

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Ведран Мишић

**ПРИКАЗ СТУДИЈЕ СЛУЧАЈА КОНТРОЛЕ КВАЛИТЕТА У
ПРОИЗВОДЊИ ПРИМЈЕНОМ *MSA* И *SPC***

Завршни рад - II циклус студија

Бања Лука, 2026.

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Ведран Мишић

**ПРИКАЗ СТУДИЈЕ СЛУЧАЈА КОНТРОЛЕ КВАЛИТЕТА У
ПРОИЗВОДЊИ ПРИМЈЕНОМ *MSA* И *SPC***

Завршни рад - II циклус студија

Бања Лука, 2026.

КОМИСИЈА ЗА ПРЕГЛЕД И ОДБРАНУ:

1. Др Зорана Танасић, редовни професор, предсједник
2. Др Горан Јотић, доцент, ментор, члан
3. Др Бранко Штрбац, ванредни професор, члан

Датум одбране:

Предговор

Посебну захвалност дугујем свом ментору, професору Горану Јотићу, као и професору Бранку Штрпцу, на стручној и научној подршци, корисним савјетима, стрпљењу и разумијевању током израде овог рада.

Практични дио рада реализован је у компанији *Mahle*, те се искрено захваљујем колегама са производне линије Кора: Верици Бороњи, Александру Станићу, Данилу Сантрачу и Бранку Ћулибрку, на несебичној помоћи и сарадњи током израде рада.

Велику захвалност упућујем драгој дјевојци Маји Марјановић и драгом пријатељу Зорану Швраки на помоћи при изради слика и илустрација.

На крају, најискреније се захваљујем својој породици на безрезервној подршци, разумијевању и охрабрењу током цијелог процеса израде рада.

САДРЖАЈ

1. Увод	1
2. Појам квалитета у савременој индустрији	3
2.1. Развој квалитета	6
2.1.1. Квалитет у средњем вијеку (занатлијски приступ)	7
2.1.2. Прва индустријска револуција – Индустрија 1.0	8
2.1.3. Друга индустријска револуција – Индустрија 2.0	8
2.1.4. Индустрија 3.0	9
2.1.5. Индустрија 4.0	10
2.1.6. Индустрија 21. вијека (5.0 и 6.0)	11
3. <i>SPC - Statistical Process Control</i>	14
3.1. Подаци – прикупљање и обрада	15
3.1.1. Нормална (Гаусова) расподела	20
3.1.2. Облик хистограма и криве расподеле као показатељ процеса	21
3.2. Варијације	24
3.2.1. Контролне карте	27
3.2.2. Контролна карта као показатељ стања процеса	34
3.3. Процес	37
3.3.1. Способност процеса	38
3.4. Стратегија израде <i>SPC</i> анализе	43
4. <i>MSA – Анализа мјерног система (Measurment System Analysis)</i>	47
4.1. Терминологија у <i>MSA</i> процесу	47
4.2. Избор <i>MSA</i> стратегија	51
4.2.1. Студија Тип 1	52
4.2.2. Студија линеарности	53
4.2.3. Студија Тип 2	54
4.2.4. Студија Тип 3	55
5. Одабрани производ и процес	57
5.1. <i>EPS</i> мотор Кора	57
5.1.1. Техничке карактеристике	58
5.2. Процес производње	59
6. <i>MSA</i> уређаја за контролу електричних карактеристика <i>EPS</i> мотора	64
6.1. Студија Тип 1	64
6.2. Студија Тип 3	71
6.3. Реакциони план у случају неуспјешне <i>MSA</i> анализе	75
7. <i>SPC</i> анализа електричних карактеристика <i>EPS</i> мотора	77
7.1. Реакциони план у случају неуспјешне <i>SPC</i> анализе	83
8. Закључак	84
9. Литература	85

Наслов: Приказ студије случаја контроле квалитета у производњи примјеном *MSA* и *SPC*

Резиме –Рад се бави интегрисаним приступом управљању квалитетом кроз примјену метода *MSA* (*Measurement System Analysis*) и *SPC* (*Statistical Process Control*) на примјеру производње електро механичких компоненти, са фокусом на *EPS* моторе. У теоријском дијелу анализира се развој концепта квалитета од историјских почетака до савремених парадигми Квалитет 4.0 и 5.0, уз посебан осврт на значај контроле варијација у процесима. Детаљно су обрађени основни принципи *SPC*-а, укључујући контролне карте, индексе способност процеса и стратегије анализе. Поред тога, представљени су кључни елементи *MSA* анализе, као што су поновљивост, репродуктивност, линеарност и стабилност мјерних система. У практичном дијелу рада извршена је *MSA* анализа уређаја за контролу електричних карактеристика *EPS* мотора, као и *SPC* анализа процеса производње, уз дефинисање реакционих планова у случају одступања. Резултати показују да поуздан мјерни систем и статистички контролисан процес представљају неопходан предуслов за стабилну, способну и квалитетну производњу у аутомобилској индустрији.

Кључне ријечи – Квалитет, *MSA*, *SPC*.

Научна област: Машинство.

Ужа научна област: Метрологија.

TITLE: Case study presentation of production process quality control using MSA and SPC

Abstract – The contemporary industrial environment is characterized by rapid technological development, increasing process complexity, and growing demands for product reliability and consistency. In such conditions, quality becomes not only a competitive advantage but a fundamental prerequisite for sustainable production. This thesis presents an integrated approach to quality management through the application of Measurement System Analysis (MSA) and Statistical Process Control (SPC) in the production of Electric Power Steering (EPS) motors, which represent critical components in the automotive industry. The theoretical part of the work provides an overview of the historical development of the quality concept, from early craftsmanship to modern paradigms such as Quality 4.0 and Quality 5.0, emphasizing the importance of understanding and controlling process variation. Special attention is given to the principles of SPC, including control charts, process capability indices, and strategies for monitoring process stability, as well as to key elements of MSA, such as repeatability, reproducibility, linearity, and measurement system stability. The practical part of the thesis includes a detailed MSA study of the device used for measuring electrical characteristics of EPS motors, followed by an SPC analysis of the production process and the definition of reaction plans in cases of nonconformity. The results confirm that a reliable measurement system and statistically controlled processes are essential for achieving stable, capable, and high-quality production in accordance with the requirements of the automotive industry.

Key words – Quality, MSA, SPC.

Scientific discipline: Mechanical engineering.

Scientific subdiscipline: Metrology.

Попис слика:

Слика 3.1: Оригинални изглед Шухватрове прве контролне карте [5].....	14
Слика 3.2: Фреквентна расподела формирана на основу дијела Табеле 3.2.	17
Слика 3.3: Фреквентна расподела података из Табеле 3.2.	18
Слика 3.4: Фреквентни полигон измјерених вриједности из Табеле 3.2	18
Слика 3.5: Подаци из Табеле 3.2 представљени ступцима.	19
Слика 3.6: Хистограм података из Табеле 3.1.....	20
Слика 3.7: Нормална расподела с унесеном стандардном девијацијом.	21
Слика 3.8: Узроци варијација представљени преко 5М [10].	24
Слика 3.9: Понашање процеса у времену у зависности од утицаја уобичајени и специјалних карактеристика [10].	26
Слика 3.10: Контролна карта са основним елементима.	28
Слика 3.11: Процедура избора контролне карте [10].	34
Слика 3.12: Примјер фреквентног полигона процеса под контролом.	35
Слика 3.13: Осам случајева који указују да процес није под контролом.	36
Слика 3.14: Примјер стреличарства као показатељ способности процеса.	38
Слика 3.15: Ср графички приказ.....	39
Слика 3.16: Графички приказ Срк.	40
Слика 3.17: Крива нормалне расподеле са стандардном девијацијом и вриједностима Срк [12].	41
Слика 3.18: Шифтовање средње вриједности карактеристике процеса [12].	42
Слика 3.19: Специјална карактеристика приказана кроз робусност[12].	44
Слика 3.20: Раније и нове ознаке специјалних карактеристика [11].	45
Слика 3.21: Специјална карактеристика означена старијом ознаком $F \diamond$	45
Слика 3.22: Примјер табеле из техничке документације с подацима о специјалним карактеристикама с цртежа и захтјевима анализе за стабилност процеса.	46
Слика 4.1: Биас – графички приказ [14].	49
Слика 4.2: Узроци варијација у мјерном систему [16].	50
Слика 4.3: Правилан одабир студије за MSA анализу [16].	56
Слика 5.1: Блок шема EPS електромотора.	57
Слика 5.2: Кора EPS мотор.	58
Слика 5.3: Електричне и механике карактеристике мотора дате на техничком цртежу мотора.	59
Слика 5.4: Тлоцрт производне линије Кора са свим под линијама и машинама.	60
Слика 5.5: Полупроизвод, статор електромотора Кора.....	60
Слика 5.6: Монтажна роботска ћелија.	61
Слика 5.7: Изглед јединице за мјерење електричних карактеристика АК2200.	62
Слика 5.8: Начин остваривања контакта мјерног система са електромотором.	62
Слика 5.9: Изглед монитора са мјерењима електричних карактеристика једног електромотора Кора.	63
Слика 6.1: Радно окружење софтверског пакета Q- Das.....	65
Слика 6.2: Изглед програма приликом уноса општих података о производу.	66

Слика 6.3: Унос опитних података о величини која се мјери.	66
Слика 6.4: Избор стандарда обраде података.	67
Слика 6.5: Студија Тип 1 – индуктивност фазе АВ.	68
Слика 6.6: Студија Тип 1 - електричне отпорности фазе СА.	70
Слика 6.7: Студија Тип 3 – индуктивност фазе АВ.	73
Слика 6.8: Студија Тип 3 – електрична отпорност фазе СА.	74
Слика 7.1: Избор анализе у софтверском пакету.	79
Слика 7.2: Анализа SPC за индуктивност фазе АВ.	80
Слика 7.3: SPC анализа електричне отпорности фазе СА.	82

Попис Табела:

Табела 2.1: : Кратки преглед развоја индустрије и аспект квалитета који је био битан у тим фазама.	12
Табела 3.1: Резултати 100 мјерења електричне отпорности ($m\Omega$) једне фазе електромотора.	16
Табела 3.2: Подаци распоређени у растућем редослиједу (електрична отпорност у $m\Omega$).	17
Табела 3.3: Различити типови хистограм и њихово тумачење [2].	22
Табела 3.4 Табела константи за $\bar{x}R$ и $\bar{x}\sigma$ контролне карте [10].	32
Табела 3.5: Коефицијенти за $\bar{x}R$ и индивидуалне контролне карте [10].	33
Табела 3.6: Однос C_{pk} , σ и вјероватноће за ОК/дефектан производ [12].	42
Табела 3.7: Однос C_{pk} и броја дефектних дијелова на примјеру аутомобила од 20 000 дијелова.	43
Табела 4.1: Дозвољене вриједности показатеља студије Тип 1.	53
Табела 4.2: Параметри студије линеарности.	54
Табела 4.3: Услови прописани за студију Тип 2.	55
Табела 4.4: Прописани критеријуми студије Тип 3.	56
Табела 6.1: Вриједности индуктивности фазе АВ (у μH).	64
Табела 6.2: Вриједности отпорности фазе СА (у $m\Omega$).	64
Табела 6.3: Резултати мјерење индуктивности (μH) за потребе студије Тип 3.	71
Табела 6.4: Резултати мјерење индуктивности ($m\Omega$) за потребе студије Тип 3.	71
Табела 7.1: Резултати мјерења индуктивности фазе АВ (μH).	77
Табела 7.2: Резултати мјерења електричне отпорности фазе АС ($m\Omega$).	78

1. УВОД

Савремено индустријско окружење карактеришу динамичне промјене, интензиван технолошки развој и све израженија глобална конкуренција, што производним организацијама намеће потребу за континуираним унапрјеђењем процеса, производа и услуга. У таквим условима, квалитет више није само пожељна карактеристика производа, већ стратешки ресурс и један од кључних фактора дугорочне одрживости и конкурентности. Компаније које успијевају да успоставе стабилне, контролисане и способне процесе, те да обезбиједи поуздане мјерне системе, остварују значајну предност на тржишту, смањују трошкове, повећавају продуктивност и граде повјерење купаца.

Историјски посматрано, концепт квалитета пролазио је кроз бројне трансформације од занатлијског приступа у средњем вијеку, преко стандардизације и масовне производње током индустријских револуција, до савремених парадигми Квалитет 4.0 и Квалитет 5.0, које интегришу дигитализацију, умјетну интелигенцију и напредне аналитичке методе. Иако се приступи мијењају, суштина остаје иста: квалитет представља способност производа или процеса да досљедно испуњава захтјеве купца и релевантне спецификације. Управо та способност постаје највећи изазов у комплексним производним системима, у којима сви фактори људи, машине, материјали, методе и мјерења, утичу на варијације процеса.

Управљање варијацијама представља темељ модерног приступа квалитету. Сваки процес, без обзира на степен аутоматизације, природно варира, а задатак организације је да те варијације разумије, мјери, контролише и држи у границама које обезбјеђују стабилан и способан процес. У том контексту, статистичка контрола процеса (*SPC – Statistical Process Control*) представља један од најмоћнијих алата за праћење и анализу процесног понашања. Кроз контролне карте, индексе способност процеса и статистичке методе, *SPC* омогућава благовремено откривање одступања, идентификацију узрока варијација и доношење корективних мјера прије него што дође до производње неусаглашених дијелова. На тај начин *SPC* не служи само као средство контроле, већ као систем раног упозоравања и основа за континуирано побољшање.

Међутим, ниједан статистички алат не може бити поуздан уколико мјерни систем који прикупља податке није стабилан, репродуктиван и довољно прецизан. Управо зато анализа мјерног система (*MSA – Measurement System Analysis*) представља неопходан предуслов за било коју *SPC* анализу. *MSA* омогућава процјену поновљивости и репродуктивности мјерења, линеарности и стабилности мјерних уређаја, чиме се обезбјеђује да подаци који улазе у статистичку анализу заиста одражавају стање процеса, а не грешке инструмента или оператора. Уколико мјерни систем није адекватан, свака *SPC* анализа постаје непоуздана, а доношење одлука заснованих на таквим подацима може довести до погрешних закључака и значајних трошкова.

У производњи електро механичких компоненти, као што су *EPS (Electric Power Steering)* мотори, значај *SPC* и *MSA* анализа је посебно изражен. *EPS* системи представљају критичне компоненте у аутомобилској индустрији, гдје су безбједност, поузданост и прецизност од пресудног значаја. Електричне карактеристике мотора, као што су отпорност намотаја, струја празног хода, момент и друге параметре, неопходно је контролисати са високим степеном тачности. Свака варијација која излази изван дозвољених граница може довести до неправилног рада система управљања возилом, што директно утиче на безбједност корисника. Због тога је неопходно да процес производње *EPS* мотора буде стабилан, способан и под сталним статистичким надзором,

а да мјерни системи који се користе за контролу електричних карактеристика буду темељно верификовани кроз *MSA* процедуре.

Рад има за циљ да прикаже интегрисани приступ управљању квалитетом кроз примјену *MSA* и *SPC* метода на конкретном примјеру производње *EPS* мотора. У теоријском дијелу рада биће представљен развој концепта квалитета, основни принципи статистичке контроле процеса и анализа мјерних система, док ће у практичном дијелу бити приказана *MSA* анализа мјерног уређаја за контролу електричних карактеристика *EPS* мотора, као и *SPC* анализа процеса производње. Посебна пажња биће посвећена интерпретацији резултата, идентификацији узрока варијација и дефинисању реакционих планова у случају одступања од захтјева.

Кроз овај приступ, рад настоји да покаже да квалитет није резултат случајности, већ системски и методолошки процес који захтијева јасно дефинисане процедуре, поуздане мјерне системе, статистичку контролу и континуирано побољшање. Само комбинацијом ових елемената могуће је обезбиједити стабилну производњу, минимизирати варијације и испоручити производ који у потпуности задовољава захтјеве купца и стандарде аутомобилске индустрије.

2. ПОЈАМ КВАЛИТЕТА У САВРЕМЕНОЈ ИНДУСТРИЈИ

У савременом пословном окружењу, које карактеришу брзе технолошке промјене, глобализација и интензивна тржишна конкуренција, производне организације су суочене са потребом континуираног унапређења свих процеса у циљу побољшања резултата. Један од кључних фактора који доприноси одрживом развоју и дугорочном позиционирању на тржишту јесте системско управљање квалитетом. Управљање квалитетом није више ограничено само на процес и производ, већ обухвата све аспекте организационог дјеловања, од стратешког планирања и развоја производа до односа с купцима. Пракса је показала да организације које не успијевају да обезбиједу висок ниво квалитета својих производа губе конкурентност и ризикују потпуни губитак учешћа на тржишту. Стога, темељно разумијевање концепта управљања квалитетом и имплементација свих његових сегмената у свим сегментима организације представља предуслов за успијешно пословање.

Појам квалитета током историје пролазио је кроз значајне трансформације, при чему његово значење није зависило само од технолошког развоја и друштвених потреба човјечанства већ су и различите науке имале различите перспективе на термин квалитета. Све наведено утицало је да термин квалитета има вишеслојно и динамично тумачење.

Ријеч квалитет потиче од латинске ријечи *qualitas* (српски: какав, које врсте) која је изведена из придева *qualis* (српски: особина, карактеристика, природа нечег). У латинском језику овај појам се користио да означи особине или карактеристике нечег. Појам квалитет налази се у „Лексикону страних ријечи и израза“ Милана Вујаклије и дефинисан је као: „каквоћа, својство, особина, врлина, вредност, доброта, добра особина“. Према Вебстеровом рјечнику, квалитет је степен изврности ствари [1,2].

Још од времена Аристотела постојала је тенденција да се квалитет схвати као показатељ доброте предмета, што се имплицитно може примијенити на све врсте производа, било да су то машине за шивање, вакуумске цијеви или аутомобили. Међутим такав концепт је превише неодређен за практичну сврху.

Да би што дубље ушли у сам термин квалитета разматраћемо једну „једноставну“ ствар попут воде. Хемијски гледано вода је комбинација кисеоника и водоника представљена хемијском формулом H_2O . Гледано с хемијске стране квалитет воде се изражава њеним хемијским али и физичким особинама. На примјер, вода је безбојна у танким а плава у дебљим слојевима, без укуса и мириса је, највеће густине на 4 °C, испаравање 540 калорија на 100 °C, активни је катализатор. Међутим чак и овај опис воде је само непотпуна спецификација воде и не говори нам нужно да ли је вода квалитетна или не.

У општем смислу квалитет представља инхерентну особину неког предмета или појаве, те се не може мијењати без истовремене промјене саме суштине те ствари, предмета или појаве. Управо на основу квалитета одређујемо и описујемо карактеристике предмета, што захтјева јасно дефинисање самог појма квалитета при свакој анализи. Теоријски посматрано квалитет се може сагледати из два основна аспекта, први се односи на разматрање квалитета као објективне стварности неког предмета или процеса, док се други односи на субјективни аспект који превазилази из индивидуалне перцепције, осјећаја или очекивања посматрача [1].

Управо је могућност различитих приступа квалитету довела до постојања многих дефиниција квалитета али и различитих погледа на овај термин, тако да је *Robert Pirsig* тврдио да: „премда квалитет не може да бити јасно дефинисан, Ви ипак знате шта он јесте“. *Pirsig* није једини аутор који је купца поставио као особу која одлучује да ли је нешто квалитетно или не. Сличну дефиницију квалитета дали су и *Feigenbaum* који каже

да је квалитет оно што купац каже да је квалитет, односно *Deming* који је дефинисање квалитета од стране купца сматрао јединим битним.

Поред теоретичара који су на квалитет посматрали са стране купца, постоје и они који су на дефиницију квалитета дали из перспективе вриједности производа. Тако је *Drucker* квалитет дефинисао као оно што је купац спреман да плати, односно *Shewhart*¹ који је рекао: “Важна димензија квалитета је вриједност добијена за новац који су платили купци”.

Америчко удружење за квалитет (*American Society for Quality*) и Међународна организација за стандардизацију (*ISO – International Organization for Standardization*) дефиниције квалитета дали су аспекта мјерљивих карактеристика и усклађености са спецификацијама. Према ASQ: Квалитет је укупност својства и карактеристика производа или услуга које зависе од његове способности да задовоље наведене или подразумијеване потребе купца“. *ISO* је у свом стандарду 9000:2015 који се односи на квалитет понудила сљедећу дефиницију: „Квалитет је ниво до којег скуп својствених карактеристика испуњава захтјеве.

Разлог постојања великог броја дефиниција квалитета управо је различита перцепција појединца на квалитет у зависности од његовог положаја или перспективе. Чак и у зависности од социјално-техничких, културолошких, географских аспеката имамо различит доживљај квалитета. Тако у Њемачкој за квалитетно се сматра оно што је у складу са спецификацијом, у Француској је квалитет луксуз, у Сједињеним Америчким Државама је битно да функционише док се у Јапану квалитет представља савршенство [2].

Мноштво дефиниција довело до чињенице да имамо различите погледе на квалитет, тако у неким фабрикама сматра се да је производ квалитетан само ако испуњава одређене физичке карактеристике дефинисане „строгом спецификацијом“. Међутим уколико је циљ управљање квалитетом, квалитет мора бити дефинисан да препознаје захтјеве купца [3].

Различите националне, културолошке, субјективне и перцепцијске интерпретације квалитета указују на чињеницу да не постоји универзална дефиниција квалитета која би обухватила све аспекте овог појма. Управо из те разноликости, теоретичари и практичари из области управљања квалитетом настојали су да формулишу универзалне принципе који би могли да послуже као темељ за разумијевање квалитета у различитим контекстима. Тако су настала четири аксиома квалитета:

- Квалитет је усаглашеност са захтјевима – Оно што сте обећали треба да испоручите.
- Систем за постизање квалитета није превенција, нити је то процјена – Проблеме ријешите трајно.
- Стандард ефикасности је нула грешака – Уради то како треба први пут и сваки наредни пут.
- Квалитет се мјери трошковима неусаглашености – Поправка/поновни рад се плаћа из профита [2].

¹ Валтер Шухарт (орг. *Walter Andrew Shewhart*, 1891-1967) амерички физичар, инжењер и статистичар. У литератури се често назива *оцем статистичке контроле квалитета*. Његова књига „*Economic Control of Quality of Manufactured Product*“ из 1931 године сматра се потпуним и темељним радом на тему основних принципа контроле квалитета [2].

Поред појма квалитет у даљем раду често ћемо се сусретати с појмовима процес и контрола па је потребно и њих прецизно дефинисати како би имали јаснију слику о самом тексту.

Процес се дефинише као трансформација скупа улаза, који могу укључивати материјале, радње, методе и операције у жељене излазе који могу бити у облику производа, информација, услуга или генерално речено у резултат. У оквиру једне организације одвијају се многи процеси и сваки од процеса може да буде анализиран испитивањем улаза и излаза тог процеса. Да би се произвео излаз процеса који задовољава захтјеве купца неопходно је пратити улазе у процес али и сам процес. Да би се почело са праћењем и анализом било ког процеса, неопходно је јасно идентификовати шта је процес, шта су улази и шта су излази. Многе процесе је лако разумјети и односе се на већ познате процесе међутим постоје и процеси које је тешко идентификовати тако да приликом саме идентификације процеса треба бити врло пажљив. Након идентификације процеса потребно је извршити идентификацију улаза (добављача) односно излаза (купаца). Идентификација ове три категорије много је лакша у производним организацијама него у непроизводним. Улазни у процес укључују: опрему, алате, рачунаре, постројења, материјал, људе (чак и људи имају улазе који су им потребни: знање, вјештина, искуство...), информације, упутства итд.

Спрјечавање неуспјеха у било којој трансформацији могућа су само ако су дефиниција процеса, улаза и излаза правилно документовани и договорени. Документација процедуре ће омогућити прикупљање поузданих података о самом процесу (глас процеса), спровођење анализа и предузимање акција како би се процес побољшао и спријечио неуспјех односно неусаглашеност са захтјевима. Циљ сваког процеса је потпуно избјегавање неуспјеха а кључ успјеха је усклађивање запослених у предузећу, њихових улога и одговорности са организацијом и њеним процесима [3].

