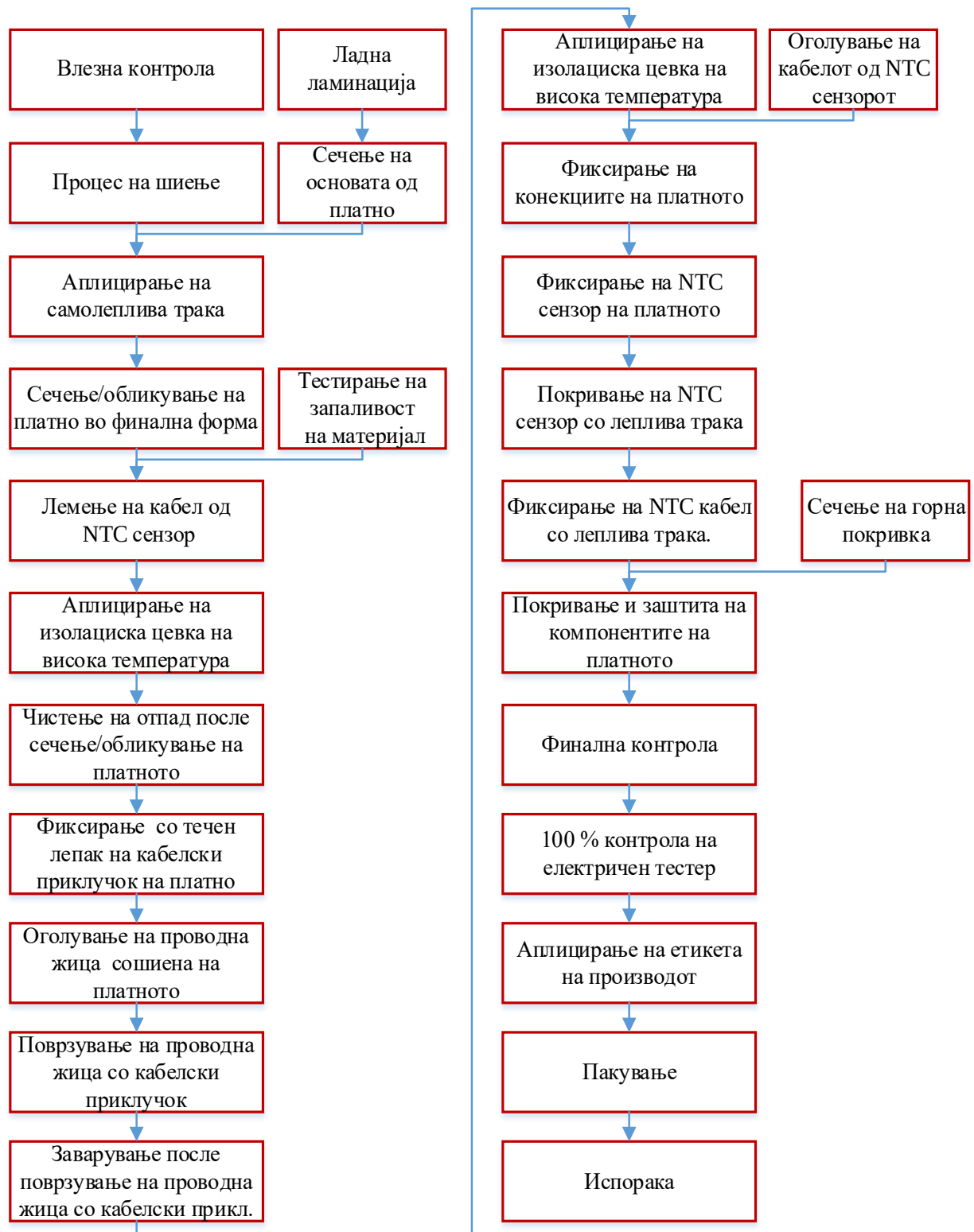
Слика 8.1. Приказ на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација“

Очекувањата од ново предложениот модел за квалитат е да се намали вкупната стапка на дефекти под 15.000 (dpmo), да се намали грешката „отпорност на греач надвор од спецификација“ под 500 (dpmo) што одговара на способност на процесот $C_{pk} \geq 1,33$, вкупното време на производство да се намали за 50 %, вкупната залиха помеѓу процесите да се намали за 45 %, ОЕЕ% да се зголеми за 20-25 % и да се намали потребниот простор во производство за 20 %.

Практичната имплементација на предложениот модел започнува со фазата на дефинирање, која ја следи структурата прикажана на блок-дијаграмот на Слика 7.1. Во оваа фаза најпрвен се дефинираат барањата на клиентот, потоа се избира проект за елиминирање на актуелните проблеми во компанијата, се дефинира опсег на проектот, цели на проектот и потребни ресурси за проектот.

Од аспект на потребни ресурси, во тимот се доделени претставници од секторите за производство, инженеринг, квалитет, логистика и континуирано подобрување. Тимот од квалитет е одговорен за анализа на мерниот систем, за статистичката контрола на процесот, да обезбеди историски податоци за грешките и наоди од дневните анализи на истите. Тимот од инженеринг и тимот за континуирано подобрување се одговорни за мапирање на текот на вредности, за дизајн на нов тек и анализа на модовите на грешки и нивниот ефект. Овие тимови се одговорни за практично имплементирање на техничките решенија на процесите со цел нивно подобрување. Тимот од логистика е одговорен за порамнување на планот за производство по модел и волумен, за намалување на вкупната залиха на материјали и готов производ и за заштеда на простор. Мулти-функционалниот тим составен од производство, квалитет, инженеринг и логистика е одговорен за потврда на ефективноста на имплементираниите подобрувања, нивно документирање и ажурирање на постоечките стандарди. На крај, тимот од инженеринг и човечки ресурси е одговорен за тренинг на сите инволвирани сектори за правилна примена на новите стандарди.

На блок-дијаграмот на Слика 8.2 е прикажан опсегот на проектот, со сите процеси потребни за производство на греачи за седишта во компанијата што е предмет на истражување, од влез на репроматеријали и влезна инспекција до финална инспекција, пакување и испорака на готов производ. Репроматеријалите се примаат во магацин и се врши влезна контрола на квалитетот, потоа следува процесот на шиене на проводникот (греач) на основа од платно. Следен чекор е аплицирање на самолеплива трака која се активира со примена на притисок (анг. pressure sensitive adhesive tape PSA). Следува сечење т.е обликување на фабрикуваното платно за да се добие финалната форма на греачот за седишта. Потоа се монтира полупроизводот заедно со кабелскиот приклучок на линијата за финална монтажа. Овде се вклучени следните чекори: лемење на сензор со негативен температурен коефициент (анг. negative temperature coefficient NTC), аплицирање на изолациска цевка која се собира при изложување на висока температура, чистење на отпадот генериран при процесот на сечење/обликување на производот, фиксирање со течен лепак на кабелскиот приклучок на платното, оголување на проводната жица сопиена на платното, побрзување на проводната жица сопиена на платното со кабелскиот приклучок, заварување или топење на слојот изолација помеѓу кабелскиот приклучок и проводната жица, аплицирање на изолациска цевка која се собира при изложување на висока температура, фиксирање на NTC сензор на платно на позиција каде што се мери температурата на греачот, покривање и заштита на NTC сензорот со леплива трака, фиксирање на NTC кабел на платно и покривање со леплива трака на сите компоненти на платното подложни на механичко оштетување. По финалната монтажа следува визуелна контрола и електрично тестирање на сите производи за да се потврди функционалноста на производот. Последни чекори се аплицирање на етикета на производот, пакување и испорака.



Слика 8.2. Блок-дијаграм на сите чекори за производство на греачи за седишта

8.2 Фаза на мерење

На Слика 7.2 е прикажана фазата на мерење на новиот модел, каде што најпрвен се избира метод за прибирање на податоците, а потоа се врши прибирање на истите. Со

прибраните податоци се мапира текот на вредности и се анализираат недостатоците, се дефинира основната линија за перформанс на процесот што вклучува анализа на мерниот систем и анализа на способноста и перформансот на процесот.

8.2.1 Избор на метод за прибирање на податоци

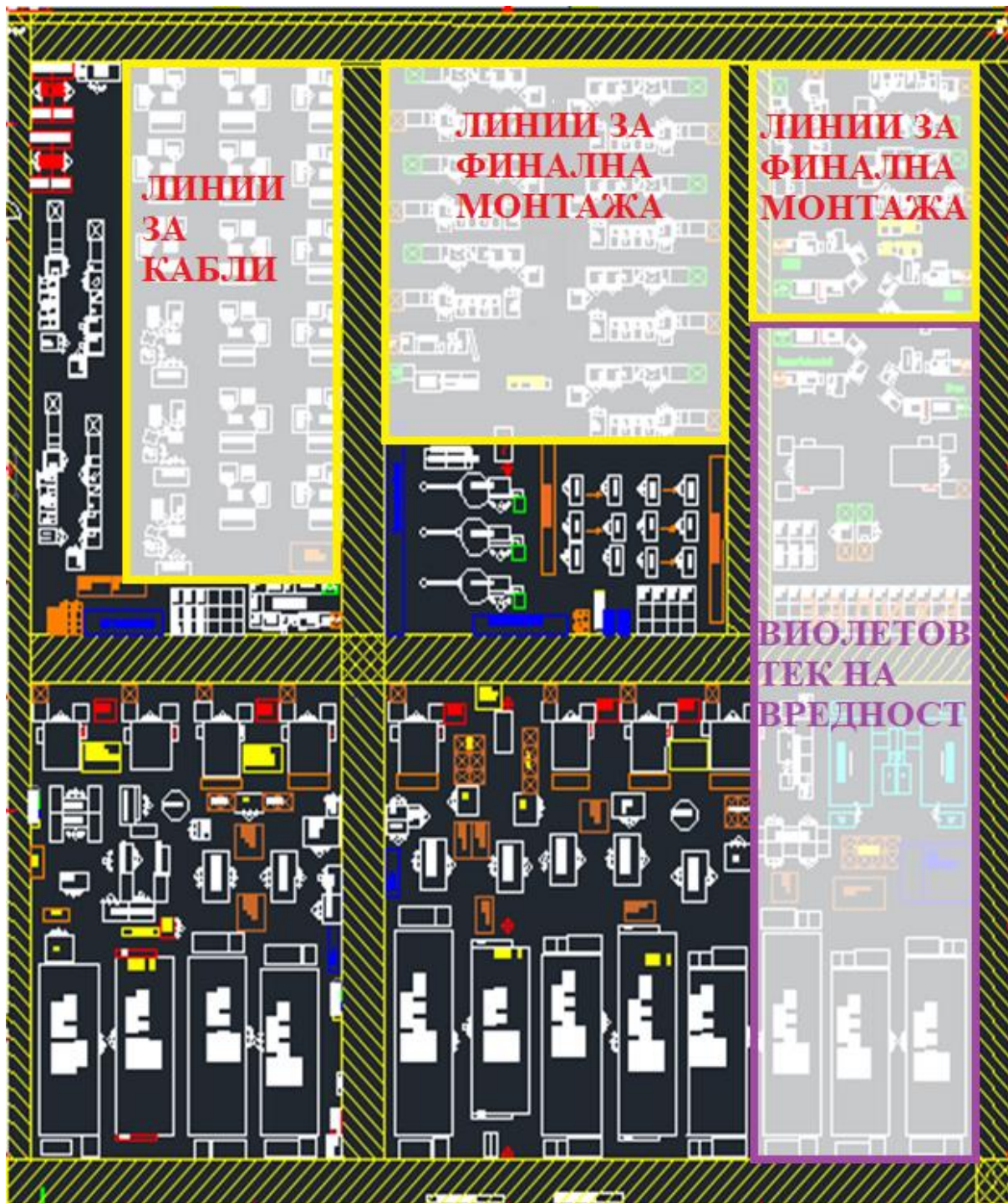
Во фазата на мерење изборот на метод за прибирање на податоци е многу важна активност затоа што од точноста на податоците зависи мапирањето на текот на вредности и дефинирањето на перформансот на процесот. Досегашниот метод за прибирање на податоци ја става под знак прашалник нивната точност и достапност во реално време, поради следните причини:

- Сумирањето на податоците за продуктивност и квалитет се врши задоцнето на крај на смена, кога се спремаат извештаите.
- Анализата на дефекти се врши задоцнето, наредниот ден, што го отежнува процесот на детекција на изворните причини за појава на проблемите.
- При анализа на изворните причини на дефектите постои субјективност од страна на вработените што ја вршат анализата.
- Најголем дел од грешките „отпорност на греач надвор од спецификација” се детектирани на електричниот тестер што е последна работна станица во текот на вредности. Оттука, грешката се препишува како да се случила на линијата за финална монтажа, затоа што точната локација на настанување на грешката тешко може да се утврди со визуелна инспекција на операторот и сето тоа води до генерирање на неточни информации. Неточните информации водат до погрешни заклучоци и имплементирање на акции кои не даваат резултат.
- Електричниот тестер врши атрибутивно мерење на добар/лош производ. Недостига континуирана статистичка контрола на процесот во реално време, со цел да се следи трендот и појавата на невообичаени шеми што сигнализираат присуство на специјални причини.
- Не постои сумиран извештај во реално време за продуктивноста, залихата и вкупното време на производство во целиот тек на вредности. Постојат поединечни репорти во ERP системот (анг. Enterprise resource planning) кои не се достапни во моментот кога се потребни за да сигнализираат девијација.

За надминување на овие проблеми, имплементирани се етикети со радио фреквентна идентификација, кои овозможуваат следење во реално време на движењето на материјалите и полупроизводите во текот на вредности, следење на залихата помеѓу процесите, на времето на циклус на сите процеси, на стапката на дефекти, на поправките и на шкартот. Од аспект на Шест Сигма и статистичката контрола на процесот, податоците се прибираат од електрични тестери кои вршат 100% проверка на секој производ со што бројот на примероци во подгрупата изнесува 1, од што зависи изборот на контролен графикон (Слика 3.3). Деталниот опис на технологиите на Индустрија 4.0 кои се имплементирани во компанијата што е предмет на истражување е прикажан во Контролната фаза од овој труд, во поглавје 8.5 (Слика 8.38). Овие технологии ги елиминираат сите погоре наведени недостатоци на досегашниот метод за прибирање на податоци.

8.2.2 Lean производство - Мапирање и анализа на тек на вредности

Прв чекот при мапирање и анализа на текот на вредности е да се мапира распоредот на опремата во производство, со цел да се види како е поставена од аспект на движење на материјалите и искористеност на просторот. На Слика 8.3 е даден графички приказ на опремата пред имплементираниите подобрувања.



Слика 8.3. Графички приказ на опремата во производство - пред подобрувањата

Од графичкиот приказ на опремата може да се заклучи следното:

- Нема јасно видлив тек на вредности во производство.
- Нема доделана опрема по фамилии на производи во текот на вредности.
- Линиите за производство на кабел се локациски оддалечени од линиите за финална монтажа, што ја зголемува патеката на движење на материјалите и ресурсите. Со ова е направено групирање по тип на опрема а не по најкратко движење на материјалите во процесот на фабрикување (тек на вредности).

За илустрација на тек на вредности извршено е мапирање на виолетовиот⁵ процес на фабрикување од вкупно 3 дефинирани во компанијата што е предмет на истражување (Слика 8.3). Мапирањето започнува од процесот кој е најблиску до купувачот, во нашиот случај испорака на готов производ, па потоа се оди наназад преку сите процеси кои претходат. Мапирањето се врши врз основа на податоци собрани од производство во моментот, а не врз основа на извештаите што не ја отсликуваат реалноста. Пред да се започне со мапирање се прави калкулација на такт времето⁶ што одговара на побарувањата на клиентот (види Табела 8.2). Од седмичната побарувачка на клиентот и бројот на работни смени во седмицата, се пресметува побарувачката на производство во една смена ($32.500 \text{ парчиња} \cdot 15 \text{ смени} = 2.167 \text{ парчиња}$). Кога работното време во една смена (27.000 s) ќе се подели со побарувачката во смена ќе се добие такт времето на производство ($27.000 \text{ s} / 2.167 \text{ парчиња} = 12,5 \text{ s}$). Планираните загуби во производството поради подесување на машините или дефекти изнесува 10 %. Кога ќе се намали такт времето од $12,5 \text{ s}$ за 10 % ќе се добие планираното време на циклус на производство од $11,2 \text{ s}$.

Табела 8.2. Калкулација на такт време на производство при мапирање на тек на вредности

Седмична побарувачка	32.500 (парчиња)
Број на смени во седмицата	15
Побарувачка по смена	2.167 (парчиња)
Работни часови во смена	7,5 (часа)
Такт време на клиентот	12,5 s
Планирани загуби	10 %
Планирано време на циклус на производство 95 %	11,2 s
Процес што е тесно грло во производство	45 s

На Слика 8.4 е прикажано мапирањето на виолетовиот тек на вредности. Користени се блокови со податоци за процесите каде што се прикажани: време на циклус на производство (анг. cycle time - CT), време потребно за подесување на машините при промена на модел (анг. changeover time C/O), вкупната ефективност на опремата (анг. overall equipment effectiveness OEE%), процент на дефектни производи и број на потребни машини и оператори за да се исполни бараното производство. Активностите кои додаваат вредност на производот (анг. processing time) се со времетраење од 141 s додека

⁵ Со цел полесно идентификување и препознавање во секојдневната комуникација помеѓу вработените, трите тек на вредности се именувани како зелен, портокалов и виолетов.

⁶ Такт времето го усогласува ритамот на производство со ритамот на продажба. Се пресметува со делење на нарачката на клиентот за одреден временски период со расположивото време за производство во истиот период.

[illegible]

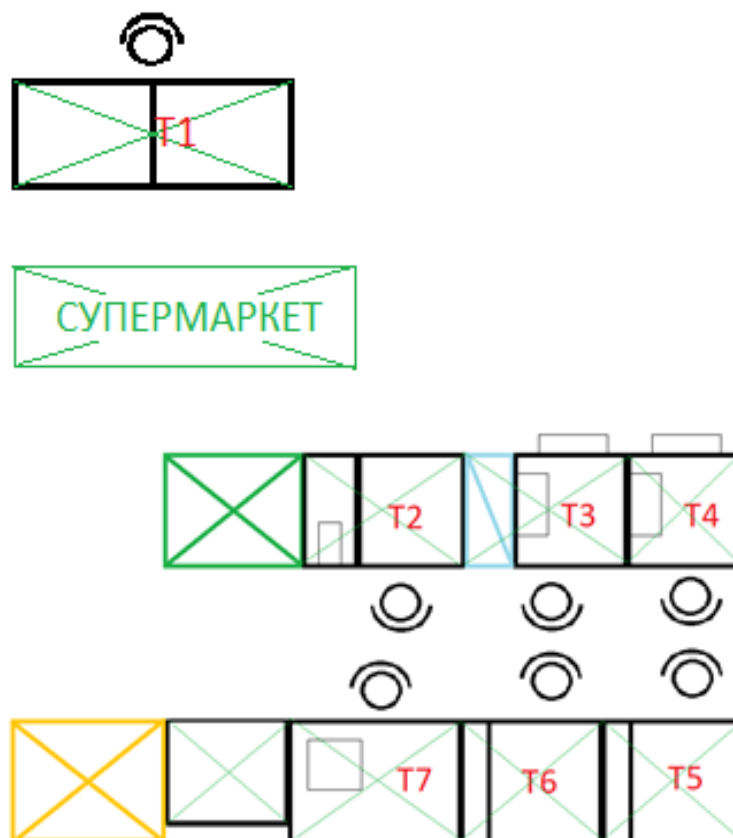
82

Истовремено, при мапирањето се врши и анализа на текот на вредности и се означуваат позициите каде што се потребни брзи подобрувања на процесите (анг. kaizen burst), и тоа:

- Големо вкупно време на производство. Вкупното време на производство од иницирање на налог за производство до добивање на финален производ изнесува 2,83 денови. Времето на процесирање или времетраењето на активностите кои додаваат вредност изнесува само 141 s. Големата разлика помеѓу вкупното време на производство и времето на процесирање е поради големата залиха на полупроизвод и готов производ. Поради високата залиха на полупроизвод се губи чувството за итност и времето на реакција на тимовите за поддршка е задоцнето.
- Нема дефинирано стандардна залиха на материјали и полупроизвод помеѓу процесите (анг. standard WIP).
- Пејсмејкер процес е првиот процес во текот на вредности т.е процесот на ламинирање на материјалот и процесот за сечење на кабли. Логистика испраќа план за производство на овие два процеси, кои се најодалечени од клиентот, со што вкупното време на производство е најдолго.
- Материјалите се движат по принцип на туркање а не по принцип на влечење. Кога се применува систем на туркање на материјалите често се произведува нешто што не е потребно за наредниот процес, со што се акумулира голема залиха на полупроизвод. При туркање на материјалите се појавува празно чекање на операторите и машините, што резултира со непланирани отстапки од планот за производство. Најчесто, отстапување од планот за производство се случува поради непланирани дефекти, недостаток на материјал, не-синхронизираност на производството на кабли и производството на греачи, итн.
- Паковно производство наместо континуирано производство на парче-по-парче. Недостаток на паковното производство е генерирање на голема залиха на полупроизвод помеѓу процесите, висока стапка на дефекти, големо вкупно време на производство и нефлексибилност при промена на побарувањата од страна на клиентот.
- Вкупниот број на оператори во виолетовиот тек на вредности во една смена изнесува 38. Овде има потенцијал за подобрување на продуктивноста на производството и редуцирање на бројот на оператори.
- Не порамнето производство по модел и волумен. Ова резултира со зголемување на залихата помеѓу процесите и намалена флексибилност да се одговори на промената на побарувањата од страна на клиентот.
- Прекумерно производство. Со цел да се постигне максимална искористеност на операторите и опремата се генерира прекумерно производство. Со прекумерното производство се трошат репроматеријалите и се зголемува залихата на полупроизвод и готов производ што врзува финансиски средства кои не можат да се наплатат од клиентот.
- Висока стапка на дефектни производи скриени во големата залиха на полупроизвод помеѓу процесите.
- Анализата на дефектите не во моментот кога тие настануваат туку наредниот ден. На овој начин е многу тешко да се утврдат изворните причини за појава на дефекти, затоа што наредниот ден причините можеби не се повеќе

присутни (на пример лошо подесување на машините, девијации во репроматеријалите, неправилно ракување на операторите итн.).

- Линиите за производство на кабел се локациски оддалечени од линиите за финална монтажа т.е опремата е групирана по тип а не по тек на вредности. Ова предизвикува подолга патека на движење на материјалите и ресурсите, несинхронизирано производство, зголемена залиха помеѓу процесите и генерирање на активности кои не додаваат вредност на производот.
- Линијата за кабли и линијата за финална монтажа за ист модел на производ не се интегрирани и покрај тоа што времето на циклус на производство и времето потребно за промена на модел им е идентично. Помеѓу нив има супермаркети со залиха на полупроизвод од 0,31 денови.
- Согласно такт времето на производство во виолетовиот тек на вредности потребни се 2,4 линии.
- На Слика 8.5 се прикажани линијата за финална монтажа и линијата за кабли. Операторите работат во стационарен режим само на една машина, при што времето на операторот не е одвоено од времето на машината (јап. Jidoka). Линијата за финална монтажа работи со паковно производство и има залиха од 200 парчиња помеѓу машините.



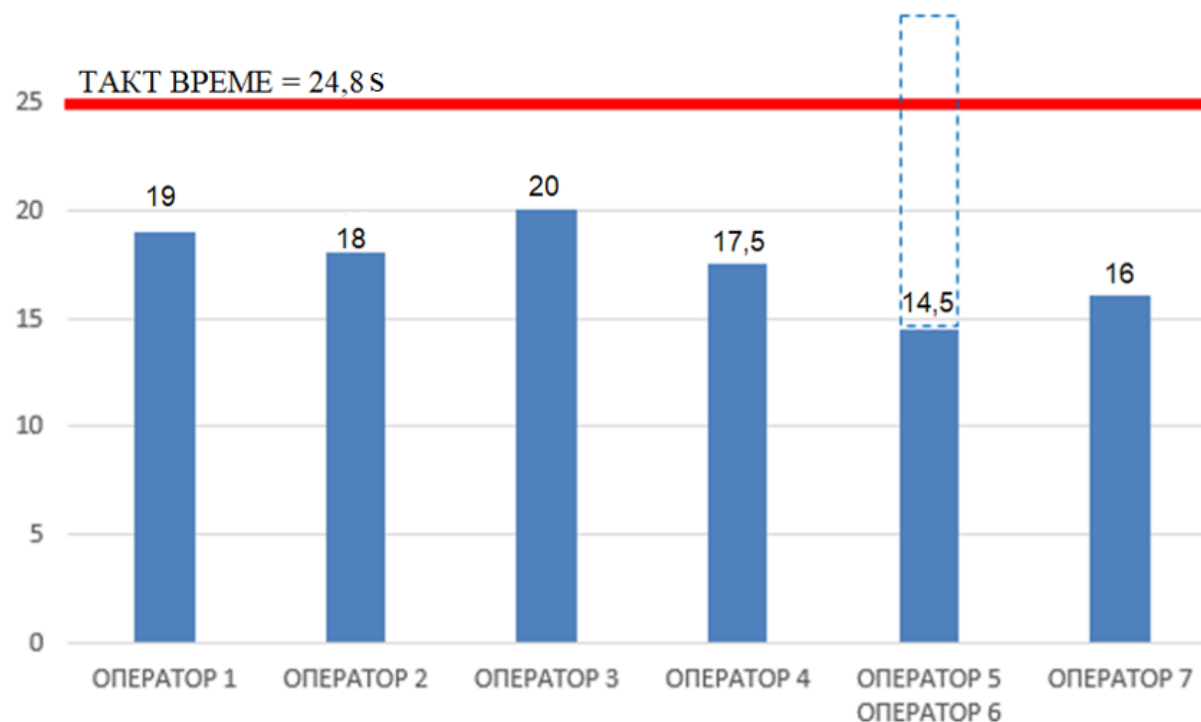
Слика 8.5. Линија за финална монтажа и линија за производство на кабел

Во Табела 8.3 е прикажана студијата на времињата на секоја операција во линијата за финална монтажа и линијата за производство на кабел. Студијата покажува дека линијата има капацитет за производство на 120 парчиња на час и дека се потребни 7 оператори. Вкупното време на производство изнесува 119,5 s.

Табела 8.3. Студија на времињата пред балансирање на линијата за финална монтажа

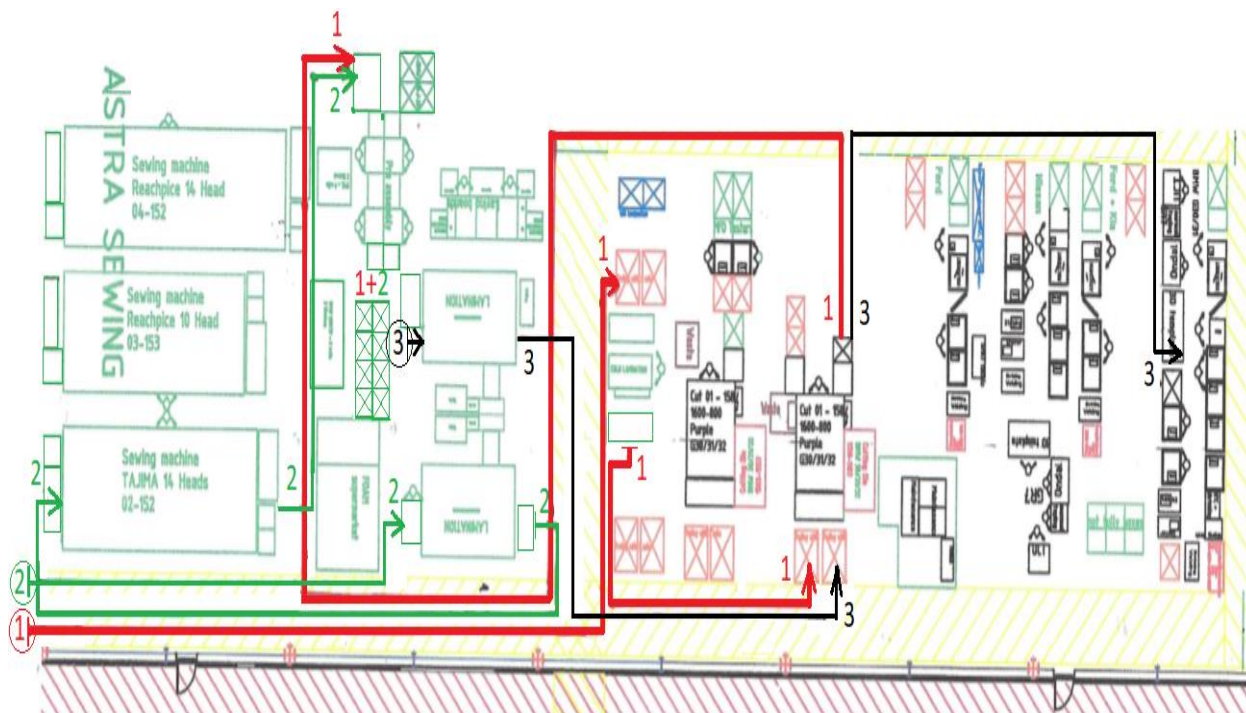
	Активност	Работна операција	Време (s)	Подобрувања (s)
Оператор 1	Поставување кабел	T1	4	
	Поставување на конектор		6	
	Поставување изолациона трака		7	
	Вадење на полупроизвод од операција		2	
	Вкупно време на операцијата		19	
Оператор 2	Поставување полупроизвод	T2	4	Паралено
	Чистење		3	
	Поставување кабелот		4	
	Лепење со течен лепак		5	
	Вадење на полупроизвод од операција		2	
	Вкупно време на операцијата		18	
Оператор 3	Поставување полупроизвод	T3	3	Редуцирај од 5 s на 3 s
	Оголување на жицата		5	
	Поврзување на проводник и кабел		9	
	Вадење на полупроизвод од операција		3	
	Вкупно време на операцијата		20	
Оператор 4	Поставување полупроизвод	T4	2	Редуцирај од 5 s на 3 s
	Лемење		8	
	Топење изолациона цевка		6	
	Вадење на полупроизвод од операција		1,5	
	Вкупно време на операцијата		17,5	
Оператор 5 Оператор 6	Поставување полупроизвод	T5 & T6	5	Редуцирај од 6,5 s на 4,5 s
	Позиционирање на контактот		6	
	Лепење со течен лепак		6	
	Лепење на покривка		9	
	Вадење на полупроизвод од операција		3	
	Вкупно време на операцијата		29	Со две работни станици
Оператор 7	Поставување полупроизвод	T7	3	Редуцирај од 6 s на 4 s
	Тестирање		5	
	Аплицирање етикета		4	
	Вадење на полупроизвод од операција		4	
	Вкупно време на операцијата		16	
Вкупно време на циклус на производство			119,5	

На Слика 8.6. е прикажан графиконот за такт време/време на циклус на производство (анг. Tact Time/Cycle Time bar chart: CT/TT= потребен број на оператори). Од графиконот се гледа дека операторите во линијата работат небалансирано т.е некој оператор работи со време на циклус од 14,5 s а друг со време од 20 s. Ова значи дека некој оператор е преоптоварен, а друг чека напразно.