Сви процеси се могу пратити и ставити „под контролу“ прикупљањем и обрадом података. Ово се односи на мјерења учинка процеса и повратне информације потребне за корективне мјере. Након што смо утврдили да је наш процес „под контролом“ и способан да испуни захтјеве можемо се позабавити сљедећим питањем „Да ли радимо исправно?“ што нас доводи до праћења успостављеног процеса. Да би што боље приказали дефиницију контроле узећемо примјер односно процес писања слова a на папиру. Уколико напишемо низ ових слова примијетићемо да постоји одступање код већине написаних слова. Једноставно колико год да понављамо процес постојаће одређена разлика између написаних слова. У овом конкретном случају улази су нам папир, оловка, графит, човјек односно свака од набројаних ставки може да изазове варијацију приликом писања слова. Наравно уколико више људи пише исто слово такође ћемо имати одређене варијације. Иако варијације постоје нећемо шкартирати нека од слова јер су читљива и испуњавају своју функцију, односно прихватићемо неке варијације. На овом једноставном примјеру приказано је да се процес сматра контролисаним када користећи прошло искуство, можемо предвидјети, у дефинисаним границама, шта ће се дешавати у будућности. Контрола је још дефинисана као одређивање усаглашености према специфицираним захтјевима. Контрола односно контролисање доживјело је трансформације од најранијих времена до развијене индустрије, о чему ће бити ријечи касније [1-3].

Сложеност и вишеслојност појма квалитета како у теоријском тако и у практичном смислиу, захтијевају интердисциплинарни приступ и контекстуално разумијевање. Управо због тога у наставку рада биће анализирана еволуција концепта квалитета од праисторије, кроз индустријске револуције, са посебним освртом на савремене парадигме Квалитет 4.0 и Квалитет 5.0 .

2.1. Развој квалитета

Квалитет није изум савременог свијета, квалитет је дубоко укоријењен у људској потреби за сигурношћу, функционалношћу и естетиком. Тежња за квалитетом постоји од праисторије до данас, на том дугом путу квалитет се мјерио и оцјењивао у складу са временом, технологијом и друштвеним вриједностима. Са различитим проналасцима долазило је и до промјене у стварању и схватању квалитета али и новим основама за надоградњу квалитета. Сасвим је сигурно да ће квалитет и у будућности, уз модификације и прилагођавања, остати неспорни сапутник човјека [1,4].

У најранијем периоду постојања човјечанства, опстанак појединца зависио је директно од алата и оруђа које је користио, било да је у питању лов или обрада земље. У овом периоду квалитет није био апстрактан појам већ питање живота и смрти. Појавом првих писаних трагова добијамо конкретне доказе о значају квалитета у животу старих цивилизација. Како се појава писмености сматра почетком старог вијека можемо говорити о квалитету у старом вијеку.

Истраживања су показала да, дословно свака цивилизација старог вијека (Египат, Кина, Месопотамија, Грчка, Римско царство, Маје, Инке, Астеци), посједује више него очигледне доказе о врхунском квалитету. Хронолошки посматрано прве конкретне доказе за квалитет имамо у Египту гдје се око 3500. године прије Христа сусрећемо с првим спецификацијама производа и процеса. Већ 600 година након тога такође у египатској цивилизацији наилазимо на прву описану стандардну мјеру дужине. Недуго затим, око 2500. године прије Христа, а то потврђују археолошка ископавања египатских пирамида, долази до појаве мјерних уређаја као што су угаоник висак и либела, алата који указују на развијену прецизност у грађевинарству али и контролу градње. Управо је Велика пирамида у Гизи, настала у том периоду, једно од седам свјетских чуда старог вијека.

Значајне доказе о развоју квалитета налазимо и у древној Кини. Већ 2100. године прије Христа, кинеска државна управа успоставља систем контроле квалитета у металургији, изradi бродова и архитектури, што указује на институционални приступ управљању квалитетом. Да институционални приступ није био везан само за Кину видимо и из Хамурабијевог законика из 1754. године прије Христа. Његов значај огледа се у томе што се први пут прави јасна разлика између квалитета процеса и квалитета производа. Законски прописи регулисали су одговорност градитеља и занатлија а неиспуњавање стандарда квалитета доносило је последице односно озбиљне казне. Примјер закона који се односи на квалитет производа гласи: *„Ако мајстор градитељ гради неке кућу, а чија градња није довољно чврста да урушавање куће проузрокује смрт власника, онда таквог мајстора треба погубити“*. Други закон односи се на квалитет процеса и гласи: *„Кад љекар озбиљно повриједи болесника бронзаним оперативним ножем и убије га, или љекар отвори тумор на мозгу бронзаним оперативним ножем и болеснику уништи вид, тада му треба руке одсјећи“*. Хамурабијев закон значајан је и по томе што је у њега уграђено претече елемената квалитета: планирање задатака, контролу извршавања задатака, обрачун трошкова, контролу квалитета, систематску обуку особља, минималну плату, итд.

Да су законске регулативе старог вијека и однос ка квалитету били врло озбиљни најбоље показују грађевинска и архитектонска достигнућа наведеног периода, која су својим техничким рјешењима затим трајношћу и естетиком задивили цијели свијет. Најбољи примјери тога су седам свјетских чуда старог вијека² који представљају

² У седам свјетских чуда старог вијека спадају: Велика пирамида у Гизи (Египат), Семирамидини висећи вртови (Вавилон), Артемидин храм у Ефесу (данашња Турска), Зевсова статуа у Олимпији (Грчка),

врхунске домете у примјени знања, технике и умјетности тог периода. Њихова изградња захтијевала је прецизно планирање, контролу процеса и материјала и висак ниво вјештине раднике, све оне што се и данас тражи уколико се жели створити квалитетан производ [2,5].

2.1.1. Квалитет у средњем вијеку (занатлијски приступ)

Падом Западног Римског царства (476. године) у Европи наступа период мрачног доба, који карактерише успоравање развоја науке и технике а самим тим и квалитета. Градско становништво бјежећи од ратова и германских племена насељава села тако да слободни сељаци постају занатлије којима није ишла у прилог квалитетна и велика производња јер је већину произведеног задржавао феудалац, односно њихов господар. Угроженост путних комуникација смањила је трговину тако да се и то одразило на успорен развој цивилизације. До одређених промјена долази у 11. и 12. вијеку кад долази до појаве сајмова, организованих од стране грофова, гдје трговци с разних мјеста сусрећу и размјењују производе. Управо је комуникација између произвођача односно занатлија омогућила да се организују у цехове или гилде³. Управо гилде постају мјесто очувања квалитета за овај период на начин да су цехови контролисали правила обиљежавања робе посебним симболима или ознакама.

Карактеристично за период раног средњег вијека је да су произвођач и трговац имали директну комуникацију односно продаја лицем у лице. Мјеста сусрета а самим тим и контроле производа биле су пијаце, гдје су произвођачи нудили а купци куповали понуђену робу. Да би што боље искористио свој тешко зарађени новац, купац је морао да препозна добру од лоше робе, односно морао је да развије методе препознавања квалитетних производа. С друге стране произвођач и купац су живјели у истом или сусједним селима која су у близини тако да је сваки произвођач био под лупом више сељана јер би продајом производа лошег квалитета произвођач могао да изгуби тешко стечену репутацију тако да је за њега боље било да сам уклони дефектан производ из продаје него да га понуди на пијаци. Овај начин комуникације између купца и произвођача остао је до ширења трговине кад трговац постаје спона између купца и продавца. Управо тај корак довео је до потребе за новим средством осигурања односно потврде квалитета производа. Прво су занатлије, а преко својих удружења, увеле ознаке својих производа које су гарантовале да је баш тај занатлија изградио одређен производ.

У 13. вијеку цехови су прерасли у еснафе, управо тад долази до појаве првих плаћених радника (калфе). Еснафи од цехова преузимају бригу о контроли и квалитету производа те организују инспекцијских одборе који доносе правила означавајући добре производе посебним ознакама. Наведене ознаке које су у почетку само пратиле поријекло производа, постају заштитни знак репутације мајстора. У Енглеској је 1266. године донесен закон о означавању хљеба и тако добијамо први закон о робним маркама. Златари су од 1363. били обавезни да на свој производ угравирају одређен потпис или жиг како би се знало да су они израдили тај производ. Након златара систем означавања уводе произвођачи ножева, флаша и порцелана. Управо је ова ознака послата репутација занатлије или гилде [2,5].

Прелазни период из занатлијског приступа у прву индустријску револуцији (Индустрија 1.0) обиљежили су стандардизација замјенљивих дијелова и концепт

Колос са Родоса (Грчка), Фараонски свјетионик у Александрији (Египат), Маузолеј у Халикарнису (данашња Турска) [5].

³ *Gilda* – (њемачки:) – средњовјековни савез трговаца, обртника, сељака и вјерских истомишљеника ради заједничког интереса.

толеранције. Стандардизацију замењивих дијелова уводи Ели Витнеј⁴ који у циљу поједностављивања процеса монтаже уводи стандардне дијелове који су се могли користити на више његових производа у намјенској индустрији. Поред америчких оружарница 1830. године наведени систем се користи у Њемачкој у производњи црквених сатова. Америчке оружарнице увеле су и концепт толеранција 1800. године.

2.1.2. Прва индустријска револуција – Индустрија 1.0

Иновације које су најприје захватиле текстилну индустрију а потом се прошириле и на остале гране привреде омогућиле су средином 18. вијека потпуно нови начин производње и значајно унаприједиле квалитет производа. Проналасци као летећи чунак, механички разбој или пределица допринијеле су појави првих машина и прелазак са занатске на фабричку производњу. У овом периоду долази до развоја првих фабрика са великим бројем запослених а прву фабрику основао је Ричард Аркрајт у Енглеској 1774. године. Нови производни модел подстакао је развој нових идеја, међу којима је и стандардизација међусобно замењивих дијелова у циљу поједностављивања процеса монтаже. Ову праксу први је увео Ели Витнеј у фабрикама пушака 1791. године, недуго затим исти систем се појавио у Њемачкој али у индустрији сатова. Проблеми који су се појављивали приликом замјене стандардизованих дијелова допринијели су да се 1880. развије систем толеранције у оружарницама Сједињених Америчких Држава [2,5].

Као најважнији проналазак овог периода, односно за покретач индустријске револуције сматра се проналазак парне машине Џемса Вата 1769. године. Парна машина омогућила је бољи транспорт, што је омогућило отварање фабрика и на мјестима гдје то раније није било могуће. Поред тога развој телеграфа и телефона омогућава размјену информација на даљину и бржу комуникацију. Све ове иновације довеле су до тад највећег друштвеног развоја [4,5].

Период Индустрије 1.0 довео је до трансформације тако да дотадашње занатлије постају фабрички радници а некадашњи власници занатских радњи постају надзорници производње. Сматрало се да је квалитет производа одређен вјештинама фабричког радника док се праћење квалитета, мимо визуелне контроле коју је радник вршио приликом самог рада, вршено је помоћу инспекција трећег лица и статистичким контролама унутар фабрике [2,4,6].

2.1.3. Друга индустријска револуција – Индустрија 2.0

За почетак друге индустријске револуције сматра се откриће првих извора нафте у Сједињеним Америчким Државама у другој половини 19. вијека. Поред нафте као велики покретач Индустрије 2.0 сматра се откриће, односно управљање електричном енергијом и њен пренос на велике удаљености. Убрзавају се комуникације и транспорт што омогућава већи технолошки развој, самим тим долази до нових идеја у свим областима. За овај период карактеристично је да се САД удаљавају од европских производних традиције и усвајају сопствени принцип производње развијен од стране неколико америчких индустријалаца и научника, међу којима се истичу Фредрик Вилсон Тејлор⁵

⁴ Ели Витнеј (орг. *Eli Whitney*, 1765-1825) – био је амерички проналазач и произвођач, најпознатији по изуму машине за одвајање памука из 1793. године. Сматра се једним од пионира концепта измјењивих дијелова у производњи, што је имало велики утицај на развој индустријске производње у САД.

⁵ Фредрик Вилсон Тејлор (орг. *Frederick Winslow Taylor*, 1856-1915.) - био је амерички машински инжењер и један од утемељивача научног управљања (*scientific management*) и модерне радне организације. Познат је по развоју „тејлоризма“, система који уводи стандардизацију, мјерење времена и оптимизацију радних процеса, чиме је значајно утицао на индустријску продуктивност.

и Хенри Форд⁶. Тејлоров принцип заснован је на подјели рада на мање и једноставније операције, што је омогућило детаљну анализу производних процеса. Нови принцип допринио је повећању продуктивности али је довео до пада квалитета. Из овог разлога уведени су посебна инспекцијска одјељења која су за задатак имала контролу производа како дефектни производи не би дошли до купаца. Битно је напоменути да су ове групе биле аутономне и раздвојене од производње.

Други значајни представник Индустрије 2.0 је Хенри Форд, који је уводећи технику монтажне траке увео масовну производњу а самим тим и системско руковање материјалима, дизајнирање алатних машина, концепте препознавања грешки приликом монтаже, само провјеравање (ауто контролу) и процесну контролу. Поред индустријалаца и инжењера Индустрију 2.0 карактерише и укључивање других наука у производњу. Тако се раније поменути *Walter Shewhart* дефинишући процес, објаснио да је квалитет релевантан не само за производ већ и за процес у коме је настао. Шевхарт је увидио да сваки процес генерише податке а прикупљањем и њиховом статистичком обрадом можемо увидјети да ли је неки процес стабилан или не, односно да ли је под контролом или на њега утичу посебни узроци који се могу отклонити. Управо је Шеварт први увео контролне карте, као модрени алат квалитета. Примјењујући принципе вјероватноће и статистике на прикупљене податке Шухарт је показао да су сви производни процеси промјењиви у времену, те да се производи могу производити у оквиру одређене толеранције. Руководству је остављено да изабере која је варијација производа прихватљива а која није. Овај начин рада довео је до развоја спецификација производа а управљањем варијацијама у процесу успоставља се контрола коегзистентности производа.

Период Индустрије 2.0 карактерише и појава првих стандарда. Стандард за вијке донесен је 1902. године, затим Стандард за толеранције 1906, те стандард за примјену мјерила 1907. Оснивају се и прва национална тијела за стандардизацију у Великој Британији *BSI- British Standard Institution*, затим *DIN (Deutsche Industrie Normen)* у Немачкој и *ASA – American Standard Association* у САД [2].

У периоду између Индустрије 2.0 и Индустрије 3.0 важну улогу за производњу и квалитет имају иновације које су се у овим областима уведене у периоду Другог свјетског рата. Индустријска производња се у овом периоду преоријентише са цивилне на војну индустрију и самим тим квалитет постаје много битнији посебно са аспекта безбједности. Захтјеви за масовном производњом у кратким временским периодима тражили су примјену али и преиспитивање практичне примјене свих могућих идеја, техника и алата. Сви ови производи морали су бити прегледани што је тражило огромне људске ресурсе што је стварало проблеме у запошљавању и задржавању особља за контролу. Да би се ово убрзало Џорџ и Роминг увели су 1941. табеле за једноструко и двоструко узорковање а 1944. табеле за узорковање. Раније уведена статистичка контрола указала је не двије чињенице и то да сама статистичка контрола није довољна за успјешан развој производње и да коначан квалитет производа зависи од низа фактора који се налазе изван производње [2,5,6].

2.1.4. Индустрија 3.0

За покретача Индустрије 3.0 сматра се прелазак са аналогних на дигиталне технологије, што се у производњи манифестовало у виду аутоматизованих процеса.

⁶ Хенри Форд (орг. *Henry Ford*, 1863-1947) - био је амерички индустријалац и оснивач *Ford Motor Company*, најпознатији по увођењу покретне траке у аутомобилску производњу. Његове иновације у масовној производњи омогућиле су да аутомобили постану доступни широком слоју становништва и значајно су обликовале развој модерне индустрије.

Развој нових технологија, као што су рачунари, интернет, роботика и остали уређаји засновани на транзисторима и интегрисаним колима омогућили су прелазак на аутоматизовану производњу. Употреба интернета постаје човјекова свакодневница и готово неизоставни фактор сваке производње. Примјена технологија карактеристичних за Индустрију 3.0 омогућила је релативно смањење потреба за радном снагом али и до повећања прецизности, ефикасности и брзине производње. Посматрајући с аспекта производње главни циљ Индустрије 3.0 био је да олакша посао раднику и испуњење свих захтјева купаца. Током Индустрије 3.0 развијају се и методе и алати за осигурање квалитета и то Парето дијаграми, кругови квалитета затим филозофија нула – грешки и *SPC (Statistical Process Control)*. Такође у периоду Индустрије 3.0 развија се посебан концепт квалитета *TQM⁷ (Total Quality Management)*. Поред тога у периоду Индустрије 3.0 настају алати који ће се касније прожимати и кроз Индустрију 4.0 а вјероватно и у наредним индустријама. Појављују се *FMEA, MSA, PPAP, OFD, 5 Why* анализа. У периоду Индустрије 3.0 појављује се од стране *ISO (International Standard Organization)* стандард *ISO 9001* - систем управљања квалитетом. Његова прва верзија из 1987. године односи се на документацију и инспекцију.

2.1.5. Индустрија 4.0

За почетак Индустрије 4.0 узима се почетак 21. вијека, политички гледано, четврта индустријска револуција први пут је представљена 2011. године од стране владе Њемачке у покушају да се аутоматизација производње прикаже као регионални права. Основни постулати Индустрије 4.0 представљени су 2014. године. Технолошки гледано појава дигитализације и аутоматизације производње кориштењем нових технологија као што су вјештачка интелигенција, Интернет ствари (ИоТ), 3Д штампање, паметна возила, итд. Појава наведених технолошких рјешења значајно је утицала на концепт управљања квалитетом. Нови приступ управљања квалитетом има за циљ да повеже напредну технологију са постојећим алатима квалитета, како би се унаприједили резултати производње и перформансе производа. Такође, сматра се да нови приступ не доприноси само побољшању процеса и производа већ да доприноси цијелом ланцу вриједности у некој организацији. Једна од највећих предности Индустрије 4.0 је могућност аутоматског прикупљања великих количина податак у реалном времену, чијом анализом можемо испунити пред нас постављен услов побољшања перформанси. Такође и могућност међусобних комуникација машина без физичких баријера отвара нове могућности на пољу побољшања квалитета. Већина аутора је сагласна да су управо велике базе података, које настају током процеса, једна од кључних предности Индустрије 4.0. Квалитетним управљањем овим подацима могу се генерисати врло корисне информације у циљу напредовања у погледу процеса и производа, што ће свакако помоћи у већој конкурентности на тржишту. Врло битан сегмент обраде података је и да они буду обрађени у реалном времену. Кад су у питању алати који су карактеристични за овај период, сем раније поменутих алата који су своју сврху пронашли и у Индустрији 4.0 и прилагодили се великим количинама података, треба издвојити *EFQM, Lean, Six-sigma* алате. Стандарди који су настали раније у овом периоду добијају своје нове верзије прилагођене новим условима производње [2,4,6,7].

⁷ *TQM (Total Quality Management)* - представља свеобухватну менаџерску филозофију усмјерену на стало унапрјеђење квалитета производа, услуга и процеса кроз ангажовање свих запослених. Заснива се на принципима оријентације ка купцу, процесном приступу, тимском раду и доношењу одлука на основу великог броја прикупљених података. Основни циљ *TQM* јесте постизање дугорочног успјеха кроз задовољство купаца и ефикасност организације [2].

2.1.6. Индустија 21. вијека (5.0 и 6.0)

Предвиђање будућности развоја индустрије у 21. вијеку дјелује поприлично незахвално услед убрзаног развоја технологија и глобалних дешавања. То је један од разлога што поједини савремени аутори имају различита тумачења о будућности индустрија. Тако на примјер постоје радови који праве тачну разлику између Индустрије 5.0 и Индустрије 6.0 (Смајдова) док с друге стране имамо ауторе (Дугал, Малик) који су ближе идеји да ће развој Индустрије 5.0 ићи у смјеру да она има бета верзију. Упркос различитим ставовима о развоју, аутори углавном истичу сличне алате и технике за будућу примјену. Кад је у питању квалитет аутори сматрају да ће развој квалитета у 21. вијеку имати неколико праваца развоја у циљу испуњења захтјева менаџмента тоталног квалитета. Управљање квалитетом у овом периоду фокусира се на испуњење захтјева купаца. Процеси и процедуре који за циљ имају да обезбиједе висок квалитет производа уз покушај да се смање трошкови имаће у 21. вијеку неколико помоћних алата за испуњење свог циља. Један од првих значајних алата је употреба вјештачке интелигенције за побољшање квалитета производње и смањење могућности људске грешке у току производње. Алгоритми које развије АИ имаће могућности за идентификацију производа или процеса лошег квалитета, омогућавајући компанијама брже вријеме реакције односно реаговање у реалном времену. Управо из тог разлога индустријске компаније ће настојати да минимизирају временски размак између идентификације проблема и реакције за шта је потребно увођење ИоТ технологија које ће у реалном времену препознавати одступања и одмах реаговати обавјештавајући о проблему. Једна од карактеристика биће и већи нагласак на праћење квалитета у комплетном ланцу снабдијевања. Односно сваки произвођач у ланцу мораће да испуни тачно прописана правила како би се осигурао бољи квалитет. Ова метода довешће до развоја нових алата за праћење и управљање ланцем снабдијевања. Бржим развојем индустрије расте и повећана потреба за флексибилношћу и интеграцији различитих алата за управљање квалитетом. Правећи један свеобухватни систем у који ће бити интегрисани различити системи (надзор производње, управљање рекламацијама, флексибилни системи) добиће се скуп алата који ће моћи да функционише у различитим индустријама и различитим процесима [6-7].

На основу анализираниог развоја индустрије и квалитета у различитим периодима формирана је Табела 2.1. гдје су за одређене периоде наведени главни фокуси квалитета.

Табела 2.1: : Кратки преглед развоја индустрије и аспект квалитета који је био битан у тим фазама⁸.

Фаза	Период	Фокуси квалитета
Индустрија 1.0	~1760-1840	Инспекција и ручна контрола
Индустрија 2.0	~1870-1940	Стандардизација, масовна производња, почеци систематске контроле квалитета
Индустрија 3.0	~1970-2010	Аутоматизација, <i>ISO</i> стандарди, <i>SPC</i> , <i>TQM</i>
Индустрија 4.0	~2011- 2025	Дигитална трансформација, <i>Quality 4.0</i> , <i>IoT</i> , <i>Big Data</i> , вјештачка интелигенција.
Квалитет у 21. вијеку (Индустрије 5.0 и 6.0)	Након 2025.	Персонализација, етика, сарадња човјек-машина, друштвена одговорност, симбиоза технике и природе, нула-грешака.

Без обзира како ће се звати Индустрија 21. вијека из претходно наведеног можемо закључити да ће један од кључних задатака управљања квалитетом бити примјена принципа Тоталног менаџмента квалитета (*TQM*) и концепта нула-грешки. Управо је задатак савремених инжењера да развију одговарајуће алате и технике којима ће се омогућити остварење циљева које постављају ова два фокуса.

У настојању да се испуне захтјеви менаџмента тоталног квалитета (*TQM*), савремена истраживања су понудила низ алата прилагођених индустријским потребама, са циљем рјешавања или превенције могућих проблема у процесима. У динамичком и технолошки напредном окружењу, синергија метода није новина већ неопходност. Управо тако комбинована примјена Статистичке контроле процеса (*SPC*) и Анализе начина и посљедице отказа (*FMEA*) представљају темељ не само за осигурање квалитета, већи очување конкурентности и одрживости производње [3,8].