Слика 8.6. Такт време/ време на циклус на производство пред подобрувањата

Од мапата прикажана на Слика 8.7 може да се види дека патеката на движење на материјалите во виолетовиот тек на вредности изнесува 278 m. Патеката на движење на сунѓерот изнесува 133 m (одбележано со 1-црвена боја), патеката на материјалот за шиене изнесува 68 m (одбележано со 2-зелена боја) и патеката на фабрикуваниот материјал изнесува 77 m (одбележано со 3-црна боја). Патеката на движење на материјалите во виолетовиот тек на вредности е долга, со многу загуби во процесите кои не додаваат вредност на производот и затоа треба да се оптимизира.



Слика 8.7. Патека на движење на материјалите во виолетов тек на вредности

8.2.3 Шест Сигма - Анализа на мерниот систем MSA

Опремата што се користи за мерење на карактеристиката отпорноста на греач е електричен тестер кој се состои од куќиште, мерни сонди и мерна опрема за отпорност. Конекторот на греачот чија отпорност се мери се поставува во куќиштето при што процесот на мерење е автоматски и операторот не влијание на резултатите од мерењето. Варијации на системот за мерење може да настанат поради истрошени иглени сонди (или несоодветно подесена висина на иглените сонди), при што контактот помеѓу конекторот на греачот и сондите не е добар. Затоа, на почеток од секоја смена се користи калибриран референтен примерок кој ја потврдува функционалноста и точноста на мерната опрема.

Анализата на мерниот систем е прикажана во Табела 8.4. Од табелата може да се види дека се направени 90 мерења, и тоа: 10 примероци · 3 оператори · 3 мерења = 90. Упатството за прибирање на примероците и спроведување на анализата е дадено во поглавје 3.3.2.

Табела 8.4. Податоци за студијата за повторливост и репродуктивност

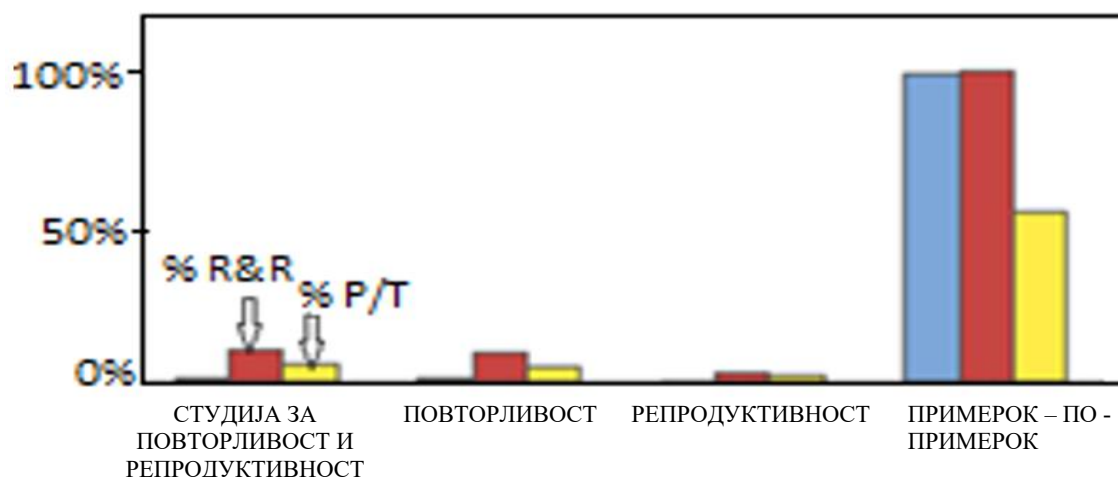
-Оценители (А,Б,В) -Мерења (1,2,3)		Примерок (mΩ)										Аритметичка средина (mΩ)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
А	1	3502	3441	3539	3369	3455	3517	3483	3382	3337	3409		3443,4
	2	3514	3439	3533	3375	3466	3524	3482	3390	3345	3417		3448,5
	3	3507	3446	3544	3374	3461	3522	3487	3389	3341	3415		3448,6
Аритметичка средина		3508	3442	3539	3373	3461	3521	3484	3387	3341	3414	$\bar{X}_a =$	3447
Опсег		12	7	11	6	11	7	5	8	8	8	$\bar{R}_a =$	8,3
Б	1	3519	3454	3548	3379	3468	3527	3494	3393	3347	3420		3454,9
	2	3504	3451	3546	3369	3466	3517	3488	3383	3339	3418		3448,1
	3	3512	3448	3541	3375	3461	3523	3487	3389	3341	3415		3449,2
Аритметичка средина		3512	3451	3545	3374	3465	3522	3490	3388	3342	3418	$\bar{X}_b =$	3451
Опсег		15	6	7	10	7	10	7	10	8	5	$\bar{R}_b =$	8,5
В	1	3514	3444	3540	3376	3460	3523	3490	3387	3342	3421		3449,7
	2	3500	3455	3548	3381	3457	3526	3494	3394	3347	3416		3451,8
	3	3512	3448	3544	3375	3462	3528	3487	3390	3349	3412		3450,7
Аритметичка средина		3509	3449	3544	3377	3460	3526	3490	3390	3346	3416	$\bar{X}_c =$	3451
Опсег		14	11	8	6	5	5	7	7	7	9	$\bar{R}_c =$	7,9
Аритметичка средина на примерок		3509	3447	3543	3375	3462	3523	3488	3389	3343	3416	$\bar{\bar{X}} =$ $R_p =$	3449 199
$\bar{\bar{R}} = ([\bar{R}_a = 8,3] + [\bar{R}_b = 8,5] + [\bar{R}_c = 7,9])/3 = 8,23$												$\bar{\bar{R}}$	8,23
$\bar{X}_{DIFF} = [Max \bar{X} = 3451] - [Min \bar{X} = 3447] = 0,004$													
$UCL_R = [\bar{\bar{R}} = 8,23] \cdot [D_4 = 2,58] = 21,2$													
$D_4 = 2,58$ за 3 повторливи мерења. UCL_R е граница на индивидуалните опсези													

Табела 8.5. Студија за повторливост и репродуктивност во процесни мерења

Извештај за студијата за повторливост и репродуктивност			
Име и бр. на делот:	Мерен инструмент:	Дата:	
Карактеристики:	Студија Бр.:	Изработил:	
Спецификации:	Студија		
Од табела 8.3	$\bar{R}=8,23$	$\bar{X}_{DIFF}=0,004$	$R_p=199$
Анализа на мерењата			% Вкупна варијација (TV)
Repeatability – Варијација на опрема (EV): $EV = \bar{R} \cdot K_1$ $= 8,23 \cdot 0,5908$ $= 4,862$			$\%EV = 100 \cdot [EV/TV]$ $= 100 \cdot [4,862/ 62,79]$ $= 7,74 \%$
K_1 зависи од бројот на мерења во студијата.		Мерење	
		2	
		3	
Reproducibility – Варијации на оценувач (AV): $AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)^2 - (EV^2/(nr))}$ $= \sqrt{(0,004 \cdot 0,5231)^2 - (4,862^2/10 \cdot 3)}$ $= 1,8368$ K_2 зависи од бројот на оценувачи			$\%AV = 100 \cdot [AV/TV]$ $= 100 \cdot [0,887/ 62,79]$ $= 2,92 \%$
п-примероци		Оценувачи	
г- број на мерења		2	
		3	
Студија за повторливост и репродуктивност: $GRR = \sqrt{(EV^2 + AV^2)}$ $= \sqrt{(4,862^2 + 1,8368^2)}$ $= 5,1996$			$\%GRR = 100 \cdot [GRR/TV]$ $= 100 \cdot [5,1996/62,79]$ $= 8,26 \%$
		Делови	
		2	
		3	
Варијација од примерок до примерок (PV): $PV = R_p \cdot K_3$ $= 62,6054$			$\%PV = 100 \cdot [PV/TV]$ $= 100 \cdot [62,61/ 62,79]$ $= 99,71 \%$
		4	
		5	
		6	
Вкупна варијација (TV): $TV = \sqrt{(GRR^2 + PV^2)}$ $= \sqrt{(4,94^2 + 62,60^2)}$ $= 62,79$			$Ndc = 1,41 \cdot [PV/GRR]$ $= 1,41 \cdot [62,61/ 5,19]$ $= 17,001 \sim 17$
		7	
		8	
		9	
		10	

Собраните податоци во Табела 8.4 и Табела 8.5 обезбедуваат метод за нумеричка анализа на податоците од истражувањето. Овие информации треба да ги надополнат резултатите добиени со графичката анализа прикажана од Слика 8.8 до Слика 8.16.

Компоненти на варијација: Графиконот на Слика 8.8 ги прикажува различните компоненти на варијација: % придонесот (сина), % варијација на студија (црвена) и % толеранција (жолта).



Слика 8.8. Потврда на мерниот систем (Графикон со компоненти на варијација)

Во Табела 8.6 се прикажани вредностите на студијата за повторливост и репродуктивност, на студијата за повторливост (анг. Repeatability или equipment variation - EV) и на студијата за репродуктивност (анг. Reproducibility или appraiser variation - AV).

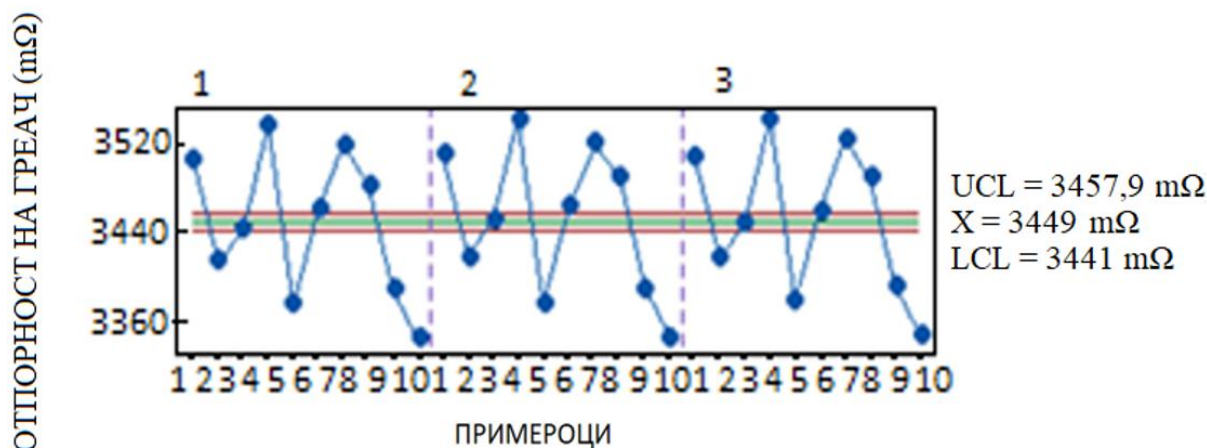
Табела 8.6. Потврда на мерниот систем: Табела со студија за повторливост и репродуктивност

	Std Var (SD)	Study Var (6 × SD)	% R&R %Study Var (%SV)	%P/T %Tolerance (SV/Toler)
Студија на Повторливост&Репрод.	5,1996	31,198	8,26	4,22
Повторливост (EV)	4,8644	29,186	7,73	3,94
Репродуктивност (AV)	1,8368	11,021	2,92	1,49
Варијации од примерок до примерок	62,7371	376,423	99,71	50,87
Вкупни варијации	62,9522	377,713	100	51,04

Бројот на различни категории изнесува 17 (види формула 15). Варијациите на мерната опрема во однос на набљудуваните варијации на процесот изнесуваат $\%R\&R = 8,26\%$, пресметката е направена според формула 4. Повторливоста на овие варијации изнесува $7,73\%$ а репродуктивноста $2,92\%$. Варијациите на мерната опрема во однос на спецификацијата изнесуваат $\%P/T = 4,24\%$, пресметката е направена според формула 3. Повторливоста на овие варијации изнесува $3,94\%$ а репродуктивноста изнесува $1,49\%$. Од анализата на мерниот систем се гледа дека варијациите на мерната опрема во однос на набљудуваните варијации на процесот како и во однос на спецификацијата се помали од 10% ($P/T\%$ и $R\&R\%$), што е карактеристика на одличен мерен систем.

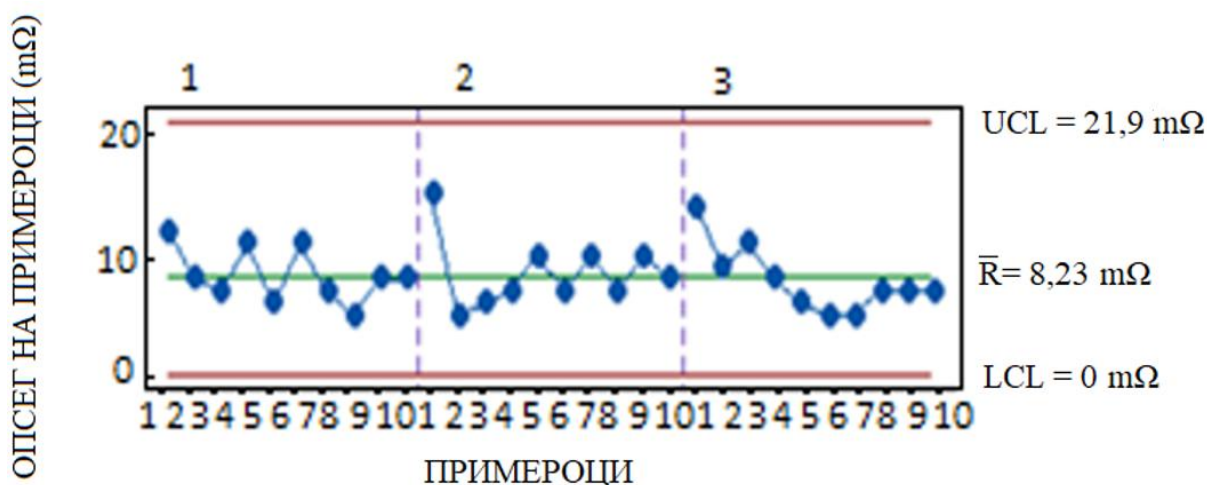
Графикон за аритметичка средина по оператори - Аритметичката средина на повеќекратните мерења од секој оценувач на секој примерок е прикажана на Слика 8.9., каде што операторите се означени со индекс 1, 2 и 3. Во овој контролен графикон мнозинството од точки се надвор од контролните граници (контролните граници UCL и LCL се означени со црвени линии на графиконот), што укажува на поголеми варијации од примерок до примерок (вистински варијации на процесот), што е посакувано во споредба со варијациите на мерниот систем. Обликот на графиконите помеѓу оценувачите 1, 2 и 3 е сличен што укажува на добра репродуктивност т.е добра варијабилност помеѓу оценувачите (анг. appraiser variations AV). Резултатите од

графиконот даваат индикација за „употребливост“ на системот за мерење. Формулите и калкулациите за UCL, LCL и $\bar{X}$ се прикажани во Табела 8.4.



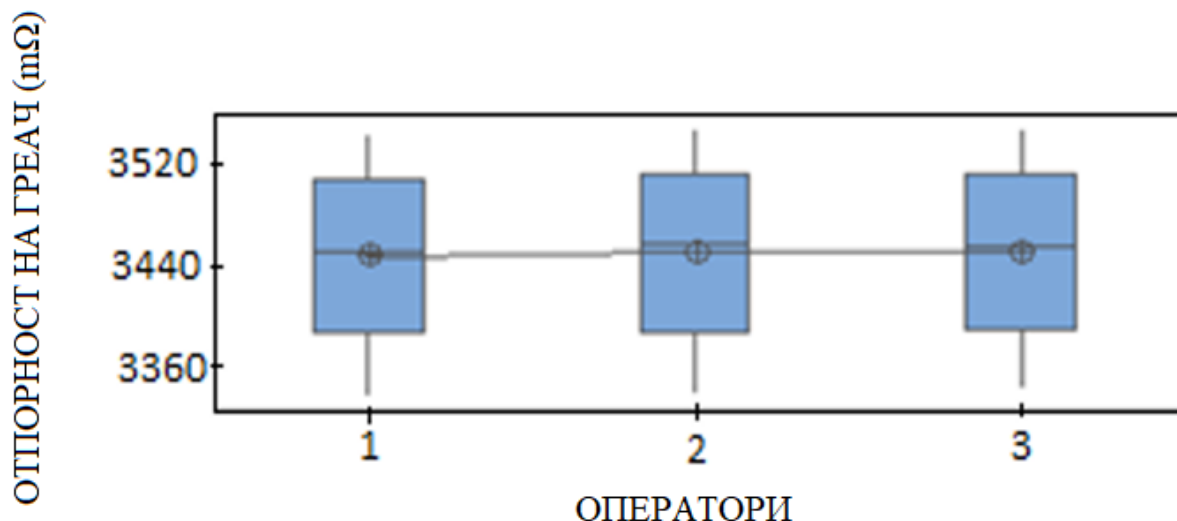
Слика 8.9. Потврда на мерниот систем - графикон за аритметичка средина по оператори

Графикон со опсег по оператори - Графиконот со опсег по оператори е прикажан на Слика 8.10. Графиконот е во контрола, што значи дека повторливоста или варијациите на опремата (EV) се добри. Во рамките на контролните граници имаме најмалку 5 мерења што индицираат соодветна резолуција. На графиконот се гледа дека сите опсези се во контрола, што значи дека сите оценувачи го вршат мерењето на ист начин т.е користат ист метод на мерење. Графиконот покажува дека системот на мерење не е чувствителен на техниката на оценување на операторите. Формулите и калкулациите за UCL, LCL и $\bar{R}$ се прикажани во Табела 8.4.



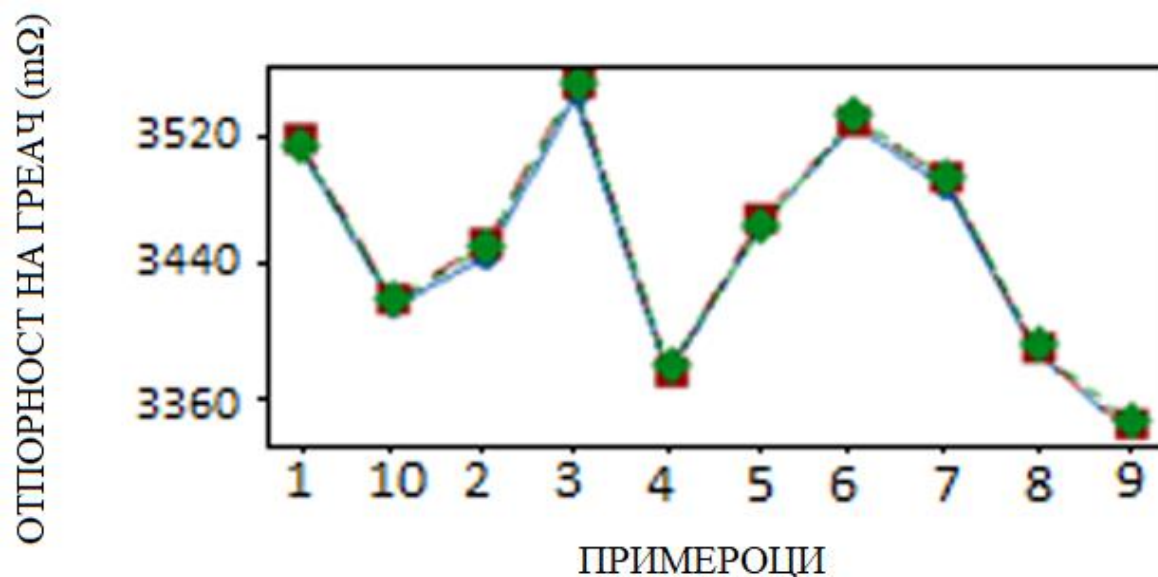
Слика 8.10. Потврда на мерниот систем - графикон со опсег по оператори

Графикон за мерења по оператори - Графиконот за мерења по оператори е прикажан на Слика 8.11. На графиконот се гледа тесна хоризонтална линија помеѓу операторите што укажува на тоа дека просечното мерење од секој оператор е речиси идентично. Ова типично е случај кога се користи автоматска мерна опрема и кога техниката на оценувачот не влијае на мерниот резултат.



Слика 8.11. Потврда на мерниот систем – графикон за мерења по оператори

Графикон со интеракција помеѓу примероци и оператори - Графиконот со интеракција помеѓу примероци и оператори е прикажан на Слика 8.12, каде што може да се види дека линиите што ги поврзуваат 10-те мерења од секој оператор се слични т.е дека операторите мерат слично. Ова значи дека операторите не додаваат отстапувања при мерењето.



Слика 8.12. Потврда на мерниот систем – графикон на интеракција помеѓу примероци и оператори

Заклучокот од спроведената анализа на мерниот систем е дека набљудуваните варијации на процесот (TV) не се предизвикани од варијациите на мерниот систем (GR&R) туку се резултат на вистинските варијации на процесот (PV). Операторите не влијаат врз резултатите од мерењата, бидејќи процесот на мерење е целосно автоматизиран. Затоа во понатамошниот дел од истражувањето фокусот ќе биде насочен кон намалување на вистинските варијации на процесот PV и зголемување на индексот на способност на процесот $C_{pk} > 1,33$, како стандард во автомобилската индустрија.

8.2.4 Шест Сигма - Анализа на перформансите на процесот со SPC студија

Од прибраните податоци може да се пресмета основната линија на процесот, и тоа: способност на процесот C_p , индекс на способност на процесот C_{pk} , перформанс на процесот Pp , индекс на перформанс на процесот Ppk и стапката на неусогласеност изразена во dpmo .

Изборот на контролен графикон зависи од природата на процесот и од големината на примероци во подгрупата (Слика 3.3). Во нашето истражување користиме електричен тестер што врши 100% проверка на секој примерок, што значи дека бројот на примероци во подгрупата е 1. Кога бројот на примероци во подгрупата изнесува 1 тогаш се користи парот од графикони за индивидуални отчитувања и подвижен опсег (I,MR). За графичка илустрација на основната линија во трудот направени се 400 мерења.

Вредностите за долната граница на спецификацијата (LSL) и горната граница на спецификацијата (USL) се зададени од клиентот:

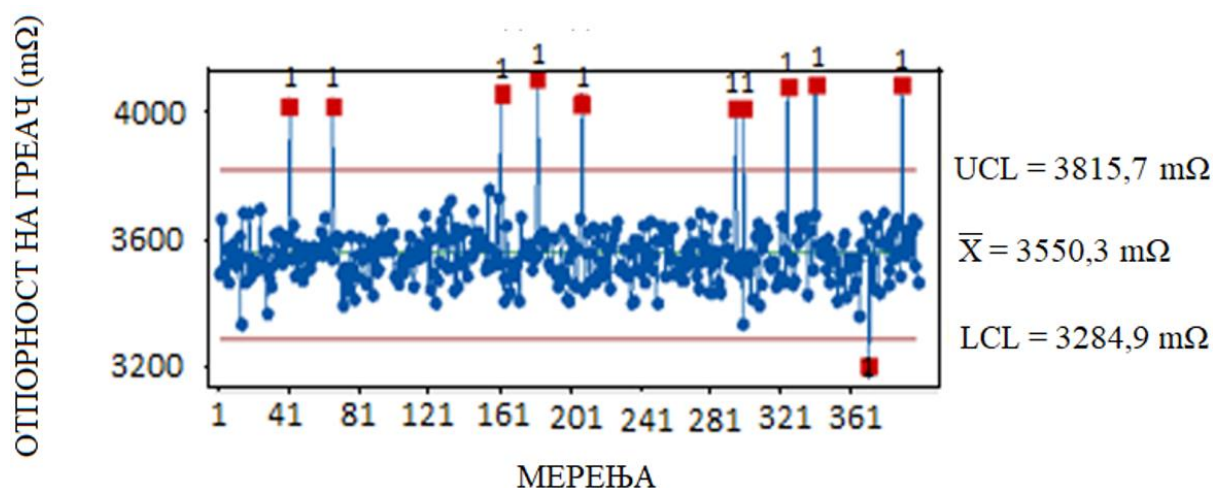
$$LSL = 3330 \text{ m}\Omega$$

$$USL = 4070 \text{ m}\Omega$$

Аритметичката средина на индивидуалните вредности изнесува $\bar{X} = 3550,3 \text{ m}\Omega$. Горната контролна граница (UCL_X) и долната контролна граница (LCL_X) во графиконот за индивидуални отчитувања се пресметуваат според формула 13 во поглавје 3.3.3:

$$UCL_X = 3815,72 \text{ m}\Omega$$

$$LCL_X = 3284,87 \text{ m}\Omega$$



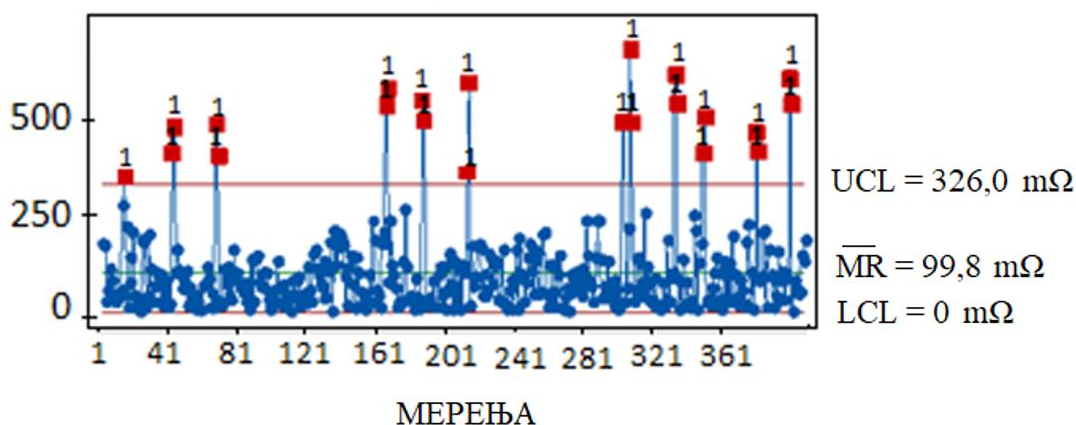
Слика 8.13. Графикон со индивидуални отчитувања - I (моментален процес)

Просечниот подвижен опсег изнесува $\overline{MR} = 99,785 \text{ m}\Omega$ (види формула 10). Горната контролна граница (UCL_R) и долната контролна граница (LCL_R) во графиконот на подвижен опсег се пресметуваат според формула 14 во поглавје 3.3.3:

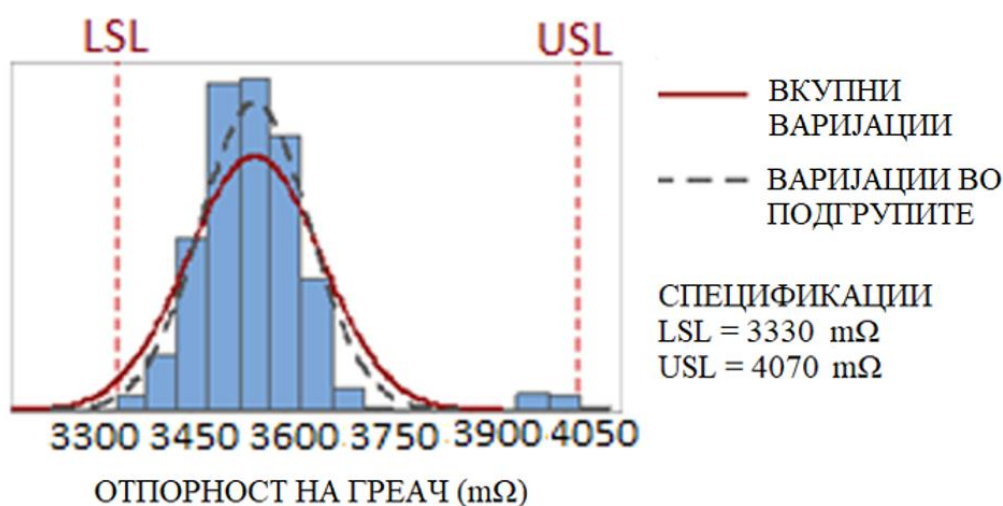
$$UCL_R = 325,997 \text{ m}\Omega$$

$$LCL_R = 0 \text{ m}\Omega$$

ОТПОРНОСТ НА ГРЕАЧ (mΩ)



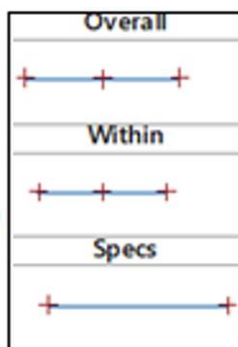
Слика 8.14. Графикон на подвижен опсег - MR (моментален процес)



Слика 8.15. Хистограм на способност (моментален процес)

ВАРИЈАЦИИ ВО ПОДГРУПИТЕ

StDev 88,46
Cp 1,39
Cpk 0,83
PPM 6380,39



ВКУПНИ ВАРИЈАЦИИ

StDev 106,7
Pp 1,16
Ppk 0,69
Cpm *
PPM 19476,19

Слика 8.16. Способност на процес и перформанс на процес (моментален процес)

Од Слика 8.16 може да се види дека стандардната девијација (StDev) изнесува $\hat{\sigma}_c = 88,461 \text{ m}\Omega$ (види формула 15), и ги зема во предвид само варијациите во подгрупите.

$C_p = 1,39$ (види формула 17). Ги зема во предвид само варијациите во подгрупите. Не го зема во предвид центрирањето на процесот.