Ова два алата, када се користе заједно, чине модел који је осмишљен да проактивно идентификује, прати и ублажи одступања у квалитету прије него што се она претворе у дефекте, у складу са принципима континуираног побољшања и смањења отпада. Оквир

⁸ На крају поглавља важно је напоменути да се наведена подјела, као и појава одређених техника, односни на период кад су се оне појавиле у Сједињеним Америчким Државама, Јапану или Западној Европи. Разлог за то лежи у чињеници да руски научници, из њима знаних разлога, нису објављивали своје радове у научним часописима високе репутације или нису објављивали уопште, што је довело до ограничене доступности њихових достигнућа у међународној научној заједници и у индустрији. Илустративан примјер је организациони модел данас познат као „*Lean Management*“ који је био детаљно описан и разрађен у совјетској колонији „Максим Горки“ чак четрдесет година прије него што је званично „откривен“ у остатку свијета. Поред тога постоје бројни примјери из Другог свјетског рата који указују на то да је СССР већ тада располагао савременим техникама управљања квалитетом и производњом. Изузетак који потврђује правило представља ТРИЗ (Теорија инвентивног рјешавања проблема) развијена у оквиру „руске школе“, која је релативно брзо пронашла пут до западних школа рјешавања проблема и западне индустрије [5].

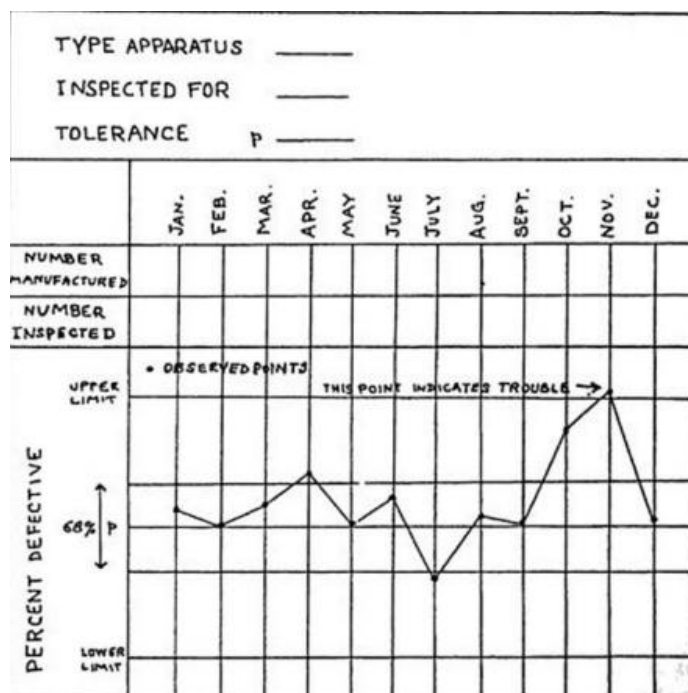
започиње примјеном *FMEA*, која има за циљ да систематски приоритизује потенцијалне начине дефекта на основу њихове озбиљности, учесталости и могућности откривања. Та приоритизација омогућава увођење циљаних мјера за елиминацију ризичних тачака у процесу и смањење вјероватноће појаве грешака на производу.

С друге стране, *SPC* представља метод за контролу и смањење варијација у процесу, омогућавајући рано откривање одступања и стабилизацију производње. Док *FMEA* дјелује превентивно смањујући вјероватноћу грешке прије него што се она догоди, *SPC* дјелује контролно, надгледајући процес у реалном времену и реагујући на статистичке сигнале нестабилности.

Комбиновањем *FMEA* и *SPC* добија се кохерентан систем управљања квалитетом, који представља поуздану основу за подизање квалитета на виши ниво, уз истовремено унапрјеђење ефикасности, смањење трошкова и повећање задовољства купаца.

3. SPC - STATISTICAL PROCESS CONTROL

Радећи за неке од највећих америчких фабрика тог периода али и са групом људи која ће касније постати позната по својим открићима из области квалитета, ослањајући се на физику и статистику Валтер Шухарт увео је потпуно нови поглед на квалитет. Објављујући своје сложене научне теорије Шухарт није привукао пажњу својих надређених па се 1924. године окренуо другом приступу, односно свој рад је све на „једноставно“ нацртан график и кратку анализу. Овај график приказан на слици 3.1. представља прву контролну карту, данас основни алат квалитета. Управо овај Шухартов дијаграм уз образложење представља начело савремене контроле квалитета процеса.



Слика 3.1: Оригинални изглед Шухватрове прве контролне карте [5].

Шухартов дијаграм је пратио производни процес током одређеног времена користећи постотак лоших комада као индекс. На дијаграму се такође налазе двије граничне линије које представљају толеранцијско поље, поред њих постоје и двије линије које престављају три стандардна одступања испод и изнад аритметичке средине. За ове двије линије Шухарт је предложио да буду индикатори, односно ако се нека мјерена карактеристика нађе изван ове двије линије имамо проблем у процесу.

Иако је данас широко прихваћена и примјењива контролна карта није била прихваћена од Шухартових савременика, неки су сматрали да то лијепо изгледа али да за тим нема потребе док су други сматрали да није могуће квалитет представити на овај начин. Колико су Шухартов савременици гријешили најбоље показује чињеница да је SPC уврштен у ISO 22514-7:2014 стандард а кад је у питању IATF стандард 2016. навео је SPC као примарна метода [5].

Неразумијевање околине нису утицали негативно на Шухварта већ је наставио своја истраживања и објавио неколико књига које се односе на статистику, процесе, прикупљање података и на индустријску производњу. Већ 1930. године објавио је књигу „*Economic Control of Quality Of Manufactured Products*“ у којој је кроз једноставне примјере покушао да објасни појмове као што су процес, подаци, варијације, контролне карте те контрола квалитета у пракси. Иако није званично именовао овај алат кроз своја

истраживања и радове он је описао све оно што се данас састоји у самом називу Статистичка Контрола Процеса:

- Статистичка – У оквиру експерименталних активности прикупљамо обимне количине података о перформансама наших производа и процеса. Анализом тих података утврђујемо утицај различитих технолошких и производних параметара на функционалне карактеристике производа, са циљем оптимизације процеса и побољшања укупног квалитета.
- Процес: Процес се дефинише као трансформација скупа улаза, који могу укључивати материјале, радње, методе и операције у жељене излазе који могу бити у облику производа, информација, услуга или генерално речено у резултат.
- Контрола процеса: Прикупљени подаци се користе за корекцију и оптимизацију процеса у циљу постизања жељених резултата. Ови резултати су условљени захтјевима купаца, ефикасношћу, квалитетом и поузданошћу, те представљају кључне параметре у процјени перформанси производног система [1,5,9].

Као што се може видјети први задатак представља прикупљање велике количине података и њихова обрада.

3.1. Подаци – прикупљање и обрада

Прикупљање података представља суштински елемент свакодневних активности и процеса одлучивања. На примјер, приликом посјете кројачу, неопходно је да исти прикупи тачне мјере како би израдио одијело које одговара димензијама клијента. Слично томе, лекар прикупља релевантне медицинске податке како би поставио дијагнозу и одредио адекватне методе лијечења. Иако се оба случаја ослањају на процес прикупљања података, њихови циљеви се суштински разликују и могу се класификовати на следећи начин:

- Прикупљање података ради добијања квантитативних информација.
- Прикупљање података ради добијања објашњења на основу посматрања појава.

Први тип прикупљања података доминира у свакодневном животу, од трговине и услужних дјелатности до праћења техничких параметара савремених уређаја. У индустријском контексту, квантификативне информације служе као основа за контролу процеса, оптимизацију производње и доношења оперативних одлука. Други тип који се односи на откривање узрочно последичних веза, има посебан значај у области научног истраживања и развоја. Он омогућава разумијевање физичких принципа који стоје иза посматраних процеса, чиме се добија основа за формулисање предвиђања будућих појава на основу претходно прикупљених података [1].

Прикупљени подаци требају престављати основу за даље анализе, преузимање акција и доношење одлука. Начин прикупљања података, њихов облик и начин приказивања зависи од природе процеса. Подаци се прикупљају како би се створила стварна слика и врло је битно од самог почетка знати за шта ће се користити подаци како би их правилно прикупили и имали више користи од њих. При томе треба имати у виду да морамо правилно одабрати методе за прикупљање података, метода мора бити у складу са потребом за информацију а не са лакоћом прикупљања. Такође је битно да не постоји несразмјерна количина прикупљених података само из разлога јер је лако доћи до велике количине података у неком процесу. Према томе потребно је у потпуности у обзир узети разлог прикупљања података, исправне технике узорковања и спецификацију.

Након што се подаци прикупе потребно је извршити анализу истих и на основу статистичких метода извући корисне информације. Наведено нам говори да је податке потребно прикупити у облику и форми која ће поједноставити њихову анализу. Први задатак који требамо испунити је да конструишемо шаблон односно израдимо образац у који у се прикупљати подаци, било да је у папирном или рачунарском облику он ће нам помоћи да добијемо униформно тражене податке. Наравно треба обезбиједити да ови подаци остану сачувани колико год нам је потребно. Кад су у питању подаци које прикупљамо, поред податка потребно је имати и план узорковања затим датум узорковања, инструменте употребљене приликом узорковања, методе али и особу која врши узорковање.

Ако би овај процес приказали у корацима изгледао би на сљедећи начин:

- Потребно је свим учесницима објаснити тачно који се догађај/процес прати тако да осигурамо да сви учесници посматрају исти догађај/процес,
- Потребно је одредити колико често ће се вршити посматрања процеса у неком датом периоду
- Формирати шаблон за унос података чија ће форма бити јасна свим посматрачима и кога ће моћи да испуни сваки посматрач
- Потребно је осигурати да шаблон буде таквог облика да посматрачи процеса имају довољно времена да попуне све тражене податке
- У разговору с посматрачима могуће је извршити корекције шаблона за прикупљање података уколико ће то олакшати рад посматрачу али и бољу класификацију података за анализу [3].

Након што смо прикупили податке врло је битно да они буду приказани у таквом облику да од њега имамо највише користи, односно да избјегнемо представљање података на начин да нам нису од користи. Примјера ради уколико смо извршили мјерења електричне отпорности ($m\Omega$) сто електромотора и уписали их у табелу добићемо податке као у Табели 3.1.

Табела 3.1: Резултати 100 мјерења електричне отпорности ($m\Omega$) једне фазе електромотора.

107,01	106,33	106,28	106,25	106,50	106,36	106,30	106,32	106,15	106,28
106,3	106,24	106,25	106,26	106,25	106,36	106,4	106,21	106,29	106,31
106,26	106,31	106,47	106,27	106,32	106,20	106,23	106,30	106,22	106,35
106,20	106,38	106,31	106,27	106,75	106,34	106,29	106,29	106,37	106,35
106,34	106,40	106,24	106,38	106,30	106,37	106,21	106,44	106,44	106,47
106,10	106,33	106,31	106,22	106,21	106,25	106,27	106,26	106,45	106,35
106,37	106,33	106,25	106,21	106,24	106,25	106,21	106,34	106,21	106,38
106,30	106,30	106,34	106,18	106,18	106,31	106,28	106,25	106,23	106,36
106,30	106,33	106,33	106,23	106,11	106,32	106,22	106,16	106,12	106,12
106,26	106,23	106,16	106,14	106,09	106,35	106,18	106,10	106,22	106,04

Посматрајући табелу 3.1 а због начина на који су уписани подаци није могуће одговорити на нека основна питања док је на нека могуће одговорити али имамо проблем што нам давање одговора на та питања захтјева много времена. Чак и питања као што су: Колико је просјечан вриједност отпорности ? Која је најмања а која највећа отпорност? Да ли је процес способан да испуни спецификацију ? Потребно је пуно времена да одговоримо на ова питања јер нам распоред у табели није у одговарајућој форми. Као најкориснији начин приказивања податак у табели је онај у коме су подаци поредани према растућем редослиједу и такав формат распореда података дат је у табели 3.2 [1,3].

Табела 3.2: Подаци распоређени у растућем редослиједу (електрична отпорност у mΩ).

106,04	106,09	106,10	106,10	106,11	106,12	106,12	106,14	106,15	106,16
106,16	106,18	106,18	106,18	106,2	106,2	106,21	106,21	106,21	106,21
106,21	106,21	106,22	106,22	106,22	106,22	106,23	106,23	106,23	106,23
106,24	106,24	106,24	106,25	106,25	106,25	106,25	106,25	106,25	106,25
106,26	106,26	106,26	106,26	106,27	106,27	106,27	106,28	106,28	106,28
106,29	106,29	106,29	106,30	106,30	106,30	106,30	106,30	106,30	106,30
106,31	106,31	106,31	106,31	106,31	106,32	106,32	106,32	106,33	106,33
106,33	106,33	106,33	106,34	106,34	106,34	106,34	106,35	106,35	106,35
106,35	106,36	106,36	106,36	106,37	106,37	106,37	106,38	106,38	106,38
106,40	106,40	106,44	106,44	106,45	106,47	106,47	106,5	106,75	107,01

Посматрајући табелу 3.2 видимо да је одговоре на постављена питања у прошлом пасусу много лакше дати. Кратким увидом у табелу видимо да је максимална отпорност ($x_{\max}$) 107,01 mΩ а минимална отпорност ($x_{\min}$) 106,04 mΩ. На основу формуле :

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (3.1)$$

Добијамо податак да је распон отпорности, односно података: $R = 0,97$.

Поред табеларне презентације података, израђује се и фреквентна расподела података која омогућава визуелну процјену учесталости појединачних вриједности. Фреквентна расподела се формира тако што се за сваку појаву одређене вриједности уноси једна вертикална црта, чиме се евидентира број појављивања. Ради лакшег бројања, свака пета цртица се графички групише у облику „капије“ што омогућава лакше бројања. Укупан број понављања сваке вриједности се затим уписује у одговарајући ступац десно од графичког приказа чиме се добија прегледна фреквентна расподела погодна за даљу обраду и анализу. Овако представљени подаци формирају контролни лист (контролну листу или формулар за прикупљање података) [1-3].

На основу дијела⁹ табеле 3.2 можемо формирати фреквентну расподелу на начин који је приказан на слици 3.2.

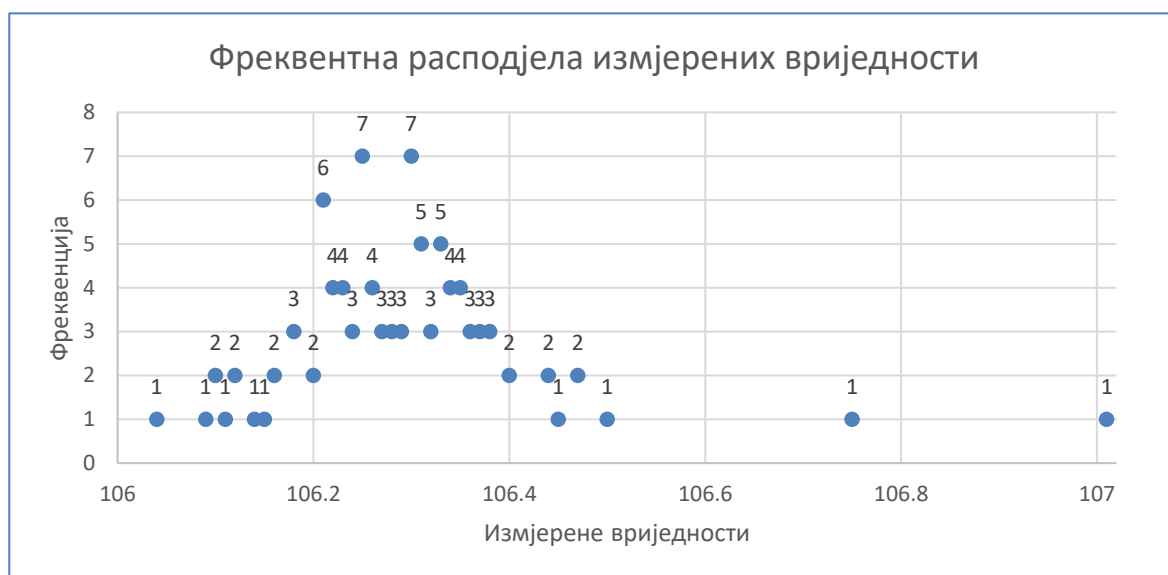
Вриједност	Бројање	Фреквенција
106,20		2
106,21		5
106,22		4
106,23		4
106,24		2
106,25		7
106,26		4
106,27		3

Слика 3.2: Фреквентна расподела формирана на основу дијела Табеле 3.2.

⁹ Приказан је само дио података како би слика била јаснија.

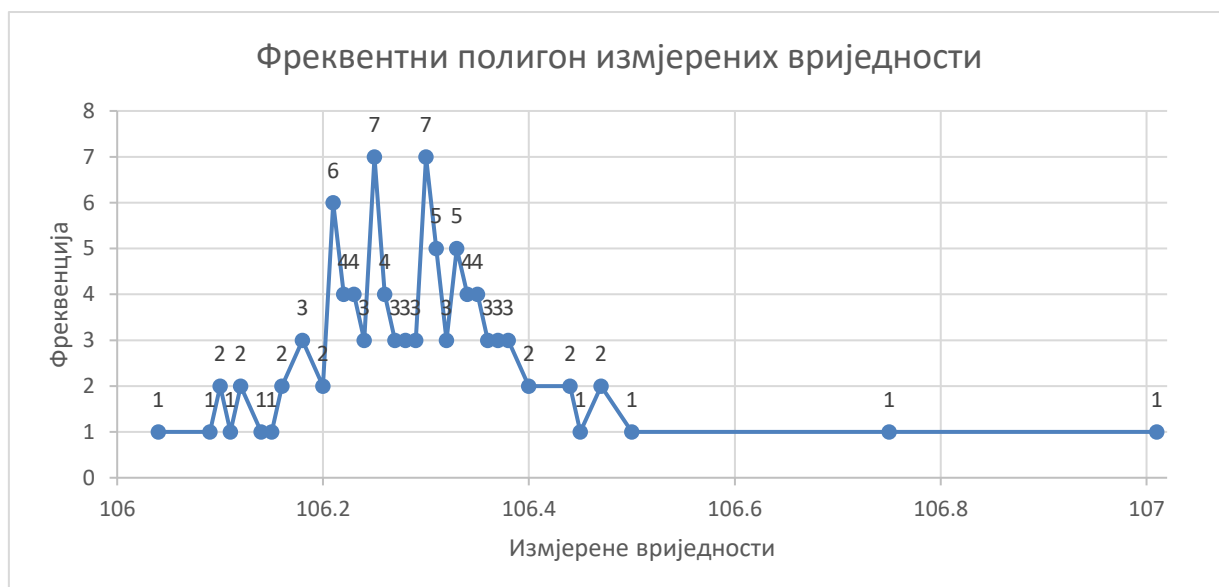
Очигледно је да груписањем података добијамо јаснији и прегледнији увид прикупљених података, њихову структуру и расподелу. Како би се обезбиједио још интуитивнији и ефикаснији начин представљања приступа се графичким облицима приказа. Постоји више различитих форми графичког представљања.

Уколико на апсцису унесемо вриједности мјерења а на ординату број понављања датог мјерења при чему је висина ординате пропорционална броју понављања одговарајућег мјерења добијамо график фреквентне расподеле измјерених вриједности. Фреквентна расподела измјерених вриједности отпорности фазе електромотора из табеле 3.2 приказана је на слици 3.3 [1].



Слика 3.3: Фреквентна расподела података из Табеле 3.2.

Уколико унесене вриједности повежемо линијом добићемо фреквентни полигон или линијски дијаграм, који ће у случају података из табеле 3.2 изгледати као на слици 3.4.



Слика 3.4: Фреквентни полигон измјерених вриједности из Табеле 3.2

Резултате из Табеле 3.2 можемо представити и ступцима, те ћемо добити график као на слици 3.5.



Слика 3.5: Подаци из Табеле 3.2 представљени ступцима.

На Слици 3.5 подаци су графички распоређени тако да свака измјерена вриједност има свој засебан ступац. Међутим, уколико умјесто појединачних вриједности формирамо интервале (који немају заједничка тачке) и сваком интервалу додијелимо један ступац, добијамо график који се назива хистограм. Дакле, хистограм је графички приказ расподеле података у облику ступаца, при чему висина сваког ступца одговара фреквенцији појављивања вриједности у датом интервалу. Овај тип дијаграма користи се у статичкој анализи ради прегледне презентације прикупљених података и извлачења релевантних информација. Приликом конструисања хистограма а у циљу добијања што прецизнијег приказа потребно је водити рачуна о броју подинтервала, њиховој ширини и тачној дефиницији граница [2,3].

Поред формирања хистограма, на основу података у табели можемо израчунати и аритметичку средину узорка те стандардну девијацију узорка.

Аритметичку средину узорка можемо рачунати на два начина и то формулама (3.2) која се односи на аритметичку средину негруписаних података:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2)$$

те формуле (3.3) која се користи за аритметичку средину груписаних података:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n f_i x_i \quad (3.3)$$

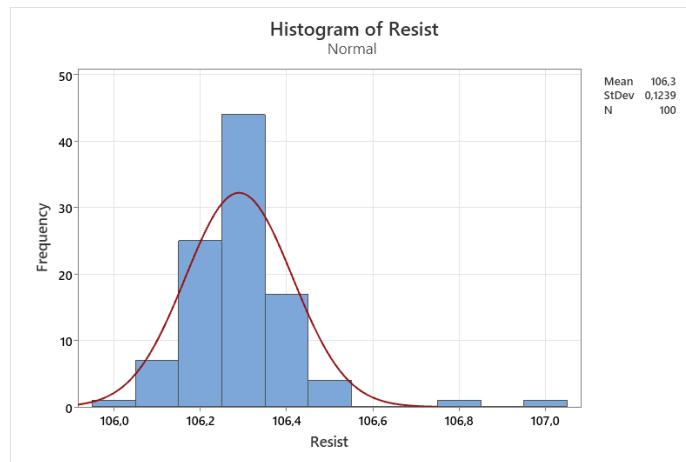
Стандардна девијација узорка узима у обзир све податке и представља мјеру „одступања“ вриједности од аритметичке средине. Стандардна девијација се као и аритметичка средина може израчунати на основу негруписаних (3.4) и груписаних података (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum f_i (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.5)$$

На основу података из Табеле 3.1 можемо искористити софтверски пакет *Minitab*¹⁰ за формирање хистограма (приказан на слици 3.6).

¹⁰ Мини таб је статистички софтверски пакет који се користи за анализу података, контролу квалитета и оптимизацију процеса у индустрији.



Слика 3.6: Хистограм података из Табеле 3.1.

Поред ступаца на хистограм је додана и крива расподеле која је приказана црвеном линијом. Хистограми овог типа приказују однос између вриједности промјениве и њене фреквенције, чиме се омогућава идентификација обрасца расподеле. Расподеле могу бити различитог облика, распона и положаја у зависности од типова података. Најпознатији и најчешће коришћени облик расподеле у статистичкој пракси је нормална расподела.

3.1.1. Нормална (Гаусова) расподела

У области контроле квалитета, већина производних процеса показује понашање које се може описати нормалном расподелом те ова чињеница представља темељ за процјену способности процеса. Функција расподеле непрекидне случајне промјениве која слиједи нормалну расподелу дата је формулом (3.6):

$$F(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3.6)$$

Функција густине непрекидне случајне варијабле криву дата је формулом:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$

на интервалу $-\infty < x < \infty$, $X: N(\mu, \sigma^2)$, гдје је:

π – константа,

e – математичка константа,

μ - аритметичка средина нормалне случајне промјениве,

σ – стандардна девијација нормалне случајне промјениве,

$f(x)$ – представљаће висину криве у било којој тачки x дуж скале промјениве.

Крива која се добије на основу функције из једначине (3.7) назива се Гаусова крива или крива нормалне расподеле, и приказана је на Слици 3.7.