$C_{pk} = \min\{1,95; 0,83\} = 0,83$ (види формула 18 и формула 19). Ги зема во предвид само варијациите во подгрупите. Го зема во предвид и центрирањето на процесот.

Стандардната девијација по примерок изнесува $s = 106,7 \text{ m}\Omega$ (види формула 16). Ги зема во предвид вкупните варијации во, и помеѓу подгрупите. Ги зема во предвид сите отчитувања.

$Pp = 1,16$ (види формула 20). Ги зема во предвид вкупните варијации во, и помеѓу подгрупите. Не го зема во предвид центрирањето на процесот.

$Pp_k = \min \{1,62; 0,664\} = 0,69$ (види формула 21 и 22). Ги зема во предвид вкупните варијации во, и помеѓу подгрупите. Го зема во предвид и центрирањето на процесот.

Од извршената анализа на процес може да се добијат 3 заклучоци:

1. Способност на процесот изнесува $C_p = 1,39 (>1,33)$ што значи дека ширината на процесот е прифатлива според автомобилските стандарди, но $Cp_k = 0,83 (<1,33)$ што значи дека локацијата на процесот не е центрирана. Од анализата на Слика 8.15 може да се види дека локацијата на процесот е изместена поблиску до долната граница на спецификацијата.
2. Од Слика 8.13 може да се види дека едно мерење е под долна контролна граница, што укажува на присуство на специјални причини во процесот. Од Слика 8.16 може да се види дека $Cp_k = 0,83$ и се разликува од $Pp_k = 0,69$, доколку процесот е во статистичка контрола овие две вредности треба да се исти (варијациите помеѓу подгрупите треба да се 0).
3. Од Слика 8.13 може да се види дека 10 мерења се над горната контролна граница што укажува на присуство на специјални причини во процесот, за оваа појава.

8.3 Фаза на анализирање

Во фазата на анализирање во новиот модел (Слика 7.3) е даден осврт на анализа на изворните причини за појава на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација“. Фокусот е насочен кон анализа на изворните причини за појава на трите девијации:

1. Изместување на нормалната дистрибуција од центарот ($C_p = 1,39; Cp_k = 0,83$), поблиску до долната граница на спецификацијата (Слика 8.15).
2. Појава на специјални причини кои доведуваат една точка да е под долната контролна граница (Слика 8.13).
3. Појава на специјални причини кои доведуваат 10 точки да се над горната контролна граница (Слика 8.13).

За анализа на изворните причини за појава на овие девијации се користат следните методи: мапирање на променливи на процес, причинско-последичен дијаграм, причинско-последична матрица, Парето дијаграм и анализа на модови на грешки и нивен ефект.

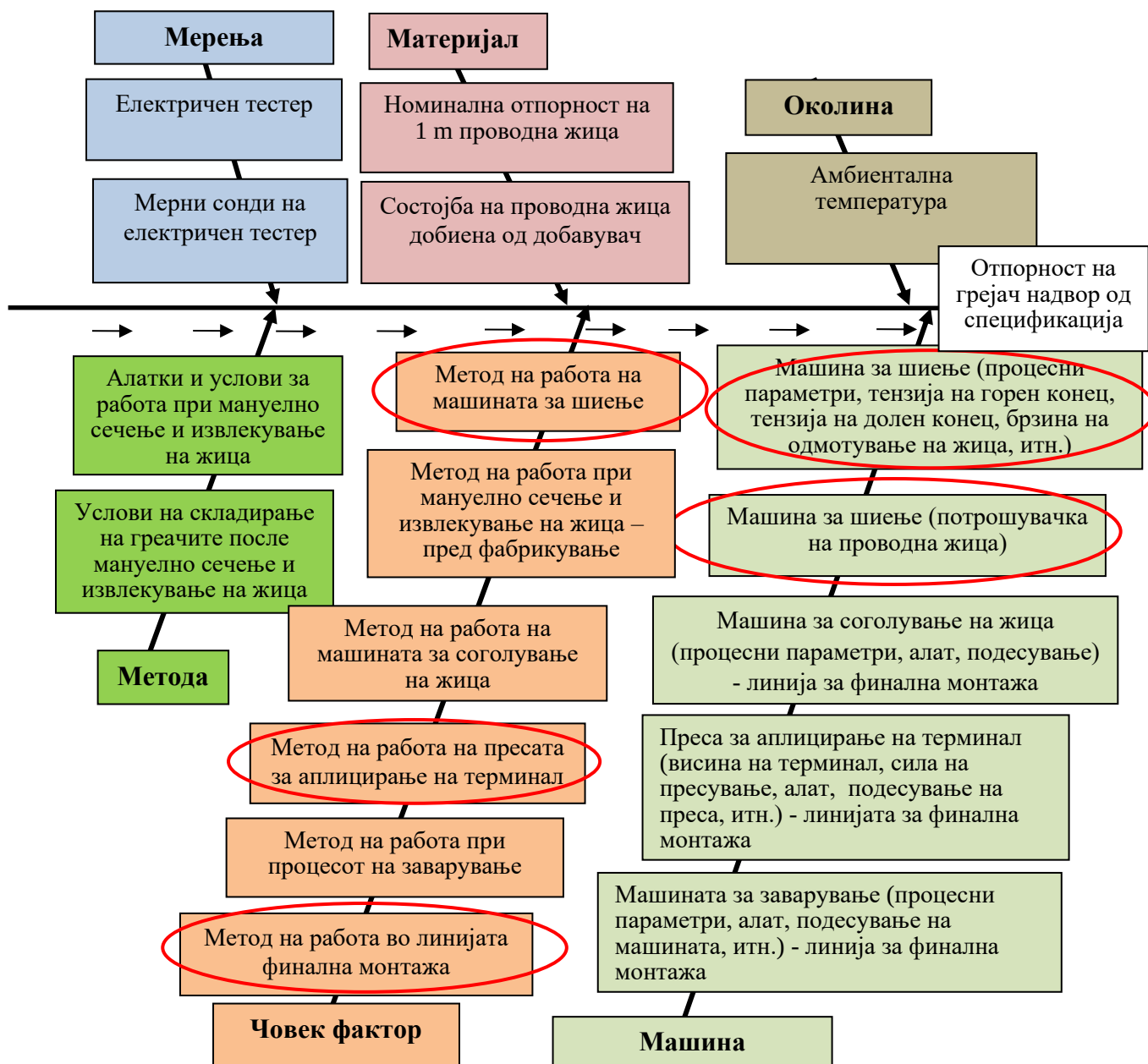
8.3.1 Шест Сигма - Мапирање на променливи на процесот

Според чекорите на процесот кои се прикажани на блок-дијаграмот на Слика 8.2 направено е мапирање на сите променливи во производниот процес каде што може да настане грешката отпорност на греач надвор од спецификација. Резултатите од мапирањето на променливите се прикажани во Табела 8.7.

Табела 8.7. Мапирање на променливите на процесот

Влезни променливи (X)	Чекори во процесот	Излезен резултат (Y)
Номинална отпорност на 1m должен проводна жица	Влезна контрола	Отпорност на греач надвор од спецификација
Состојба на проводната жица добиена од добавувач		
Машина за шиење (процесни параметри, тензија на горен конец, тензија на долен конец, брзина на одмотување на жица, итн.)	Шиење	
Метод на работа на машината за шиење		
Дизајн на производ		
Премотување на проводна жица пред процесот на шиење		
Метод на работа при мануелно сечење и извлекување на жица	Пред-монтажа	
Алатки и услови за работа при мануелно сечење и извлекување на жица		
Услови на складирање на греачите после процесот на мануелно фабрикување		
Машина за соголнување на жица (процесни параметри, алат, подесување на машината, итн.)	Соголнување на S-Icu жица	
Метод на работа на машината за соголнување на жица		
Метод на работа на пресата за аплицирање на терминал	Поврзување на I-Cu жица со кабелски приклучок	
Преса за аплицирање на терминал (процесни параметри, алат, подесување на преса, итн.)		
Машина за заварување (процесни параметри, алат, подесување на машина, итн.)	Заварување I-Cu wire	
Метод на работа на машината за заварување		
Метод на работа во линијата за финална монтажа		
Електричен тестер	Финална монтажа/инспекција	
Мерни сонди на електричен тестер		

Во дијаграмот на Слика 8.17 се прикажани сите потенцијални причини кои може да доведат до појава на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација“. Причините кои имаат најголема веројатност да ја предизвикаат грешката се означени со црвено.



Слика 8.17. Причинско - последичен дијаграм

Во причинско-последичната матрица прикажана во Табела 8.8 се поврзани влезните променливи (X) со излезниот резултат (Y). Рангирањето се врши според големината на влијание на X врз Y, согласно следните критериуми:

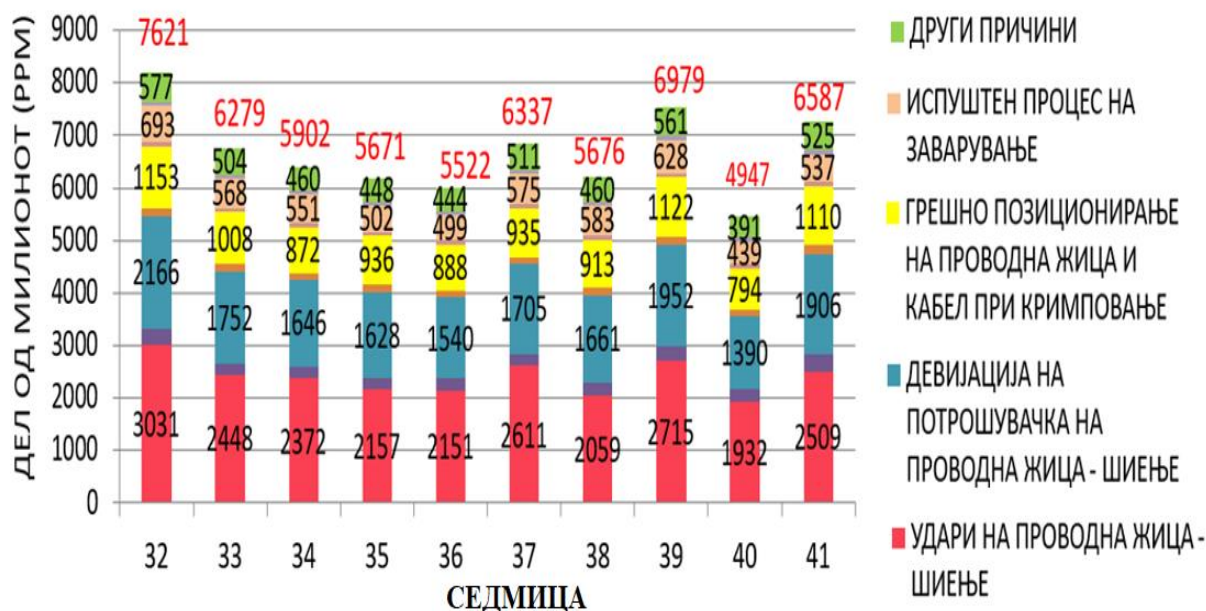
- Рангирање со 1: Во случај кога X незначително влијае на Y.
- Рангирање со 3: Во случај кога X значително влијае на Y.
- Рангирање со 9: Во случај кога X директно и силно влијае на Y.

Табела 8.8. Причинско - последична матрица

	Чекори во процесот на производство	Влезни променливи (X)	Рангирање (Y)	Приоритет на настаните
1	Шиење	Машина за шиење (процесни параметри, тензија на горен конец, тензија на долен конец, брзина на одмотување на жица, итн)	9	90
2	Шиење	Метод на работа на машината за шиење	9	90
3	Поврзување на проводник со кабел	Метод на работа на пресата за аплицирање на терминал	9	90
4	Заварување	Метод на работа во линијата за финална монтажа	9	90
5	Влезна контрола	Номинална отпорност на 1m должен проводна жица	3	30
6	Влезна контрола	Состојба на проводната жица добиена од добавувач	3	30
7	Шиење	Премотување на проводна жица пред процесот на шиење	3	30
8	Шиење	Дизајн на производ	3	30
9	Пред - фабрикување	Метод на работа при мануелно сечење и извлекување на жица	3	30
10	Пред - фабрикување	Алатки и услови за работа при мануелно сечење и извлекување на жица	3	30
11	Пред - фабрикување	Услови на складирање на греачите после мануелно сечење и извлекување на жица	3	30
12	Соголување на жица	Машина за соголување на жица (процесни параметри, алат, подесување на машината)	3	30
13	Соголување на жица	Метод на работа на машината за соголување на жица	3	30
14	Заварување	Метод на работа на машината за заварување	3	30
15	Заварување	Машина за заварување (процесни параметри, алат, подесување на машина)	3	30
16	Финална монтажа /инспекција	Електричниот тестер	3	30
17	Финална монтажа /инспекција	Мерни сонди на електричниот тестер	3	30
18	Поврзување на проводник со кабел	Преса за аплицирање на терминал (процесни параметри, алат, подесување на преса, итн.)	1	10

8.3.2 Шест Сигма – Анализа на податоците и утврдување на изворни причини за појава на грешките

Врз основа на спроведените дневни анализи во период од една година, на графиконот на Слика 8.18 се рангирани причините со најголемо влијание за појава на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација”.



Слика 8.18. Причини за појава на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација”

Од графиконот може да се види дека:

1. Во 39 % од вкупно 6.400 дрто, причина за појава на грешката е удар од игла на 1 m проводна жица за време на процесот на шиене. Проводникот кој се инсталира во греачите за седишта се состои од паралелни бакарни филаменти кои се изолирани меѓусебно. Доколку иглата ги оштети бакарните филаменти во процесот на шиене, тоа ќе предизвика зголемување на отпорноста на проводникот.

Оваа изворна причина влијае за појава на мерења над горната контролна граница (Слика 8.13).

2. Во 28 % од вкупно 6.400 дрто, причина за појава на грешката е варијација на потрошувачката на проводната жица во однос на предвидениот норматив во дизајнот на производот. Најчесто, должината на потрошената проводна жица во процесот на шиене е помала од нормативот што резултира со отпорност на греач под долна контролна граница.

Оваа изворна причина предизвикува поместување на локацијата на процесот поблиску до долната граница на спецификацијата (Слика 8.15) и е причина што едно мерење е под долната контролна граница (Слика 8.13).

3. Во 16 % од вкупно 6.400 дрто, причина за појава на грешката е погрешно позиционирање на проводната жица и кабелскиот приклучок на пресата за аплицирање на терминал, во линијата за финална монтажа. Ако паралелните бакарни филаменти за време на поврзувањето на проводникот и кабелскиот

приклучок не се зафатат добро, тоа ќе придонесе за лош контакт и зголемена отпорност на греачот.

Оваа изворна причина влијае за појава на мерења над горната контролна граница (Слика 8.13).

4. Во 9 % од вкупно 6.400 дрпто, причина за појава на грешката е испуштање на процесот на заварување во линијата за финална монтажа. Целта на процесот на заварување е да го стопи слојот од изолација помеѓу бакарните филаменти и да формира добар контакт и спроводливост. Доколку се испушти заварувањето како процесен чекор, тоа ќе предизвика зголемена отпорност на греачот за седишта.

Оваа изворна причина влијае за појава на мерења над горната контролна граница (Слика 8.13).

5. Во 8 % од грешките „отпорност на греач надвор од спецификација“, причините се различни:
- Грешен дизајн на производот и помал предвиден норматив на потрошувачка на проводната жица.
 - Номиналната отпорност на проводната жица отстапува од спецификацијата на добавувачот.
 - Неусогласени алатки и работни услови во процесот на пред - фабрикување.
 - Оштетување на проводната жица за време на сечење/обликување на финалниот производ.
 - Погрешно манипулирање на операторот при процесот на заварување.

8.3.3 Шест Сигма - Анализа на модовите на дефекти и нивниот ефект

Следно во трудот е да се направи проценка на ризик на сите чекори во процесот на производство на греачи за седишта, каде што постои веројатност да настане грешката „отпорност на греач надвор од спецификација“. Чекорите во процесот на производство на греачи за седишта се прикажани на блок-дијаграмот на Слика 8.2.

Во Табела 8.9 е прикажана анализата на модови на дефекти и нивниот ефект во моменталниот процес на шиене, а во Табела 8.10 анализата на модови на дефекти и нивниот ефект во моменталниот процес на финална монтажа. При анализата на идентификуваните причини за појава на грешки кои се елаборирани во поглавје 8.3.2, најпрвен треба да се провери дали овие причини се веќе вклучени во анализата на ризици. Доколку не се вклучени треба да се вклучат, доколку се вклучени тоа укажува на потребата од ревидирање на постоечките акции или воведување на нови акции за да се намали ризикот за нивна појава. Новите предвидени корективни акции се означени со црвено во Табела 8.9 за процесот на шиене и во Табела 8.10 за процесот на финална монтажа.

Табела 8.9. Анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на шиене (моментален процес)

Функција на процесот/ Барања	Потенцијален режим на грешка	Потенцијални последици од грешката	Сериозност	Потенцијални причини за појава на грешки	Појава	Моментална контрола на процесот	Детекција	RPN	Препорачани акции
Процес на шиене - обезбеди соодветен материјал - обезбеди точна патека за шиене - обезбеди точна позиција на проводникот - обезбеди точни димензии на моделот за шиене - обезбеди правилна отпорност - обезбеди да нема контаминации	Отпорност на проводна жица - надвор од спецификација (под или над)	Отпорност на греач надвор од спецификација (7)	7	Тензија на жица премногу високо/ниско	6	P ⁽⁷⁾ : листа со параметри на машина за шиене (5)	4	168	D: Систем за контрола на потрошувачка на проводна жица
						D ⁽⁸⁾ : 100% проверка на отпорност на електричен тестер (4)			
		Издржливост/век на траење на греач (7)				D: визуелна проверка (8)			
		Изгубена функција на греачот (7)				D: инспекција на прво парче после шиене (5)			
						D: инспекција на прво парче на електричен тестер (4)			
						P: механизам за дотур на проводна жица при процес на шиене (5)			
						P: стандардизиран процес (5)			

⁷ P се однесува на контролен план за превенција⁸ D се однесува на контролен план за детектирање

				Тензија на конец премногу високо/ниско	6	P: листа со параметри (5) D: 100% проверка на отпорност на електричен тестер (4) D: визуелна проверка (8) D: инспекција на прво парче после шиене (5) D: инспекција на прво парче на ел.тестер (4) P: уред за снабдување на конец (5) P: стандардизиран процес (5)	4	168	D: Систем за контрола на потрошувачка на проводна жица
	Отпорност на проводна жица - над спецификација	Отпорност на греач надвор од спец. (7) Издржливост/ век на траење на греач (7) Изгубена функција на греачот (7) Ризик од струја на кратка врска (9)	9	Висок број на удари од игла на 1 (m) проводна жица	7	D: 100% проверка на отпорност на електричниот тестер (4) D: инспекција на прво парче на електричен тестер (4) D: визуелна проверка (8) D: инспекција на прво парче после шиене (5) P: стандардизиран процес (5)	4	252	D: Систем за детекција на удар од игла D: PLC систем што ја блокира машината за шиене доколку системот за детекција на удар од игла не е активиран

Табела 8.10. Анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на Финална Монтажа (моментален процес)

Функција на процесот/ Барања	Потенцијален режим на грешка	Потенцијални последици од грешката	Сериозност	Потенцијални причини за појава на грешки	Појава	Моментална контрола на процесот	Детекција	RPN	Препорачани акции
Поврзување на I-Cu бакарна жица со кабелски приклучок	Дел од филаментите на проводникот не се зафатени во терминалот	Силата на извлекување на филаментите од терминалот е под спец. (8)	8	Грешка на оператор, погрешно позиционирање на проводник	4	D: CFA - систем за мониторинг на силата на аплицирање на терминалот (3)	3	96	Р: Камера за позиционирање на проводникот при поврзување со кабелскиот приклучок
					D: визуелна проверка (8)				
		Издржливост/ век на траење на греач (7)		Погрешно подесување на пресата, грешна висина на терминалот	3	D: CFA (3)	3	72	
						D: визуелна проверка (8)			
						D: мерење на сила на извлекување (5)			
						D: напречен пресек на терминал (5)			
		Изгубена функција на греачот (7)		Поставување на грешен алат	2	D: CFA (3)	3	48	
						D: визуелна проверка (8)			
		D: мерење на сила на извлекување (5)							
		D: напречен пресек на терминал (5)							
				P: стандардизиран процес (5)					
	Испуштен процесен чекор на заварување	Изгубена функција на греач (7)	8	Грешка на оператор, испуштен чекор	4	D: визуелна проверка (8)	4	128	Р: PLC систем кој спречува испуштен процес на заварување
						D: 100% проверка на отпорност на ел. тестер (4)			

8.4 Фаза на подобрување

Оваа фаза ја следи структурата на новиот модел прикажан на блок-дијаграмот на Слика 7.4, каде што ќе се генерираат потенцијални решенија за елиминирање на физичките препреки во производството преку дизајн на нов тек на вредности и намалување на варијациите на процесите. Дизајнот на новиот тек на вредности се состои од следните активности:

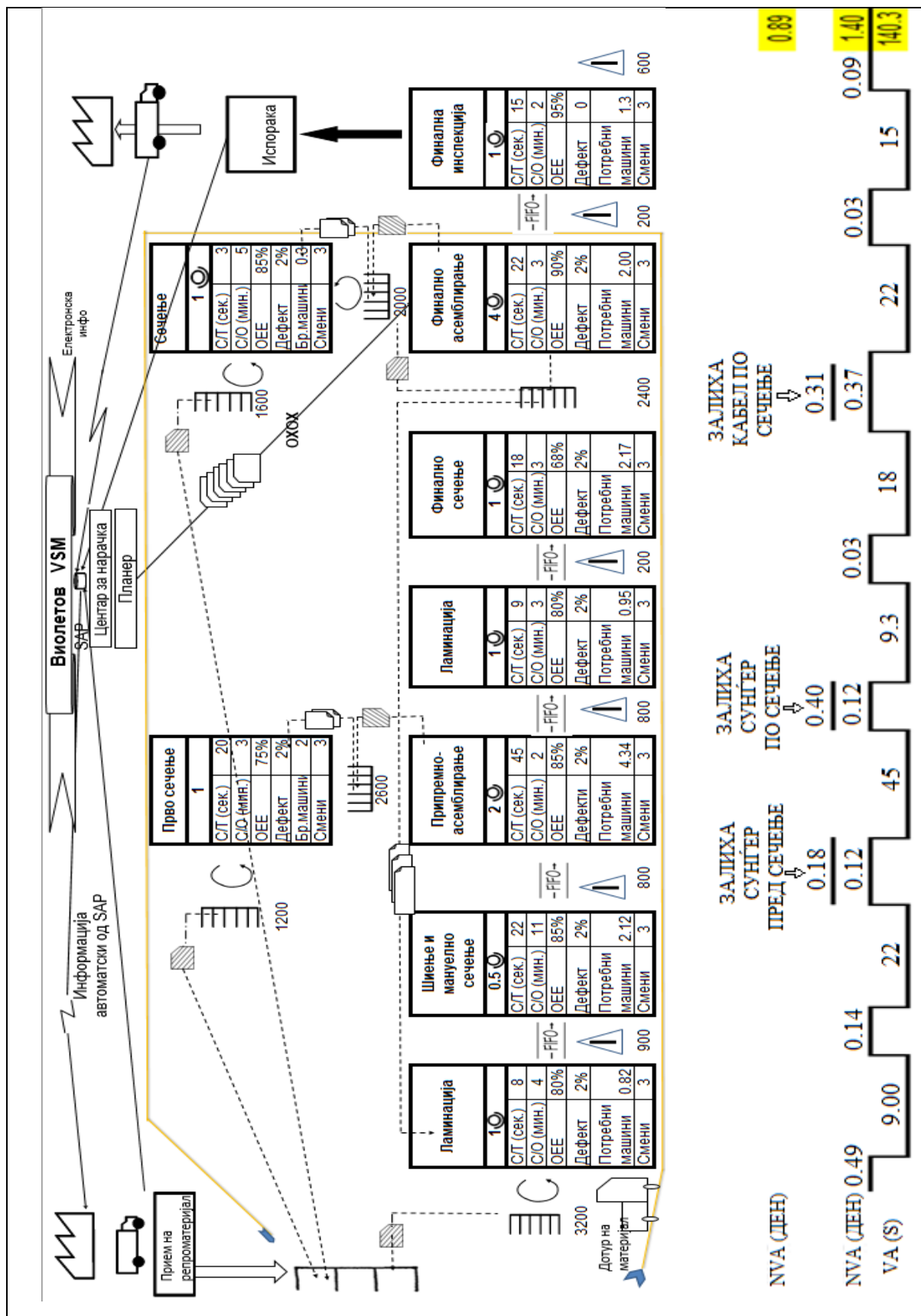
1. Дефинирање на групи на производи според сличност на процесите.
2. Дизајн на 3 нови тек на вредности, согласно дефинираните групи на производи.
3. Дефинирање на такт времето за секој тек на вредности.
4. Имплементирање на континуирано производство, секаде каде што тоа е можно.
5. Имплементирање на супермаркети и систем на повлекување на материјали.
6. Дефинирање на пејсмејкер процес.
7. Порамнување на планот за производство по модел и волумен.
8. Подобрувања на процесите за да може новиот тек на вредности да функционира согласно идниот дизајн: намалување на време на промена на модел, имплементирање на вкупно продуктивно одржување, визуелизација и Андон систем, Jidoka и контрола на квалитетот на самата работна станица.

Потенцијални решенија за намалување на варијациите на процесот (Шест Сигма):

1. Дизајн на експерименти за да се утврди најдобриот сооднос на параметри на машината за шиене со цел да се намалат ударите од игла – процес шиене.
2. Инсталирање на систем за детекција на удар од игла – процес шиене.
3. Автоматска проверка дали системот за детекција на удар е активиран – процес шиене.
4. Систем за контрола на потрошувачката на проводна жица – процес шиене.
5. Систем за контрола на позиција на проводна жица при процесот на поврзување со кабелскиот приклучок – финална монтажа.
6. Систем за контрола на редослед на операции во линијата - финална монтажа.

8.4.1 Lean производство - Дизајн на нов тек на вредности

Дизајнот на новиот тек на вредности започнува со калкулација на потребната опрема за планираното производство. Во зависност од сличноста на производните процеси и заеднички користената опрема дефинирани се 3 фамилии на производи т.е 3 тек на вредности. Секој тек на вредности има фиксна опрема што не може да се споделува со други фамилии на производи. Недостаток на фиксната опрема е тоа што се намалува флексибилноста на производството. Придобивките од друга страна се многу поголеми од аспект на зголемено чувство за итност при решавање на проблемите, кратко време на реакција и зголемена креативност на луѓето со што се постигнува континуирано подобрување на процесите и развој на луѓето. За илустрација, на блок-дијаграмот на Слика 8.19 е прикажан дизајнот на виолетовиот тек на вредности (виолетовиот тек на вредности е прикажан на Слика 8.3).



Слика 8.19. Дизајн на виолетовиот тек на вредности

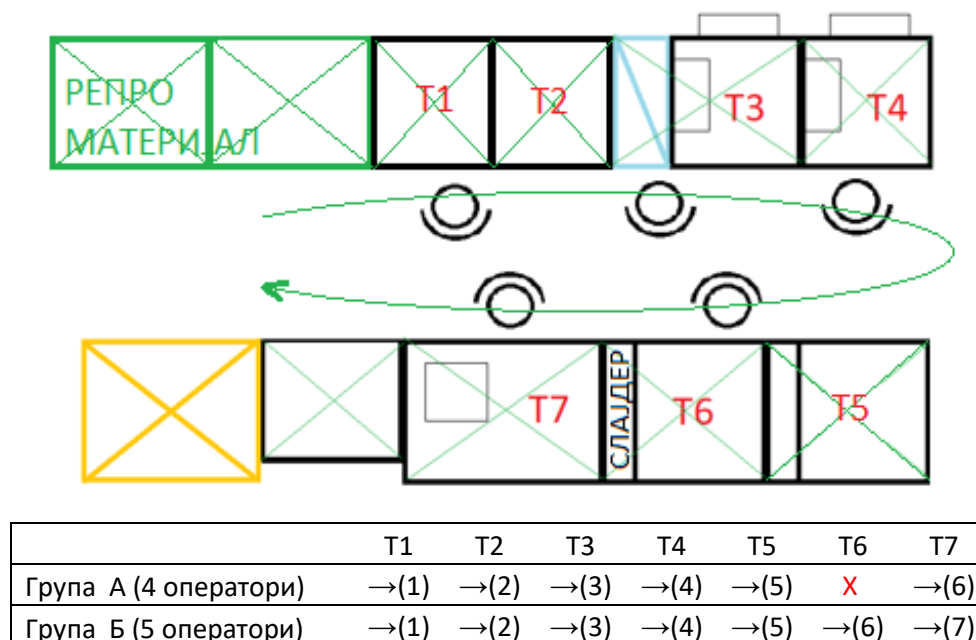
При мапирањето на новиот тек на вредности постои логичен редослед на подобрувањата кои треба да се имплементираат.

Дефинирање на такт времето. Пред да се започне со дизајнот на процесите и на новиот тек на вредности потребно е да се пресмета такт времето на производство согласно побарувањата од клиентите. Според такт времето се дизајнира времето на циклус на процесите во новиот тек на вредности, со цел да се избегне прекумерно производство или пак застои поради недостаток на материјал помеѓу процесите. Калкулацијата за такт време е прикажана во Табела 8.2.

Креирање на континуиран тек на производство. Формирани се ќелии со интегрирање на линиите за производство на кабел и на линиите за финална монтажа. Во зависност од времето на циклус на производство и времето потребно за промена на модел, формирани се 3 типа на ќелии:

- Целосно интегрирани ќелии во форма на буквата U. Ова е можно кога времето на циклус на производство на линијата за финална монтажа и на линијата за производство на кабел е приближно исто. Дополнително, времето потребно за промена на модел кај двете линии треба да е приближно исто. Во интегрираната линија имплементиран е ротирачки режим на производство, каде што операторите ротираат и производството е парче-по-парче (Слика 8.20).
- Полу-интегрирани ќелии во форма на двојно U. Ова е можно кога времето на циклус на производство на линијата за производство на кабел е повисоко од времето на линијата за финална монтажа и капацитетот на линијата за кабли може да се регулира со промена на бројот на оператори во самата линија. Времето потребно за промена на модел кај двете линии мора да е приближно исто. Ротацијата на операторите во линијата за производство на кабел е независна од ротацијата на операторите во линијата за финална монтажа т.е. има два независни круга на ротација. Производството се одвива парче-по-парче.
- Не-интегрирани линии кои се локациски доближени една до друга. Во овој случај, времето на циклус на производство на двете линии или времето потребно за промена на модел се разликува драстично, при што производството мора да биде пакетно. Веднаш после линијата за производство на кабел има поставено супермаркет што го диктира ритамот на производство на самата линија, согласно потрошувачката во линијата за финална монтажа.