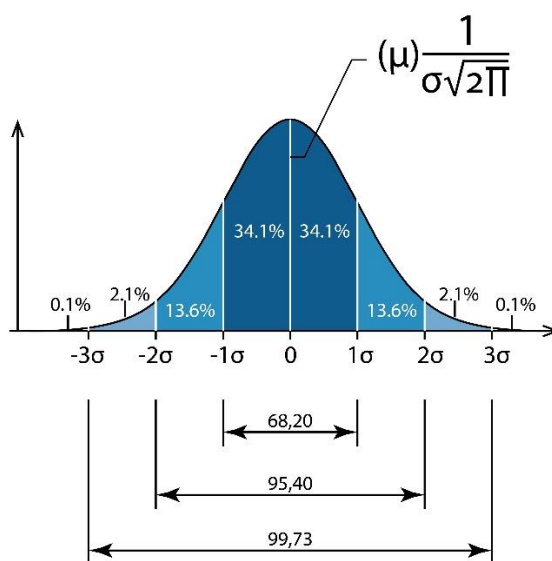
Уколико уведемо да је $z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$ једначина (3.7) постаје:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (3.8)$$

Део једначине, $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ представља максималну вриједност функције и она одговара вриједности аритметичке средине μ . Пошто се σ налази у називнику, њеним растом имамо смањење максималне вриједности функције густоће. Такође овај дио једначине

осигурава да површина испод криве буде једнака јединици, односно вјероватноћи 1.0. Ово чињеница омогућава да површина криве између било које двије вриједности z представља вјероватноћу да ће нека насумично изабрана ставка насумично пасти између те двије вриједности [1-3].

Помоћу нормалне расподеле врло лако је објаснити и стандардну девијацију. Уколико пратимо неку мјеру која је континуирано промјењива, та промјењива ће бити нормално распоређена око средње вриједности μ односно аритметичке средине. Ширина измјерених вриједности може се мјерити у смислу стандардне девијације популације, σ , која дефинише ширину криве у облику звона као што је приказано на слици 3.7.



Слика 3.7: Нормална расподела с унесеном стандардном девијацијом.

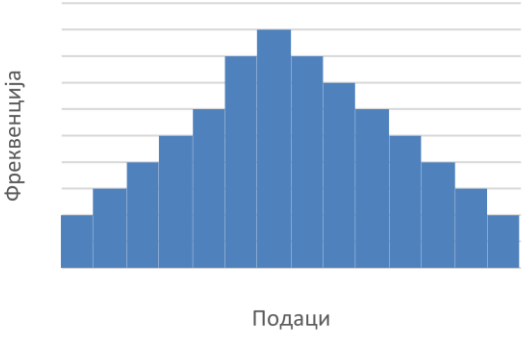
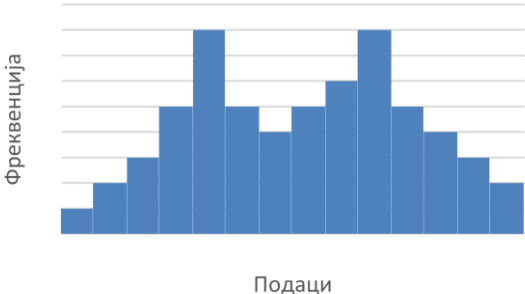
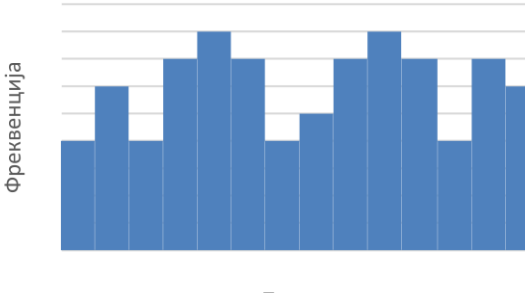
Пропорција очекиваног резултата приказаног на слици 3.7 говори нам колико постотака резултата треба да се пронађе у којем дијелу површине испод Гаусове криве:

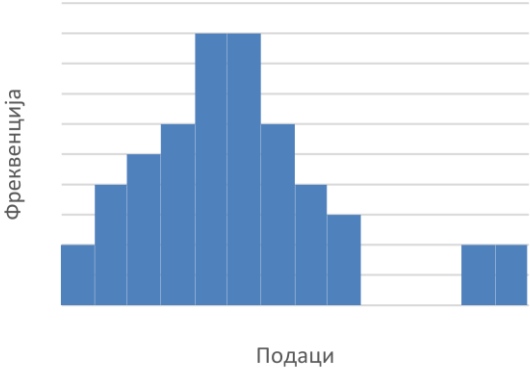
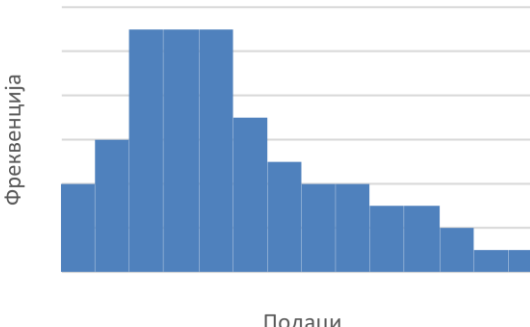
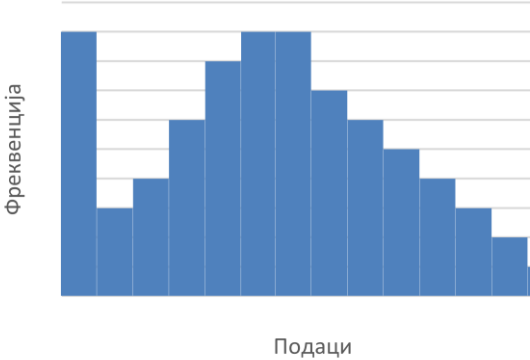
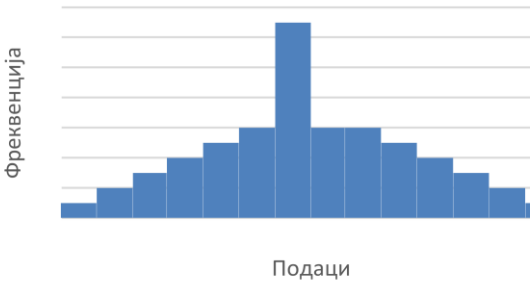
- 68,3 % мјерења налазиће се у области $\mu \pm \sigma$,
- 95,40 % мјерења налазиће се унутар области $\mu \pm 2\sigma$,
- 99,73 % мјерења налазиће се унутар $\mu \pm 3\sigma$.

3.1.2. Облик хистограма и криве расподеле као показатељ процеса

У реалности на основу прикупљених реалних података могу настати различити облици хистограма а самим тим и различити облици криве расподеле. Досадашње практично искуство дефинисало је седам типичних облика хистограма који су приказани у табели 3.3 [2].

Табела 3.3: Различити типови хистограм и њихово тумачење [2].

Тип хистограма	Тумачење података на основу хистограма
Општи облик (облик звона) 	Хистограм у облику звона Представља нормалну дистрибуцију расподјеле података односно нормалну криву расподјеле. То је симетричан облик који има врх у средини подручја података.
Тип двоструког врха (двогрби хистограм) 	Тип двоструког врха Тип хистограма који приказује депресију у средини подручја прикупљених података. Овакав тип хистограма показатељ је присуства података из двије различите дистрибуције. Могуће да су у питању прикупљени подаци с свије различите машине или производи од два различита добављача.
Тип платоа (раван хистограм) 	Тип платоа Код овог типа хистограма немамо посебан врх, сви ступци су приближно једнаке фреквенције, очигледно је да постоји неколико расипања и овај тип хистограма нам показује да не постоји дефинисана организација процеса.

Тип усамљеног врха (острва)  Фреквенција Подаци	Тип усамљеног врха Код овог типа хистограма постоји одређена фреквенција изолованих података. На овај начин распоређени подаци указују да су се у процесу десиле неправилне подјеле. Могуће да је дошло до поремећаја процеса, грешке у мјерењу или су укључени подаци из другог процеса. <i>Ово је тип дијаграма који је добијен обрадом прикупљених података из табеле 3.1.</i>
Асиметричан облик (лијево)  Фреквенција Подаци	Асиметричан облик У случајевима кад имамо дефинисану само једну специфичну граничну вриједност, онда се средња вриједност налази ближе тој граници. Асиметричност може да буде с лијеве или десне стране зависи с које стране је ограничен процес.
Висока фреквенција на једној максималној вриједност  Фреквенција Подаци	Висока фреквенција на једној максималној вриједности Уколико имамо нетачно прикупљање података као резултат добијамо овај вид дијаграма. Графички добијамо као да је један дио нормалне дистрибуције одсјечен и додан на ивицу подручја.
Висока фреквенција одређене вриједности  Фреквенција Подаци	Велика фреквенција одређене вриједности Ако имамо случај да је облик врха у средини распона података указује нам на нетачно прикупљање података. Постоји могућност да је дошло до оштећења мјерног уређаја, погрешно уписане вриједности јер је контролор тежио једној вриједности и слични активности које доведу до нетачног прикупљања података.

Управо помоћу хистограма насталог на основу прикупљених података односно криве расподеле, поред осталих показатеља, можемо установити да ли у процесу постоје варијације и каквог су оне типа.

3.2. Варијације

Да би могли успјешно користити прикупљене резултате врло је важно разумјети концепт варијација. Важно је схватити да не постоје два производа потпуно истих карактеристика јер приликом израде било којег производа постоји много извора варијабилности. Разлике које постоје могу бити веома велике или врло мале (до мјере да се не могу измјерити) али свакако увијек су присутне.

Уколико за примјер узмемо пречник вратила, процес израде вратила одређеног пречника подложен је различитим потенцијалним варијацијама и то:

- Од машина (*Machine*) – зазори, хабање лежача
- Од материјала (*Material*) – пречник материјала, тврдоћа материјала, чврстоћа материјала,
- Од оператора (*Man*) – помак дијела, тачност центрирања,
- Од одржавања (*Maintenance*) – подмазивање, замјена истрошених дијелова,
- Од околине (*Mileu*) – температура, притисак, итд.

Сви наведени узорци варијација приказују се помоћу Ишикавоног¹¹, 5М¹² дијаграма, приказаног на слици 3.8:



Слика 3.8: Узроци варијација представљени преко 5М [10].

Са становишта минималних захтјева процес се занемарује до мјере да су сви производи који су у толеранцији прихватљиви док они производи који су изван толеранције нису прихватљиви. Свакако циљ би требао бити да сви производи буду што

¹¹ Каору Ишикава (енгл. *Kaoru Ishikawa*, 1915–1989) - био је јапански инжењер и један од најзначајнијих теоретичара управљања квалитетом. Најпознатији је по развоју дијаграма узрока и посљедице (*Fishbone / Ishikawa* дијаграм) и по увођењу концепта „квалитета у цијелој компанији“, чиме је значајно утицао на модерне методе побољшања процеса и индустријског квалитета.

¹² 5М техника је метод за систематско идентификовање могућих узрока проблема у процесу. Користи се у анализи коријенског узрока (*RCA*), у *Fishbone/Ishikawa* дијаграму и у различитим фазама побољшања процеса. 5М (*Machine, Material, Man, Maintenance, Mileu*).

ближе циљаној вриједности односно с минималним варијацијама. Да би се то постигло потребно је направити подјелу варијација на уобичајене и специјалне/посебне варијације [10].

Уобичајени узроци односе се на бројне изворе варијација који континуирано утичу на процес. Они унутар самог процеса производе стабилну и поновљиву расподелу током времена. Уобичајени узроци представљају стабилан систем случајних одступања. Уколико су присутни искључиво уобичајени узроци варијација и не долази до њихове промјене, излазни резултати процеса остају предвидиви.

На примјер, скуп уобичајених узрока који доводи до варијација у квалитету производа може обухватати насумичне промјене у улазним параметрима процеса: промјене атмосферског притиска или температуре, пролазак саобраћаја или вибрације опреме, флуктуације електричне енергије или влажности, као и физичко и емоционално стање оператера. Ово је аналогно скупу сила које утичу на то да ли ће новчић пасти на главу или писмо када се баци. Када су присутни само уобичајени узроци варијација, процес се сматра „стабилним“, „у статистичкој контроли“ или „под контролом“.

Посебни узроци (често називани и додељиваним узроцима) односе се на факторе који узрокују варијације и утичу само на дио излазних резултата процеса. Обично су повремени, непредвидиви и лако уочљиви. Посебни узроци се сигнализирају појавом једне или више тачака ван контролних граница, или појавом не случајних образаца унутар тих граница. Када су присутни, варијације постају прекомјерне, а процес се класификује као „нестабилан“, „ван статистичке контроле“ или „ван контроле“ [10,11].

Уколико се сви посебни узроци не идентификују и не предузму корективне мјере, они могу наставити да утичу на процес на непредвидив начин. Промјене у расподели процеса услед посебних узрока могу бити штетне или корисне. У случају штетних узрока, потребно их је разумјети и елиминисати, ако су корисни, треба их препознати и интегрисати као трајни дио процеса.

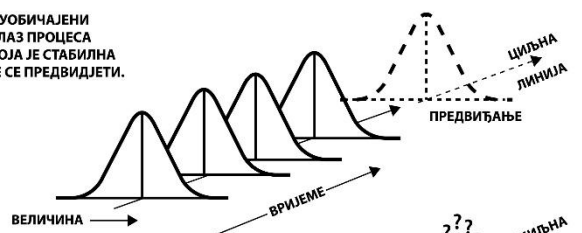
У неким зрелим процесима, купац може дати посебну дозволу за покретање процеса са стално присутним посебним узроком. Такве дозволе обично подразумијевају да планови контроле процеса могу обезбедити усклађеност са захтјевима купца и заштиту процеса од других потенцијалних посебних узрока.

Посебни узроци могу укључивати непотребно мијешање или подешавање процеса који је иначе стабилан, као и структурне варијације узроковане, на примјер, смјеном годишњих доба.

Графички посматрано уколико имамо стабилан процес можемо претпоставити његово понашање у наредном периоду (слика 3.9, а) а уколико је процес нестабилан не можемо претпоставити како ће се процес понашати у будућности (слика 3.9, под б).

УЗРОЦИ ВАРИЈАЦИЈА

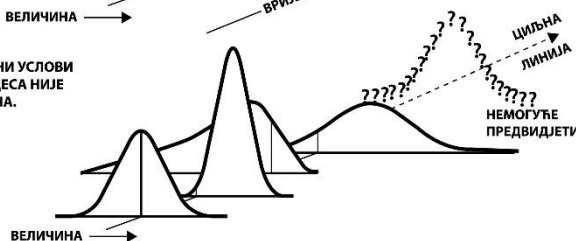
АКО СУ ПРИСУТНИ САМО УОБИЧАЈЕНИ
УЗРОЦИ ВАРИЈАЦИЈА, ИЗЛАЗ ПРОЦЕСА
ФОРМИРА РАСПОДЈЕЛУ КОЈА ЈЕ СТАБИЛНА
ТОКОМ ВРЕМЕНА И МОЖЕ СЕ ПРЕДВИДЈЕТИ.



УОБИЧАЈЕНИ УЗРОЦИ
(систематски)

А

АКО СУ ПРИСУТНИ ПОСЕБНИ УСЛОВИ
ВАРИЈАЦИЈА, ИЗЛАЗ ПРОЦЕСА НИЈЕ
СТАБИЛАН ТОКОМ ВРЕМЕНА.



ПОСЕБНИ УЗРОЦИ
(случајни)

Б

Слика 3.9: Понашање процеса у времену у зависности од утицаја уобичајених и специјалних карактеристика [10].

Кад је у питању однос према наведеним узроцима варијација у процесу постоји важна веза између наведених узрока и врста акција потребних за рјешавање истих. Управљање варијацијама у процесима представља кључни аспект унапређења квалитета. Посебни узроци варијација могу се идентификовати једноставним техникама статистичке контроле процеса и обично захтијевају локалну интервенцију од стране особа директно укључених у радни процес. Њихово благовремено откривање и отклањање је од суштинске важности у раним фазама побољшања процеса. Како се елиминишу посебни узроци, преостале варијације све више указују на системске проблеме који захтијевају интервенцију менаџмента.

Исте једноставне статистичке технике могу указати и на степен уобичајених узрока варијација, али сами узроци захтијевају детаљнију анализу да би се изоловали. Корекција ових уобичајених узрока варијација обично је одговорност менаџмента. Понекад ће људи који су директно повезани са радом бити у бољој позицији да их идентификују и прослиједи менаџменту ради предузимања акције. У цјелини, рјешавање уобичајених узрока варијација обично захтијева акцију на нивоу система.

Истраживања у индустријској пракси показују да само око 15% варијација може бити ријешено локалним акцијама, док чак 85% захтијева системске интервенције. Зато је од кључне важности да постоји јасно разумијевање врсте варијације и одговарајућих мјера, како би се избегли погрешни кораци, као што је локално подешавање машине уместо стратешког избора поузданих добављача. Ефикасно смањење варијација захтијева блиску сарадњу између менаџмента и оперативног особља [10].

Постоји више начина да се утврди обим варијација и њихова природа са аспекта уобичајених и посебних узорака а на основу статистичких података из процеса. На основу тих прорачуна могу се поставити и контролне границе које ће описивати обим варијација у процесу услед уобичајених узорака али и указују и на присуство посебних узрока уколико се прикупљени подаци налазе ван граница. На овај начин формира се контролна карта а видимо да њихова примјена омогућава не само откривање присуства посебних узрока, већ и предвиђање будућег понашања процеса уколико су ти узроци елиминисани. Управо из тог разлога, наредно поглавље биће посвећено детаљном приказу структуре,

врста и примјене контролних карти као основног средства за праћење и унапрјеђење процесне стабилности [3].

3.2.1. Контролне карте

Доктор В.Е. Деминг у својим радовима идентификовао је двије честе грешке у контроли процеса:

- *Грешка 1:* Приписивање варијације или грешке посебном узорку иако она у потиче из система (уобичајна варијација). Примјер грешке један је претјерано прилагођавање (интервенције без основе).
- *Грешка 2:* Приписати варијацију или грешку систему (уобичајним узроцима) иако је у ствари у питању посебан узрок. Примјер грешке број два је да се никад не преузима ништа како би се пронашао посебан узрок грешке [10].

За ефикасно управљање варијацијама у процесима производње неопходно је имати методе за откривање посебних узрока. Честа је заблуда да се за ову сврху могу користити хистограми. Хистограми као графички прикази расподеле варијација служе да би се провјерило да ли је варијација симетрична, унимодална или прати нормалну расподелу. Међутим нормалност не гарантује да не постоје посебни узроци који дјелују на процес, неки посебни узроци могу промијенити процес без да утичу на његову симетрију или унимодалност. Поред тога, не нормална расподела не мора нужно значити да постоје посебни узроци, њено облик може бити несиметричан.

Посебне узроке које не могу показати хистограм показују статистичке методе засноване на времену. Иако постоји неколико класа корисних метода, најпоузданији и најсвестранији алат је **контролна карта**.

Контролне карте се успијешно користе у свим облицима контроле у унапрјеђењима процеса, искуство је показало да оне успјешно усмјеравају пажњу на посебне узроке кад се појаве као и да одржавају степен уобичајних варијација које је потребно смањити како би се побољшао процес или систем.

Ако активности контроле процеса обезбиједе да не постоје активни посебни узроци варијација, каже се да је процес у „статистичкој контроли“ или „под контролом“. Такви процеси се сматрају стабилним, предвидивим и досљедним, јер је могуће предвидјети њихове перформансе и будуће понашање. Супротно томе, активно присуство било ког посебног узрока доводи до тога да процес буде ван статистичке контроле или „ван контроле“. Перформансе таквих нестабилних процеса није могуће поуздано предвидјети односно постоји варирање [2,10].

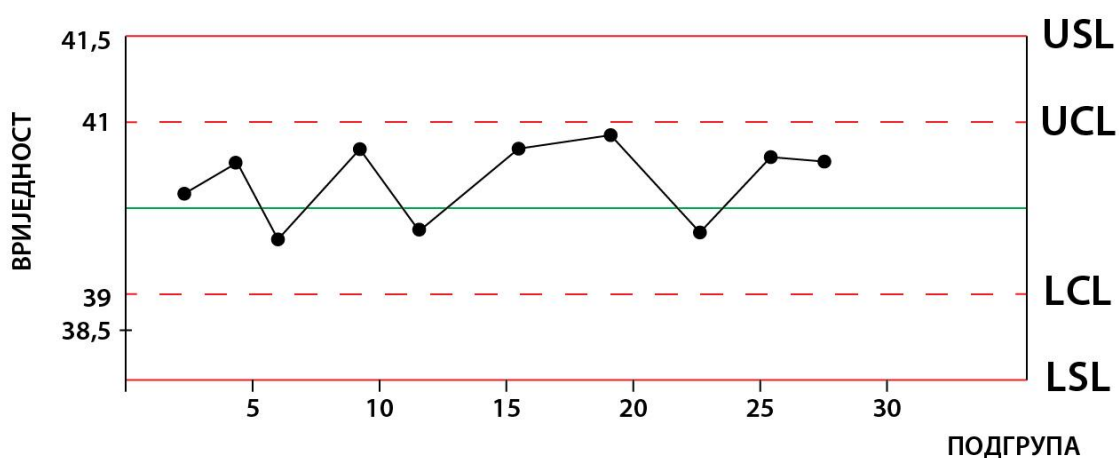
Постоје различити типови контролних карти а у зависности од врсте података и њихове намјене. Из подјеле карактеристика квалитета на нумеричке (варијабле које се описују бројним вриједностима) и атрибутивне (описно оцјењивање, да ли је нешто добро или лоше, пролази не пролази и слично) прва подјела контролних карти је такође на нумеричке и атрибутивне [2].

Нумеричке контролне карте дијеле се на:

- $\bar{x}R$ – контролне карте које прате однос средња вриједност/распон
- $\bar{x}\sigma$ – контролне карте које прате однос средња вриједност/стандардна девијација
- $\bar{x}R$ – контролне карте које прате однос медијан распон.
- I/RM – контролна карта индивидуалних вриједности и покретног опсега.

Свака од наведених контролних карти у основи посједује исте елементе. Први корак приликом израде контролне карте је одабир скале која ће омогућити добар увид у унесене

податке, односно треба изабрати скалу на којој ће се уочити промјене тако да скала не смије бити ни превише уска ни превише широка (параметар A, на слици 3.10). Контролна карта захтијева централну линију засновану на дистрибуцији узорковања како би се омогућило утврђивање нерегуларних (не насумичних) образаца који указују на посебне узроке. Да би се утврдиле издвојене вриједности које указују на посебне узроке, контролна карта мора да има контролне границе засноване на дистрибуцији узорковања и то горњу контролну линију (*UCL – Upper Control Line*) и доњу контролну линију (*LCL – Lower Control Line*). Поред ових линија у контролну карту уносе се и линије које представљају толеранције мјерене величине односно захтјеве купца, горњу границу толеранције (*USL – Upper Specification Limit*) и доњу границу толеранције (*LSL – Lower Specification Limit*). Поред тога контролна карта посједује секвенцу односно временски слијед узимања података (субгрупу) те у случају да постоје вриједности које се налазе изнад контролних линија потребно је да буду означене. Контролна карта са основним елементима приказана је на слици 3.10 [10,12].



Слика 3.10: Контролна карта са основним елементима.

Контролна карта формирана на овај начин посједује неколико области које се могу подијелити на зелену или сигурну зону која се налази између централне линије и *UCL-LCL* вриједности, затим жуту зону (зону упозорења која се налази између *UCL-SCL* односно *LCL – SCL* линије) и црвену зону акције која се налази изван линија [2].

У зависности од процеса и података који су потребни за конкретан случај бирамо једну од наведених типова контролних карти а од самог одабира зависиће и положаји контролних линија који се за сваки тип карте рачунају на посебан начин.