На Слика 8.20 е даден графичкиот приказ на интегрирана линија во форма на буквата U каде што операторите заедно со производот ротираат од една работна станица на друга. Во конкретниот случај, станува збор за мешана интегрирана линија (анг. mix line) каде што се произведуваат две групи на производи, со различно такт време и различна секвенца на движење на операторите. За двете групи на производи има дефинирано комбинација на стандардизирани активности (анг. standard work combination sheet) што вклучува анализа на време на циклус на производство, секвенцата на движење на операторите и потребен број на оператори. Ова му овозможува на сменскиот лидер да провери дали има отстапување од стандардот. Ваквиот модел на линија овозможува производство на парче-по-парче, со што се елиминира залихата на полупроизвод помеѓу работните станици.



Слика 8.20. Интегрирана линија во форма на буквата U со ротирачки режим на производство

По интегрирање на линиите и имплементирање на производство парче-по-парче, секаде каде што тоа е можно, направено е балансирање на линиите, како што е прикажано:

- Одвоена е станицата за лемење од станицата за топење на изолациона цевка.
- Алатите во работните станици се поставени на дофат на операторите за да се елиминира непотребното движење.
- Отстранети се држачите за полупроизвод помеѓу работните станици со цел да се елиминира залихата помеѓу процесите и да се овозможи производство на парче-по-парче.
- Извршена е стандардизација на линијата. Сите работни станици се ергономски преработени, имаат иста локација на материјалите, иста локација на работните упатства и на цртежите. На овој начин е постигната рутински повторувачка работа на операторите што придонесува до намалување на грешките. Имплементиран е принцип на снабдување на материјалите од надворешната страна на линијата, за да не се попречува работата на операторите во самата линија. Дефиниран е систем за дополнување на материјалите со системот на две кутии, кога едната кутија ќе се испразни сигнализира потреба за дополнување. Имплементирана е визуелизација во линијата за приказ на процесните индикатори и Андон систем за ескалација.
- Модифициран е електричниот тестер со што е постигнато одвојување на работата на операторот од работата на машината. Поставен е пнеуматски цилиндер кој го фиксира греачот во тестерот што му овозможува на операторот да го постави производот и да продолжи со работа на наредната работна станица, со што се елиминира времето на празно чекање. Старт дугмето е заменето со сензор за активирање на работата на тестерот со што се намалува движењето на операторот. Со овие подобрувања времето на циклус на производство на електричниот тестер е намалено од 45 s на 5 s.
- Извршен е тренинг на операторите за да можат да работат на сите работни станици како предуслов за ротирачки режим на производство.

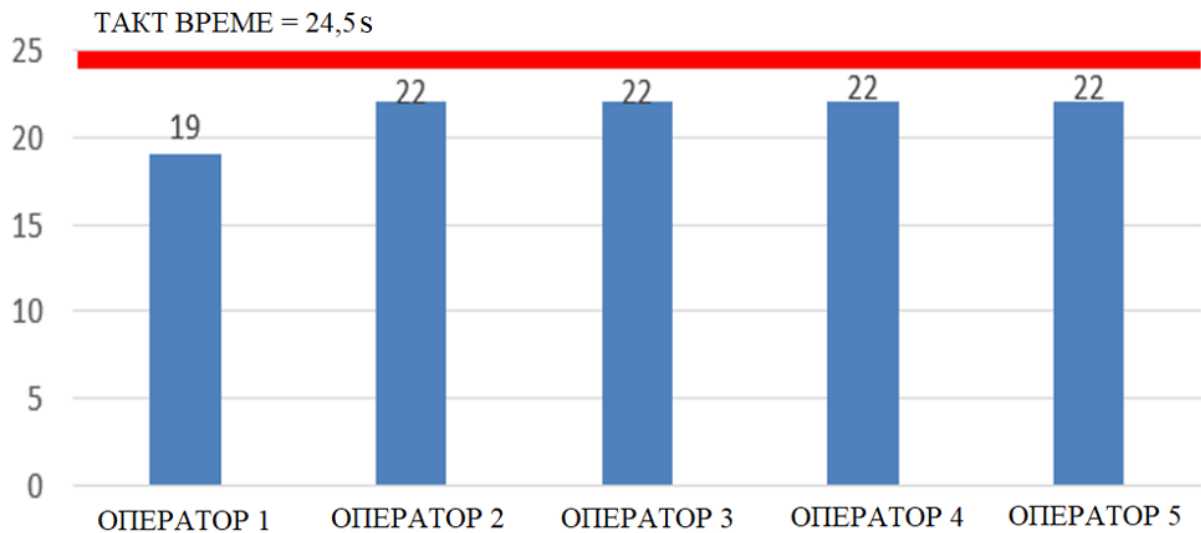
Во Табела 8.11 е прикажана анализа на времето на циклус на производство во интегрираната линија, по имплементираните подобрувања. Времето на циклус на производство после подобрувањата изнесува 108,5 s, додека пак пред подобрувањата било 119,5 s (види Табела 8.3). Потребниот број на оператори може да се пресмета кога ќе се подели времето на циклус на производство со такт времето:

$$108,5 \text{ s} / 24,5 \text{ s} = 4,42 \text{ оператори} \approx 5 \text{ оператори} \quad (25)$$

Табела 8.11. Анализа на времињата по балансирање на линијата

	Активност	Работна операција	Време (s)
Оператор 1	Поставување кабел	T1	4
	Поставување на конектор	T1	6
	Поставување на изолациона трака	T1	7
	Вадење на полупроизвод од операција	T1	2
	Вкупно		19
Оператор 2	Поставување полупроизвод	T2	4
	Поставување кабелот	T2	4
	Чистење и лепење	T2	5
	Вадење на полупроизвод од операција	T2	2
	Вкупно		15
Оператор 3	Поставување	T3	1
	Оголдување на жицата	T3	5
	Поврзување на проводник со кабелски приклучок	T3	9
	Вадење на полупроизвод од операција	T3	2
	Вкупно време на операцијата		17
Оператор 4	Поставување	T4	1
	Лемење	T4	8
	Топење изолациона цевка	T4	6
	Вадење на полупроизвод од операција	T4	1,5
	Вкупно време на операцијата		16,5
Оператор 5	Поставување	T5/T6	3
	Позиционирање на контактот	T5/T6	6
	Лепање	T5/T6	6
	Лепање на покривка	T5/T6	9
	Вадење на полупроизвод од операција	T5/T6	2
	Вкупно време (на две работни станици)		26
ОПЕРАТОР	Поставување	T7	2
	Тестирање	T7	5
	Аплицирање етикета	T7	4
	Вадење на полупроизвод од операција	T7	4
	Вкупно време на операцијата		15
Вкупно време на производство			108,5

На Слика 8.21 е прикажан графиконот за такт време/време на циклус на производство со потребниот број на оператори, по балансирање на линијата.



Слика 8.21. Такт време/време на циклус на производство по балансирање на линијата

На Слика 8.22 е прикажана споредба пред и после интегрирање на линијата. Придобивките се следни:

- Бројот на оператори е намален од 7 на 5 (со можност да се намали на 4).
- Вкупното време на производство е намалено од 119,5 s на 108,5 s.
- Капацитетот на линијата е зголемен од 120 на 144 парчиња/час (со намален број на оператори од 7 на 5). Ефикасноста по оператор е зголемена за 65%.
- Операторите се тренирани да работат на сите работни станици во линијата, со што се овозможува флексибилност и подобра реакција при промена на побарувањата од клиентот. Новите побарувања може да се постигнат со додавање или одземање на оператори во линијата.
- Одвоена е работата на операторот од работата на машината (јап. Jidoka). Со ова се елиминира времето на празно чекање на операторот да заврши машината со работа (една од 7-те загуби на Оно).
- Намалена е стапката на дефекти со примена на производство парче-по-парче наспроти пакетното производство. Детектирањето на неусогласен производ во линијата за финална монтажа се врши на последната работна станица т.е на електричниот тестер, така што при парче-по-парче производство во линијата има затекнато од 7-10 потенцијално неусогласени полупроизводи, наспроти паковно производство кога во линијата има затекнато 100 потенцијално неусогласени полупроизводи.
- Имплементиран е Андон систем за ескалација во случај на потребна поддршка при појава на дефект на машина, недостаток на репроматеријал или појава на дефектни производи. Со ова е нагласено чувството за итност при решавање на проблемите.
- Со интегрирањето на двете линии се добива заштеда на простор од 10,96 m².

Пред интеграција и балансирање	После интеграција и балансирање
34 m ²	23,04 m ²
Заштеда од 10,96 m ²	

Слика 8.22. Пилот линијата пред и после интегрирање

Супермаркети и систем за повлекување на материјалите. Следните активности се предуслов за имплементирање на систем за повлекување на метеријалите:

- Дизајн на нов тек на вредности и фамилија на производи.
- Дефинирање на текот на информации при повлекување на материјалите.
- Дефинирање на големина на пакување за транспорт на полупроизводите.
- Дефинирање на супермаркети и нивна големина.
- Пресметка на број на канбан карти.

Супермаркетите се поставени помеѓу процесите кои имаат различно време на циклус на производство и каде што не е можно да се имплементира континуиран тек на производство. Целта на супермаркетите е да го контролира производството на претходните процеси и да елиминира прекумерно производство. Прекумерното производство ги генерира сите 6 останати загуби: транспорт, залиха на полупроизвод, непотребно движење на луѓе и материјали, време на празно чекање на луѓе и машини, прекумерно процесирање и дефекти. Пресметката на потребниот простор за супермаркети е направена врз основа на времето потребно за дополнување на полупроизвод во супермаркет:

$$T_{WBZ} = T_I + T_W + T_F + T_A \quad . \quad (26)$$

каде што: T_{WBZ} е времето потребно за замена на полупроизвод во супермаркет, T_I е просечно време потребно да се извади канбан карта за производство од полна кутија и да се стави на собирното место за канбан карти, T_W е просечно време на чекање да се доврши производството на затекнат производ во редот, T_F е просечното време на производство на канбан, T_A е просечното време потребно за транспорт на произведената количина до супермаркет (Слика 8.23).

За секој полупроизвод во супермаркетот се дефинира минимална количина што ќе сигнализира почеток на производство на референтниот производот. Минималната количина се пресметува со делење на времето за замена на полупроизвод (T_{WBZ}) со такт времето, каде што за T_W се зема најдолгото можно време на производство на модел затекнат во редот на чекање. Според волуменот постојат А производи кои учествуваат со 80 % од вкупниот волумен, В производи кои учествуваат со 15 % и С производи кои учествуваат со 5 %. Во новиот дизајн на тек на вредности С производите се произведуваат по добиен налог, без да се чува залиха на супермаркет.

На овој начин е пресметана залихата во супермаркетите. После процесот на шиене и процесот на сечење има 6 часа залиха на полупроизвод, после линиите за производство на кабли има 8 часа залиха (поголемата залиха е поради подолгото време потребно за промена на модел) и пред линиите за финална монтажа има 2 часа залиха. Супермаркетите за репроматеријали пред линиите за финална монтажа користат канбан систем со две кутии за дополнување на материјалите.

Движењето на информациите при повлекување на материјалите се одвива во два канбан круга: транспортен круг и производствен круг (Слика 8.23). Во канбан транспортниот круг информацијата се движи по следниот редослед:

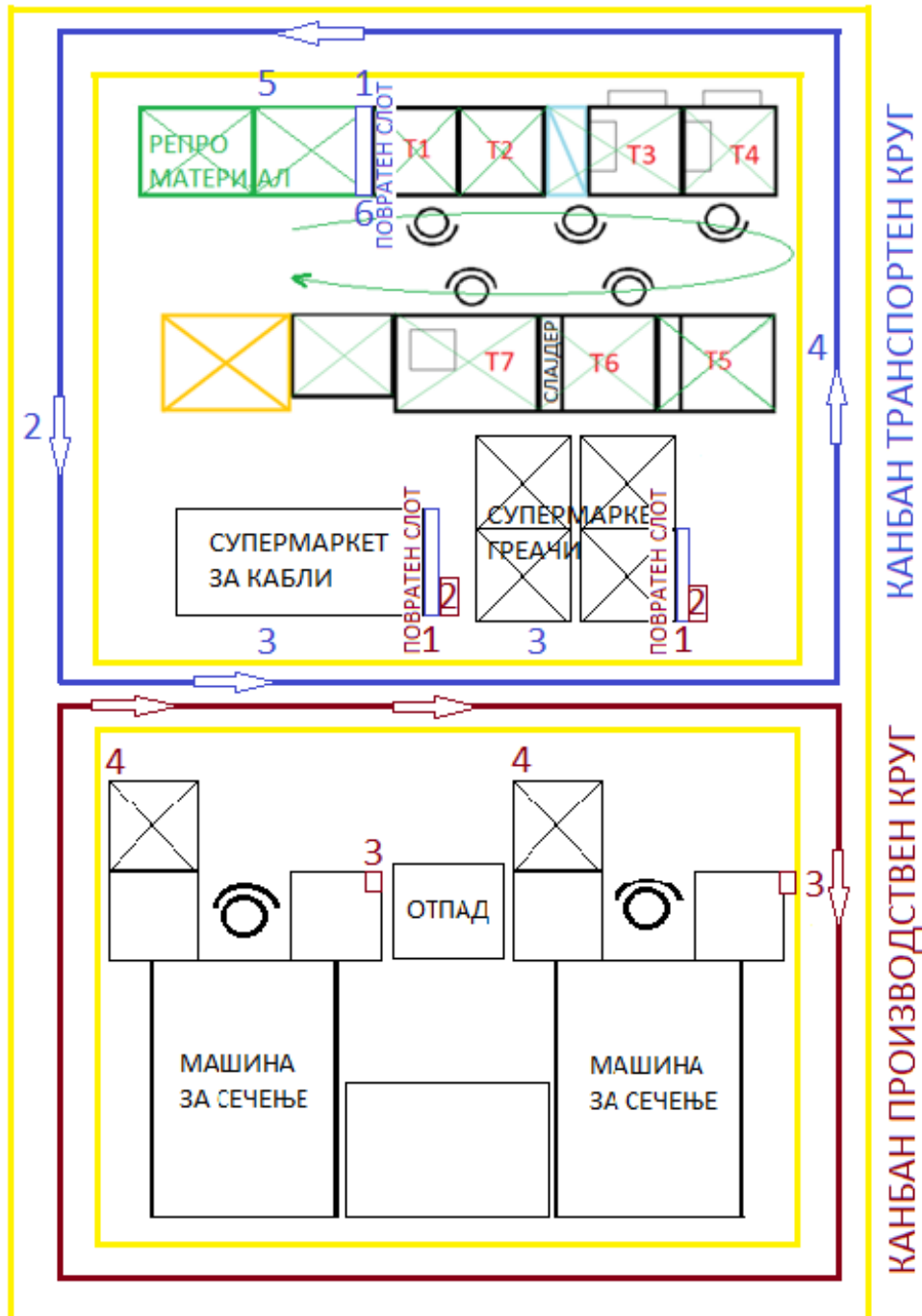
- Операторот кој е задолжен за дотур на материјали во производство ги зема канбан транспортните карти од повратниот слот на процесот – потрошувач.
- Операторот заедно со канбан картата за транспорт оди до супермаркетот.
- Канбан транспортните карти се поставуваат на полни кутии од супермаркетот.
- Операторот задолжен за дотур на материјал во производство ги носи канбан картите за транспорт заедно со полните кутии до процесот – потрошувач.
- Полните кутии заедно со канбан картите за транспорт одат до работната станица на процесот - потрошувач.
- Кога ќе го консумира првото парче од полната кутија потрошувачот ја вади канбан транспортната карта и ја става во повратниот слот.

Во канбан производствениот круг информацијата се движи по следниот редослед:

- Кога ќе се подигне полна кутија со полупроизвод, операторот одговорен за дотур на материјали ја сместува канбан производствената карта во повратниот слот наменета за канбан производствени карти.
- Кога повратниот слот ќе се наполни, операторот одговорен за дотур на материјали ги собира сите канбан производствени карти и ги става во мала кутија.
- Кутијата со канбан производствени карти се носи до процесот за производство.
- Кога кутијата со полупроизвод ќе се произведе, операторот ја сместува канбан производствената карта во предниот дел од полната кутија и ја носи на супермаркет. Пресметката на бројот на канбан карти пуштени во опсег е според следната формула:

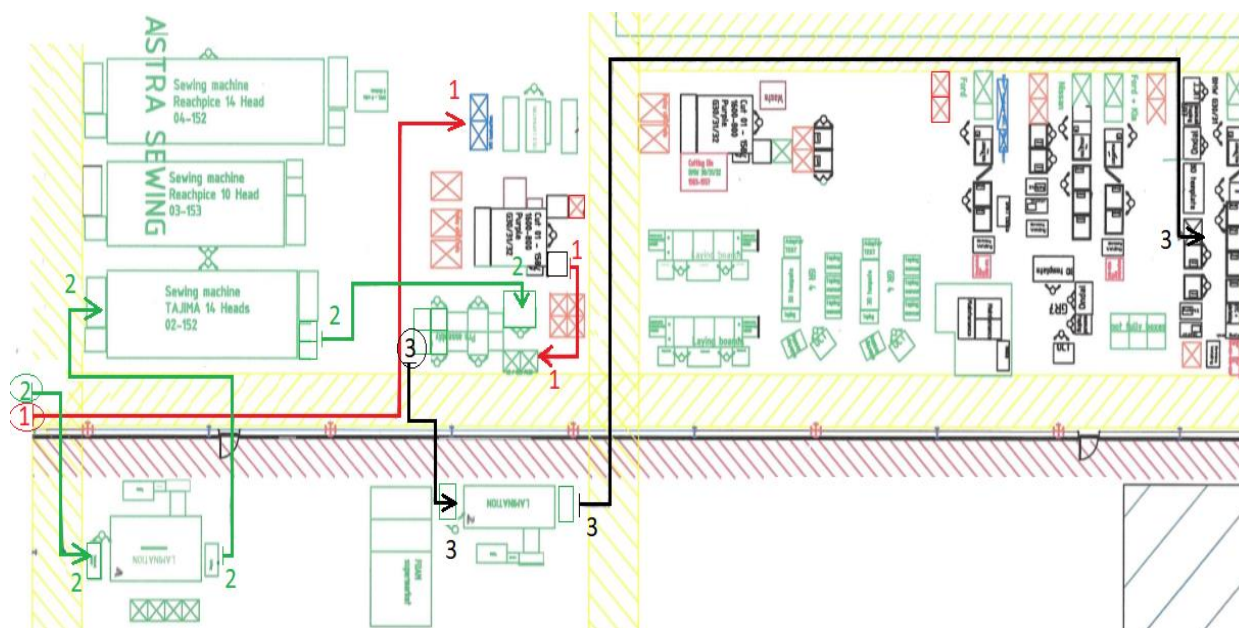
$$N = \frac{D + WBZ \times (1 + SF)}{BG} \quad (27)$$

каде што N е број на канбан карти, D е побарувачката од клиентот, WBZ е времето потребно за замена на полупроизвод на супермаркет, SF е сигурносна количина на залиха, BG е големина на пакување. Вообичаено за сигурносна залиха се зема 10 %.



Слика 8.23. Канбан транспортен и производствен круг на движење на информацијата

На Слика 8.24 е прикажана патеката на движење на материјалите во дизајнот на новиот тек на вредности (виолетовиот тек е прикажан на Слика 8.25). Вкупното движење на материјалите изнесува 137 m: движење на сунѓерот 39 m (одбележано со 1-црвена боја), движење на материјалот за шиене 37,5 m (одбележано со 2-зелена боја) и движење на фабрикуваниот материјал 60,5 m (одбележано со 3-црна боја). За споредба, пред подобрувањата движењето на материјалите изнесуваше 238 m (види Слика 8.7).



Слика 8.24. Патека на движење на материјали во новиот дизајн на виолетовиот тек

Дефинирање на пејсмејкер процес во новиот тек на вредности (линијата за финална монтажа). Планерот на производство испраќа налог за производство до линиите за финална монтажа. Контролата на претходните процеси се регулира со помош на супермаркетите и канбан картите. Препорачливо е за пејсмејкер процес да се избере оној процес што е најблиску до потрошувачот. Со ова се постигнува минимално време на производство од моментот на иницирање на работен налог до испорака на готов производ. Правило е сите процеси после пејсмејкер процесот да се со континуиран тек на производство т.е парче-по-парче производство.

Порамнување на производството на пејсмејкер процесот по модел и волумен (јап. Heijunka). Целта на порамнувањето на производството е да се постигне стабилно и балансирано производство. Непорамнето производство (јап. mura) е причина за појава на преоптоварување на опремата и луѓето (јап. muri) и појава на загуби (јап. muda). Во новиот тек на вредности налог за производство до пејсмејкер процесот се праќа на интервал од 1 час (анг. Every Part Every Interval – EPEI), со што се постигнува следно:

- Порамнување на производството по модел и волумен, и контрола на залихата на полупроизводи помеѓу процесите во случај на промена на барањата од страна на клиентот (анг. bullwipp efect).
- Дефинирање на големина на пакување на производите.
- Исполнет предуслов за имплементирање на систем за повлекување на материјали.
- Дефинирање на залиха во супермаркетите.

- Приказ на проблемите и насока за нивното решавање.
- Калкулација на вкупното време на производство во тек на вредности.
- Дефинирање на рутата за дотур на материјали.

Калкулацијата на временскиот интервал за испраќање на налог за производство е според следната формула:

$$EPEI = \frac{\sum_i (C/O_i)}{Wh - \sum_i (D \times CT_i)/OEE} \quad (28)$$

каде што EPEI е временски интервал на испраќање на налог до пејсмејкер процесот, $\sum_i (C/O_i)$ е сума од времињата потребни за промена на модел, Wh е вкупното работно време во еден ден (анг. working hours Wh), D е сума од побарувањата на клиентот на ден, CT_i е сума на време на циклус на производство и OEE е ефикасноста. Од формулата се гледа дека доколку се намали времето потребно за промена на модел $\sum_i (C/O_i)$ тогаш ќе се намали и интервалот на испраќање на налог за производство до пејсмејкер процесот EPEI. Генерално правило е 10 % од вкупното расположливо време за производство да се користи за промена на модел.

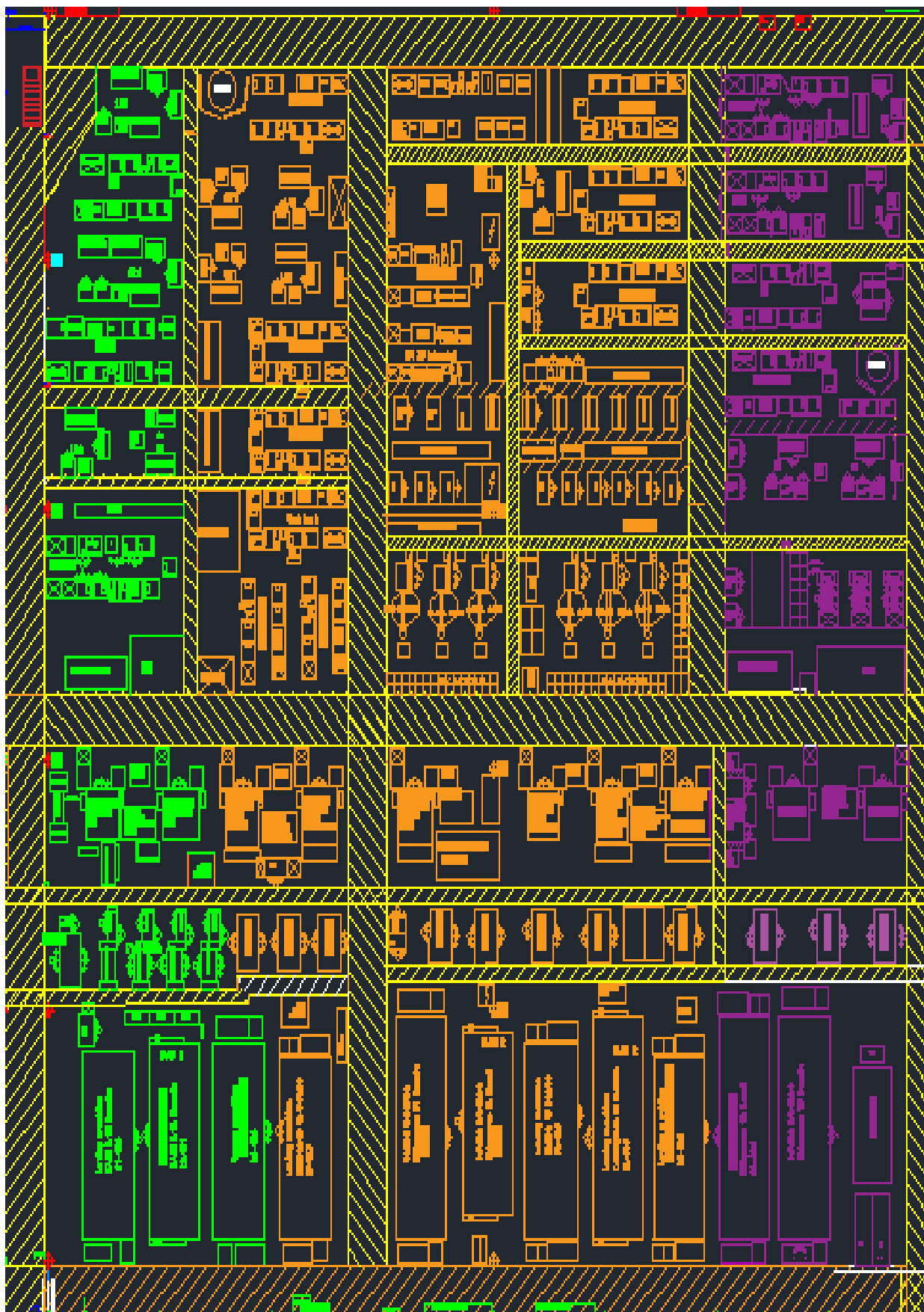
Подобрување на процесите за да може да функционира новиот тек на вредности согласно идниот дизајн. Со цел да може да функционира новиот тек на вредности согласно идниот дизајн, направени се подобрувања на вкупното продуктивно одржување (анг. TPM), OEE%, времето потребно за промена на модел, автоматизација на процесите, брза реакција при појава на проблеми, итн.

Во линиите за финална монтажа намалено е времето потребно за промена на модел на пејсмејкер процесот со имплементирање на мали и флексибилни работни станици. Работните станици се со брзи спојки за електрична и пнеуматска конекција и подвижни тркала што овозможува брзо додавање и вадење на станици при промена на модел. Сите активности со неповторувачки карактер како обврски се префрлени на линиските лидери. Растојанието помеѓу работните станици во линиите е сведено на минимум за да се намали патеката на движење на операторите. Ширината на U линиите е намалена на 1,2 m, а максималната должина на линиите е 8 m. Сите помошни алатки и темплејти потребни за различните производи се локациски поставени во линиите, за да бидат лесно достапни при промена на модел. Имплементиран е систем за скенирање на работниот налог, репроматеријалите и темплејти/алати за да се осигура правилно користење на истите.

На машините за шиене е намалено времето потребно за промена на модел од 14 минути на 8 минути, со инсталирање на дупли држачи за репроматеријал (котур со жица), со што промената на модел се врши додека машината шие.

Низ целиот произведен процес се имплементирани ниско буџетни интелигентни решенија за автоматизација на машините (анг. Autonomation). На машината за шиене имплементирани се системи за детекција на дефекти, енкодери и микроконтролери за контрола на потрошувачката на проводна жица. На линијата за финална монтажа (пејсмејкер процесот) имплементирани се камера систем за контрола на позицијата на проводната жица при процесот на поврзување со кабелскиот приклучок, и PLC систем за контрола на редоследот на операции согласно текот на процесот.

На Слика 8.25 е прикажан графичкиот нацрт со новите тек на вредности (зелениот, портокаловиот и виолетовиот).



Слика 8.25. Графички нацрт на новите три тек на вредности (зелен, портокалов, виолетов)

8.4.2 Lean производство - Потврда на дизајнот на новиот тек на вредности

Во Табела 8.12 се прикажани подобрувањата постигнати со Lean техниките преку дизајнот на новиот тек на вредности. Може да се види дека вкупната стапка на дефекти е намалена за 26 %, намалено е вкупното време на производство за 51 %, вкупната залиха помеѓу процесите е намалена за 49 %, вкупната ефективност на опремата е подобрена за 17 %, намален е бројот на оператори во линиите за финална монтажа за 29 %, намален е бројот на линии за финална монтажа за 17 %, намален е просторот потребен за линиите за финална монтажа за 31 % и намалена е патеката на движење на материјалите за 42 %. Добиените резултати ја потврдуваат ефективноста на имплементираните подобрувања со новиот дизајн на тек на вредности.

Табела 8.12. Резултати добиени со дизајн на новиот тек на вредности

	Вкупна стапка на дефекти (брто)	Вкупно време на производство (денови)	Вкупна залиха помеѓу процесите (парчиња)	Вкупна ефективност на опремата (%)	Редуцирање на број на оператори	Редуцирање на број на линии за финална монтажа	Редуцирање на просторот за финална монтажа (m ²)	Движење на материјалите (m)
Моментален перформанс	30.000	2,83	23.200	78	38	2,4	34	238
Дизајн на тек на вредности	22.000	1,4	11.900	95	27	2	23,4	137
Подобрувања [%]	-26%	-51%	-49%	+17%	-29%	-17%	-31%	-42%

Од подобрувањата постигнати преку Lean методологијата се гледа дека без елиминирање на физичките недостатоци на производните процеси не може да се постигне одржлив резултат на квалитетот и оперативниот перформанс. Предуслов за постигнување на добар квалитет на производот е имплементирање на производство парче-по-парче, имплементирање на стандардизирани повторливи операции кои се во согласност со такт времето на производството и постигнување на кратко време на производство.

8.4.3 Шест Сигма – Намалување на варијациите на процесот

Врз основа на анализата на изворни причини за појава на грешката „отпорност на греач надвор од спецификација” спроведена во поглавје 8.3, во овој дел од трудот ќе се прикажат имплементираните корективни акции за намалување на варијациите на процесот.

Процес Шиене – изворна причина „удар од игла врз проводната жица на греачот”. Најпрвин, со дизајн на експерименти ќе се дефинира најдобриот сооднос на параметри на машината за шиене со цел да се намалат грешките предизвикани од удар од игла на проводна жица. Потоа ќе се имплементира интелигентна автоматизација за да ги детектира оние удари од игла кои не можат да се избегнат ниту со најдобар сооднос на параметри. На крај ќе се имплементира PLC контролер за проверка дали системот за детекција на удар од игла е активиран и е во функција.

Дизајн на експерименти за дефинирање на најдобар сооднос на параметри на машината за шиене - При дизајнот на експеримент за намалување на бројот на удари од игла на проводна жица, ќе се дефинира соодносот на следните критични фактори: затегнување на горен конец, затегнување на долен конец, брзина на осовина, време на одмотување на проводна жица. Ова значи дека имаме 4 фактори кои влијаат на излезниот резултат што е предмет на анализата „удар од игла на проводна жица на греач”. Во дизајнот на експерименти ќе се работи со две нивоа на фактори т.е со минимална и максимална вредност. Факторите и нивоата при дизајнот на експерименти може да се видат во Табела 8.13.

Табела 8.13. Фактори и нивоа при дизајнот на експерименти

	Затегнување на горен конец (cN ⁹)	Затегнување на долен конец (Nm)	Брзина на осовина (vrt/min)	Време на одмотување на проводна жица (s)
min	120	300	600	0.3
max	180	400	800	0.9

Во Табела 8.14 е прикажан сумиран преглед на дизајн на експерименти наменет за параметрите на машината за шиене. Од прегледот може да се види дека во овој дизајн на експерименти ќе се направат 16 тестирања со различен сооднос на факторите ($2^4=16$, 2 нивоа и 4 фактори) и 3 дополнителни тестирања за централните точки на факторите, вкупно 19 тестирања (16+3). Бројот на повторување на тестовите е 1.

Табела 8.14. Сумиран преглед на дизајн на експерименти

Фактори:	4	Основен дизајн 2^4 :	16
Број на тестирања:	19	Повторување на тестот:	1
Блок:	1	Централна точка (вкупно):	3

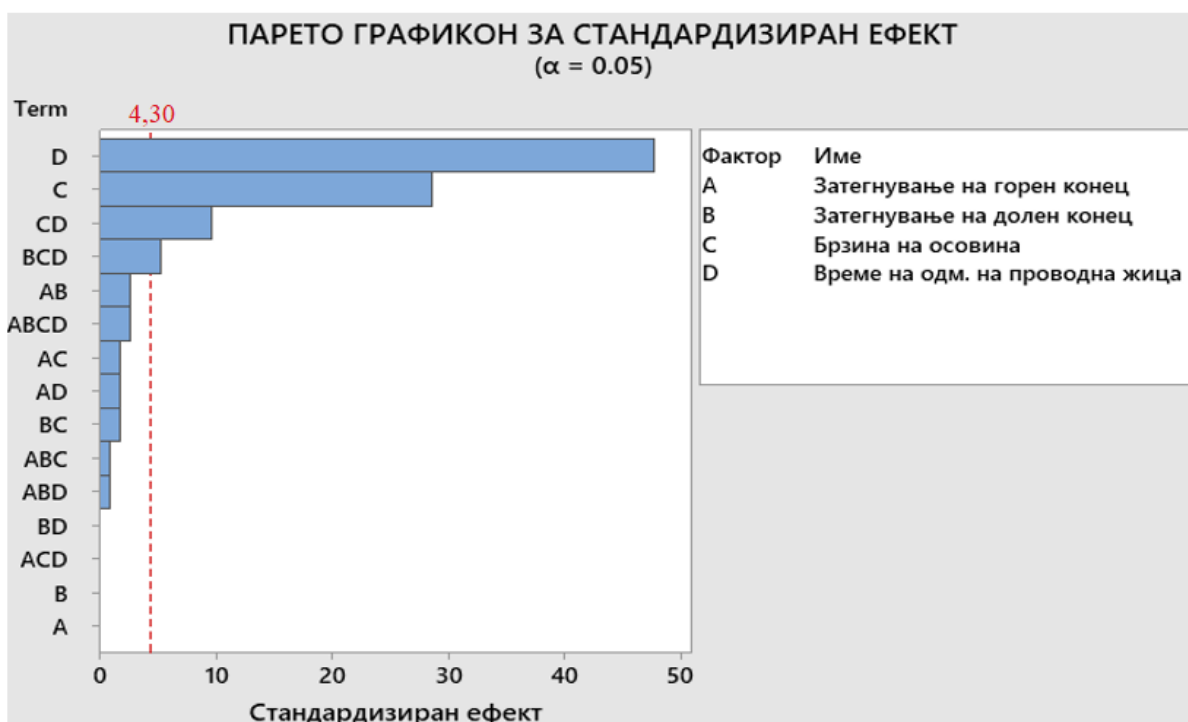
⁹ 1 По препорака на производителот на опремата, за мерење на затегнувањето на горен конец се користи инструмент со единица мерка cN (Centinewton), а за мерење на затегнување на долен конец инструмент со единица мерка Nm (Newton meter). Соодносот на овие две мерни единици е следен: cN (Centinewton)= 0.01 Nm (Newton meter).

Во Табела 8.15 се прикажани резултатите добиени со различни комбинации на факторите.

Табела 8.15. Резултати за број на удари од игла при различни комбинации на фактори

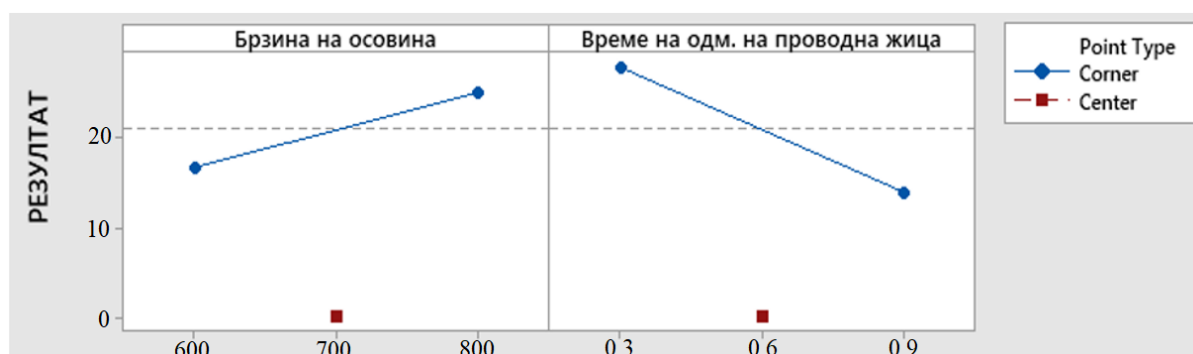
Затегнување на горен конец (cN)	Затегнување на долен конец (Nm)	Брзина на осовина (vrt/min)	Време на одмотување на проводна жица (s)	Резултати - бр.на удари од игла
120	300	600	0,3	24
180	300	600	0,3	25
120	400	600	0,3	25
180	400	600	0,3	26
120	300	800	0,3	32
180	300	800	0,3	30
120	400	800	0,3	29
180	400	800	0,3	31
120	300	600	0,9	10
180	300	600	0,9	9
120	400	600	0,9	7
180	400	600	0,9	8
120	300	800	0,9	19
180	300	800	0,9	18
120	400	800	0,9	21
180	400	800	0,9	20
150	350	700	0,6	1
150	350	700	0,6	0
150	350	700	0,6	0

На Слика 8.26 е прикажан Парето графикон со влијанието на секој од факторите и нивната меѓусебна интеракција врз бројот на удари од игла на проводникот. Се што е десно од црвената линија (4,3 удари од игла) се смета за критичен фактор со големо влијание да предизвика удар од игла. Првиот елемент D (време на одмотување на проводна жица) има најголем ефект да предизвика удар од игла. Доколку ја промениме вредноста на овој фактор, ефектот врз резултатот ќе биде многу поголем во споредба со останатите фактори. Следен фактор што се смета за критичен и влијае на резултатот е C (брзина на осовина). Потоа следува комбинација на факторите C и D (брзина на осовина и време на одмотување на проводна жица) и комбинација на факторите B, C и D (затегнување на долен конец, брзина на осовина и време на одмотување на проводна жица). Останатите комбинации на фактори не се сметаат за критични врз бројот на удари од игла. На пример интеракцијата помеѓу затегнување на горен конец и затегнување на долен конец не е критична бидејќи не влијае на бројот на удари од игла.



Слика 8.26. Интеракција на факторите и нивното влијание врз бројот на удари од игла

Интеракцијата помеѓу факторите C и D т.е брзината на осовината и времето на одмотување на проводна жица е прикажана на Слика 8.27. Од графоконот може да се види дека со зголемување на брзината на осовината над 700 vrt/min и намалување на времето под 0,6 s, бројот на удари од игла ќе се зголеми. Спротивно на ова доколку ја намалиме брзината на осовината под 700 vrt/min и го зголемиме времето на одмотување на проводна жица над 0,6 s тогаш бројот на удари од игла ќе се намали.



Слика 8.27. Интеракција помеѓу брзина на осовина и време на одмотување на проводник

Сега откако го знаеме влијанието на секој од факторите и нивната меѓусебна интеракција врз бројот на удари од игла, следува да се дефинира најдобар сооднос на факторите за да се постигне минимален број на удари од игла. Во Табела 8.16 се прикажани идеалните вредности на секој од 4-те фактори за да се постигне најдобар резултат. Од табелата може да се види дека вредноста на затегнување на горен конец треба да се подеси на 150 cN, вредноста на затегнување на долен конец на 350 Nm, вредноста на брзина на осовина на 700 vrt/min и вредноста на време на одмотување на проводна жица на 0,6 s.

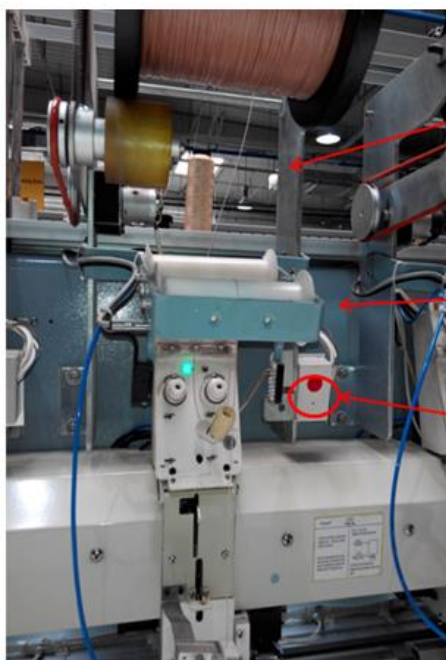
Табела 8.16. Најдобар сооднос на факторите за минимален број на удари на игла

Решение	Затегнување на горен конец (cN)	Затегнување на долен конец (Nm)	Брзина на осовина (vrt/min)	Време на одмотување на проводна жица (s)	Резултат - број на удари од игла
1	150	350	700	0,6	0,33

Од спроведениот дизајн на експерименти се гледа дека и со подесување на најдобриот сооднос на параметрите на машината за шиене, не е можно целосно да се спречи грешката удар од игла. Ова се должи на моменталната технологија и опрема што се користи во процесот на шиене во компанијата што е предмет на истражување. Според спецификацијата на греач за седишта, дозволени се 6 удари од игла на 1 m должен проводна жица. Ова значи дека сепак ќе се појави удар од игла на производот и затоа треба да се имплементира систем за детекција на ударот, кој ќе го изолира оштетениот производот и ќе ја сопре машината се додека не се утврди изворот за појава на специјалната причина.

Автоматски систем за детекција на удар од игла - Системот за детекција на удар од игла е прикажан на Слика 8.28, а електричниот дијаграм е прикажан на Слика 8.29. Овој систем се состои од механизам за одмотување на проводната жица кој е со напон 5 V и главна конзула на машината која е со напон 0 V. Проводната жица се инсталира на механизмот за одмотување, со што нејзиниот напон се израмнува на 5 V. Иглата за шиене е инсталирана на конзолата на машината со што нејзиниот напон се израмнува на 0 V. Кога иглата за шиене со напон 0 V ќе удри на проводната жица која е со напон 5 V, системот за детекција на разлика на напон ќе се активира и ќе сигнализира удар од игла. PLC контролерот автоматски ја стопира машината за шиене, покажува аларм со порака на која глава од машината за шиене се случил удар од игла. Операторот врши анализа на причините за појава на удар од игла, имплементира корективни акции и го ослободува процесот за понатамошно производство. Системот за детекција на удар од игла не спречува појава на удар од игла, но врши 100 % контрола и детекција на оштетена проводна жица. На овој начин дефектните производи нема да продолжат на следниот производствен процес и нема да генерираат дополнителни загуби од аспект на потрошени репроматеријали, време и ресурси.

Единствена можност системот да не детектира удар од игла е доколку не е активиран. Активирање на системот значи физичко конектирање на проводната жица со механизмот за снабдување, со што нивниот напон се израмнува на 5 V. Неактивирање на системот обично се случува за време на промена на котур со проводна жица, во случај кога операторот ќе заборави да го поврзе механизмот.

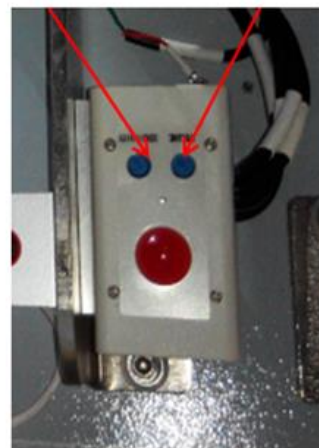


ДРЖАЧОТ НА УРЕДОТ
ЗА ОДМОТУВАЊЕ НА
ПРОВОДНА ЖИЦА ИМА
НАПОН 5 (V)

КОНСТРУКЦИЈАТА НА
МАШИНАТА ЗА ШИЕЊЕ Е
СО НАПОН 0 (V)

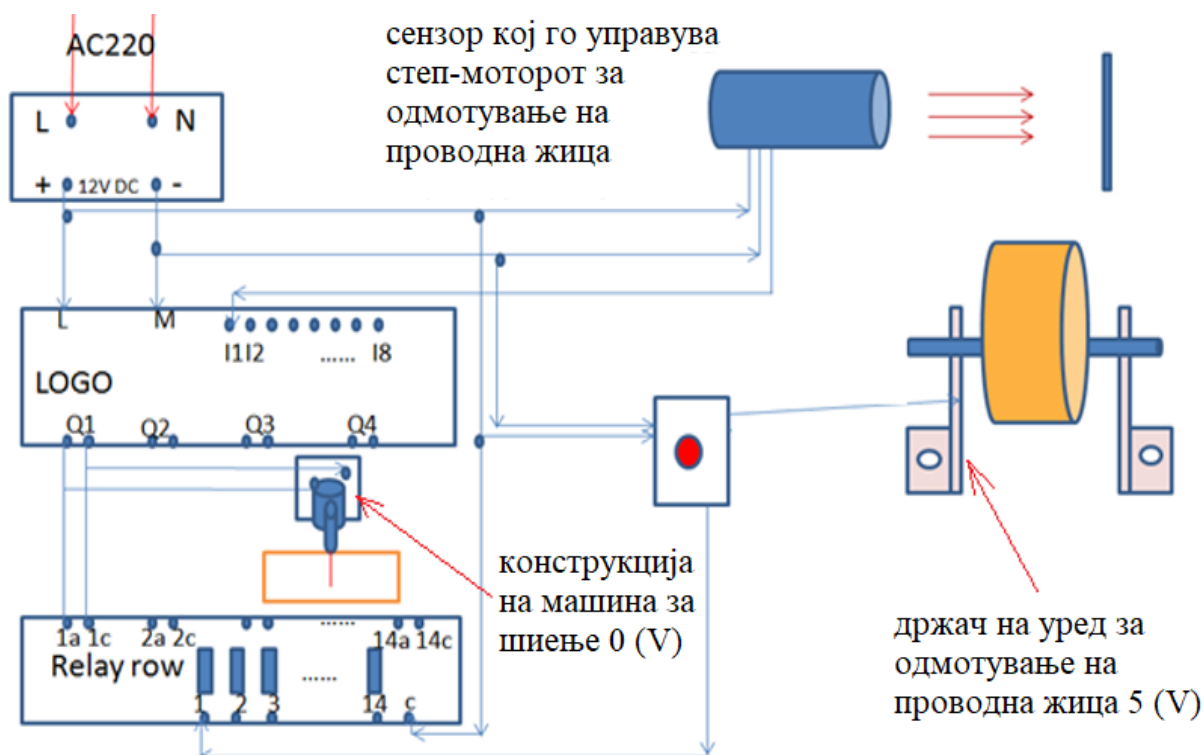
УРЕД ЗА ДЕТЕКЦИЈА НА
РАЗЛИКА НА НАПОН

ЧУСТВИТЕЛНОСТ НА
ЗВУК



0 (V) - 5 (V)
ДЕТЕКТОР НА НАПОН

Слика 8.28. Автоматизиран систем за откривање на удар од игла при процес на шиене



Слика 8.29. Електричен дијаграм на систем за детекција на удар од игла

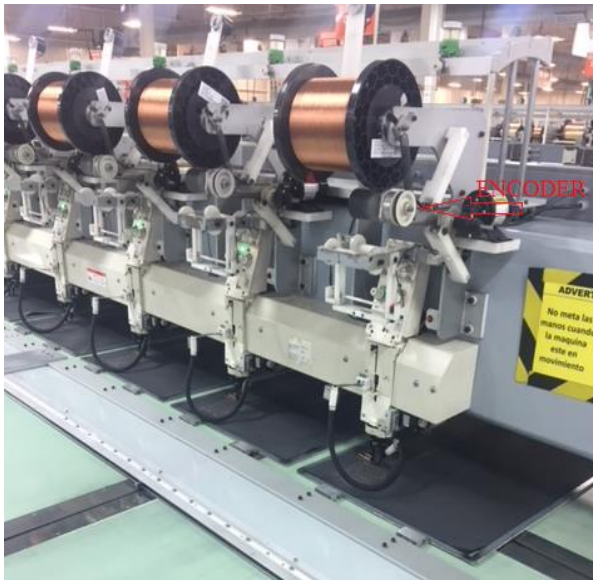
Автоматска проверка дали системот за детекција на удар од игла е активиран - За да се избегне грешката неактивиран систем за детекција на удар од игла, инсталиран е систем кој ќе врши самопроверка на конекцијата помеѓу проводната жица и механизмот за одмотување. Концептот на системот е да се искористи постоечкиот уред

за сечење на проводната жица, кој се активира после секој завршен циклус на шиене (Слика 8.30). Принципот на работа е следен: ножот за сечење на проводната жица е поставен на главната конзола на машината со што има напон како и машината 0 V. Ако проводната жица е правилно поврзана со механизмот за одмотување тогаш нејзиниот напон се израмнува на 5 V. После секој циклус на шиене ножот од машината ја сече проводната жица при што настанува контакт 0 V – 5 V и се активира детекторот на напон што е воедно потврда дека конекцијата помеѓу проводната жица и механизмот за одмотување е правилно поврзана. PLC контролерот после секој циклус на шиене добива сигнал за различен напон што е услов машината да продолжи со работа. Предноста на овој систем е тоа што при самопроверката на конекцијата не се зголемува времето на циклус на производство на машината за шиене.



Слика 8.30. Систем за сечење на проводна жица на машината за шиене

Процес шиене – изворна причина „погрешна потрошувачка на проводна жица“. Потрошувачката на проводна жица зависи од подесувањата на тензијата на крајот (горен/долен крај) што е мануелна операција и секогаш се прави при промена на модел, а може да се измести во процесот на работа на машината. Втор параметар што влијае на потрошувачката на проводна жица е тензијата на проводната жица што зависи од брзината на механизмот за одмотување. Како корективна акција на овие изворни причини имплементиран е систем за контрола на потрошувачката на проводна жица. На Слика 8.31 е прикажан системот кој се состои од PLC контролер и енкодери поставени на секој механизам за одмотување на машината за шиене. Овие енкодери ја мерат реалната потрошувачка на проводна жица и ја споредуваат со дефинираниот норматив за конкретниот производ. На овој начин целосно се елиминира можноста за сериски дефекти поради девијации на потрошувачката на проводна жица.

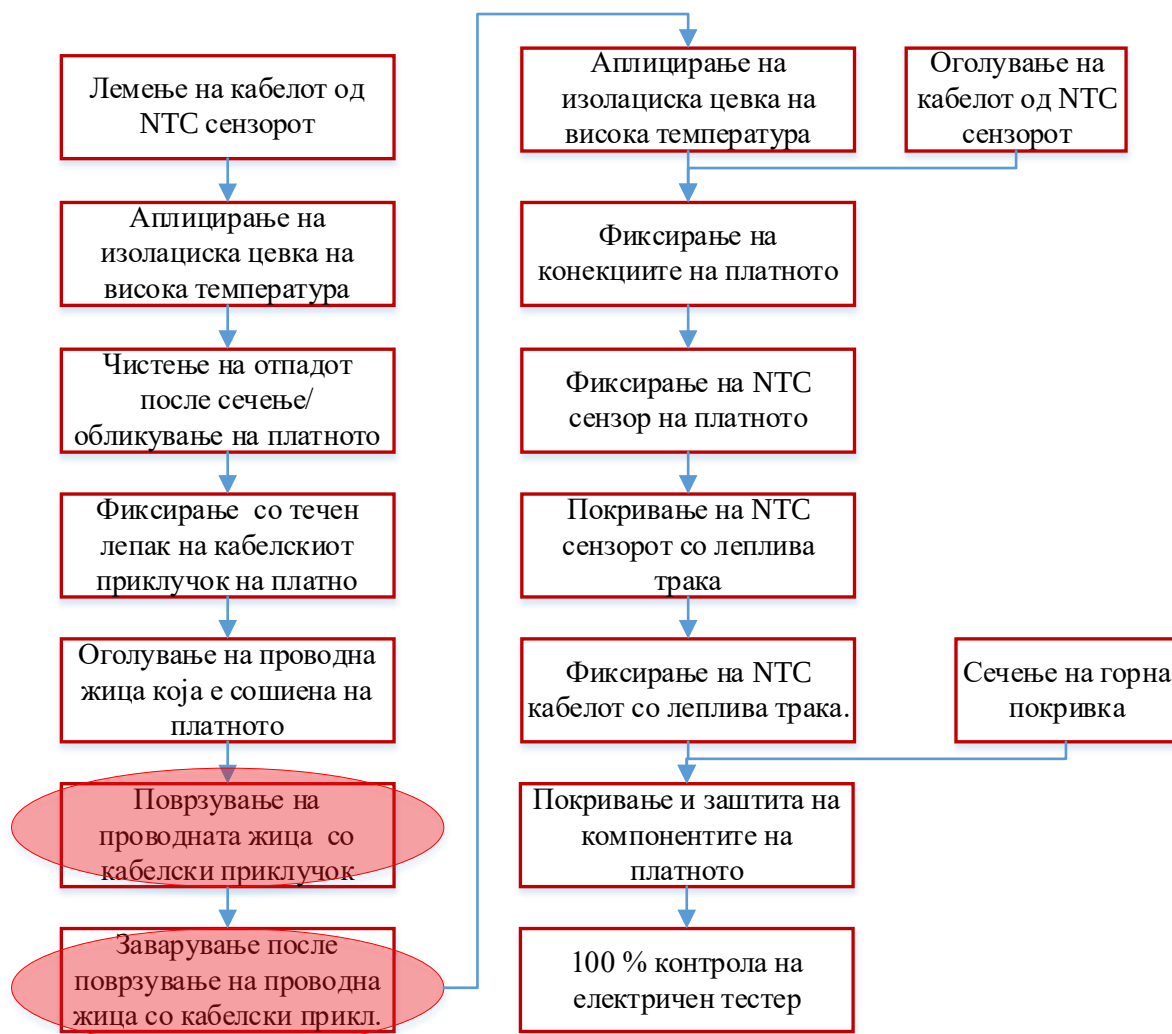


Слика 8.31. Автоматски систем за контрола на потрошувачката на жица

Процесот на финална монтажа – изворна причина „грешно позиционирање на проводна жица и кабелски приклучок при процесот на поврзување”. За елиминирање на оваа изворна причина имплементиран е камера систем за контрола на позицијата на проводната жица и кабелскиот приклучок при процесот на поврзување. Доколку позицијата на проводната жица и кабелскиот приклучок е грешна, системот нема да дозволи процесот на поврзување (аплицирање на терминал) да продолжи.

Процесот на финална монтажа – изворна причина „грешен редослед на операциите во линијата за финална монтажа”. Производството во линијата за финална монтажа се одвива во ротирачки режим на работа каде што операторите заедно со производот ротираат низ сите работни станици во линијата. Операциите во линијата за финална монтажа се прикажани на Слика 8.32. Поради ротацијата понекогаш се случува операторот да испушти некоја операција, при што грешката најчесто се детектира на следниот процес со визуелна контрола. Исклучок за визуелна контрола на испуштен процес е станицата за заварување, затоа што оваа девијација може да се детектира само на електричниот тестер, преку мерење на отпорност на производот, што е последна операција во линијата за финална монтажа. Испуштено заварување како процес предизвикува изолацијата помеѓу бакарните филаменти да остане нерастопена, што резултира со лош контактот помеѓу филаментите и терминалот и отпорност надвор од спецификацијата на производот. Оваа детекција е многу задоцнета од аспект на сериски дефекти во линијата и финансиски загуби поради шкарт бидејќи производот со оваа грешка не се преработува.

За да се избегне грешката на операторот да пропушти некоја операција во линијата за финална монтажа, инсталиран е автоматскиот систем што ќе го контролира редоследот на операции и во случај на пропуст ќе ја блокира линијата.



Слика 8.32. Графикон со тек на процес - линијата за финална монтажа

8.4.4 Шест Сигма - Потврда на подобрениот перформанс на процесот

По имплементирање на потенцијалните решенија за подобрување на процесите се прибираат податоци од редовното производство за да се спроведе SPC студија во однос на карактеристиката „отпорност на греач надвор од спецификација”. Врз основа на 400 мерења од редовното производство ќе се пресмета способност на процесот C_p , индексот на способност на процесот C_{pk} , перформансот на процесот P_p , индексот на перформанс на процесот P_{pk} и стапката на дефекти d_{pmo} .