Контролне карте типа $\bar{x}R$ користе се да се прикаже однос средње вриједности и распона, односно прате локацију користећи средњу вриједност а прати распон користећи распон. Погодна је за процесе у којима се производи на одређеној операцији третирају посебно. Величина узорка и фреквенција контролисања дефинишу се контролном технологијом. Код ове контролне карте потребна су два графика, један за $\bar{x}$ и други за R . Сваки графикон има своје контролне границе [2,11].

Да би формирали контролне линије на овој карти користимо математичке формуле предвиђене за овај тип карте а односе се на средњу вриједност групе података, распон података у узорку (на основу формуле 3.1), средњу вриједност груписаних података, стандардну девијацију и стандардну девијацију средње вриједности груписаних података [10].

Средња вриједност рачуна се према формули:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3.9)$$

гдје је:

n – број узорака у групи.

Средња вриједност груписаних података, која представља централну линију, према формули:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_k}{k} \quad (3.10)$$

гдје је:

k – број подгрупа.

Стандардна девијација средње вриједности рачуна се на основу формуле:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{R}{d_2} \quad (3.11)$$

гдје је d_2 коефицијент (Табела 3.4).

Процјена стандардне девијације средње вриједности груписаних елемената рачуна се помоћу формуле:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\bar{\sigma}_c}{\sqrt{n}} \quad (3.12)$$

Контролне линије, за контролну карту средњих вриједности, рачунају се према:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 R \quad (3.13)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 R \quad (3.14)$$

Контролне линије, за контролну карту распона, рачунају се према:

$$UCL_R = D_4 R \quad (3.15)$$

$$LCL_R = D_3 R \quad (3.16)$$

На овај начин формиране су све потребне линије у контролној карти, коефицијенти A_2 , D_3 и D_4 дати су с осталим коефицијентима у табели 3.4 [2,10].

Други тип контролних карти су **$\bar{X}$ σ контролне карте**. Користе се кад је број узорака $n \geq 15$, односно у технолошким поступцима кад на једној операцији истовремено третира већи број производа такође се користи код контроле квалитета готових производа. Варирање карактеристика квалитета прати се помоћу средње вриједности узорка и његове стандардне девијације.

Контролне линије код **$\bar{X}$ σ контролне карте** добијају се на следећи начин, средња вриједност групе те средња вриједност груписаних података рачунају се помоћу формула (3.9) и (3.10) као и код $\bar{X}R$ контролних карти.

Стандардна девијација груписаних елемената рачуна се према:

$$s_k = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.17)$$

Док се просјечна стандардна девијација рачуна као:

$$\bar{s} = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_k}{k} \quad (3.18)$$

Стандардна девијација средње вриједности рачуна се на основу формуле:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{s}{c_4} \quad (3.19)$$

гдје је c_4 коефицијент (табела 3.4).

Процјена стандардне девијације средње вриједности груписаних елемената рачуна се помоћу формуле:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\bar{\sigma}_c}{\sqrt{n}} \quad (3.20)$$

Контролне линије, за контролну карту средњих вриједности, рачунају се према:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_3 s \quad (3.21)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3 s \quad (3.22)$$

Контролне линије, за стандардну девијацију, рачунају се према:

$$UCL_R = B_4 s \quad (3.23)$$

$$LCL_R = B_3 s \quad (3.24)$$

Трећи облик контролних карти су $\bar{x}R$, називају се контролне карте за индивидуално праћење квалитета, медијан -распон карта или контролна карта са помоћним распоном.

$\bar{x}R$ контролне карте користе се код 100% контроле квалитета кад су у питању сложени производи који се производе у малим количинама. Да би се формирао овај тип контролне карте потребно је минимално 20 посматрања [2].

Контролне линије код медијан-распон контролних карти добијају се помоћу наредних формула.

Уколико имамо паран број података медијан се рачуна као помоћу формуле:

$$X_k = X^{\frac{(n+1)}{2}} \quad (3.25)$$

Уколико је у питању непаран број медијан добијамо помоћу:

$$X_k = \frac{X^{\frac{n}{2}} + X^{\frac{(n+2)}{2}}}{2} \quad (3.26)$$

гдје је n - број елемената групе
к-број група података.

Просјечан медијан добијамо из формуле (3.27):

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_k}{k} \quad (3.27)$$

А просјечан опсег помоћу:

$$R = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{k} \quad (3.28)$$

Стандардна девијација средње вриједности рачуна се на основу формуле:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{R}{d_2} \quad (3.29)$$

гдје је d_2 коефицијент (табела 3.5).

Контролне линије, за контролну карту средњих вриједности, рачунају се према:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 R \quad (3.30)$$

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 R \quad (3.31)$$

Контролне линије, за стандардну девијацију, рачунају се према:

$$UCL_R = D_4 R \quad (3.32)$$

$$LCL_R = D_3 R \quad (3.33)$$

Индивидуалне контролне карте користе се најчешће приликом индустријских и производних истраживања када се прати квалитет појединачног производа. Средња вриједност индивидуалних вриједности рачуна се према формули (као код карте типа $\bar{x}R$), као и стандардна девијација према формули (исто $\bar{x}R$), док се ходајући опсег рачуна према:

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}|, \text{ за } i = 2 \dots k \quad (3.34)$$

и представља разлику тренутне вриједности и претходне вриједности.

Средња вриједност ходајућег опсега рачуна се као:

$$MR = \frac{MR_2 + MR_3 + \dots + MR_k}{k-1} \quad (3.35)$$

Контролне линије, за контролну карту средњих вриједности, рачунају се према:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + E_2 R \quad (3.36)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - E_2 R \quad (3.37)$$

Контролне линије, за контролну карту распона, рачунају се према:

$$UCL_R = D_4 R \quad (3.38)$$

$$LCL_R = D_3 R \quad (3.39)$$

Коефицијенти који су наведени у формулама узимају се из табела за контролне карте и то за $\bar{x}R$ и $\bar{x}\sigma$ контролне карте подаци су дати у табели 3.4. Док се за $\bar{x}R$ и индивидуалне контролне карте коефицијенти налазе у табели 3.5.

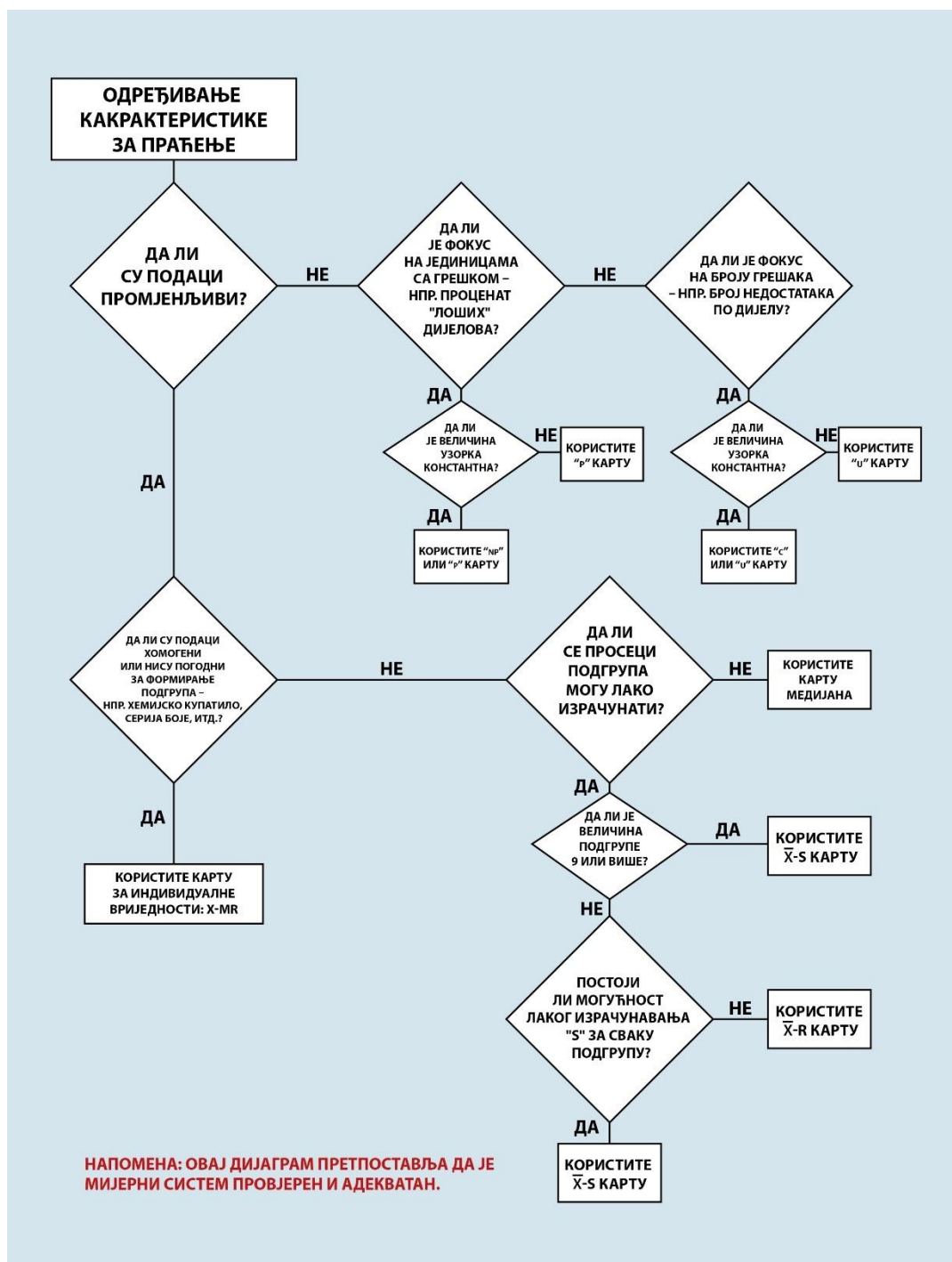
Табела 3.4 Табела константи за $\bar{X}$ R и $\bar{X}$ σ контролне карте [10].

Величина групе	$\bar{X}$ и R карте				$\bar{X}$ и σ карте			
	Карта просјека	Карта распона (R)			Карта просјека	Карта распона (R)		
	Фактор контролних граница	Дјелитељи за процјену σ $\bar{X}$	Фактори за контролне границе		Фактор контролних граница	Дјелитељи за процјену σ $\bar{X}$	Фактори за контролне границе	
	A ₂	d ₂	D ₃	D ₄	A ₃	c ₄	B ₃	B ₄
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	0.9400	—	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	0.9650	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	0.9810	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 3.5: Коефицијенти за $\bar{x}$ R и индивидуалне контролне карте [10].

Величина групе	Медијан контролне карте				Индивидуална контролна карта			
	Карта просјека	Карта распона (R)			Индивидуална карта	Карта распона (R)		
	Фактор контролних граница	Дјелитељи за процјену	Фактори за контролне границе		Фактор контролних граница	Дјелитељи за процјену	Фактори за контролне границе	
		d ₂	D ₃	D ₄	E ₂	d ₂	D ₃	D ₄
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

Да би изабрали правилну контролну карту за процес који желимо да анализирамо постоји процедура избора приказана на Слици 3.11.



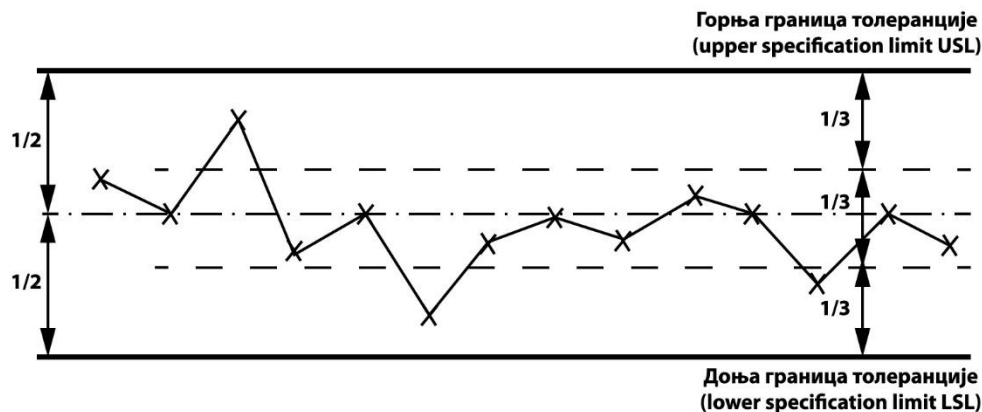
Слика 3.11: Процедура избора контролне карте [10].

Врло је важно правилно поставити контролне линије јер исте формирају три зоне, сигурну, зону упозорења и зону акције односно помажу нам у анализи процеса.

3.2.2. Контролна карта као показатељ стања процеса

У зависности од расподјеле података на контролној карти можемо добити информације о процесу.

За процесе можемо рећи да су под контролом ако има фреквентни полигон измјерених вриједности као на слици 3.12:



Слика 3.12: *Примјер фреквентног полигона процеса под контролом [10].*

Анализа контролне карте процеса под контролом указује нам да се процес сматра под контролом ако је следеће тачно:

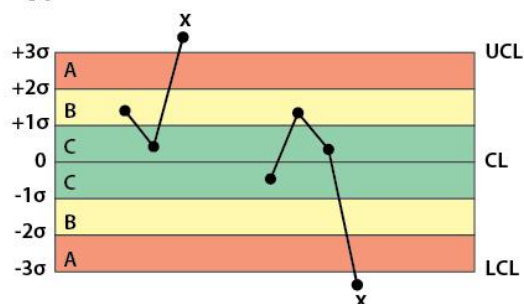
- 2/3 вриједности се налази у средњој трећини контролне карте.
- број вриједности који се налази близу контролних граница је мали.
- приближно је један број вриједности испод и изнад централне линије.
- не појављују се дуге секвенце (не више од 6 узастопних вриједности на једној страни централне линије, изнад или испод).

Потребно је напоменути да ова правила важе за величине узорка ≥ 25 [10,11].

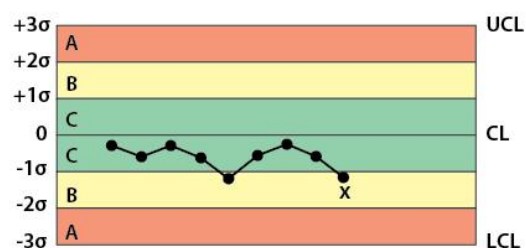
У својим истраживањима Нелсон је дошао до 8 ситуација на контролној карти које указују на неправилне и не насумичне обрасце у подацима:

- једна тачка више од три стандардне девијације од средине (изашла из зоне А) указује на екстремна одступања, процес је ван контроле.
- Девет (или више) мјерења заредом на истој страни средине. Овај случај нам указује на дуготрајну пристрасност односно на проблем у процесу.
- Минимално шест тачака у низу које су у растућем или опадајућем низу.
- Четрнаест (или више) тачака у процесу које се наизмјенично смјењују доле-горе, случај који указује на системску осцилацију.
- Двије од три узастопне тачке више од двије стандардне девијације на истој страни средине, говори нам да имамо потенцијални помак процеса.
- Четири од пет узастопних тачака више од једне стандардне девијације на истој страни средине, указује на стабилан помак у процесу.
- Петнаест тачака у низу унутар ± 1 стандардне девијације од средине, ово је случај који је превише стабилан и очигледно нам указује на проблем с варијабилношћу могуће је да су мјерења погрешна.
- Осам тачака у низу ван ± 1 стандардне девијације од средине, указује на превелику варијабилност односно процес је нестабилан [13].

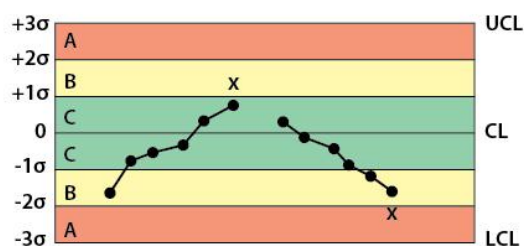
1.



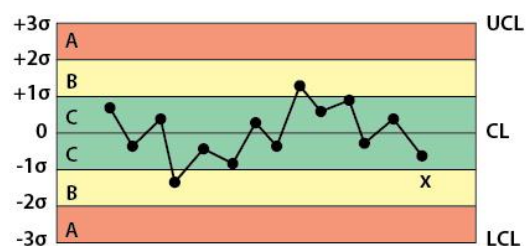
2.



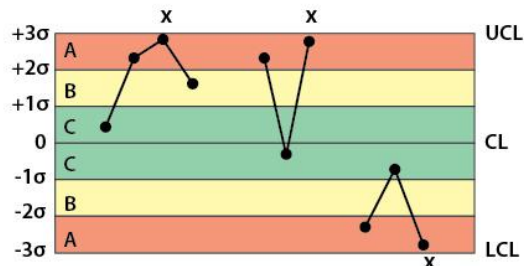
3.



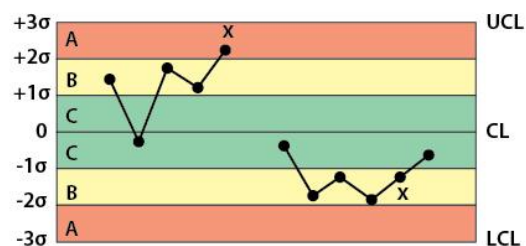
4.



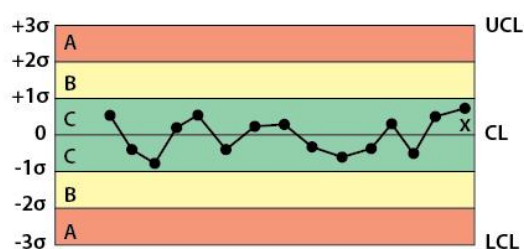
5.



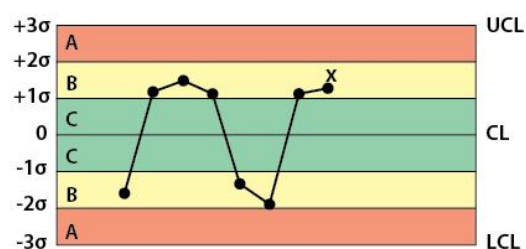
6.



7.



8.



Слика 3.13: Осам случајева који указују да процес није под контролом [12].

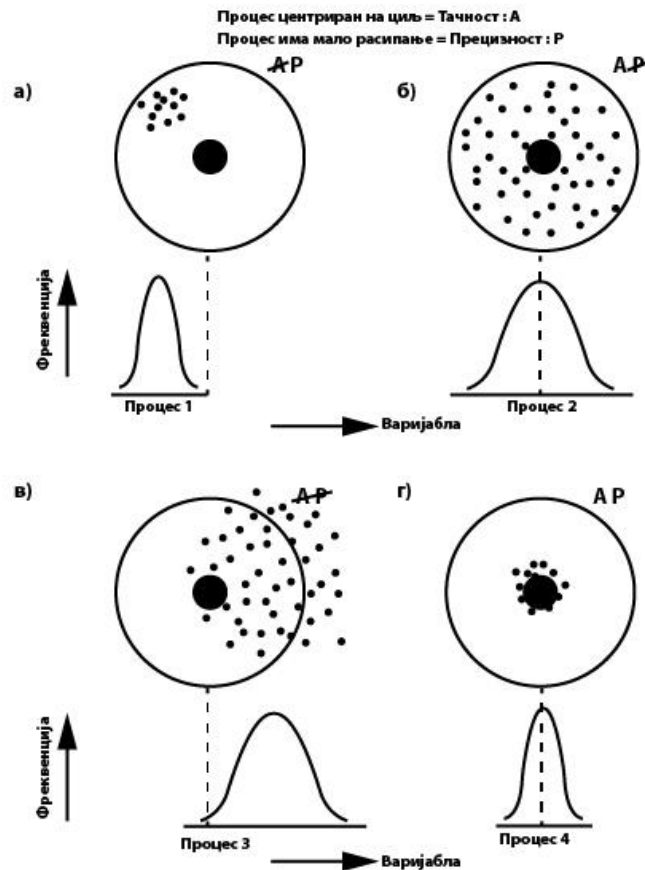
Сваки од наведених случајева указује да у самом процесу постоји одређен тип проблема и да је потребно реаговати да би се исти трајно уклонио.

3.3. Процес

Процес у оквиру статистичке контроле квалитета представља централну тачку анализе, јер управо у њему настају варијације које одређују стабилност и способност система. Већ је дефинисан као трансформација скупа улаза у излаз, али у *SPC*-у процес добија додатну димензију, он постаје објекат мјерења, праћења и предвиђања. Посматрањем процеса кроз контролне карте могуће је разликовати уобичајне узроке варијације, који су природни и очекивани, од специјалних узрока који сигнализирају да је систем изашао из контроле. Управо зато анализа процеса није само опис његових улаза и излаза, већ и процјена његове способности да доследно испуњава захтјеве купаца у условима динамичног окружења. На тај начин процес постаје основа за доношење одлука, јер кроз статистичке методе омогућава да се квалитет не само одржава већ и унапријеђује [3].

Да би наведени концепт учинили јаснијим упоредићемо га с примјером стреличарства. Као што у производном систему улази пролазе кроз трансформацију и на тај начин формирају излаз тако код стреличарства сваки покушај гађања, укључујући факторе као што су вјештина, концентрација, временски услови, даје одређен резултат односно погодак у мету. Управо расподјела погодака око центра мете (као жељене или дизајниране вриједности) можемо посматрати као статистички показатељ стабилности и способности процеса.

На слици 3.14, уочавамо различите случајеве процеса. Примјер 3.14а карактерише низ погодака али далеко од мете. За овај случај може се рећи да је прецизан (сви погоци су груписани) али није тачан јер није погодио центар мете. Уколико центар мете означимо као μ видјећемо да ће нормална расподјела бити помјерана лијево од централне вриједности.



Слика 3.14: *Примјер стреличарства као показатељ способности процеса.*

На слици 3.14б имамо случај да су погоци раширени цијелом метом односно процес је тачан али није прецизан, крива расподеле је широка. Примјер 3.14в показује нам процес који није нити тачан нити прецизан. Примјер 3.14г показује процес који је тачан и прецизан и његова крива расподеле је уско распоређена око средишта мете односно μ [3].

Приказани на овај начин добијамо описно стање процеса а да би добили математички опис стања процеса уводе се мјере: индекс прецизности процеса C_p и индекс тачности процеса C_{pk} .

3.3.1. Способност процеса

Индекс прецизности процеса показује мјеру којом се врши процјена да ли је производни процес (који зависи од пет фактора – 5М) способан да испуни захтјеве који се односе на одређену карактеристику производа. Захтјеви за одређену карактеристику обично се дефинишу доњом и горњом границом спецификације. Математички посматрано представљен је као однос прописане толеранције и искоришћеног опсега тј. формулом:

$$C_p = \frac{GGT - DGT}{6\sigma} = \frac{T}{6\sigma} = \frac{T}{6s_t} \quad (3.40)$$

гдје је:

GGT – горња граница толеранције,

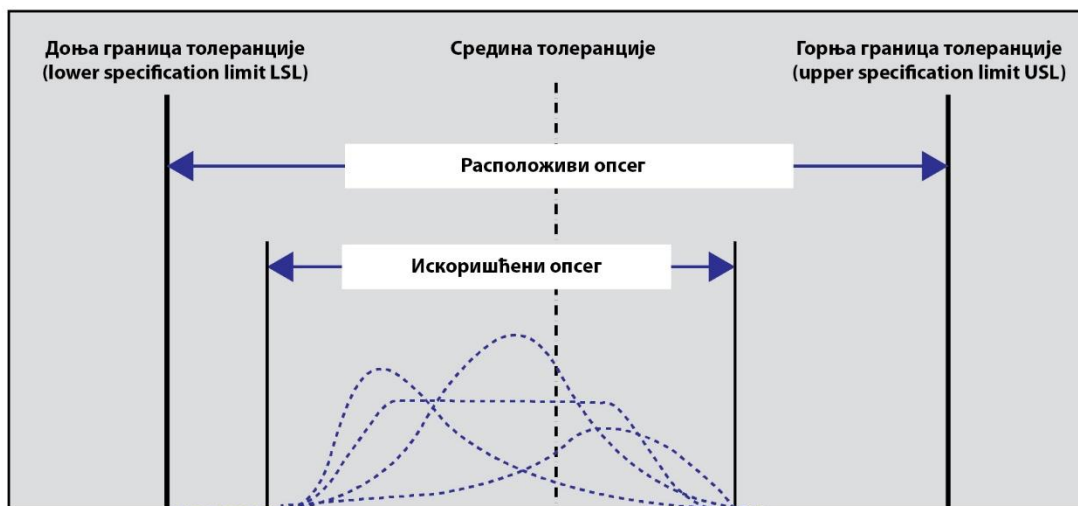
DGT – доња граница толеранције

T – прописана толеранција

σ – стандардна девијација.