Вредностите за долната граница на спецификацијата (LSL) и горната граница на спецификацијата (USL) се зададени од клиентот:

$$LSL = 3330 \text{ m}\Omega$$

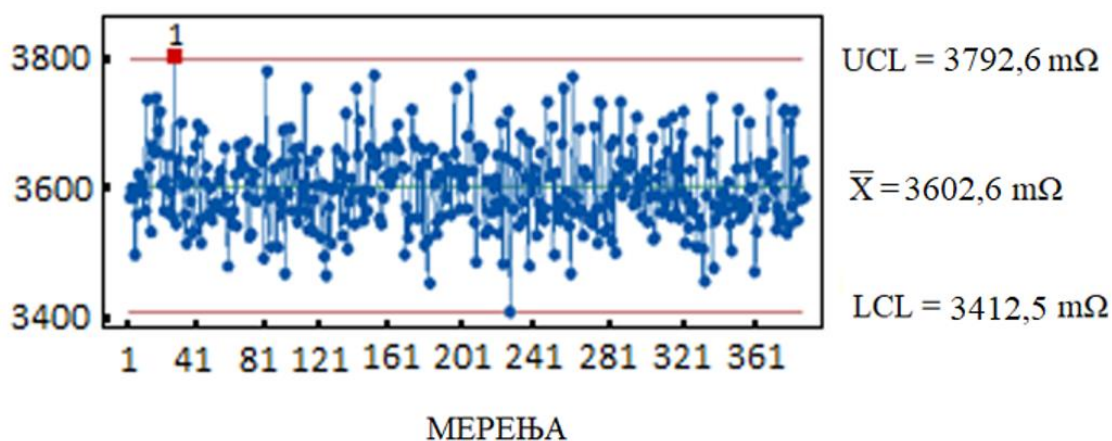
$$USL = 4070 \text{ m}\Omega$$

Аритметичката средина на индивидуални вредности изнесува $\bar{X} = 3602,56 \text{ m}\Omega$. Горната контролна граница (UCL_X) и долната контролна граница (LCL_X) во графиконот за индивидуални отчитувања се пресметуваат според формула 13 во поглавје 3.3.3:

$$UCL_X = 3792,6 \text{ m}\Omega$$

$$LCL_X = 3412,5 \text{ m}\Omega$$

ОТПОРНОСТ НА ГРЕАЧ (mΩ)



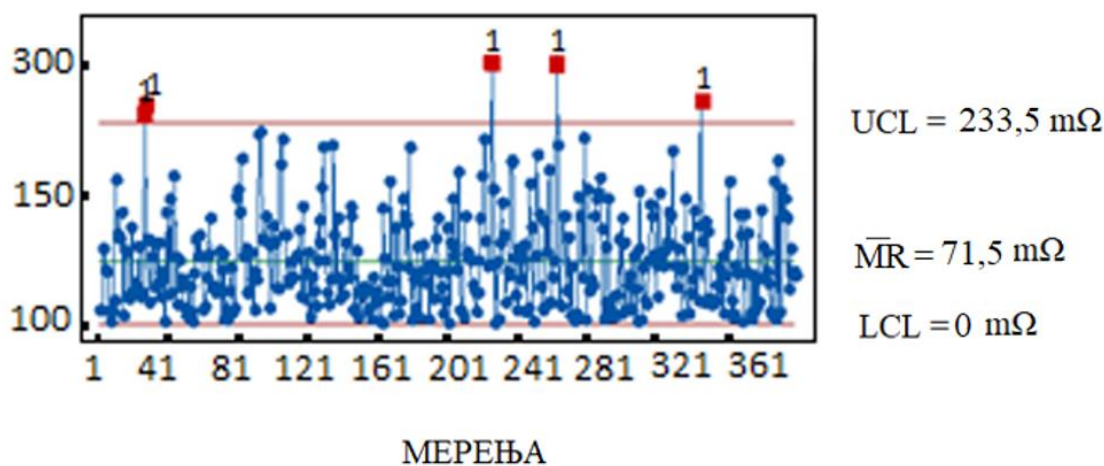
Слика 8.33. Графикон со индивидуални отчитувања (подобрен процес)

Просечниот подвижен опсег изнесува $\overline{MR} = 71,465 \text{ m}\Omega$ (види формула 10). Горната контролна граница (UCL_R) и долната контролна граница (LCL_R) во графиконот на подвижен опсег се пресметуваат според формула 14 во поглавје 3.3.3:

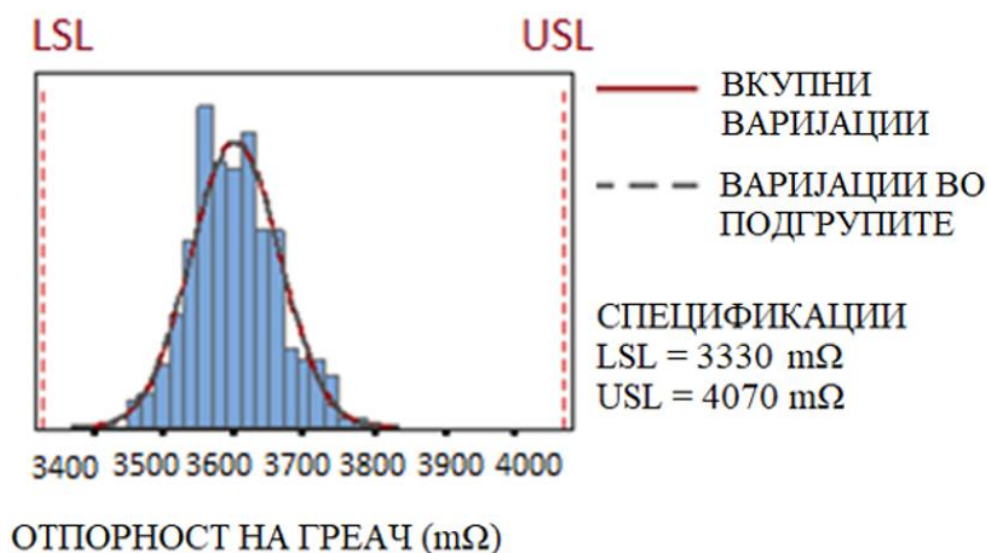
$$UCL_R = 233,47 \text{ m}\Omega$$

$$LCL_R = 0 \text{ m}\Omega$$

ОТПОРНОСТ НА ГРЕАЧ (mΩ)



Слика 8.34. Графикон на подвижен опсег (подобрен процес)



Слика 8.35. Хистограм на способност (подобрен процес)

ВАРИЈАЦИИ ВО ПОДГРУПИТЕ			ВКУПНИ ВАРИЈАЦИИ			
StDev	63,36		StDev	62,95		
Cp	1,96		Pp	1,96		
Cpk	1,43		Ppk	1,44		
PPM	8,46		Cpm	*		
			PPM	7,47		
			Specs			

Слика 8.36. Способност на процес и перформанс на процес (подобрен процес)

Стандардната девијација (StDev) изнесува $\hat{\sigma}_c = 63,36 \text{ m}\Omega$ (види формула 15). Ги зема во предвид само варијациите во подгрупите.

$C_p = 1,946$ (види формула 17). Ги зема во предвид само варијациите во подгрупите. Не го зема во предвид и центрирањето на процесот.

$C_{pk} = \min \{2,45; 1,43\} = 1,43$ (види формула 18 и формула 19). Ги зема во предвид само варијациите во подгрупите. Го зема во предвид и центрирањето на процесот.

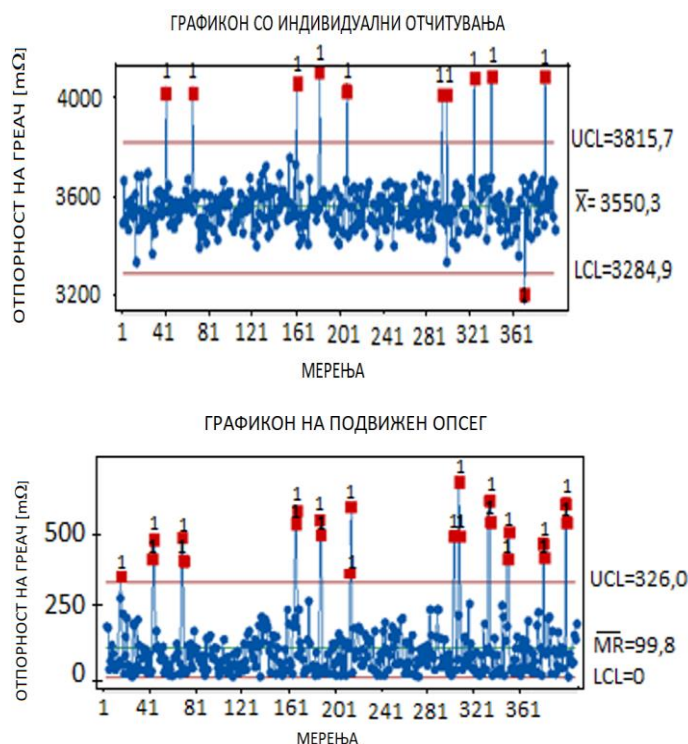
Стандардната девијација по примерок изнесува $s = 62,953 \text{ m}\Omega$ (види формула 16). Ги зема во предвид вкупните варијации (сите отчитувања) т.е варијациите во, и помеѓу подгрупите.

$P_p = 1,959$ (види формула 20). Ги зема во предвид варијациите во, и помеѓу подгрупите. Не го зема во предвид и центрирањето на процесот.

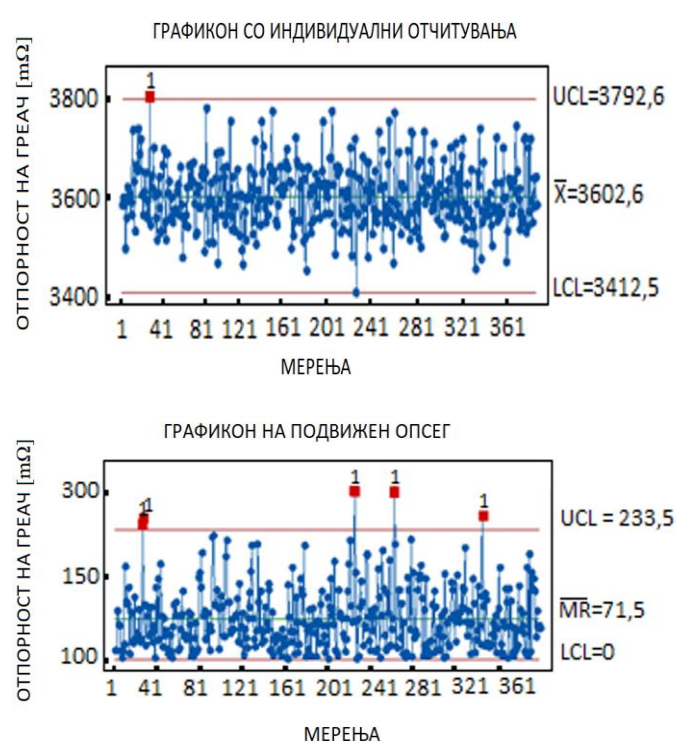
$P_{pk} = \min \{2,475; 1,443\} = 1,443$ (види формула 21 и формула 22). Ги зема во предвид варијациите во, и помеѓу подгрупите. Го зема во предвид и центрирањето на процесот.

На Слика 8.37 е направена споредба на перформансот на процесот пред и после имплементираните подобрувања.

Перформанс на процес пред подобрувањата

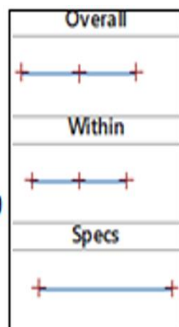


Перформанс на процес после подобрувањата



ВАРИЈАЦИИ ВО ПОДГРУПИТЕ

StDev 88,46
Cp 1,39
Cpk 0,83
PPM 6380,39

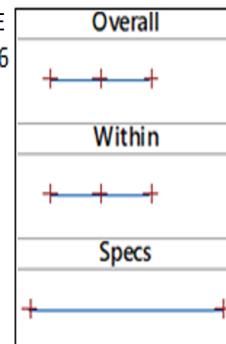


ВКУПНИ ВАРИЈАЦИИ

StDev 106,7
Pp 1,16
Ppk 0,69
Cpm *
PPM 19476,19

ВАРИЈАЦИИ ВО ПОДГРУПИТЕ

StDev 63,36
Cp 1,96
Cpk 1,43
PPM 8,46



ВКУПНИ ВАРИЈАЦИИ

StDev 62,95
Pp 1,96
Ppk 1,44
Cpm *
PPM 7,47

Слика 8.37. Перформанс на процес пред и после имплементираните подобрувања

Од резултатите прикажани во Табела 8.17 може да се види дека вредноста на C_p е подобрена за 40 %, вредноста на C_{pk} за 72 %, вредноста на Pp за 69 % и вредноста на P_{pk} за 109 %. Од анализата на подобрениот процес се гледа дека вредностите на C_p и Pp т.е на C_{pk} и P_{pk} се речиси идентични, што укажува на тоа дека нема присуство на специјални причини во процесот. Со ова се потврдува ефективност на подобрувањата имплементирани во процесите.

Табела 8.17. Перформанс на процесот пред и после имплементираните подобрувања

	Пред подобрување на процесот	После подобрување на процесот	Пред vs. После подобрување [%]
Ср	1,39	1,95	40%
Срк	0,83	1,43	72%
Рр	1,16	1,96	69%
Ррк	0,69	1,44	109%

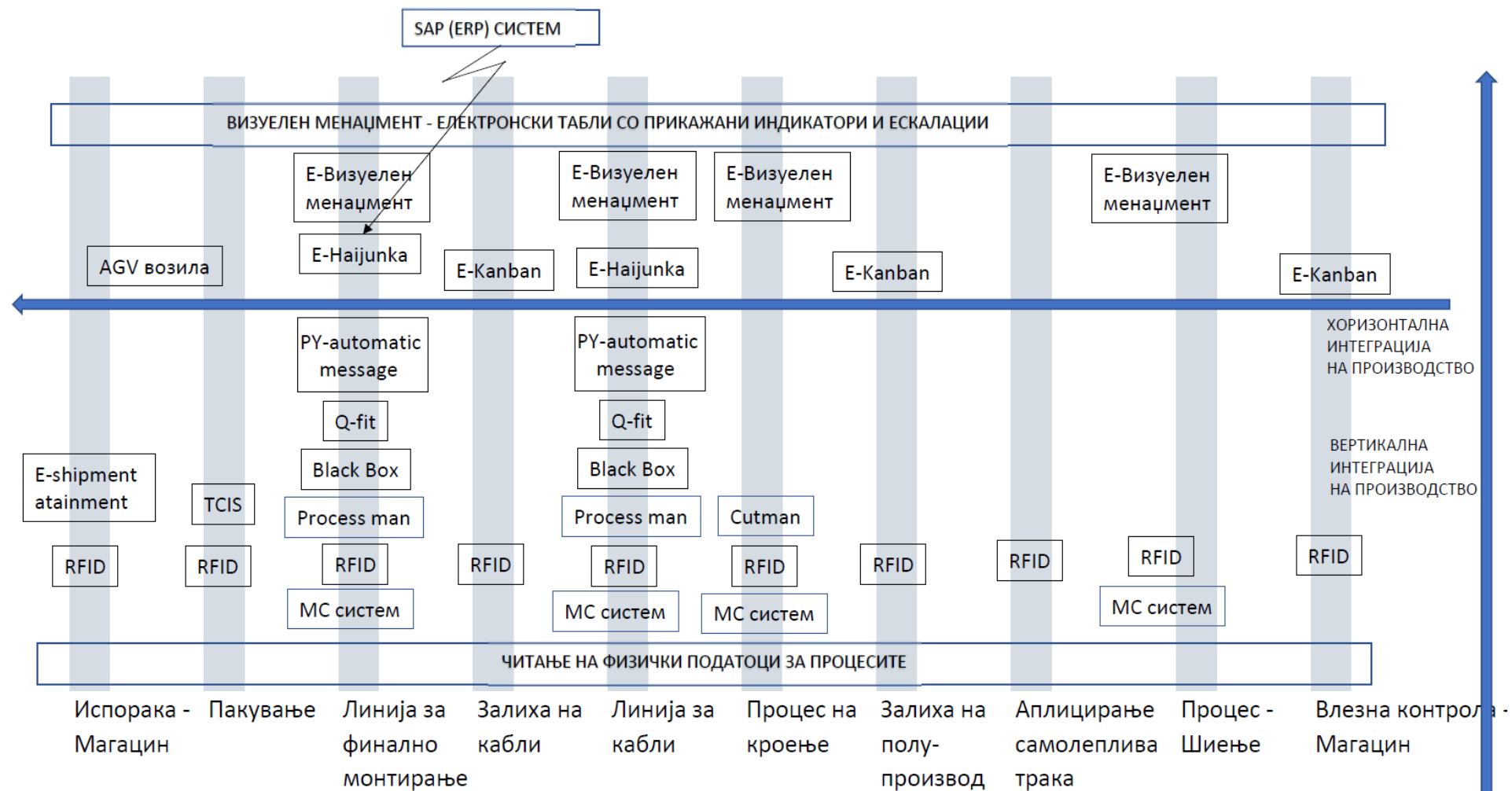
Во Табела 8.18 е прикажано намалувањето на вкупната стапка на дефекти постигнато со Шест Сигма методологијата. Од табелата може да се види дека вкупната стапка на дефекти е намалена за - 27 %, со фокус на конкретен проблем со квалитетот „отпорност на греач надвор од спецификација”.

Табела 8.18. Подобрување на вкупната стапка на дефекти со Шест Сигма техниките

	Вкупна стапка на дефекти (брто)	Вкупно време на производство (денови)	Вкупна залиха помеѓу процесите (парчиња)	Вкупна фективност на опремата (%)	Редуцирање на број на линии за финална монтажа	Редуцирање на простор за финална монтажа (m ²)	Движење на материјалите (m)
Lean техники	22.000	1.4	11.900	85	2	23,4	137
Шест Сигма техники	16.000	-II-	-II-	-II-	-II-	-II-	-II-
Вкупно подобрување	-27 %	0%	0%	0%	0%	0%	0%

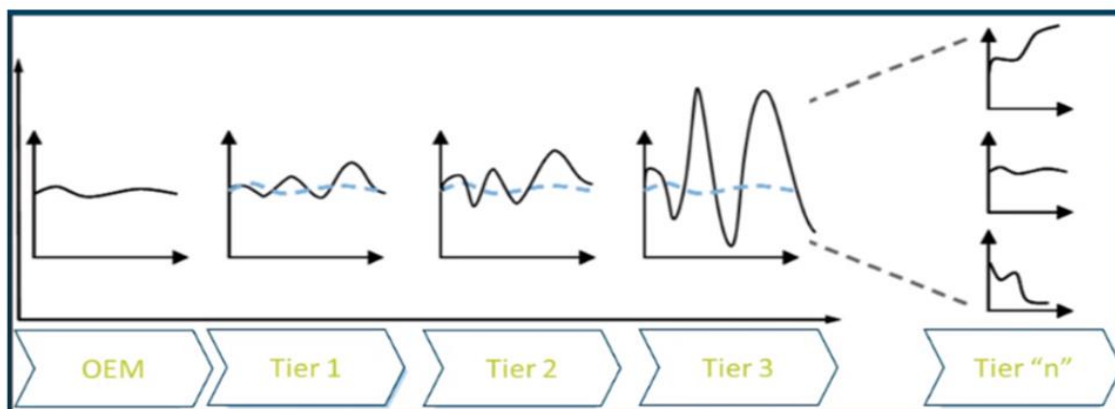
8.5 Контролна фаза и имплементирање на Индустија 4.0 технологиите

По потврдата на ефективноста на дизајнот на новиот тек на вредности и намалувањето на варијациите во процесот следува контролната фаза каде ќе се прикажат интегрираните технологии на Индустија 4.0 и нивниот придонес во контролата на процесите. На Слика 8.38 се прикажани технологиите на Индустија 4.0 и нивната хоризонталната и вертикалната интеграција во компанијата.

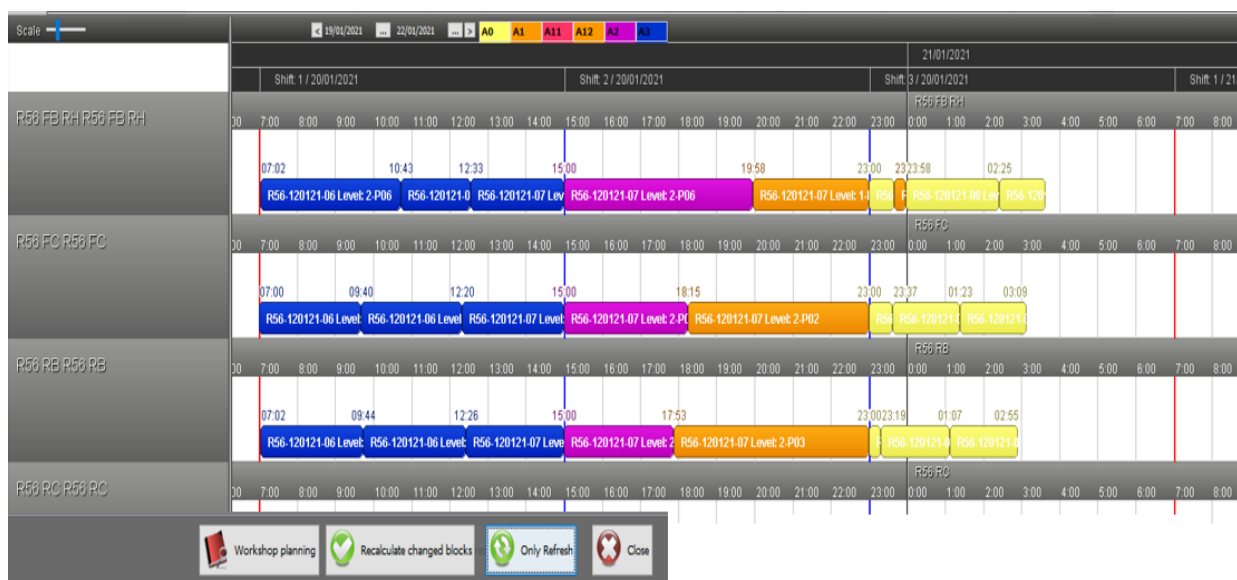


Слика 8.38. Хоризонтална и вертикална интеграција на технологиите на Индустија 4.0

Вертикална интеграција – ERP (анг. Enterprise resource planning) системот поврзан во неколку фабрики од ланецот на снабдување ги следи побарувањата од клиентот и го контролира планот за производство со цел да се намалат залихите на материјали или bull-veep ефектот помеѓу фабриките (Сл. 8.39). Планот за производство не треба да отстапува повеќе од $\pm 15\%$ согласно договорот склучен со клиентот. ERP испраќа план за производство до Е-Хејунка системот кој е поставен на пејсмејкер процесот т.е линијата за финална монтажа. Планот за производство се порамнува по волумен и модел со користење на методот секој модел/секој ден (анг. EPEI) (Сл. 8.40).

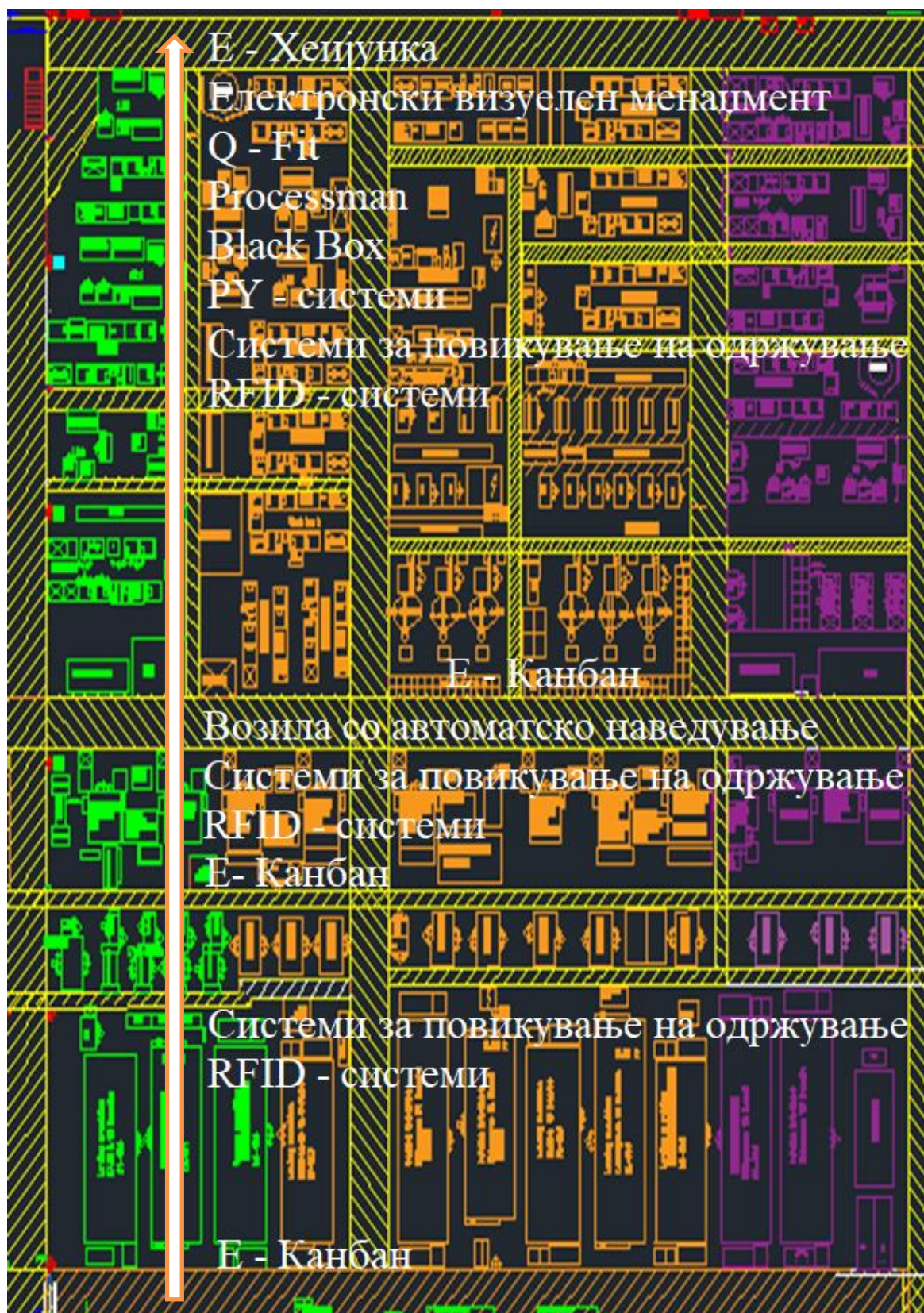


Слика 8.39. Вертикална интеграција на ERP системот помеѓу неколку фабрики.



Слика 8.40. Е-Хејунка за планирање на производство

Хоризонталната интеграција на технологиите на Индустија 4.0 ги поврзува сите процеси во новиот дизајн на тек на вредности и обезбедува податоци во реално време за оперативните индикатори на производството. Следните технологии се користат во хоризонталната интеграција: Е-Хејунка, Q-Fit, Processman, Black Box, PY-системи, Систем за повикување на одржување (анг. Maintenance calling system - MCS), е-канбан, RFID технологиите, Возилата со автоматизирано наведување и електронски-Андон. На Слика 8.41 е прикажана локацијата на секоја од технологиите во производниот процес на компанијата што е предмет на истражување.

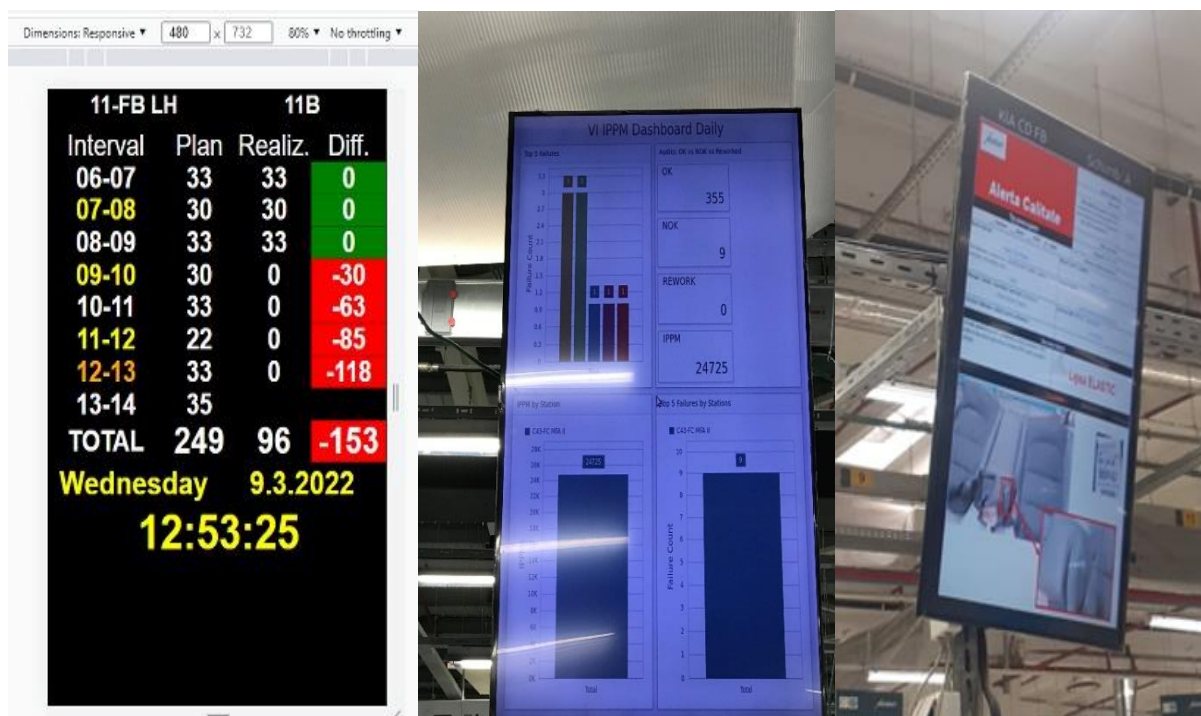


Слика 8.41. Хоризонтална интеграција на Индустрија 4.0 технологиите

Е-Хеијунка системот е поставен на линиите за финална монтажа и врши планирање на производството по модел и волумен согласно информациите од ERP системот. Овој систем во комбинација со RFID системите го следи перформансот на линиите со следните индикатори: реализацијата на планот за производство по час, OEE%, стапката

на дефекти (дрмо), шкарт и преработката на производи. Овој систем ги оптимизира линиите за финална монтажа со примена на модулите: дефинирање на тек на процесот на монтирање, планирање на присуство на операторите, распоред на ресурсите согласно планот за производство, ротирање на операторите и канбан производство. Дополнително, системот автоматски ја пресметува платата со помош на електронска евиденција на присуство на вработените.

Q-fit системот е поставен на линиите за финално монтажа и врши мерење на стапката на дефекти во реално време (дрмо), стапката на шкарт и стапката на преработка. Системот врши класификација и анализа на дефектите врз основа на повеќе критериуми: топ дефекти, најзасегнати модели, оператори, смени и машини. Дополнително, овозможува различни е-визуелизации како на пример: рекламации од клиентот, индикатори на процесите поврзани со квалитет, критични грешки, алерти за квалитет, итн. Ги снима локациите на производот каде што настанала грешката, ги анализира проблемите и врши целосна контрола при процесот на преработка на дефектните производи. Со Q-fit се вршат димензионални мерење и статистичка контрола на процесот (Сл. 8.42).



Слика 8.42. Перформанс на процесот OEE%, ППМ

Processman системот е поставен во линиите за финално монтажа и врши нивно оптимизирање во согласност со такт времето/циклус времето на производство. Овој систем го следи и споредува времето на производство на секоја операција со дефинираното време на циклус и во случај на отстапки генерира ескалации преку андон системите. Обезбедува е-визуелизација на работните инструкции, на материјалите и количините кои влегуваат во производот, на спецификациите на производот и на контролните планови. Прибира податоци за движењето на операторите и ја подобрува ергономијата во линиите.

Black box системот е поставен во линиите за финално монтажа и врши мерење на искористеноста на машините, на техничките застои на машините и на тесните грла во

линиите. Врши контрола на стандардизираните времиња на циклус, на производството парче-по-парче, на редоследот на извршување на операциите и дали операторите правилно ротираат. Обезбедува е-визуелизација на работните инструкции за квалитет, на 5S стандардите и на локацијата на материјалите во линиите со што го подобрува процесот на брза промена на модели и ја елиминира можноста за грешно аплицирање на материјали при процесот на монтирање.

Во комбинација со виртуелната и проширената реалност обезбедува правилно превентивно и корективното одржување, со што го намалува времето на застои на машините и времето на интервенции. Системот прибира информации за правилно користењето на РУ уредите и алармира во случај на отстапки. Исто така алармира во случај на недостаток на материјали на работните станици во линиите со што го намалува времето на застои. Ги мери оперативните индикатори во линиите и ги прикажува на дигиталните дисплеи. По имплементацијата на овој систем, ефикасноста во линиите за финална монтажа е подобрена за 12 %.

РУ системите се поставени во сите производни процеси кои имаат карактеристика опасност по живот на човек (CC/SC карактеристика). Овие системи спречуваат појава на грешки и автоматски ги активираат алтернативни контролни методи во случај на дефект на машината.

Систем за повикување на одржување (анг. Maintenance calling systems) е поставен на сите машини во производството и во комбинација со сензорите за вибрации, мерачите на потрошувачка на струја и РУ системите автономно детектира и алармира за техничките застои на машините и за дефекти на производите предизвикани од технички проблеми на машините (технички дрпто). Овој систем обезбедува база на податоци за подобрување на превентивното, предвидливото и корективното одржување.