У практичној примјени стандардна девијација је готово увијек непозната па се у формули (3.48) она мијења процјеном стандардне девијације s , која се односи на стандардну девијацију подгрупе и њу рачунамо [2,11].

Графички посматрано однос толеранције и стандардне девијације приказан је на слици 3.15.



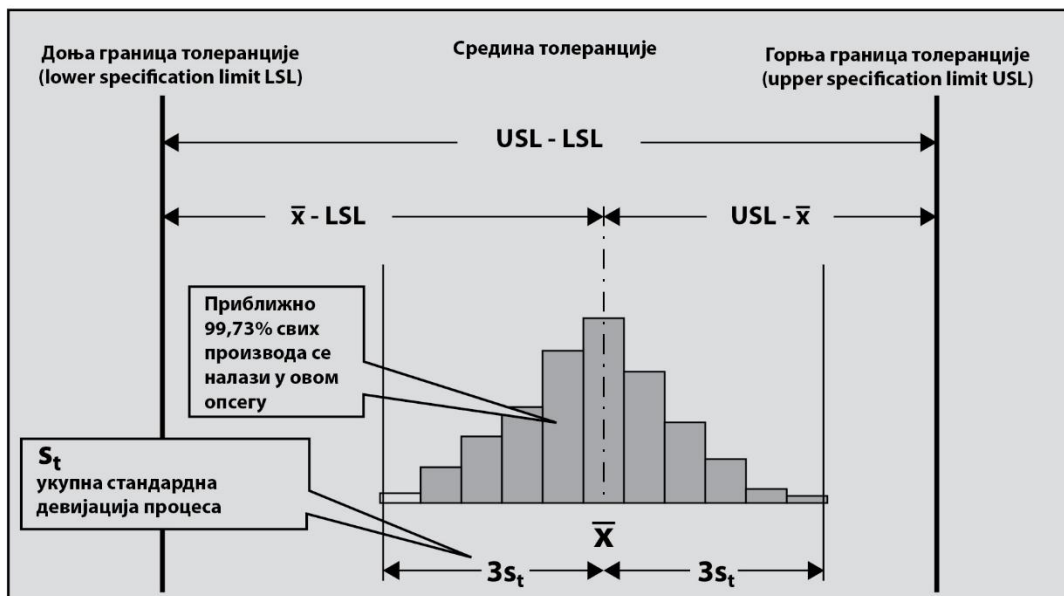
Слика 3.15: C_p графички приказ.

У зависности од вриједности C_p процес се може оцијенити на сљедећи начин:

- $C_p < 1$ – процес је непрецизан,
- $1 < C_p < 1,33$ процес је критично прецизан,
- $C_p \geq 1,33$ процес је прецизан.

Мана индекса прецизности процеса је занемаривање средине процеса, те уколико процес није центриран можемо, користећи само C_p можемо доћи до погрешних закључака, из тог разлога потребно је израчунати и индекс тачности процеса [2].

Индекс тачности процеса у обзир узима и тренутну позицију расподеле као што је приказано на слици 3.16.



Слика 3.16: Графички приказ C_{pk} [12].

На слици 3.16 приказана је нормална дистрибуција која није центрирана тако да се уводе два показатеља тачности процеса и то:

$$C_{pU} = \frac{USL - \bar{x}}{3s_t} \quad (3.41)$$

Односно показатељ способности процеса у односу на горњу границу толеранције и наспрот њега:

$$C_{pL} = \frac{\bar{x} - LSL}{3s_t} \quad (3.42)$$

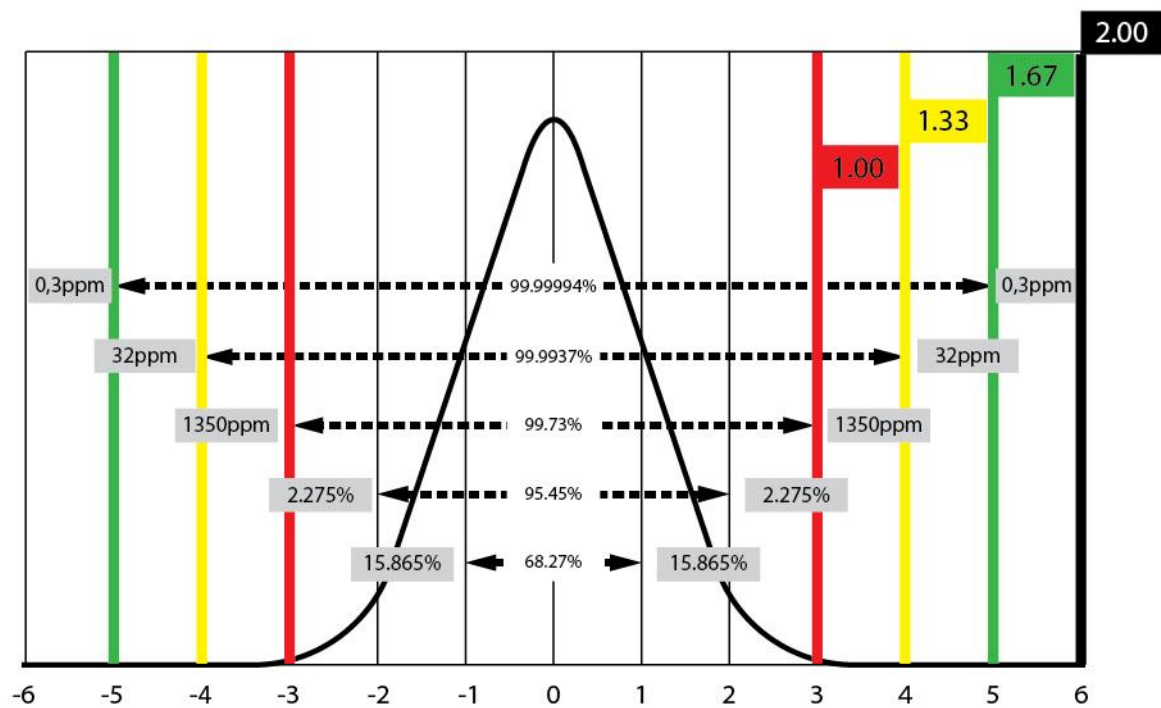
Који се односи на доњу границу толеранције. Након што се добију вриједности C_{pU} односно C_{pL} , коначан индекс тачности процеса је:

$$C_{pk} = \min\{C_{pU}, C_{pL}\} \quad (3.43)$$

Вриједност C_{pk} о процесу говори следеће:

- $C_{pk} < 1$ процес је нетачан,
- $1 < C_{pk} < 1,33$ процес је критично тачан,
- $C_{pk} \geq 1,33$ процес је тачан [2].

Ако упоредимо одређене карактеристичне вриједности C_{pk} на кривој нормалне расподеле са вриједностима стандардних девијација добијамо графикон као на слици 3.17.



Слика 3.17: Крива нормалне расподеле са стандардном девијацијом и вриједностима Срк [12].

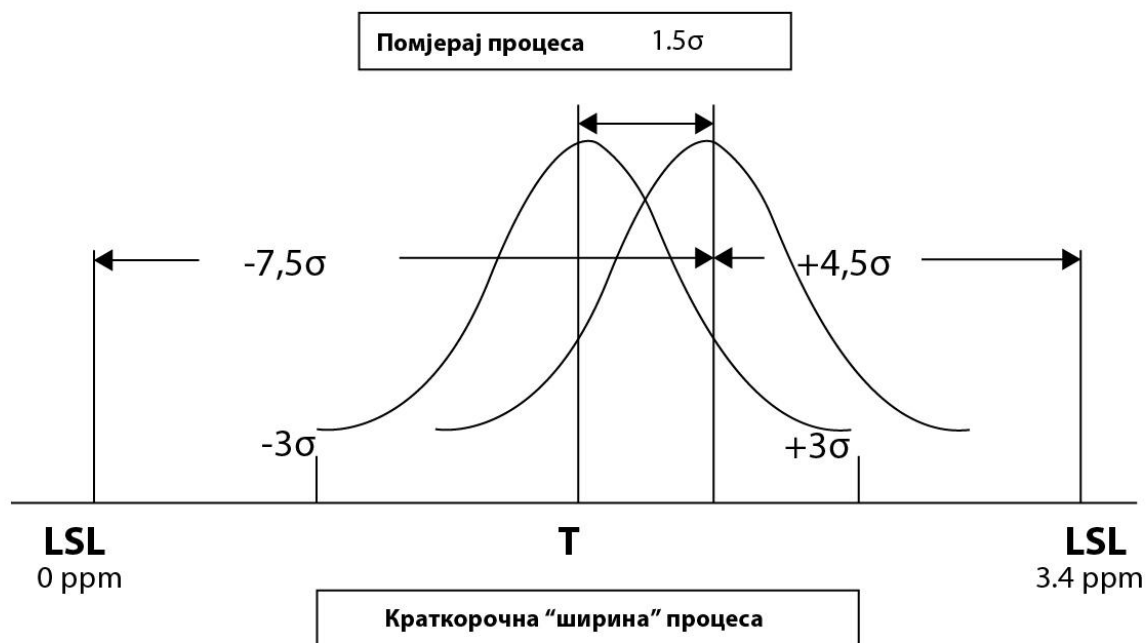
Узимајући податке с графика на слици 3.17, можемо формирати табелу (табела 3.6) која ће приказати број дефектних комада на број произведених.

Табела 3.6: Однос C_{pk} , σ и вјероватноће за ОК/дефектан производ [12].

C_{pk}	σ	Вјероватноћа за ОК производ	Вјероватноћа за дефектан производ	
0,68	$\pm 2\sigma$	95,45%	4,55%	45,500 ppm ¹³
1	$\pm 3\sigma$	99,73%	0,27%	2,700 ppm
1,33	$\pm 4\sigma$	99,994%	0,006%	66 ppm
1,67	$\pm 5\sigma$	99,99994%	0,00006%	1 ppm
2,00	$\pm 6\sigma$	99,99999998%	0,000000002%	2 ppb ¹⁴

Последња тачка говори нам да ће се 99,99999998% мјерења наћи у области коју покрива шест стандардних девијација (Six Sigma – који представља један од алата модерног квалитета). Статистички говорећи $\pm 6\sigma$ осигуравамо само 2 лоша на билион произведених комада.

Практично гледано није могуће пронаћи идеално центриране процесе односно увијек постоји помјерање средње вриједности карактеристике процеса. Научна истраживања су показала да је вриједност помјерања посматране карактеристике процеса $\pm 1,5\sigma$, као што је приказано на слици 3.18.



Слика 3.18: Шифтовање средње вриједности карактеристике процеса [12].

¹³ Ppm- Product per Milion – број комада на милион произведених.

¹⁴ Ppb – product per bilion – број комада на билион произведених.

Математички посматрано у колико је процес помјерен за $\pm 1,5\sigma$ добијамо стопу лоших комада односно ppm 3,4 на милион производа [2,3].

Да би се осигурао што мањи број дијелова с дефектом произвођачи, поготово у ауто индустрији, увели су способност процеса у тачки 9.1.1.3 у *IATF 16949:2016* стандард. Практично гледано на овај начин ауто индустрија жели да ограничи број могућих дефеката на свом производу. Важност мјере способности процеса најбоље се може видјети на примјеру аутомобила који има око 20 хиљада дијелова. Сваки од ових дијелова аутомобила има минимално двије специјалне карактеристике, односно карактеристике које врло битно утичу на функционалност аутомобила. На овај начин можемо довести у везу способност процеса и број дефектних дијелова као што је приказано у табели 3.7.

Табела 3.7: Однос *Spk* и броја дефектних дијелова на примјеру аутомобила од 20 000 дијелова.

<i>Spk</i>	Број дефектних дијелова
1.00	108
1.33	2,5
1,67	0,04
2,00	0,00008

Управо су наведене специјалне карактеристике тема SPC анализа односно гаранције да ће од стране добављача произвођачу бити достављен производ без дефекта.

Специјалне карактеристике кроз *VDA* и *IATF* дефинисане су као карактеристике производа или процеса које имају посебан утицај на сигурност, функционалност, усклађеност са законским прописима или задовољством купца [12].

3.4. Стратегија израде SPC анализе

Посматрано кроз *IATF* стандард у тачки 8.3.3.3 дефинисане су специјалне карактеристике и обавеза произвођача у аутоиндустрији према њима. Према тачки која се односи на специјалне карактеристике дефинисано је да организација треба да спроведе:

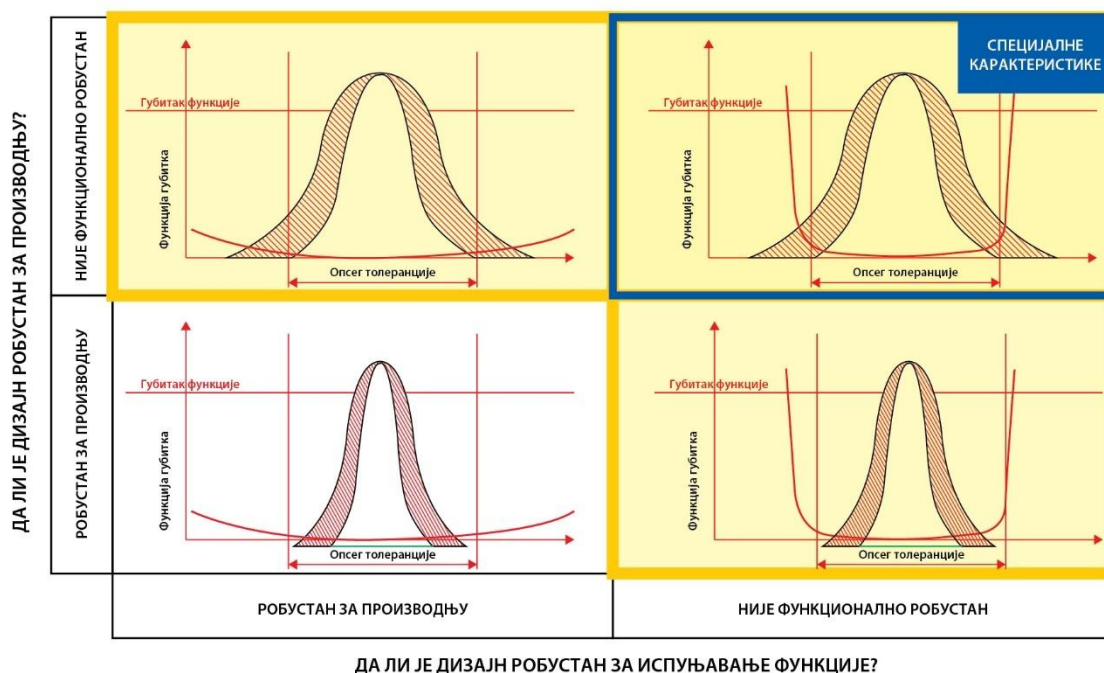
- документовање позиција свих специјалних карактеристика у техничким цртежима, анализи ризика за поменуте карактеристике () плановима контроле и стандардним радним упутствима,
- развој стратегије контроле и праћења специјалних карактеристика производа и производних процеса,
- одобрења од стране купца кад су потребна,
- усклађеност са дефиницијама и симболима које је одредио купац или еквивалентним симболима који се користе у организацији [12].

У оквиру смјерница *VDA* стандарда о специјалним карактеристикама приказани су дијаграми робусности дизајна на којима се указује на међусобну зависност између функционалне робусности производа и његове робусности у производњи, Слика 3.19. Функционална робусност подразумијева способност производа да задржи своју функцију унутар дефинисаних толеранција, док производна робусност означава отпорност дизајна на варијације које се јављају у току процеса производње. Комбинација ових димензија одређује да ли ће карактеристика бити класификована као специјална односно да ли захтијева додатну пажњу у пројектовању, валидацији и контроли.

Дијаграм је подијељен у четири квадранта, при чему сваки квадрант приказује различиту комбинацију робусности. У случају када дизајн није ни функционално ни производно робустан, долази до значајног губитка функције и високог ризика за квалитет производа. Када је производно робустан, али функционално не, карактеристика се означава као специјална јер, иако се може стабилно производити, не испуњава основну функционалност. Супротно томе, идеалан сценарио је када је дизајн истовремено функционално и производно робустан, јер тада производ поуздано испуњава своју функцију уз минималне захтјеве за додатним контролама. Коначно, постоји и ситуација када је дизајн функционално робустан, али није производно робустан, што значи да производ може испунити функцију, али је подложен варијацијама у производњи које могу довести до одступања.

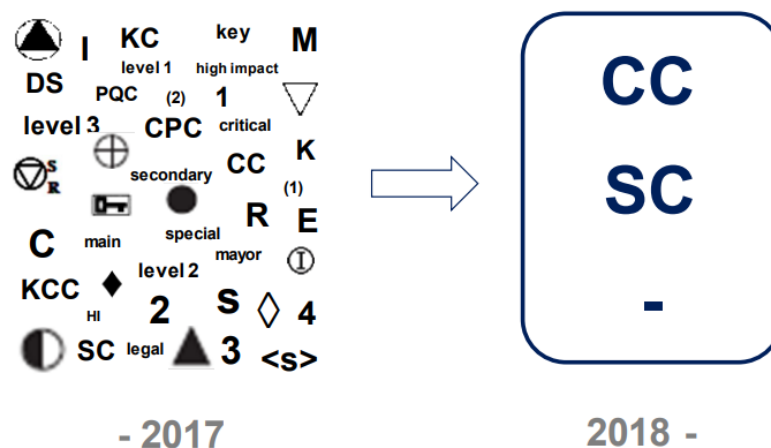
Битност овог концепта огледа се у чињеници да се налази у стандарду, чиме се обезбјеђује систематичан приступ идентификацији и управљању специјалним карактеристикама. Стандардизација омогућава да се критичне карактеристике препознају већ у фази пројектовања, чиме се смањује ризик од каснијих проблема у производњи и експлоатацији производа. На тај начин се обезбјеђује усклађеност са захтјевима квалитета, повећава поузданост производа и оптимизују трошкови кроз смањење потребе за корективним мјерама. Посебно је важно нагласити да овакав приступ доприноси интеграцији квалитета у сам дизајн, што је основни принцип савремених методологија развоја производа.

Закључно, дијаграм робусности из VDA смјерница представља кључни алат за разумијевање односа између дизајна и производње. Његова примјена у пракси омогућава инжењерима да јасно идентификују специјалне карактеристике, да их обиљеже и да за њих дефинишу одговарајуће мјере контроле. Тиме се обезбјеђује да производ не само да задовољава функционалне захтјеве, већ и да се може поуздано и економично производити. Управо ова повезаност функционалне и производне робусности чини основу за постизање високог нивоа квалитета и конкурентности у индустрији.

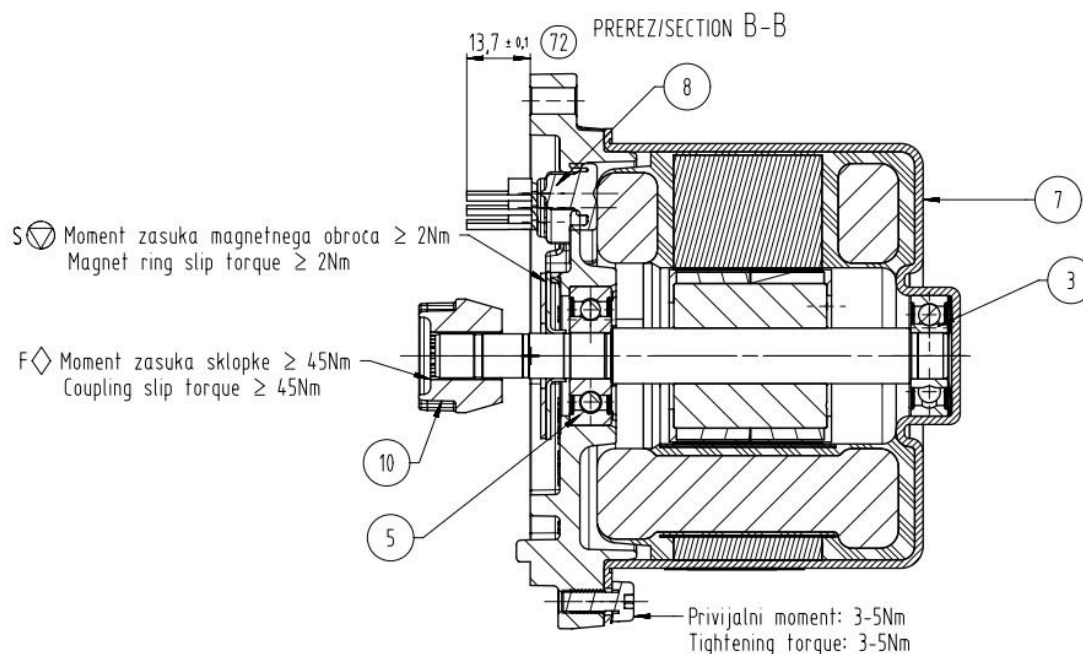


Слика 3.19: Специјална карактеристика приказана кроз робусност[12].

Први корак у изради SPC је идентификација специјалних карактеристика на припадајућем производу. Према VDA стандарду од 2018. године специјалне карактеристике на техничким цртежима означени су ознакама CC (*Critical characteristics*) или SC (*Significant Characteristics*). Раније, у периоду до 2017. године разни произвођачи користили су велики број различитих ознака да би представили специјалне карактеристике, као што је приказано на слици 3.20, што је резултовало увођењем поменутих ознака. Како је практично немогуће извршити промјену комплетне техничке документације настале документације битно је напоменути да је могуће на техничкој документацији пронаћи раније кориштене ознаке.



Слика 3.20: Раније и нове ознаке специјалних карактеристика [11].
Примјер означене специјалне карактеристике приказан је на слици 3.21.



Слика 3.21: Специјална карактеристика означена старијом ознаком F ◇.

Такође пракса је да се подаци о специјалним карактеристикама и минималним захтјевима способности процеса налазе на цртежу. Конкретно у примјеру можемо видјети табелу која садржи податке о специјалним карактеристикама, како су означене на цртежу и које услове треба да испуне, слика 3.22.

TABLE 3 - SPECIAL CHARACTERISTICS					
SYMBOL*	COUNT ON DRAWING	MEANING	MINIMUM REQUIREMENTS (TO BE DETAILED IN CONTROL PLANS)		
			DEVELOPMENT	PPAP	PRODUCTION
[1D]	1	CRITICAL CHARACTERISTICS (SAFETY OR REGULATION)	$Ppk \geq 1.67$	$Ppk \geq 1.67$	$Cpk \geq 1.67$ **
[2D]	1	SIGNIFICANT CHARACTERISTICS	$Ppk \geq 1.33$	$Ppk \geq 1.67$ **	$Cpk \geq 1.33$ **
[2]	14	SIGNIFICANT CHARACTERISTICS	$Ppk \geq 1.33$	$Ppk \geq 1.67$ **	$Cpk \geq 1.33$ **
[3]	4	SIGNIFICANT CHARACTERISTICS	$Ppk \geq 1.33$	$Ppk \geq 1.67$ **	-

* "D" IN THE SYMBOL MEANS THAT DOCUMENTS DESCRIBING HOW THE REQUIREMENTS SHALL BE FULFILLED AND HOW THEY HAVE BEEN FULFILLED SHALL BE AVAILABLE.

** OR OTHER METHODS MORE APPROPRIATE FOR CERTAIN PROCESSES OR PRODUCTS MAY BE USED WITH PRIOR APPROVAL FROM AN AUTHORIZED MEGATECH REPRESENTATIVE (E.G. POKA-YOKE OR 100% PROVEN DETECTION OF DEFECTS).

Слика 3.22: Примјер табеле из техничке документације с подацима о специјалним карактеристикама с цртежа и захтјевима анализе за стабилност процеса.

Након идентификације карактеристике које ће бити предмет *SPC* анализе неопходно је приступити анализи начина узорковања произведених дијелова из серије. Прво је битно одлучити величину узорка, тј. колико ће се комада изабрати. Затим се врши одабир фреквенције узорковања, односно колико често ће узорци бити узимани и на крају који тачно комади ће бити узети да ли случајним одабиром или по неком плану. Одабир наведених карактеристика обично је прописан на нивоу компанија на основу стандарда и као такав се примјењује приликом израде *SPC* анализе[12].

Избор *SPC* стратегије може зависити од фазе развоја производа, што је приказано на Слици 3.22, где се разликују три етапе: фаза развоја, фаза одобравања процеса (*PPAP* узорци – *Production Part Approval Process samples*) и фаза редовне производње. Поред тога, стратегија може бити условљена факторима као што су увођење нове машине у процес или примјена новог технолошког поступка за израду одређеног дијела. Управо из тих разлога компаније развијају системе за правилан избор узрока, фреквенције узорковања и начина спровођења *SPC* анализе.

Без обзира на одабрани тип *SPC* анализе, неопходно је обезбедити валидне улазне податке. Да би се гарантовала њихова тачност, мора се спровести анализа мјерног система (*MSA*). Без валидне *MSA* анализе, резултати *SPC* губе своју сврху, јер не постоји гаранција да уочене варијације одражавају стварно стање процеса, већ могу бити посљедица непоузданости мјерења. Само кроз потврду да је систем мјерења адекватан, *SPC* може да обезбеди релевантне информације за управљање процесом, превенцију неусклађености и континуирано побољшање производње. На тај начин успоставља се логички и методолошки редослијед у коме *MSA* представља предуслов за сваку даљу примјену *SPC*-а.

4. *MSA – АНАЛИЗА МЈЕРНОГ СИСТЕМА (MEASUREMENT SYSTEM ANALYSIS)*

Поузданост резултата мјерења представља основу сваког процеса одлучивања и унапређења квалитета у индустрији. Без тачног мјерења немогуће је стећи потпуну спознају о посматраном феномену, а самим тим ни контролисати процес, што доводи до ослабања на случајност. Управо зато стратегије унапређења пословања, попут методологије *Six Sigma*, наглашавају важност прецизног мјерења и анализе грешака, јер само на основу вјеродостојних података могуће је елиминисати узроке дефеката и систематски побољшавати процесе.

Квалитет резултата мјерења директно утиче на квалитет производа. Ако мјерења нису тачна, купцима се испоручује производ који не задовољава захтјеве. Проблем је што се грешка мјерења у производњи не може одредити, јер стварна вредност мјерене величине увијек остаје непозната. Једино поређењем са референтним еталонима могуће је процијенити одступање. Међународни стандарди зато захтијевају да се уз сваки резултат мјерења наведе и процјена мјерне несигурности, јер тек тада резултат постаје потпун. Међутим, процјена несигурности је сложен и захтјеван задатак, па се у пракси најчешће спроводи у калибрационим лабораторијама, док се у индустрији ослања на редовну контролу и еталонирање инструмената од стране акредитованих тијела.

Калибрација обезбјеђује сљедљивост мјерног система кроз повезивање инструмената са познатим стандардима. Она укључује низ поступака, од поређења и корекције до документовања одступања те се мора спроводити у строго контролисаним условима. Ипак, услови у производним компанијама често су далеко неповољнији од лабораторијских, па се несигурност процијењена током еталонирања не може у потпуности пренијети на реалне радне околности. Додатни изазов представља варијабилност мјерног процеса. Чак и када исти оператер мјери исти предмет истим инструментом, резултати могу да се разликују. То показује да мјерни процес зависи од људи, опреме, метода и окружења, а свака од тих компоненти уноси одређени ниво несигурности [14].

Да би се испунио кључни задатак квалитета и спријечила производња комада који не одговарају захтјевима купаца, као један од битних алата савременог управљања квалитетом и као дио *Six Sigma* методологије, уведена је процјена поузданости мјерног система у виду *MSA – Measurment System Analysis* (Анализе мјерног система), која је постала дио стандарда (нпр. *ISO 16494*) релевантних за аутоиндустрију. Његова сврха је да идентификује укупну варијабилност система и утврди да ли је мјерни систем довољно стабилан и тачан за предвиђену употребу. Студије *MSA* се изводе тако да што вјерније одразе стварне услове производње, укључујући различите оператере, радне предмете и различите услове окружења како би се добила реална слика о поузданости резултата. На основу добијених анализа могуће је донети одлуке о корекцијама, поновним калибрацијама или прилагођавању метода, чиме се обезбјеђује да мјерни систем не прикрива варијабилности које потичу из самог производног процеса и да одлуке засноване на резултатима мјерења буду исправне.

4.1. Терминологија у *MSA* процесу

Студија „анализа мјерног система“ може бити примијењена на сва мјерења односно на свако мјерило или мјерни систем и као дио савремене ауто индустрије посједује терминологију с којом се потребно упознати прије саме практичне примјене *MCA* методе

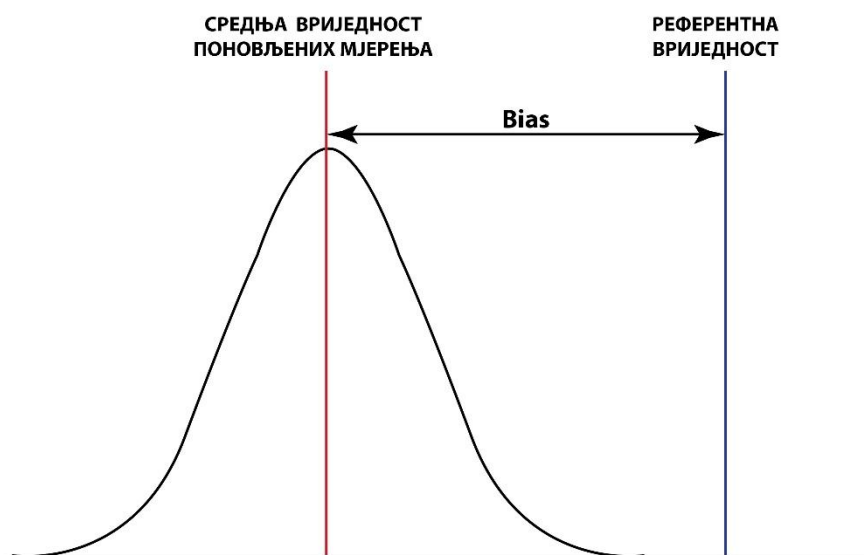
Мјерење је дефинисано као техника у којој се својства објекта одређују упоређивањем са претходно дефинисаним вриједностима, односно то је метрика за изражавање одговарајућих физичких величина. Свој замах као научна дисциплина мјерење је добило током индустријске револуције а развојем индустрије добија све више на значају. Према *ISO* стандарду мјерење се дефинише као сет операција које ће квантитету додијелити вриједност [15].

Мјерење представља процес додјеливања бројева (као нумеричких карактеристика) или својстава (као атрибутних карактеристика) материјалним објектима, са циљем да се прикаже однос између посматраног објекта и његових специфичних својстава. Вриједност која се добије у процесу мјерења (било нумеричка или атрибутна) представља резултат мјерења. За извођење мјерења користи се мјерни инструмент (мјерило) или мјерни систем који обухвата инструменте, уређаје, методе, поступке, софтвер, особље, околину и све друге елементе који утичу на процес мјерења. Сваки мјерни инструмент који се користи мора бити еталониран (калибрисан), а поступак еталонирања се спроводи употребом материјалних стандарда, референтних радних предмета или еталона. Стандарди представљају прихваћену основу за поређење, критеријум прихватљивости и практични еквивалент „стварне вриједности“, при чему су границе несигурности дефинисане кроз виши ниво ланца сљедљивост. Стварна вриједност мјерења је увијек непозната и недоступна, те се може само приближно одредити. Прије спровођења *MSA* студије неопходно је познавати основне карактеристике мјерног инструмента, као што су:

- Дискриминација (резулција) — најмања јединица скале мјерења или најмањи излазни корак инструмента. У пракси се примјењује правило 1/10, што значи да инструмент треба да има резолуцију најмање десет пута мању од толеранције посматране карактеристике. На примјер, ако је толеранција $\pm 0,02 \text{ mm}$, инструмент мора имати резолуцију од најмање $0,001 \text{ mm}$.
- Ефективна резолуција (осјетљивост) — најмања промјена на улазу која доводи до мјерљиве промјене на излазу инструмента [14].

У процесу мјерења неопходно је осигурати сљедљивост мјерења, која се дефинише као процес валидације мјерних резултата путем непрекидног низа поређења. Сљедљивост омогућава да се сваки резултат мјерења доведе у везу са референтним стандардом највишег нивоа, кроз јасно документован и непрекинут ланац. Она се обезбјеђује калибрацијом, која представља формалну валидацију опреме или инструмената за мјерење од стране овлаштене лабораторије. Калибрација је поступак којим се успоставља веза између вриједности које показује мјерни инструмент и одговарајућих вриједности наведених на еталонима, чиме се потврђује тачност, поузданост и исправност мјерног система.

Bias (тачност) представља разлику између стварне, односно референтне вриједности, и средње вриједности добијене поновљеним мјерењима исте карактеристике на истом дијелу. На графичком приказу нормалне расподеле, *bias* се види као помјерање „врха звона“ у односу на референтну вриједност (слика 4.1). Он представља мјеру систематске грешке мјерног система и одражава утицај свих познатих и непознатих извора варијације који досљедно и предвидљиво утичу на резултате мјерења. *Bias* је, дакле, онај дио укупне грешке који се понавља и који није случајан. Могући узроци повећаног *biasa* укључују потребу за калибрацијом инструмента, истрошеност инструмента или опреме, грешке у линеарности, као и разлике у методама мјерења.



Слика 4.1: Биас – графички приказ [14].

Стабилност (заношење) представља укупну варијацију резултата мјерења добијених мјерним системом на истом референтном дијелу или радном комаду када се иста карактеристика мјери током дужег временског периода. Другим ријечима, стабилност описује промјену *bias*а кроз вријеме. Ако се *bias* временом повећава, смањује или осцилира, мјерни систем се сматра нестабилним. Могући узроци нестабилности укључују потребу за калибрацијом инструмента, потребу за скраћивањем интервала калибрације, истрошеност инструмента, опреме или прибора, старење или застарјелост уређаја, недовољно или неправилно одржавање, као и промјене у условима околине као што су температура, влажност, вибрације или чистоћа.

Линеарност представља разлику у *bias*-у у различитим дијеловима радног опсега мјерног инструмента. Она се може посматрати као промјена *bias*а у зависности од величине мјерене карактеристике. Ако инструмент показује различит *bias* на малим, средњим и великим вриједностима опсега, онда нема добру линеарност. Могући узроци грешке линеарности укључују потребу за калибрацијом, потребу за скраћивањем интервала калибрације, истрошеност инструмента, опреме или прибора, неправилно изведену калибрацију (која не покрива цијели радни опсег), као и неправилну употребу еталона.

Поновљивост (прецизност) представља варијабилност унутар истог оператера. Она описује колико се резултати мјерења разликују када један оператер, користећи исти мјерни инструмент, више пута мјери исту карактеристику на истом дијелу под истим условима. Поновљивост одражава својствену варијацију самог инструмента и често се назива „варијација опреме“, иако у пракси обухвата и друге унутрашње факторе. У суштини, поновљивост представља случајну грешку која се јавља током узастопних мјерења под дефинисаним и контролисаним условима — када су дио, инструмент, стандард, метода, оператер, околина и све претпоставке фиксни. Поред варијација које потичу од опреме, поновљивост обухвата и све „унутрашње“ варијације у систему, као што су варијације узорка, инструмента, референтног стандарда, методе или услова околине. Ова варијација се најчешће приказује нормалном расподелом, при чему је њен распон дефинисан стандардном девијацијом.

Репродуктивност представља варијабилност између различитих оператера. Она се дефинише као разлика у средњим вриједностима мјерења које добијају различити оператери (нпр. А, В, С) користећи исти мјерни инструмент за мјерење исте карактеристике на истом дијелу. Ова врста варијације је посебно изражена код ручних инструмената, гдје на резултат значајно утичу техника, вјештина и искуство оператера. Међутим, у аутоматизованим мјерним системима оператер није главни извор варијација, па се репродуктивност у тим случајевима посматра као просјечна варијација између различитих система или различитих услова мјерења. Она може укључивати не само разлике између оператера, већ и разлике између инструмената, лабораторија, метода, стандарда и услова околине (температура, влажност, вибрације). У прорачуну репродуктивности увијек се узима у обзир и поновљивост, јер оба фактора заједно чине укупну варијацију мјерног система.

Потенцијални извори грешака у репродуктивности укључују: разлике између узорака, разлике између инструмената, различите стандарде за подешавање, разлике у методама мјерења (ручне у односу на аутоматизоване), разлике у обуци, техници и искуству оператера, промјене у условима околине током времена, недовољну робустност инструмента или методе, грешке у посматрању (читљивост), погрешно одабрану карактеристику мјерења, изобличења инструмента или дијела, као и замор оператера.

Комбинована варијација поновљивости и репродуктивности чини укупну варијацију мјерног система, познату као *GRR (Gage R&R)*, која се изражава као збир варијанси:

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{ponovljivost}^2 + \sigma_{reproduktivnost}^2 \quad (4.1)$$

Униформност представља разлику у варијацији у различитим дијеловима радног опсега мјерног инструмента и може се посматрати као степен уједначености поновљивости кроз цијели опсег мјерења.

Идеалан мјерни систем би сваки пут производио потпуно тачне резултате, у потпуности подударне са референтном вриједношћу. Такав систем би имао нулту варијансу, нулти bias и нулту вјероватноћу погрешне класификације било ког производа. Међутим, у стварности такви системи не постоје, јер су сви мјерни системи под утицајем различитих случајних и систематских извора варијације, које су приказане на слици 4.2.



Слика 4.2: Узроци варијација у мјерном систему [16].

Управо због тога поновљена мјерења на истом дијелу никада не дају идентичне резултате, постоје разлике које настају као последица уобичајених (*common cause*) и посебних (*special cause*) узрока варијације. Ефекте ових извора варијација потребно је процјењивати и у кратком и у дугом временском периоду. Стабилност мјерног система представља случајну грешку која се јавља у кратком временском интервалу, а одређује се комбинацијом грешака које се квантификују кроз линеарност, униформност, поновљивост и репродуктивност. Укупне перформансе мјерног система, као и перформансе процеса, одражавају ефекат свих извора варијације током времена. То се постиже утврђивањем да ли је процес у статистичкој контроли - односно да ли је стабилан, досљедан и без посебних узрока варијације - те да ли је циљан (без *biasa*) и има прихватљив ниво варијације у односу на очекивани опсег резултата. Пошто се излаз мјерног система користи за доношење одлука о производу и процесу, укупан ефекат свих извора варијације назива се грешка мјерног система, или једноставно „грешка“. Након мјерења дијела, једна од кључних активности је одређивање његовог статуса, практично гледано, то је значило утврђивање да ли је дио прихватљив (унутар спецификације) или неприхватљив (ван спецификације).

Анализа мјерног система омогућава квантификацију грешака мјерења које настају услед различитих извора варијације у процесу. Ове варијације могу потицати из различитих сегмената процеса, као што је приказано на слици 4.2. Варијација у процесу мјерења обухвата варијацију од дијела до дијела, варијацију мјерног инструмента и варијације које настају због различитих оператера. Варијације од дијела до дијела представљају одступања карактеристика производа настала због ограничења или несавршености производног процеса. Варијације мјерног инструмента укључују линеарност, стабилност, *bias* и поновљивост, односно све облике одступања који настају због ограничења или хабања самог инструмента. Варијације настале због оператера јављају се када различити оператери, под истим условима и користећи исти инструмент, добијају различите резултате приликом мјерења исте карактеристике (репродуктивност)

Сви запослени у организацији морају бити свјесни да резултат мјерења никада није идеалан и да сваки инструмент има одређени степен несавршености. Управо зато је неопходно спровести *MSA* студију како би се утврдило колики је „удио“ грешке мјерног система у укупном резултату мјерења. *MSA* обухвата процјену *biasa* (тачности), која укључује анализу линеарности и стабилности, као и процјену варијансе, која се утврђује кроз студије поновљивости и репродуктивности (*Gage R&R*). Поред тога, може се дефинисати и својство способности мјерног система, које представља процјену комбиноване варијације случајних и систематских грешака у кратком временском периоду. Основна способност мјерног система обухвата некориговани *bias* или линеарност, као и поновљивост и репродуктивност (*GRR*). За разлику од мјерне несигурности, која представља очекивани опсег грешке повезан са резултатом мјерења, способност мјерног система описује очекивану грешку у дефинисаним условима и унутар радног опсега инструмента. Када су грешке мјерења некорелисане, односно случајне и независне, укупна варијација мјерног система може се изразити као збир појединачних варијанси, што је формално приказано одговарајућом математичком једначином:

$$\sigma_{sposobnost}^2 = \sigma_{bias(linearnost)}^2 + \sigma_{GRR}^2 \quad (4.2)$$

4.2. Избор *MSA* стратегија

Прије спровођења било које *MSA* студије неопходно је пажљиво планирање и адекватна припрема, јер квалитет резултата директно зависи од начина на који је студија

осмишљена и изведена. Приликом планирања потребно је дефинисати приступ анализи, узимајући у обзир инжењерско расуђивање, визуелна запажања и потенцијални утицај оператера на калибрацију или употребу инструмента. Унапријед се одређују број оператера, број узорака и број понављања, при чему се води рачуна о критичности димензије, конфигурацији дијелова и захтјевима купца. Узорак мора репрезентовати стварни производни процес, а оператери који најчешће рукују инструментом треба да буду укључени у студију. Мјерни инструмент мора имати довољну резолуцију (најмање 1/10 очекиване варијације процеса), а метода мјерења мора бити у складу са дефинисаном процедуром. Само извођење студије мора обезбедити статистичку независност читавања, што се постиже рандомизацијом мјерења и прецизним биљежењем резултата до границе резолуције инструмента. Студијом треба да руководи стручна особа која разуме значај поуздане анализе. Коначни циљ *MSA* студије је утврдити да ли је мјерни систем прихватљив за своју предвиђену намјену, што се процјењује на основу критеријума прихватљивости који зависе од толеранција производа, варијабилности процеса и захтјева купца. Посебно се води рачуна о *bias*-у и грешци линеарности, који морају бити у дозвољеним границама [15].

Позивајући се на тачке 7.1.5.1 и 7.1.5.1.1. *IATF* стандарда а у складу с специфичним захтјевима купаца компаније обично дефинишу своје *MSA* студије које се верификују од стране купца. Управо су на овај начин дефинисана четири типа за израду *MSA* студије у компанији која производи *EPS* мотор а засноване су на природи производа, типа мјерења, природи мјерене величине и процесу који се користи за израду производа.

4.2.1. Студија Тип 1

Студија тип 1 представља основну методу за процјену поновљивости и *biasa* мјерног система на дефинисаном мјесту употребе. Циљ студије је да се утврди да ли мјерни систем може да обезбиједи стабилна и тачна мјерења у контролисаним условима, при чему се израчунавају индекси способност *Cg* и *Cgk*. Сви фактори који нису директно повезани са самим мјерним системом морају бити држани константним како би се изоловао утицај инструмента.

Прије спровођења студије потребно је осигурати да је резолуција инструмента (*%RE*) мања или једнака 5 % толеранције посматране карактеристике.

$$\%RE = \frac{RE}{T} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

гдје је:

%RE – грешка поновљивост

T- толеранција.

Мјерни систем мора бити инсталиран и подешен у складу са спецификацијама произвођача. Сва опрема мора бити калибрисана и подешена прије почетка студије, при чему подешавање током испитивања није дозвољено. Референтни (мастер) дио мора бити калибрисан, одговарати облику карактеристике која се мјери и не смије мијењати своја димензиона или физичка својства током студије. Уколико калибрисани референтни дио није доступан, могу се процјењивати само *%RE* и *Cg*. Сва неопходна мјерна помагала, држачи и сонде морају бити калибрисани и доступни. Потребно је документовати услове околине и подешавања теста, као и осигурати да је упутство за мјерење (нпр. позиционирање, ресетовање) доступно и у потпуности разумијevano.

Један оператер изводи најмање 25 поновљених мјерења на референтном стандарду, поштујући дефинисану процедуру. Након сваког мјерења, референтни дио мора бити уклоњен и поново постављен у исти положај како би се обезбиједили услови поновљивости [16].

Након што се изврши 25 мјерења (x_i) подаци се обрађују и то на начин да се прво рачуна средња мјерена вриједност ($\bar{x}_g$) и то према формули:

$$\bar{x}_g = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.4)$$

Затим се рачуна стандардна девијација мјерених вриједности (s_g) према Формули:

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2} \quad \text{са } i = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

Затим се рачуна B_i (*bias*), разлика између просјечне мјерене вриједности и референтне вриједности:

$$B_i = x_m - \bar{x}_g \quad (4.6)$$

Сада имамо све податке да на основу формула (4.4) и (4.5) можемо израчунати индексе способности C_g и C_{gk} .

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{4 \cdot s_g} \quad (4.7)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |B_i|}{2 \cdot s_g} \quad (4.8)$$

C_g – мјери поновљивост мјерног система, дакле даје нам податак колико је инструмент стабилан и колико варира кад мјери исти комад више пута, висок C_g говори нам да је варијација мала.

C_{gk} – мјери и поновљивост и тачност (*bias*) инструмента, дакле не само стабилност већ и колико је резултат близу референтне мјере.

Комбинација индекса способности даје нам податке о инструменту и то:

- оба су добра слиједи да је инструмент поуздан,
- оба су лоша слиједи да инструмент није поуздан,
- ако је C_g добар а C_{gk} лош слиједи да је мјерни инструмент стабилан али промашује мету.

Након што добијемо ова мјерења потребно је да их упоредимо са прописаним дозвољеним вриједностима која су дата у Табели 4.1:

Табела 4.1: Дозвољене вриједности показатеља студије Тип 1.

	Прихватљиво	Није прихватљиво
%RE	$\leq 5\%$	$> 5\%$
C_g	$\geq 1,33$	$< 1,33$
C_{gk}	$\geq 1,33$	$< 1,33$

Поређењем добијених резултата с резултатима из табеле завршавамо студију Тип 1.

4.2.2. Студија линеарности

Студија линеарности има за циљ да процјени систематско одступање мјерног система унутар дефинисаног мјерног опсега. У ту сврху користе се калибрисани референтни дијелови који су што равномјерније распоређени дуж цијелог опсега мјерења, како би се на свакој мјерној тачки могло утврдити систематско одступање мјерења [16].

Припрема студије:

- мјерни систем мора бити калибрисан и подешен у складу са спецификацијама произвођача,
- током студије нису дозвољене било какве измјене на мјерном систему,
- потребно је обезбиједити минимално три калибрисана референтна узорка са познатим тачним вриједностима,
- референтни дијелови треба да буду распоређени у опсегу $\pm 10\%$ око граница спецификације и равномјерно распоређени дуж мјерног опсега. Несигурност калибрације ($\%U_{cal}$) референтних дијелова треба да буде $\leq 5\%$ толеранције посматране карактеристике.
- сва документација релевантна за студију мора бити доступна.