Е-канбан системите се поставени пред процесот на шиене, пред процесот на сечење и пред процесот на финална монтажа. Овие системи заедно со RFID сензорите ја контролираат залихата на материјали и полупроизводи помеѓу процесите т.е автоматски сигнализираат кога претходниот процес треба да почне со производство со цел да се дополнат супермаркетите.

Возилата со автоматизирано наведување во координација со е-канбан системите автономно ги дополнуваат супермаркетите со материјали и полупроизводи. Со ова се намалува залихата на материјали во производството и се елиминираат празните и непотребни движења на доставувачите на материјали.

RFID системите го следат движењето на материјалите во дизајнот на новиот тек на вредности и обезбедуваат информации во реално време за оперативните индикатори во производството: вкупно време на производство, патека на движење на материјалите, залиха на материјали и полупроизводи во супермаркетите и линиите, време на циклус на производство, број на оператори во линиите, правилна ротација на операторите, производство на парче-по-парче, време потребно за промена на модел, време на празно чекање поради различни девијации (лошо планирање, дефекти на машини, несинхронизирани процеси, тесни грла, недостаток на материјали итн). Овој систем значително ги намалува загубите на материјали во производството бидејќи во секој момент има точен преглед за движењето и потрошувачката на материјалите во самиот производ. Дополнително, во магацинот за репроматеријали со RFID етикетите и програмираните дронови со RFID читачи се прават неделни пописи на материјалите, без ангажирање на ресурси, со што се подобрува физичката усогласеност на материјалите

наспроти системската евиденција. За споредба, во минатото пописот во магацин се одржувал два пати годишно и секогаш имало големи загуби на материјалите.

3Д принтерите овозможуваат производство на алати за машините и за работните станици, ја намалуваат залихата на резервни делови во магацин и ги намалуваат вкупните трошоците потребни за одржување на опремата.

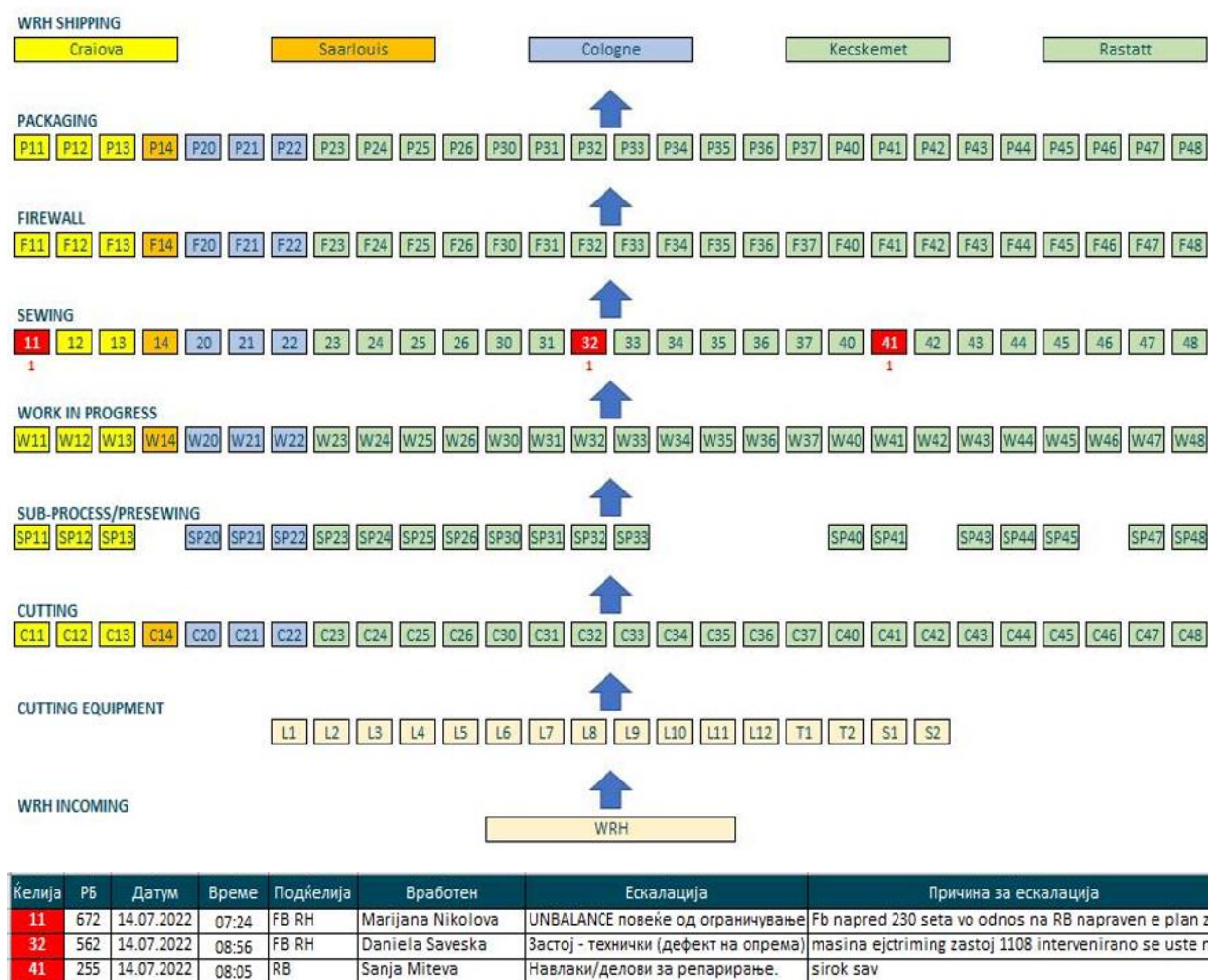
Дигиталните дисплеи прибираат информации од технологиите на Индустрија 4.0 и вршат е- визуелизација на оперативните индикатори, во реално време.

Сајбер физичкиот систем ги интегрира сите технологии опишани погоре и динамички го контролира новиот дизајн на тек на вредности. Физичките податоци од процесите прибрани во реално време ги споредува со дефинираните индикатори во виртуелниот модел и во случај на отстапки автоматски генерира корективни акции со што го забрзува времето на реакција и врши оптимизирање на процесите. Во виртуелниот модел на сајбер физичкиот систем дефинирани се следните индикатори:

1. Магацин за готов производ:
 - Индикатори: Запазување на план за испорака, денови на залиха на готов производ и искористеност на просторот.
2. Линии за финална монтажа:
 - Индикатори: Запазување на план за производство, OEE%, dpmo, рекламации, шкарт, поправки на производ, застои на машини подолго од 20 мин, небалансирано производство помеѓу линиите за финално монтажа и линиите за кабли, недостаток на материјали.
 - Индустрија 4.0 технологии: E-Хеијунка, Q-fit, Processman, Black Box, Систем за повикување на одржување.
3. Процес на сечење на материјал:
 - Индикатори: Запазување на план за производство, OEE%, dpmo, рекламации, шкарт, поправки на производ, недостаток на материјали.
 - Индустрија 4.0 технологии: Black Box, Систем за повикување на одржување.
4. Суб-процес за монтирање на полупроизвод:
 - Индикатори: Запазување на план за производство, OEE%, dpmo, рекламации, шкарт, поправки на производ, недостаток на материјали.
5. Процес на шиенење на материјалот:
 - Индикатори: OEE%, dpmo, рекламации, шкарт, поправки на производ, недостаток на материјали на машина.
 - Индустрија 4.0 технологии: Black Box, Систем за повикување на одржување.
6. Линија за монтирање на кабел:
 - Индикатори: OEE%, dpmo, рекламации, шкарт, поправки на производ, недостаток на материјали на машина.
 - Индустрија 4.0 технологии: Q-fit, Processman, Black Box, Систем за повикување на одржување.
7. Процес на сечење на кабел - Комакс:
 - Индикатори: OEE%, dpmo, рекламации, шкарт, поправки на производ.
 - Индустрија 4.0 технологии: Q-fit, Black Box, Систем за повикување на одржување.

На Слика 8.43 е даден опис на сајбер физичкиот систем за новиот тек на вредности и оперативните индикатори за секој процес. Од визуелниот приказ може да се види дека

има отстапки во линија 11, 32 и 41 со небалансирано производство, технички дефект и поправка на производ.



Слика 8.43. Е- визуелизација на сајбер физичкиот систем

8.5.1 Ажурирање на анализа на модови на дефекти и нивниот ефект

Во Табела 8.19 е прикажана ажурираната PFMEA анализа. Од табелата може да се види дека со подобрениот процес на шиеење се намалува вредноста на појава и детекција при проценката на ризикот:

- За потенцијалната причина за појава на грешката „тензија на жица премногу високо/ниско“, појавата е намалена од вредност 6 на вредност 3, а детекцијата од вредност 4 на вредност 3. Бројот на приоритет на ризик е намален од 168 на 63.
- За потенцијалната причина за појава на грешката „тензија на конец премногу високо/ниско“, појавата е намалена од вредност 6 на вредност 3, а детекцијата од вредност 4 на вредност 3. Бројот на приоритет на ризик е намален од 168 на 63.
- За потенцијалната причина за појава на грешката „висок број на удари на проводник од игла за шиеење на 1 m должен“, појавата е намалена од вредност 7 на вредност 3, а детекцијата од вредност 4 на вредност 3. Бројот на приоритет на ризик е намален од 252 на 81.

Табела 8.19. Ажурирање на анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на шиене (подобрен процес)

Функција на процесот/ Барања	Потенцијален режим на грешка	Потенцијални последици од грешката	Сериозност	Потенцијални причини за појава на грешки	Појава	Моментална контрола на процесот	Детекција	RPN	Препорачани акции
Процес на шиене - обезбеди соодветен материјал - обезбеди точна патека за шиене - обезбеди точна позиција на проводникот - обезбеди точни димензии на моделот за шиене - обезбеди правилна отпорност - обезбеди да нема контаминации	Отпорност на проводна жица - надвор од спецификација (под или над)	Отпорност на греач надвор од спецификација (7)	7	Тензија на жица премногу високо или ниско	3	Р: листа со параметри на машина за шиене (5)	3	63	Р: нема
						D: систем за контрола на потрошувачка на проводна жица (3)			
						D: 100% проверка на отпорност на електричен тестер (4)			
		Издржливост/ век на траење на греач (7)				D: визуелна проверка (8)			
		Изгубена функција на греачот (7)				D: инспекција на прво парче после шиене (5)			
						D: инспекција на прво парче на електричен тестер (4)			
						Р: механизам за дотур на проводна жица при процесот на шиене (5)			
						Р: стандардизиран процес (5)			

				Тензија на конец премногу високо/ниско	3	P: листа со параметри (5) D: контрола на потрошувачка на проводна жица (3) D: 100% проверка на отпорност на електричен тестер (4) D: визуелна проверка (8) D: инспекција на првото парче после шиене (5) D: инспекција на прво парче на електричен тестер (4) P: уред за снабдување на проводна жица на машина (5) P: стандардизиран процес (5)	3	63	P: нема
	Отпорност на проводна жица - над спецификација	Отпорност на греач надвор од спец. (7) Издржливост/век на траење на греач (7) Изгубена функција на греачот (7) Ризик од струја на кратка врска (9)	9	Висок број на удари од игла на 1 m проводна жица	3	D: 100% проверка на отпорност на електричниот тестер (4) D: систем за детекција на удар од игла (3) D: систем што ја блокира машината за шиене доколку системот за детекција на удар од игла не е активирана (3) D: инспекција на прво парче на електричен тестер (4) D: визуелна проверка (8) D: инспекција на првото парче после шиене (5) P: стандардизиран процес (5)	3	81	P: нема

Табела 8.20. Ажурирање на анализа на модови на дефекти и нивниот ефект - процес на финална монтажа (подобрен процес)

Функција на процес /барање	Потенцијален режим на грешки	Потенцијални ефекти од грешки	Сериозност	Класа	Потенцијални причини/ Механизам на грешка	Појава	Моментална контрола на процесот	Откривање	RPN	Препорачани акции
Поврзување на I-Cu бакарна жица со кабелски приклучок	Дел од филаментите на проводникот не се зафатени во терминалот	Силата на извлекување на филаментите од терминалот е под спецификација (8)	8	S C	Грешка на оператор, погрешно позиционирање на проводник	3	D: CFA систем за мониторинг на силата на аплицирање на терминалот (3)	2	48	P: нема
							D: визуелна проверка (8)			
							P: камера за контрола на позицијата на проводникот и кабелскиот приклучок (2)			
		Издржливост/ век на траење на греач (7)			Погрешно подесување на пресата, грешна висина на терминалот	3	D: CFA систем за мониторинг на силата на аплицирање на терминалот (3)	3	72	P: нема
							D: визуелна проверка (8)			
							D: мерење на сила на извлекување (5)			
		D: напречен пресек на терминал (5)								
		Изгубена функција на греачот (7)			Поставување на грешен алат	2	D: CFA систем за мониторинг на силата на аплицирање на терминалот (3)	2	32	P: нема
							D: визуелна проверка (8)			
							D: мерење на сила на извлекување (5)			
							D: напречен пресек на терминал (5)			
		P: стандардизиран процес (2)								
	Испуштен процесот на заварување	Изгубена функција на греачот (7)	8	S C	Грешка на оператор испуштен чекор	3	D: визуелна проверка (8)	2	48	P: нема
							D: 100% проверка на отпорност на електричниот тестер (4)			
							P: систем кој спречува испуштање на процесот на заварување (2)			

Во Табела 8.20 е прикажани ажурирана PFMEA анализа за линијата за финална монтажа, промените се обележани со црвено:

- Превенција: *Систем со камера за контрола на позиционирањето на проводникот и кабелскиот приклучок при процесот на поврзување.*
- Превенција: *Автоматски систем кој спречува испуштање на процесот на заварување во линијата за финална монтажа.*

Со подобрувањата во процесот на финална монтажа, ажурирани се појавата и детекцијата:

- За потенцијалната причина за појава на грешката „погрешно позиционирање на проводник“, појавата е намалена од вредност 4 на вредност 3, а детекцијата од вредност 3 на вредност 2. Бројот на приоритет на ризик е намален од 96 на 48.
- За потенцијалната причина за појава на грешка „испуштен процес на заварување“ појавата е намалена од вредност 4 на 3, а детекцијата од вредност 4 на 2. Бројот на приоритет на ризик е намален од 128 на 48.

Критериумите за рангирање на сериозност, појава и детекција се прикажани во во додаток, Табела А.3 – Табела А.5.

8.5.2 Ажурирање на Контролен план

Дефинираните корективни акции и контролни механизми во PFMEA анализата се основа за припрема на контролниот план. Врз основа на корективните акции во PFMEA анализата ќе се утврди големината на подгрупата со примероци, фреквенцијата на прибирање на примероци, методот на мерење итн. Ажурирањата направени во контролниот план се прикажани подолу во трудот.

Вкупен број на удари од игла на 1 m проводна жица - процес на шиене. Треба да се провери функционалност на системот за детекција на удар од игла преку симулација на грешката на секоја глава за шиене на машината. Со оваа проверка операторот потврдува дека системот работи и дека е активиран. Фреквенцијата на проверка е на почеток на производство и при промена на модел. Резултатите се ажурираат во инспекциска листа која потоа се користи за следливост на квалитетот.

Во случај операторот да пропушти да направи проверка на функционалност на системот за детекција на удар од игла, во фазата на подобрување е имплементиран дополнителен автоматски систем што ќе открие дали системот за детекција на удар од игла е во функција и во случај на отстапка автоматски ќе ја стопира машината.

Девијација на потрошувачката на проводна жица во однос на нормативот предвиден во дизајнот на производот - процес шиене. Треба да се провери функционалност и прецизноста на енкодерот и PLC контролерот кои ја мерат потрошувачката на проводна жица. За ослободување на процесот за сериско производство, се проверува функционалност и точноста на мерната опрема преку тестирање со референтен примерок¹⁰, на почетокот од секоја смена. Резултатите се ажурираат во инспекциска листа која потоа се користи за следливост на квалитетот.

¹⁰Референтен примерок претставува проводна жица со специфицирана должина калибрирана од страна на овластена лабораторија, која се користи за проверка на функционалност и точноста на енкодерот пред секое сериско производство.

Грешно позиционирање на проводникот – процес на поврзување на проводникот и кабелскиот приклучок на линијата за финална монтажа. На почеток на секоја смена, треба да се провери функционалност на системот со камера за детекција на позиционирање на кабел. Проверката на функционалност се прави со референтен примерок. Системот со камера мора да го препознае добриот примерок и да продолжи со работа исто така да го детектира и лошиот примерок. По детектирање на лошиот примерок, пресата за аплицирање на терминал треба да прекине со работа и да го блокира процесот. Резултатите се ажурираат во инспекциска листа која покасно се користи за следливост на квалитетот.

Испуштен процесот на заварување - линијата за финална монтажа. На почеток на секоја смена треба да се провери функционалноста на системот кој детектира испуштен процесот на заварување. Се симулира пропуштање на процесот на заварување за да се провери дали системот ќе ја блокира линијата. Резултатите мора да се ажурираат во инспекциска листа која потоа се користи за следливост на квалитетот.

8.5.3 Шест Сигма - Обука на вработените

По имплементирање на подобрувањата и ажурирањето на стандардите следува обука на вработените. Планот за обука ги вклучи сите инволвирани во процесот: тренерите, инженерите, контролорите на квалитет, супервизорите и операторите.

8.5.4 Шест Сигма - Статистичка контрола на процесот

Во фазата на подобрување од Lean Шест Сигма анализата способноста на процесот е подобрена од Cpk 0,83 на 1,35. Со цел да се оджи овој резултат и да се дејствува на време доколку се појави негативен тренд, сајбер физичкиот систем на Индустрија 4.0 врши статистичка контрола на процесот во реално време со мерење на секој производ.

8.5.5 Стандардизирани задачи и одржливост на резултатите

Постигнатите подобрувања во новиот дизајн на тек на вредности и намалените варијации на процесите се безначајни доколку не се постигне одржливост на резултатите во иднина. Ова е единствено можно со стандардизирана работа што вклучува документирање на подобрените процеси. Стандардот претставува алатка за обука на новите вработени и за ревизија на процесите.

9 ЗАКЛУЧОК

Индивидуалните заклучоци кои беа претставени во различните поглавја од ова истражување се сумирани во три сегменти, и тоа: преглед на моменталната научна литература за менаџирање со квалитет, развој на нов модел за контрола на квалитетот и практична примена на новиот модел.

1. Преглед на моменталната научна литература за менаџирање со квалитет

Во истражувањето е направен систематичен преглед на повеќе од 150 научни труда кои се занимаваат со менаџирање на квалитетот во автомобилската индустрија. Во моменталната литература достапни се многу методи за менаџирање со квалитет, како на пример стандардите ISO 9001 и IATF 16949, севкупното управување со квалитет (анг. Total quality management, TQM), континуираното подобрување (анг. Continuous improvement, CI), методологијата планира – дејствува – проверува – извршува (анг. Plan-Do-Check-Act, PDCA), Lean, Шест Сигма, интегрираниот модел на Lean и Шест Сигма, влијанието на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот, итн.

Од прегледот на моменталната научна литература во овој труд, методологијата на Lean и Шест Сигма се издвојува како најефикасна за подобрување на квалитетот во автомобилската индустрија. Главните предизвици во литературата за Lean и Шест Сигма во трудот се групирани во 4 категории:

1. Немање на јасна визија и детално развиен модел кој ќе ги интегрира Lean и Шест Сигма како методологија за менаџирање со квалитет.
2. Влијанието на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот е неизбежно, но сепак предизвик е немање на јасно дефиниран модел за интегрирање на Индустрија 4.0 во DMAIC структурата на Lean Шест Сигма.
3. При имплементирање на Индустрија 4.0 често се игнорираат законите кои важат во производството т.е се занемарува моќта на Lean и Шест Сигма. Поради ова, не секогаш со имплементација на Индустрија 4.0 се постигнуваат посакуваните подобрување на квалитетот, најчесто како последица на нејасните разбирања на можностите на производните процеси.
4. Недостаток на практична имплементација и емпириска анализа за учеството на Индустрија 4.0 во менаџирањето со квалитетот.

2. Развој на нов модел за контрола на квалитетот

Најзначајниот придонес на ова истражување лежи во предлогот и потврдата на нов модел за подобрување на квалитетот, развиен со цел да се надминат горенаведените предизвици во моменталната литература. Новиот модел ги интегрира *Lean*, *Шест Сигма* и *Индустрија 4.0* во DMAIC структурата, со јасни инструкции и редослед за имплементирање на поедините техники (Табела 7.1, Слика 7.1 - Слика 7.5). Редоследот на активности во моделот има за цел да ги следи законите кои важат во производството т.е најпрвен со Lean Шест Сигма да се намалат варијациите и загубите во процесите, а потоа со Индустрија 4.0 да се постигне дополнително подобрувања на квалитетот и одржливост на резултатите.

Lean техниките во моделот имаат за цел да ги елиминираат загубите во целиот тек на вредности, од влез на репроматеријали до излез на готов производ. Следните Lean техники се применети во моделот: такт време, производство на парче-по-парче, систем на повлекување на материјали и контрола на залихата, пејсмејкер процес поставен поблиску до клиентот во текот на вредности, порамнување на производството по модел и волумен, брза промена на модел, контрола на квалитет на самите работни станици,

интелигентна автоматизација за избегнување на грешки, Андон систем за ескалација на проблемите и брза реакција при нивно решавање.

Шест Сигма методологијата во предложениот модел има за цел да ги редуцира варијациите во процесите. Следните Шест Сигма техники се користат во моделот: потврда на точност на мерната опрема, статистичка контрола на процесите, дизајн на експерименти за дефинирање на најдобар сооднос на параметри на машините, подобрување на процесите и статистичка контрола на подобрените процеси.

Индустрија 4.0 со своите технологии интегрирани во сајбер физичкиот систем, има за цел да ги прибере податоците во реално време за новиот тек на вредности, да ги спореди овие податоци со виртуелниот модел, да обезбеди брза и автоматизирана реакција при појава на отстапки, да ја подобри ефикасноста и квалитетот во линиите за финална монтажа, да го подобри севкупното одржување на опремата и да постигне стандардизација и одржливост на резултатите.

3. Практична примена на новиот модел во автомобилска компанија за производство на греачи за седишта и анализа на добиените резултати

Во експерименталниот дел на овој труд е прикажана практичната примена на новиот модел во компанија за производство на греачи за седишта. Имплементацијата на новиот модел ја следи структурата опишана во блок-дијаграмите прикажани на Слика 7.1 - Слика 7.5. Добиените резултати од имплементацијата на моделот како и учеството на секоја од техниките во подобрувањето на перформансот се прикажани во Табела 9.1.

Табела 9.1. Индивидуални постигнувања на техниките во новиот DMAIC модел

	Вкупна стапка на дефекти (dpmo)	Вкупно време на производство (денови)	Вкупна залиха помеѓу процесите (парчиња)	Вкупна ефективност на опремата (%)	Редуцирање на број на линии за финална монтажа	Редуцирање на просторот за линиите за финална монтажа (m ²)	Движење на материјалот (m)
Моментална состојба	30.000	2,83	23.200	78	2,4	34	238
Lean техники	22.000	1,4	11.900	95	2	23,4	137
Шест Сигма техники	16.000	-II-	-II-	-II-	-II-	-II-	-II-
Индустрија 4.0	9.000	-II-	-II-	103	-II-	-II-	-II-
Вкупни подобрувања	-70%	-51%	-49%	+25%	-17%	-31%	-42%

Од табелата може да се види дека со Lean техниките постигнато е намалување на вкупната стапка на дефекти од 30.000 dpmo на 22.000 dpmo, намалено е вкупно време на производство од 2,83 дена на 1,4 дена, намалена е залихата за 50 %, подобрена е вкупната ефективност на опремата од 78 % на 95 %, редуцирани се бројот на линии за финална монтажа за 17 %, постигната е подобра искористеност на просторот за финална монтажа за 31 % и намалена е патеката на движење на материјалите за 42 %.

Со Шест Сигма техниките постигнато е намалување на вкупната стапка на дефекти од 22.000 дрмо на 16.000 дрмо. Варијациите на процесот се намалени преку подобрување на способност на процесот Ср за 29 % и Срк за 42 %, а перформансот на процесот е подобрен за Рр 41 % и Ррк за 52 %.

Индустрија 4.0 преку вертикалната и хоризонталната интеграција ја намалува стапката на дефекти од 16.000 дрмо на 9.000 дрмо и ја подобрува вкупната ефикасност на опремата од 95 % на 103 %. Дополнително, придонесува за стандардизација на процесите и одржливост на постигнатите резултати во новиот тек на вредности.

Истражувањето потврдува дека редоследот на имплементирање на техниките во предложениот модел се клучни за добивање на посакуваните резултати за квалитет и оперативен перформанс. Во Табела 9.2 е направена споредба на подобрувањата постигнати со Lean Шест Сигма наспроти подобрувањата постигнати со Индустија 4.0. Може да се види дека придонесот на Lean Шест Сигма во вкупното подобрување на квалитетот изнесува 67 % додека на Индустија 4.0 изнесува 33 %, придонесот на Lean Шест Сигма во подобрување на вкупната ефективност на опремата изнесува 68 % додека на Индустија 4.0 изнесува 32 %. За останатите индикатори (вкупно време на производство, вкупна залиха помеѓу процесите, редуцирање на број на линии за финална монтажа, редуцирање на просторот и движење на материјалот) придонесот во подобрувањата доаѓа од Lean Шест Сигма. За овие индикатори, Индустија 4.0 придонесува од аспект на постигнување на одржливост на добиените резултати.

Табела 9.2. Процентуално учество на техниките на DMAIC моделот во вкупното подобрување

	Lean Шест Сигма (%)	Индустрија 4.0 (%)
Вкупна стапка на дефекти (дрмо)	67 %	33 %
Вкупно време на производство (денови)	100 %	0 %
Вкупна залиха помеѓу процесите (парчиња)	100 %	0 %
Вкупна ефективност на опремата (%)	68 %	32 %
Редуцирање на број на линии за финална монтажа	100 %	0 %
Редуцирање на простор (m ²)	100 %	0 %
Движење на материјалот (m)	100 %	0 %

Треба да се напомне дека процентот на учеството на Индустија 4.0 во подобрување на квалитетот може да претрпи промени согласно оспегот и степенот на напредност на Индустија 4.0 технологиите. Во компанијата што е предмет на истражување во овој труд, добиените резултати се одраз на моменталните технологии на Индустија 4.0. Сепак може да се заклучи дека и при имплементација на значително понапредни технологии на Индустија 4.0 законите кои важат во производството и моќта на Lean Шест Сигма имаат исклучителен придонес во подобрувањето на квалитетот.

Добиените резултати со имплементацијата на новиот модел во компанијата што е предмет на истражување се значително подобри во споредба со сите претходно користени методи за менаџирање со квалитет, со што се потврдува ефикасноста и ефективноста на предложениот модел.

Во иднина наодите од овој труд може да се користат како ориентир во други автомобилски компании кои имаат за цел подобрување на квалитетот, додека пак ограничувањата во ова истражување од аспект на моменталните достапни технологии на Индустија 4.0 може да бидат основа за идни практични и академски истражувања.

❖ **Научни придонеси**

Како научен придонес од ова истражување, објавени се следните трудови:

1. „Six Sigma methodology implemented in automotive industry” – Journal of electrical engineering and information technologies, Vol 5, No 2 (2020)
[View of 175. SIX SIGMA METHODOLOGY IMPLEMENTED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY \(ukim.edu.mk\)](#)
2. „Industry 4.0 and quality management in automotive sector” – International Journal for Science & Engineering Research, Volume 12, Issue 10, October 2021 ISSN 2229-5518
<https://www.ijser.org/onlineResearchPaperViewer.aspx?Industry-4-0-and-Quality-Management-in-Automotive-sector.pdf>

Додаток А

Табела А.1. Табела на константи и формула за контролни графיקони ($\bar{X}$ и R Графיקони)

Големина на Подгрупа	$\bar{X}$ и R Графיקони				$\bar{X}$ и s Графיקони			
	Графикон за Пресеци	Графикони за ранг (R)			Графикон за Пресеци	Графикони за ранг (R)		
	Фактор за контролни граници	Делители за пресметка на σ_X	Фактори за контролните граници		Фактор за контролна граници	Делители за пресметка на σ_X	Фактор за контрола на граници	
	A2	d2	D3	D4	A3	c4	B3	B4
2	1,880	1,128	-	3,267	2,659	0,7979	-	3,267
3	1,023	1,693	-	2,574	1,954	0,8862	-	2,568
4	0,729	2,059	-	2,282	1,628	0,9213	-	2,266
5	0,577	2,326	-	2,114	1,427	0,94	-	2,089
6	0,483	2,534	-	2,004	1,287	0,9515	0,030	1,970
7	0,419	2,704	0,076	1,924	1,182	0,9594	0,118	1,882
8	0,373	2,847	0,136	1,864	1,099	0,965	0,185	1,815
9	0,337	2,970	0,184	1,816	1,032	0,9693	0,239	1,761
10	0,308	3,078	0,223	1,777	0,975	0,9727	0,284	1,716
11	0,285	3,173	0,256	1,744	0,927	0,9754	0,321	1,679
12	0,266	3,258	0,283	1,717	0,886	0,9776	0,354	1,646
13	0,249	3,336	0,307	1,693	0,850	0,9794	0,382	1,618
14	0,235	3,407	0,328	1,672	0,817	0,981	0,406	1,594
15	0,223	3,472	0,347	1,653	0,789	0,9823	0,428	1,572
16	0,212	3,532	0,363	1,637	0,763	0,9835	0,448	1,552
17	0,203	3,588	0,378	1,622	0,739	0,9845	0,466	1,534
18	0,194	3,640	0,391	1,608	0,718	0,9854	0,482	1,518
19	0,187	3,689	0,403	1,597	0,698	0,9862	0,497	1,503
20	0,180	3,735	0,415	1,585	0,680	0,9869	0,510	1,490
21	0,173	3,778	0,425	1,575	0,663	0,9876	0,523	1,477
22	0,167	3,819	0,434	1,566	0,647	0,9882	0,534	1,466
23	0,162	3,858	0,443	1,557	0,633	0,9887	0,545	1,455
24	0,157	3,895	0,451	1,548	0,619	0,9892	0,555	1,445
25	0,153	3,931	0,459	1,541	0,606	0,9896	0,565	1,435

Табела А.2. Табела на константи и формула за контролни графיקони (I, MR графיקони)

Големина на Подгрупа	Графикони за средна вредност **				Индивидуални графיקони			
	Графикони медијани	Графикони за ранг (R)			Индивидуални графיקони	Графикони за ранг (R)		
	Фактор за контролни граници	Делители за пресметка на σ_X	Фактори за контролните граници		Фактор за контролна граници	Делители за пресметка на σ_X	Фактори за контролните граници	
	$\bar{A}$	d2	D3	D4	E2	d2	D3	D4
2	1,880	1,128	-	3,267	2,660	1,128	-	3,267
3	1,187	1,693	-	2,574	1,772	1,693	-	2,574
4	0,796	2,059	-	2,282	1,457	2,059	-	2,282

5	0,691	2,326	-	2,114	1,290	2,326	-	2,114
6	0,548	2,534	-	2,004	1,184	2,534	-	2,004
7	0,508	2,704	0,076	1,924	1,109	2,704	0,076	1,924
8	0,433	2,847	0,136	1,864	1,054	2,847	0,136	1,864
9	0,412	2,970	0,184	1,816	1,010	2,970	0,184	1,816
10	0,362	3,078	0,223	1,777	0,975	3,078	0,223	1,777

Табела А.3. Критериуми за евалуација на сериозноста

Ефект	Критериум: Сериозност од ефектот врз производот (Ефект врз клиентот)	Рангирање
Неможност да се исполни безбедноста и/или регулативите.	Потенцијалниот мод на грешка влијае на безбедноста на функционирањето на возилото и/или вклучува неусогласеност со владините регулативи без предупредување.	10
	Потенцијалниот мод на грешка влијае на безбедноста на функционирањето на возилото и/или вклучува неусогласеност со владините регулативи со предупредување.	9
Губење или намалување на примарната функција.	Губење на примарната функција (возилото не е во возна состојба, не влијае на безбедноста при оперирање на возилото).	8
	Намалување на примарната функција (возилото е во возна состојба, но со намалено ниво на перформанси).	7
Губење или намалување на секундарната функција.	Намалување на секундарната функција (возилото е во возна состојба, но функциите за удобност/комфорт не се во функција).	6
	Намалување на секундарната функција (возилото е во возна состојба, но функциите за удобност/комфорт се со намалено ниво на перформанси).	5
Предизвикува вознемиреност	Појава на чујна бучава, возилото е во возна состојба, производот не е во согласност со спецификациите и регулативите и ќе биде забележан од поголемиот дел од клиентите (> 75 %).	4
	Појава на чујна бучава, возилото е во возна состојба, производот не е во согласност со спецификациите и регулативите и ќе биде забележан од многумина од клиентите (50 %).	3
	Појава на чујна бучава, возилото е во возна состојба, производот не е во согласност со спецификациите и регулативите и ќе биде забележан од мал број клиенти (< 25 %).	2
Нема ефект	Нема јасен ефект.	1

Табела А.4. Критериум за евалуација на појавата

Веројатност за појава на грешка	Стапка за можна грешка	Српк	Рангирање
Многу високо	> 1 во 2	< 0,33	10
	1 во 3	> 0,33	9
Високо	1 во 8	> 0,51	8
	1 во 20	> 0,67	7
Просечно	1 во 80	> 0,83	6
	1 во 400	> 1,00	5
	1 во 2.000	> 1,17	4
Ниско	1 во 15.000	> 1,33	3
Многу ниско	1 во 150.000	> 1,50	2
Далечна	< 1 во 1.500.000	> 1,67	1

Табела А.5. Критериум за евалуација на детекција

Детекција	Критериум: Веројатност за детекција со процесот на контрола	Оцена	Веројатност за детекција
Нема можност за детекција	Нема моментален процес на контрола. Не може да се детектира или не се анализира воопшто.	10	Скоро Невозможно
Не е веројатно да се детектира при било која фаза	Модот на грешка и/или причина не е лесен за детектирање (на пример при случајни аудити).	9	Многу неверојатно
Детекција на проблемот после процесирањето	Модот на грешка може да се детектира после процесирањето од страна на операторот на еден од следните начини визуелно/со осет/ преку звук.	8	Неверојатно
Детекција на проблемот во изворот	Модот на грешка може да се детектира на самата станица каде настанува од страна на операторот на еден од следните начини визуелно/со осет/ преку звук или после процесирањето со примена на атрибутивни мерни алатки (поминува/не поминува, мануелен	7	Многу ниска
Детекција на проблемот после процесирањето	Модот на грешка може да се детектира после процесирањето од страна на оператор со примена на мерни алатки за варијабилни податоци, или на самата станица од страна на оператор со примена на атрибутивни мерни алатки (поминува/не поминува, мануелен торк итн).	6	Ниска
Детекција на проблемот во изворот	Модот на грешка или причина за појава на грешка може да се детектира на самата станица каде настанува од страна на операторот со примена на мерни алатки за варијабилни податоци, или со автоматска контрола на самата станица која што детектира неусогласен производ и го известува операторот (светличка сигнализација, сирена). Се врши мерење за време на подесувањето или проверка на прво парче (само при подесување).	5	Просечна
Детекција на проблемот после процесирањето	Модот на грешка може да се детектира после процесирањето со автоматска контрола која што детектира неусогласен производ и го заклучува за да спречи понатамошно процесирање на истиот.	4	Просечна висока
Детекција на проблемот во изворот	Модот на грешка може да се детектира на самата станица со автоматска контрола која што детектира неусогласен производ и го заклучува за да спречи понатамошно процесирање на истиот.	3	Висока
Детекција на причината и/или Превенција на грешката	Детектирање на причината за појава на грешка на самата станица со автоматска контрола која ќе ја детектира причината и ќе спречи настанување на неусогласен производ.	2	Многу висока
Детекција не може да се примени; Превенција на причината	Превенирање на причината за појава на грешка како резултат на дизајнот на фиксатурата, на машината или на дизајнот на производот/делот. Неусогласен производ не може да настане затоа што процесот/дизајнот на производот има механизам за избегнување на грешка.	1	Речиси сигурно

10 РЕФЕРЕНЦИ

- [1] Habidin, N. F.; Yusof, S. *Relationship between lean six sigma, environmental management systems, and organizational performance in the Malaysian automotive industry*, International Journal of Automotive Technology, 2012.
- [2] Salah, S.; Rahim, A.; Carretero, J. A. *The integration of Six Sigma and Lean management*, International Journal of Lean Six Sigma, Vol. 1, No. 3, pp. 249-274, 2010.
- [3] Lee, Y-H.; Min, K. G.; Han, C.; Chang, K. S.; Choi, T. H. *Process improvement methodology based on multivariate statistical analysis methods*, Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 8, pp 945-961, 2004.
- [4] General Electric, *What is Six Sigma: the roadmap to customer impact?*, <http://www.ge.com/sixsigma/SixSigma.pdf>, 2018.
- [5] Angoss Software, *Key performance indicators, Six Sigma and data mining*, 2011.
- [6] Rother, M.; Harris, R. *Create continuing flow*, US: Lean Enterprise Institute, 2001.
- [7] Jonson, J. *Lean vs Six Sigma: What's the difference & use cases*, 2016.
- [8] Chen, S. C. ; Chen, R. O. C. K. S.; Hsia, T. C. *Promoting customer satisfactions by applying Six Sigma: an example from the automobile industry*, Taiwan, 2005.
- [9] Desai, V. *Small scale industries and entrepreneurship*, 6th edition, Himalaya Publishing House, 2005.
- [10] Kumer, V.; Kumar, S.; Tiwari, M. K.; Chan, F. *Performance evaluation of flexible manufacturing systems under uncertain and dynamic situations*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008.
- [11] Tong, K. W.; Kwong, C. K.; Yu, K-M. *Process optimisation of transfer moulding for electronic packages using artificial neural networks and multiobjective optimisation techniques*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 675-685, 2004.
- [12] Drechslein, J. *Applying Six Sigma and DMAIC to diversity initiatives*, Journal of Healthcare Management, 2007.
- [13] Kumar, M.; Antony, J. *Comparing the quality management practices in UK SME's*, Industrial Management & Data Systems, 2008.
- [14] Chakravorty, S.; Shah, A. D. *Lean Six Sigma (LSS): an implementation experience*, European Journal of Industrial Engineering, Vol. 6, No.1, pp. 118-137, 2012.
- [15] Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H. G.; Feld, T.; Hoffmann, M. *Industry 4.0*, Business and information systems engineering, pp. 239-242, 2014.
- [16] Müller, J.; Kiel, D.; Voigt, K-I. *What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability*, Proceedings of the Conference Sustainability, (Switzerland), 2018.
- [17] Muller, J. *Antecedents to digital platform usage in industry 4.0 by established manufacturers*, Department of Logistics and Operations Management, Salzburg University of Applied Sciences, Austria, 2019.
- [18] Köksal, G.; Batmaz, I.; Testik, M. *A review of data mining applications for quality improvement in manufacturing industry*, Expert systems with applications, Vol.38, Issue 10, 2011.
- [19] Lewin, K. *Kurt Lewin and the Origins of Action Research*, Educational action research, 1993.
- [20] Liker, J. K. *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*, McGraw-Hill, 2004.
- [21] Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D. *The machine that changed the world*, New York: USA: Rawson Associate, 1990.
- [22] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0 - Securing the future of German manufacturing industry*. Final Report of the Industry 4.0 working group - National Academy of Science and Engineering, München, 2013.
- [23] Anvari, A.; Moghimi, R. *The strategic approach to exploration review on TQM and Lean Production*, International Journal of Lean Thinking, 2012.
- [24] Juran, J. M. *Juran's Quality handbook*, McGraw-Hill Companies, Inc, 1962.
- [25] Ishikawa, K. *Introduction to Quality Control*, JUSE Press, 1954.
- [26] Feigenbaum, A. V. *Total Quality Control*, Harvard Business Review, 34 (6), 93-101, 1956.
- [27] Crosby, P. B. *Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain*, New York: McGraw-Hill, 1979.

- [28] Dean, J. W.; Bowen, D. E. *Management Theory and Total Quality: Improving Research and Practice through Theory Development*, Academy of Management Review, pp. 392-418, 1994.
- [29] Johnson, A.; Omachonu, V. K. *Total quality management as a health care corporate strategy*, International Journal of Health Care Quality Assurance, Vol. 8 No. 6, pp. 23-28.
- [30] Anderson, J. C.; Rungtusanatham, M.; Schroeder, R. G.; Devaraj, S. *A path analytic model of a theory of quality management underlying the deming management method: preliminary empirical findings*, USA: Decision Sciences, Volume 26 Number 5, 1995.
- [31] Imai, M. *Kaizen: The key to Japan's Competitive Success*, New York: McGraw-Hill, 1986.
- [32] Prajago, D. I. *The comparative analysis of TQM practices and quality performance between manufacturing and service firms*, International Journal of Service Industry Management, pp. 217-28, 2005.
- [33] Bou-Llusar, C. J.; Escrig-Tena, A. B.; Roca-Puig, V.; Beltran-Martin, I. *An empirical assessment of the EFQM excellence model: Evaluation as a TQM framework relative to the MBNQA Model*, Journal of Operations Management, pp. 1-22, 2009.
- [34] Mehra, S.; Kumar, S. K. *Implementing total quality management with a focus on enhancing customer satisfaction*, International Journal of Quality & Reliability Management, pp. 913-927, 2008.
- [35] Abdullah, M. *The mediating effect of customer satisfaction on TQM practices and financial performance*, Singapore Management Review, pp. 22-55, 2000.
- [36] Kumar, V.; Choisine, F.; Grosbois, D.; Kumar, U. *Impact of TQM on company's performance*, International Journal of Quality & Reliability Management, pp. 23-37, 2009.
- [37] Hackman, J. R.; Wageman, R. *Total quality management: Empirical, conceptual, and practical issues*, Administrative Science Quarterly, pp. 309-342, 1995.
- [38] Powell, T. C. *Total quality management as competitive advantage: A review and empirical study*, Strategic Management Journal, pp. 15-27, 1995.
- [39] Narasimhan, R.; Talluri, S. *A methodology for strategic sourcing*, European Journal of Operational Research, pp. 236-250, 2004.
- [40] International organization for standardization, *ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements*, 2015.
- [41] International organization for standardization, *ISO 9004:2018 Quality management - Guidance to achieve sustained success*, 2018.
- [42] International organization for standardization, *ISO 19011:2018 - Guidelines for auditing management systems*, 2018.
- [43] Automotive Industry Action Group (AIAG), *Failure mode and effect analyze*, 2018.
- [44] Automotive Industry Action Group (AIAG), *Statistical process control*, 2005.
- [45] Automotive Industry Action Group (AIAG), *Measurement system analysis*, 2010.
- [46] Nave, D. *How to compare Six Sigma, Lean and the Theory of Constraints*, Quality progress, 2002.
- [47] Antony, J. *Some pros and cons of Six Sigma: An academic perspective*, Emerald Group Publishing Limited, Glasgow, UK, 2004.
- [48] Henderson, K.; Evans, J. *Successful implementation of Six Sigma benchmarking General Electric company*, An International Journal, pp. 260-282, 2000.
- [49] Antony, J.; Banuelas, R. *Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organizations*. The TQM Magazine, Measuring Business Excellence, 2002.
- [50] Keui, C. H.; Madu, C. N. *Customer-centric six sigma quality and reliability management*, MCB UP Ltd, New York, 2003.
- [51] Horel, H. *Minimization of production cost by reducing casting defects using DMAIC approach*, Quality Engineering Magazine, 2004.
- [52] Hoerl, R. *Six Sigma and Total Quality Management (TQM): similarities, differences and relationship*, International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage, 2004.
- [53] Heckl, D.; Moormann, J.; Rosemann, M. *Uptake and success factors of Six Sigma in the financial services industry*, Business Process Management Journal, pp. 436-472, 2010.
- [54] Brassard, M.; Finn, L.; Ginn, D.; Ritter, D. *The Six Sigma memory Jogger II: A pocket guide*, Salem NH, USA, 2002.
- [55] George, M. L.; Maxey, L.; Rowlands, D.; Price, M. *The Lean Six Sigma pocket toolbox: A quick reference guide to 100 tools for improving quality and speed*, New York: McGraw-Hill, 2004.

- [56] Munk, J. *How Six Sigma has improved the automobile industry*, Continuing & profesional education 2013.
- [57] Montgomery, D. C. *Introduction to statistical process control*, Arizona, USA: John Wiley and Sons, 2013.
- [58] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control 6th Edition*, Don Fowley, 2013.
- [59] Димески, Д.; Сребренкоска, В. *Дизајн и анализа на експерименти (сефакторен план на експерименти)*, Универзитет Гоце Делчев Штип, pp. 185, 2014.
- [60] Womack, J. P.; Jones, D. T. *Lean thinking :Banish waste and create wealth in your corporation*, Free Press Simon&Schuster, New York, 2003.
- [61] Rhoter, M.; Shook, J. *Learning to see: Value stream mapping to add value and eliminate muda*, Brookline, Massachusetts USA: Lean enterprise institute, 1999.
- [62] Ohno, T. *The Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Productivity Press, 1988.
- [63] Boakye-Adjei, K.; Thamma, R.; Kirby, E. D. *Autonomation: the future of manufacturing*, IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 2015.
- [64] MacDougall, W. *Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future*, Germany Trade & Invest, 2014.
- [65] Zhou, K.; Liu, T.; Zhou, L. *Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges*, 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) IEEE.,2016.
- [66] Muller, M. J.;Buliga, O.; Voigt, K-I. *Fortune favors the prepared: How SMEs business model innovations in Industry 4.0*, Technological forecatisng and social change, Vol.132, pp. 2-17, 2018.
- [67] Ruttimann, B. G.; Stockli, M. T. *Lean and Industry 4.0 - Twins, Partners, or Contenders? A due clarification regarding the supposed clash of two production systems*, Journal of service sience and management, 2016.
- [68] Brettel, M.; Friederichsen, N.; Keller, M.; Rosenberg, N. *How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective*, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 2014.
- [69] Pereira, A. C.; Romero, F. *A Review of the meanings and the Implications of the Industry 4.0 concept*, Proceedings of the Manufacturing Engineering Society International Conference, 2017.
- [70] Junior, F. M.; Montenegro, M.; Thadani, R.; Pedroso, G. A. C.; Oliveira, M. A. *Industry 4.0 as a way to enhance Lean manufacturing and Six Sigma*, European Lean Educator Conference, Braga, Portugal 2018.
- [71] Ahuett-Garza, H.; Kurfess,T. *A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing*, Manufacturing Letters, Vol. 15, pp. 60-63, 2018.
- [72] Qi, Q.; Tao, F.; Zuo, Y.; Zhao, D. *Digital twins shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing*, IEEE Access, Vol. 72, pp. 237-242, 2017.
- [73] Kouicem, D. E.; Bouabdallah, A.; Laklef, H. *Internet of things security: A top-down survey*, Computer Networks, 2018.
- [74] Lanotte, R.; Merro, M. *A semantic theory of the Internet of Things*, Information and computation, Vol. 259, pp. 72-101, 2018
- [75] Sabino, W. S. *Sensors are fundamental to new intelligent systems*, A Siemens business, 2017.
- [76] Radziwon, A.; Bilberg, A.; Bogers, M.; Madsen, E. S. *The smart factory: Exploring adaptive and flexible manufacturing solutions*, Procedia Engineering, Vol. 69, pp.1184-1190, 2014.
- [77] Santos, M. Y.; Oliveira e Sa, J.; Andrade, C.; Vale Lima, F.; Costa, E.; Costa, C.; Martihno, B.; Galvao, J. *A big data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy*, International Journal of Information Management, Vol. 37, pp. 750-760, 2017.
- [78] Nimmagadda, S. L.; Reiners, T.; Wood, L. C. *On big data-guided upstream business research and its knowledge management*, Vol. 89, pp. 143-158, Journal of Business Research., 2018.
- [79] Ahuett-Garza, H.; Kurfess,T. *A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing*, Manufacturing Letters, Vol. 15, pp. 60-63, 2018.
- [80] Caesarius, L. M.; Hohenthal, J. *Searching for big data: How incumbents explore a possible adoption of big data technologies*, Vol. 34, pp. 129-140, Scandinavian Journal of Management, 2018.
- [81] Foidl, H.; Felderer, M. *Research challenges of Industry 4.0 for quality management*, Innovations in Enterprise Information Systems Management and Engineering, Springer, Cham, 2015.
- [82] Gunasekaran, A.; Subramanian, N.; Ngai, W. T. E. *Quality management in the 21st century enterprises: Research pathway toward Industry 4.0*, International jurnal of production economics, pp. 125-129, 2019.

- [83] Jayram, A. *Lean six sigma approach for global supply chain management using industry 4.0 and IIoT*, Proceedings of the 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics, IEEE, IC3I 2016, 2016.
- [84] Muller, J. M. *Contribution of Industry 4.0 to quality mangement*, Internatinal fedaration of automatic control IFAC, 2019.
- [85] Davies, R. S.; Coole, T. *Review of sociotechnical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0*, Procedia Manufacturing, Vol. 11, pp. 1288-1295, 2017.
- [86] Pereira, A. C.; Dinis - Carvalho, J. *How industry 4.0 can enhance Lean Practices*, Algoritmi Research center, Unevrsity of Minho, Portugal, 2018.
- [87] Xu, Y.; Chen, M. *An internet of things based framework to enhance just-in-time manufacturing*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manufacturing, Vol. 232, 2017.
- [88] Kukushkin, I.; Zavrazhina, A.; Grabenweger, J.; Kildibekov, A. *Model based concept for scheduling analysis of packaging lines*, Proceeding of the 26th International DAAAM Symposium, 2016.
- [89] Witkowski, K. *Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative solutions in logistics and supply chains management*, Procedia Engineering, 2017.
- [90] Lugert, A.; Volker, K.; Winkler, H. *Dynamization of value stream management by technical and managerial approach*, Procedia CIRP, pp. 701-706, 2018.
- [91] Wagner, T.; Herrmann, C.; Thiede, S.; *Identifying target oriented Industry 4.0 potentials in lean automotive electronics value streams*, Procedia CIRP, pp. 1003-1008, 2018.
- [92] Demircioglu Diren, D.; Boran, S.; Cil, I. *Integration of machine learning techniques and control charts*, Scientia Iranica, 2019.
- [93] Hohmann, C. *Six Sigma and Industry 4.0*, 2019.
- [94] Kuo C-J.; Tnig, K-C.; Chen, Y-C.; Yang, D-L.; Chen, H-M. *Automatic machine status prediction in the era of Industry 4.0*, Journal of Systems Architectur, Vol. 81, pp. 44-53, 2017.
- [95] Godina, R.; Matias, J. *Quality control in contex of Industry 4.0*, Proceedings of the International Joint Conference on Industrial Engineering and Operational Management, pp. 177-187, 2019.
- [96] Wang L.; He, L.; Xu, S. *The application of Industry 4.0 in customized furniture manufacturing industry*, 13th Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM 2016), 2017.
- [97] Demartini, M.; Tonelli, F. *Quality management in the Industry 4.0 era*, Industrial systems engineering, Unuversity of Genova, Italy, 2019.
- [98] De Carolis, A.; Macchi, M.; Negri, E.; Terzi, S. *A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies*, Conference: IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, Milano, 2017.
- [99] Cattaneo, L.; Rossi, M.; Negri, E.; Powell, D. *Lean thinking in the digital era*, Product Lifecycle Management and the Industry of the Future, Seville, Springer, pp. 371-381, 2017.
- [100] Emmer, C.; Pfouga, A.; Stjepandic, J. *Novel approach with 3D measurement data management for Industry 4.0*, 24th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineerin, Singapore, 2017.
- [101] Hienke, S.; Frölian, H.; Zeller, V.; Schuh, G. *Energy management 4.0: Roadmap towards the self-optimising production of the future*, 6th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, 2017.
- [102] Schlüter, N.; Sommerhoff, B. *Development of the DGQ role bundle model of the Q occupations*, International Journal of Quality and Service Sciences, 2017.
- [103] Kiel, D.; Arnold, C.; Muller, J. M.; Voight, K-I. *Sustainable industries value creation: benefits and challenges of industry 4.0*, International journal of innovation management, p. 8, 2017.
- [104] Eleftheriadis, R. J.; Myklebust, O. *A guideline of quality steps towards Zero Defect*, International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Michigan, Detroit, 2016.
- [105] Mrugalska, B.; Wyrwicka, M. *Towards Lean production in Industry 4.0*, Procedia Engineering, pp. 466-473, 2017.
- [106] Brauner, P.; Valdez, A.; Philipsen, R.; Zieffle, M. *How correct and defect decision support systems influence trust, compliance, and performance in supply chain and quality management*, Human-Computer Interaction Center at RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2017.
- [107] Dossou, P.; Nachidi, M. *Modeling supply chain performance*, Proceeding of the 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, Modena, Italy , 2017.

- [108] Li, T.; He, Y.; Zhu, C. *Big data oriented macro-quality index based on customer satisfaction index and PLS-SEM for Manufacturing Industry*, Proceeding of the 2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), 2016.
- [109] Štofova, L.; Szaryszova, P.; Vilamova, Š. *Development of the integrated quality management model for increasing the strategic performance of enterprises in the automotive industry*, Problems and Perspectives in Management, pp. 4-15, 2017.
- [110] Szabó, K. *Ramp-up process improvement practices for time-to-market reduction*, Periodica Polytechnica Social and Management Sciences , pp. 19-29, 2018.
- [111] Stojanovic, L.; Dinic, M.; Stojanovic, N.; Stojadinovic, A. *Big-data- driven anomaly detection in Industry (4.0): an approach and a case study*, Proceeding of the 2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2016.
- [112] Song, Z.; Sun, Y.; Wan, J.; Liang, P. *Data quality management for service-oriented manufacturing cyber-physical systems*, Computers & Electrical Engineering, pp. 34-44, 2017.
- [113] George, M. L. *Lean Six Sigma: combining Six Sigma quality with Lean production*, New York: NY, USA:McGraw-Hill Education, 2002.
- [114] Habidin, N. F.; Yusof, S.; Fuzi, N. M. *Lean Six Sigma, strategic control systems, and organizational performance for automotive suppliers*, EmeraldInsight, 2015.
- [115] G. Kristof, *Planning business improvement using analytic hierarchy process (AHP)*, 2005.
- [116] Andersen, H. V.; Lawrie, G. J. G.; Savic, N. *Effective quality management through third generation balanced scorecard*, International Journal of Productivity and Performance, 2004.
- [117] Niu, G.; Lau, D.; Pecht, M. *Computer manufacturing management integrating Lean Six Sigma*, International Journal of Performability, 2010.
- [118] Habidin, N. F.; Yusof, S.; Omar, B.; Mohamad, S. I. S.; Janudin, S. E.; *Strategic balanced scorecard systems for Malaysian automotive industry*, Management Research Journal, 2012.
- [119] Habidin, F. N.; Mohd Fuzi, N.; Mohd Zamri, F. I.; Hibadullah, S. N. *ISO 26000 efforts and corporate social responsibility performance in Malaysian automotive industry*, International Journal of Business Excellence, 2014.
- [120] Dixon, J. R.; Nanni, A. J.; Vollmann, T. E. *The new performance challenges – measuring operating for world-class competition*, CA: Dow Jones Irwin, 1990.
- [121] Govindarajan, V.; Gupta, A. K. *Linking control systems to business unit strategy: impact on performance*, Accounting, Organization and Society, Vol. 10, pp. 51-66, 1985.
- [122] Daniel, S. J.; Reitsperger, W. D. *Linking quality strategy with management control system: empirical evidence from Japanese industry*, Accounting, Organizations and Society, Vol. 16, pp. 601-618, 1991.
- [123] Ittner, C. D.; Larcker, D. F. *Total quality management and the choice of information and reward systems*, Journal of Accounting Research, Vol. 33, pp.1-34, 1995.
- [124] Hoque, Z. *A contingency model of the association between strategy environment uncertainty and performance measurement: impact on organization performance*, International Business Review, 2004.
- [125] Salah, S.; Rahim, A. *The integration of Six Sigma*, Internal Journal of Lean Six Sigma, Emerald group publishing, pp. 49-93, 2018.
- [126] Mader, D. P. *Lean Six Sigma's evolution: integrated method uses different deployment models*, Quality Progress, p.p 40-48 , 2008.
- [127] Crawford, R. *Ammunition enterprise excellence ready for tomorrow*, USA Armor School Research Library, 2008.
- [128] Snee, R. *When worlds collide: Lean and SixSigma*, QualityProgress, 2005.
- [129] Hines, P.; Holweg, M; Rich, N. *Learning to evolve. A review of contemporary Lean thinking*, International Journal of Operations & Production Management, 2004.
- [130] Bendell, T. *A review and comparison of Six Sigma and the lean organizations*, The TQM Magazine, 2006.
- [131] Despinoski, G. *Industry 4.0 and quality in automotive sector*, International Jurnal of Sience and Engineering Research, Volume 12, Issue 10, October 2021, ISSN 2229-5518, 2021.
- [132] Leyh, C.; Martin, S.; Schaffer, T. *Analyzing industry 4.0 models with focus on Lean production aspects*, Information technology for management ongoing research and development, Springer, p.p 114-130, 2018.

- [133] Leyh, C.; Martin, S.; Schaffer, T. *Industry 4.0 and Lean production - a machine relationship?*, Proceedings of the institute of electrical and electronics (IEEE), Federated conference of computer science and information systems, 2017.
- [134] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0 - Final report of the Industry 4.0 working group*, Communication promoters group of the industry - science research, 2013.
- [135] Schmitt, J.; Deuse, J. Stemann, D. *Enhanced Six Sigma - integration of data mining techniques into DMAIC cycle*, <http://www.researchgate.net/publication/329916208>, 2019.
- [136] Liker, J. K. *The toyota way, second edition: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*, New York: MC GRAW HILL, 2021.
- [137] Sanders, A.; Elangeswaran, C.; Wulfsberg, J. P. *Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing*, Journal of Industrial Engineering and Management, pp. 811-833, 2016.
- [138] Albliwi, S. A.; Antony, J.; Abdul Halim Lim, S. *A systematic review of Lean Six Sigma for the manufacturing industry*, Business Process Management Journal, 2015.
- [139] Snee, R. *Lean Six Sigma, getting better all the time*, International Journal of Lean Six Sigma, 2010.
- [140] Kumar, M.; Antony, J.; Kumar Sing, R.; Kumar Tiwary, M. *Implementing the Lean Six Sigma framework in an Indian SME: a case study*, Production Planning & Control, pp. 407-423, 2006.
- [141] Laureani, A.; Antony, J. *Standards for Lean Six Sigma certification*, International Journal of Productivity and Performance Management, 2012.
- [142] Vinodh, S.; Gautham, S. G.; Ramiya R, A. *Implementing lean sigma framework in an Indian automotive valves manufacturing organization: a case study*, Production Planning & Control, pp. 708-722, 2011.
- [143] Pepper, M. P.; Spedding, T. A. *The evolution of Lean Six Sigma*, International Journal of Quality & Reliability Management, pp. 138-155, 2010.
- [144] Hilton, R. J.; Sohal, A. *A conceptual model for the successful deployment of Lean Six Sigma*, International Journal of Quality & Reliability Management, pp. 54-70, 2012.
- [145] Breyfogle, F. *Beyond troubleshooting*, ASQ Six Sigma Forum Magazine, 2008.
- [146] Thomas, A.; Rowlands, H.; Byard, P.; Rowland-Jones, R. *Lean Six Sigma: an integrated strategy for manufacturing sustainability*, International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage, 2008.
- [147] Vinodh, S.; Vasanth Kumar, S.; Vimal, K. E. K. *Implementing Lean Six Sigma in an Indian rotary switches manufacturing organization*, Production Planning & Control, pp. 282-302, 2012.
- [148] Chen, M.; Lyu, J. *A Lean Six-Sigma approach to touch panel quality improvement*, Production Planning & Control, pp. 445- 454, 2009.
- [149] Proudlove, N.; Moxham, C.; Boaden, R. *Lessons for lean in healthcare from using Six Sigma in the NHS*, Public Money & Management, p.p 27-34, 2008.