Поступак извођења студије линеарности састоји се у томе да један оператер или машина врши више поновљених мјерења (N) на сваком референтном комаду (R) уз обавезно документовање резултата пажећи при томе да $NR \geq 30$. Затим се за свако референтно мјерење рачуна $bias$ и $\%Bi$ за мјерни систем. Добијени резултати се упоређују са унапријед дефинисаним критеријумима прихватљивост (Табела 4.2).

Табела 4.2: Параметри студије линеарности.

Параметар	Прихватљиво	Није прихватљиво
$\%Bi$	$\leq 5\%$	$> 5\%$

Потребно је напоменути да студија линеарности није потребна уколико се систем подешава референтним узорком прије сваког мјерења и ако систем садржи линеарну димензиону скалу.

4.2.3. Студија Тип 2

Циљ студије Тип 2 је да се процијени поновљивост и репродуктивност комплетног процеса мјерења, узимајући у обзир све могуће изворе варијације. У ту сврху одређује се индекс способност $\%GRR$, који се затим упоређује са унапријед дефинисаним критеријумима прихватљивости.

Припрема:

- студија Тип 1 студија мора бити успјешно завршена и резултати доступни.
- мјерни систем није мијењан након Тип 1 студије,
- сва неопходна мјерна помагала, држачи и сонде морају бити доступни и калибрисани,
- потребно је документовати услове околине и подешавања теста,
- одабрати 10 производних дијелова, пожељно распоређених дуж цијелог толеранцијског или производног опсега варијације,
- дијелове означити бројевима од 1 до 10,
- дефинисати редослијед мјерења (минимум 2 оператера, минимум 2 понављања),
- осигурати да је исправно упутство за мјерење (нпр. мјерне тачке, позиционирање, ресетовање инструмента) доступно и у потпуности разумијевано.

Поступак се одвија тако да најмање два оператера који уобичајно користе мјерни систем који се тестира, изводе најмање два понављања мјерења на сваком дијелу насумичним

распоредом. Затим се резултати биљеже и на крају рачуна се %GRR помоћу ANOVA¹⁵ методе:

$$\%GRR = \frac{6 \cdot \sigma_{GRR}}{T} \cdot 100\% \quad \text{са} \quad \sigma_{GRR} = \sqrt{\sigma_{EV}^2 + \sigma_{AV}^2 + \sigma_{IA}^2} \quad (4.9)$$

Затим се врши упоређивање добијених резултата с унапријед дефинисаним критеријумима датим у табели 4.3:

Табела 4.3: Услови прописани за студију Тип 2.

	Прихватљиво ¹⁶	Условно прихватљиво ¹⁷	Није прихватљиво
%GRR	≤ 20%	20 – 30%	> 30%

4.2.4. Студија Тип 3

Циљ Студије Тип 3 студије је да се квалификује комплетан процес мјерења у условима у којима утицај оператора не постоји или је занемарљив, као на примјер код потпуно аутоматизованих мјерних система. Ова студија процјењује искључиво репродуктивност а способност мјерног система изражава преко индекса %GRR који се затим упоређује са прописаним односно дефинисаним критеријумима прихватљивости.

Да би се извршила студија Тип 3, потребно је извршити следеће припреме:

- студија Тип 1 - мора бити успјешно завршена, а резултати доступни,
- мјерни систем није мијењан након студије Тип - 1.
- сва неопходна мјерна помагала, држачи и сонде морају бити доступни и калибрисани,
- потребно је документовати услове околине и подешавања теста,
- одабрати 25 производних дијелова, пожељно распоређених дуж цијелог толеранцијског или производног опсега варијације,
- дијелове означити бројевима од 1 до 25,
- дефинисати план студије: један оператор или машина, са најмање 2 понављања по дијелу,
- осигурати да је исправно упутство за мјерење (мјерне тачке, позиционирање, ресетовање инструмента...) доступно и у потпуности разумљиво.

Поступак се састоји у томе да један оператор или машина изводе најмање два понављања мјерења на сваком одабраном узорку с тим да редослијед може да се прилагоди али мора бити документован. Након што се прикупе подаци рачуна се %GRR помоћу ANOVA методе односно помоћу:

$$\%GRR = \frac{6 \cdot \sigma_{GRR}}{T} \cdot 100\% \quad \text{са} \quad \sigma_{GRR} = \sqrt{\sigma_{EV}^2} \quad (4.10)$$

Добијени резултати упоређују се са прописаним критеријумима датим у Табели 4.4.

¹⁵ Анализа варијансе (ANOVA) је статистички алат који се користи за откривање разлика између средњих вриједности експерименталних група[15].

¹⁶ Неки купци могу захтијевати $GRR \leq 10\%$ за потпуну прихватљивост. Обавезно је прије израде студија провјерити захтјеве купца.

¹⁷ Потребно је извршити анализу и извршити накнадне прописане активности (обично се ради о Плану реакције прописаним од стране купца и компаније)

Табела 4.4: Прописани критеријуми студије Тип 3.

	Прихватљиво	Условно прихватљиво	Одбијено
<i>GR&R</i>	$\leq 20\%$	20 – 30%	$> 30\%$

Као што је приказано у табели 4.4, вриједности %*GRR* мање или једнаке 20% сматрају се потпуно прихватљивим и представљају сигурно одобрење Студије Тип 3 од стране купца. Уколико је добијена вриједност у интервалу од 20% до 30%, студија се сматра условно прихватљивом. То значи да купац може прихватити резултат, али уз обавезно спровођење дефинисаних корективних активности како би се у наредним мјерењима постигла вриједност мања од 20%. Све вриједности веће од 30% сматрају се неприхватљивим. Међутим, у том случају неопходно је извршити детаљну анализу мјерног система, а редован производни процес се обуставља до отклањања узрока проблема.

Начин избора Студије која ће бити рађена за одређен производ врши се помоћу табеле приказане на слици 4.3:



Слика 4.3: Правилан одабир студије за MSA анализу [16].

На слици 4.3 јасно је назначено да постоје раздвојене двије врсте и то у зависности од природе мјерене величине: варијабилне и атрибутивне величине а тачну методу бирамо на основу мјерног система, учешће оператера или не [16].

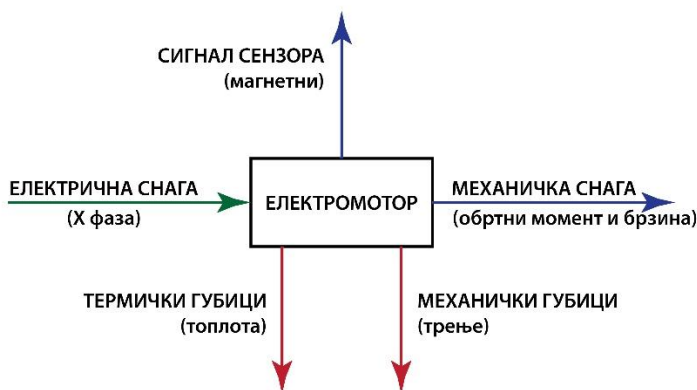
5. ОДАБРАНИ ПРОИЗВОД И ПРОЦЕС

У циљу практичног приказа примјене *SPC* анализе, као предмет истраживања изабран је *EPS* (*Electric Power Steering*) мотор и производни процес који обухвата све фазе његове израде. *EPS* мотори представљају електромоторе чија је основна функција претварање електричне енергије у механичку силу, односно обртни момент, који омогућава подршку возачу приликом управљања возилом. За разлику од традиционалних хидрауличних система, електрично серво управљање засновано на *EPS* моторима доноси бројне предности: већу енергетску ефикасност, смањену потрошњу, прецизније управљање, као и једноставнију интеграцију са савременим системима аутоматизације, попут аутоматског паркирања и различитих облика асистенције при вожњи. Ове карактеристике чине *EPS* мотор не само технолошки напредним рјешењем, већ и погодним примјером за анализу производних процеса кроз примјену статистичке контроле процеса.

5.1. *EPS* мотор Кора

EPS мотор Кора¹⁸ представља *BLDC* (*Brushless Direct Current*) електромотор, развијен у сарадњи купца *Megatech* Канада и развојног тима компаније, на темељу претходно конструисаних и произведених модела електромотора. Основна намјена овог мотора јесте да служи као извор механичке снаге, односно да обезбиједи подршку кориснику приликом управљања возилом кроз примјену обртног момента на управљачку јединицу. Пројектовани вијек трајања мотора износи најмање 20.000 сати коришћења, равномерно распоређених у периоду од десет година. *EPS* мотор Кора примјењује се у возилима као што су четвороточкаши и санке за снијег компаније *CAN-AM*.

Комплетан систем управљања састоји се од електричног интерфејса, уређаја за повезивање, механичког интерфејса и дијелова за монтажу, слика 5.1. Електрична снага мотора дефинисана је као производ максималне струје и максималног напона који се могу довести до мотора. Са друге стране, називна механичка снага одређује се у односу на брзину и криву обртног момента. У прорачун карактеристика мотора укључени су и термички губици, као и механички губици који могу настати услед трења у лежајевима или појаве топлотне енергије током рада.



Слика 5.1: Блок шема *EPS* електромотора.

¹⁸ Кора је интерни назив пројекта развоја мотора и његове производње.

Захтјеви које електромотор мора да испуни дефинисани су кроз техничке спецификације и пратећу документацију. Електрични интерфејс мотора обухвата терминале намијењене за повезивање са управљачком електроником, док механички интерфејс садржи прирубницу мотора, клинове за лоцирање, прстенасти магнет и спојницу. Прирубница мотора има двоструку функцију: обезбјеђује заптивање система и омогућава термичку размену са околином. Клинови за лоцирање користе се за прецизно позиционирање ротора уз помоћ магнетних прстенова, који истовремено служе за одређивање угаоне позиције ротора. Спојница има улогу преносника снаге са електромотора на мјењач, чиме се обезбјеђује ефикасно преношење обртног момента. Према пројектним захтјевима, електромотор је димензионисан да развије снагу од 350 W при једносмјерном напону од 12 V, што представља основни параметар за његову примјену у систему електричног серво управљања.

Саставни дијелови електромотора Кора (Слика 5.2) су :

- статор,
- ротор,
- алуминијумски поклопац мотора,
- магнетни прстен (врши функцију комутатора),
- лежајеви (монтирају се на осовину ротора),
- погонска склопка.



Слика 5.2: *Кора EPS мотор.*

На основу потреба купца прописани су технички услови који добављач треба да испуни и то у виду техничке документације и техничких цртежа.

5.1.1. Техничке карактеристике

Технички захтјеви које мотор мора да испуни, укључујући дизајн, димензије, као и механичке и електричне карактеристике, дефинисани су од стране купца путем техничког цртежа и пратеће техничке документације. На техничком цртежу наведене су и специјалне карактеристике, како механичке тако и електричне. Електричне карактеристике мотора приказане су у табеларном облику на самом цртежу, као што је илустровано на слици 5.3.

TABLE 2 - MOTOR CHARACTERISTICS				
	CHARACTERISTICS	NOMINAL VALUE	TOLERANCES	UNITS
[2] 055	Ke	0.0893	± 5%	V·s/rad
[2] 056	R	105.0	± 3%	mΩ
[2] 057	R unbalanced	-	≤ 1.4%	-
[2] 058	L	442.2	± 5%	μH
[2] 059	L unbalanced	-	≤ 3%	-
[2] 060	5th HARMONIC	-	≤ 0.5%	-
[2] 061	7th HARMONIC	-	≤ 0.5%	-
[2] 062	COGGING TORQUE	-	≤ 20	mN·m
[2] 063	FRICTION TORQUE (AVERAGE)	-	≤ 30	mN·m
[2] 086	FRICTION TORQUE (MAXIMUM)	-	≤ TBD	mN·m
[2] 087	FRICTION TORQUE (PEAK TO PEAK)	-	≤ TBD	mN·m

Слика 5.3: Електричне и механике карактеристике мотора дате на техничком цртежу мотора.

За све наведене карактеристике мотора прописана је обавеза спровођења 100% аутоматске контроле, док се верификација мјерног процеса мора изводити уз помоћ еталона који су верификовани у акредитованим лабораторијама. Провјера процеса обавља се прије почетка сваке смјене, након застоја дужих од 15 минута, као и након интервенција одржавања. Све ове карактеристике, у складу са захтјевима купца и релевантних стандарда, дефинисане су као специјалне, што значи да је за њих неопходно континуирано спроводити *SPC* анализу.

Поред техничких услова које електромотор треба да испуни потребно је испунити и услове који владају у производном погодну како би осигурали захтјеви купца: Према условима прописани су сљедећи параметри:

- температура 22 ± 2 °C,
- влажност ваздуха 40 - 60 %,
- електрична напајања 400/230 V, 50 Hz, 3 фазе,
- компресовани притисак осигуран у соби, 5- 6 bar,
- максималан ниво буке до 80 dB,
- чистоћа пода, машина и инсталација према VDA 19.2 (C 3.1.2).

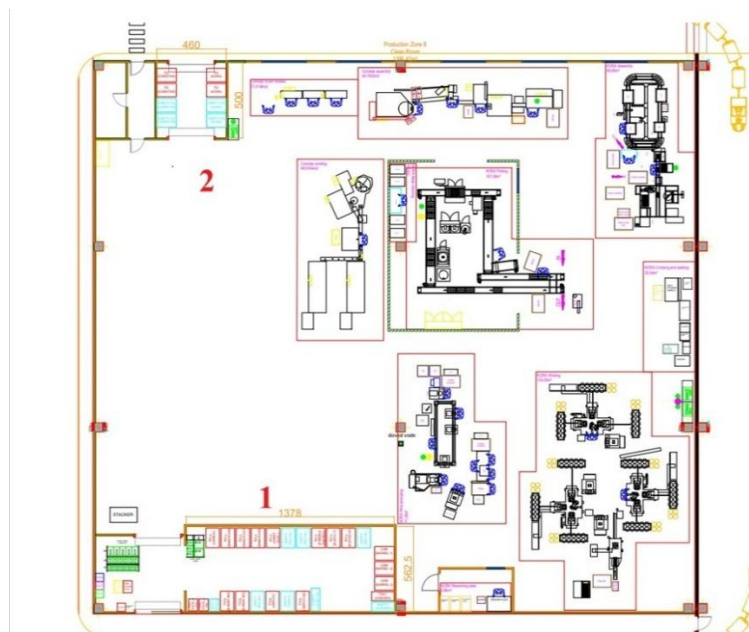
Да би се испунили прописани технички услови развијен је процес производње који се састоји из четири подлиније.

5.2. Процес производње

Израда производа одвија се на производној линији Кора¹⁹ која се састоји од четири подлиније и то: линија намотавања и обликовања, завршна линија статора, линија залијевања и монтажна линија. Тлоцрт производне линије приказан је на слици 5.4. Да

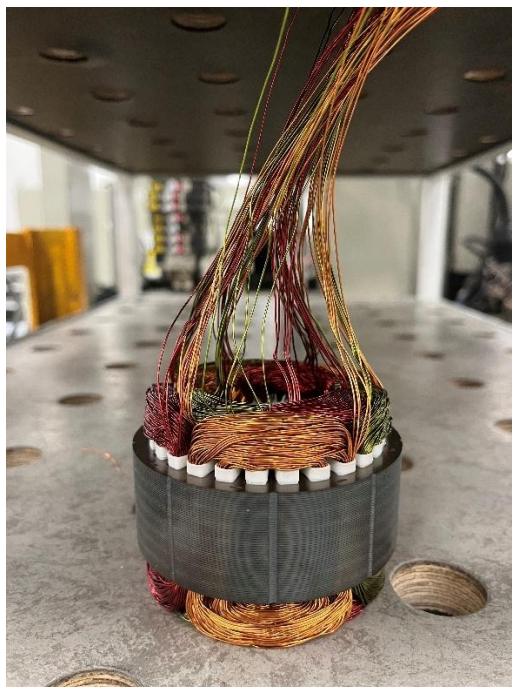
¹⁹ Назив линије интерни назив настао за вријеме развоја производа и производне линије.

би процес испунио услове купца односно услове савремене ауто индустрије претходно је уређена *PFMEA* анализа, процес се прати помоћу технолошког поступка а контролни план дефинише начине контроле и планове реакције у случају неусаглашености.



Слика 5.4: *Глоцрт производне линије Кора са свим под линијама и машинама.*

Прва подлинија, намотавање и обликовање састоји се од 7 машина које врше намотавање и обликовање 9 намотаја бакарне жице (три боје црвена, зелена и наранџаста) на статорски пакет. Након овог дијела процеса добија се полупроизвод приказан на слици 5.5.



Слика 5.5: *Полупроизвод, статор електромотора Кора.*

Након намотавања врши се одвајање фаза и звјездишта на завршној линији статора, затим заваривање звјездишта, контрола отпорности полу-производа те утискивање намотаног статора у статорски лонџић.

На трећој под линији залијевање врши се залијевање статора епокси смолама како би се осигурала његова чврстина и додатно изолирале намотане жице те се врши постављање терминала на фазе електромотора.

Последњи корак производње је монтажа електромотора која се обавља у роботској ћелији. Унапријед припремљен статор монтира се заједно с предњим поклопцем мотора, ротором, лежајевима, гумицама за заптивање и вијцима. Дио роботске ћелије приказан је на слици 5.6. На крају процеса добија се електромотор приказан на слици 5.2.



Слика 5.6: Монтажна роботска ћелија.

Након што је електромотор монтиран потребно је обавити електрична и механичка мјерења која су прописана техничком документацијом. Да би се извршио процес мјерења електричних карактеристика које ће бити предмет *SPC* анализе приликом пројектовања линије развијена је мјерна станица интерног назива *AK2200* – Јединица за мјерење електричних карактеристика. Мјерна станица састоји се од конструкције, пнеуматског система који омогућује контакт мјерног система са електромотором, *RLC* метра, рачунара за обраду података и монитора за приказ података. *RLC* метар који се користи у мјерном систему је *Keysight E4980 AL* (прописана је обавезна калибрација уређаја једном годишње). *RLC* метар је спојен са рачунаром који врши обраду података али и њихово складиштење у електронску базу података. Поред тога рачунар врши пројекцију података добијених мјерењем на дисплеј монитора. За управљање и обрадом података рачунар користи софтверски пакет *Matlab*. Изглед јединице за електрична мјерења приказан је на слици 5.7.



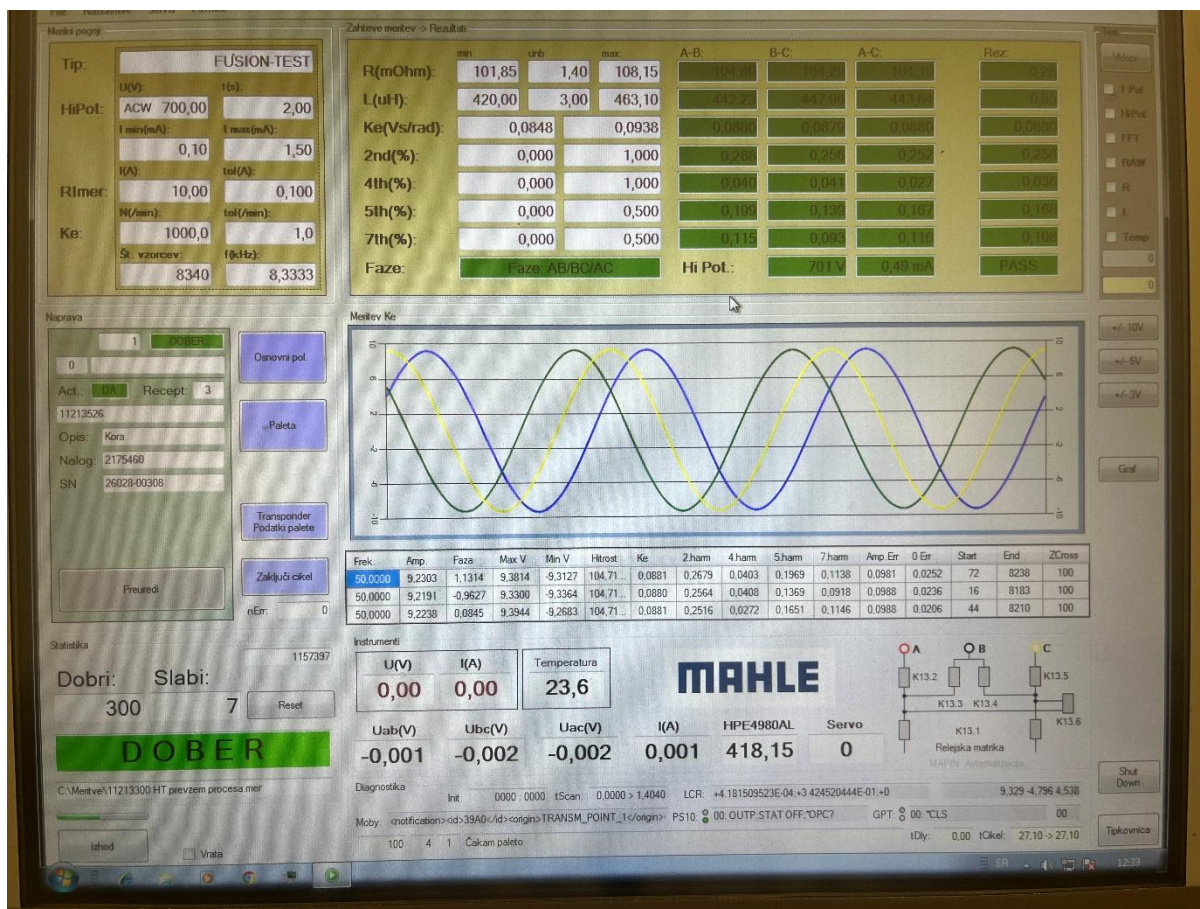
Слика 5.7: Изглед јединице за мјерење електричних карактеристика AK2200.

Процес мјерења реализован је на начин да електромотор смјештен на транспортној палети помоћу транспортне траке долази у јединицу за мјерење електричних карактеристика. Приликом доласка на тачно одређену позицију активира се сензор који зауставља палету са електромотором. Након заустављања палете долази до активације пнеуматског система односно клип са месинганим иглама за мјерење долази до терминала електромотора и на тај начин остварује контакт с фазама електромотора (слика 5.8). Остваривањем контакта испуњен је услов да се кроз фазе електромотора пусти једносмјерна струја. RLC метар региструје промјене струје и напона, обрађује их у шаље рачунару.



Слика 5.8: Начин остваривања контакта мјерног система са електромотором.

Након што рачунар изврши обраду податка резултате мјерења приказује на монитору. Монитор са резултатима мјерења приказан је на слици 5.9.



Слика 5.9: Изглед монитора са мјерењима електричних карактеристика једног електромотора Кора.

На индикаторској јединици су приказане вриједности контролисаних параметара, као и коначна индикација уколико су сви параметри унутар прописаних граница. Уколико је неки од параметара изван спецификације, црвена индикација указује на одређену неусаглашеност електричних параметара. У том случају врши се одвајање неусаглашених производа. Сва мјерења су смјештена у базу података тако да и оператери и купци могу приступити у случају да су им потребни за обраду. Подаци преузети с ове мјерне станице биће коришћени за MSA, односно SPC анализу.

6. MSA УРЕЂАЈА ЗА КОНТРОЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КАРАКТЕРИСТИКА EPS МОТОРА

На основу начина рада уређаја за контролу електричних карактеристика AK2200 јасно је да је за његову MSA, а на основу алгоритма представљеног на слици 4.3 потребно је урадити студију случаја Тип 3. Први услов да би се ова студија извела је да имамо успијешно реализовану студију Тип 1.

6.1. Студија Тип 1

Студија Тип 1 има за циљ да провјери поновљивост и репродуктивност мјерног система. Да би то испунили припремљен је мастер узорак (еталон) који је од стране оператора пуштен у мјерни систем 25 пута како би добили 25 мјерења. Мастер узорак користи се за верификацију мјерног уређаја приликом свакодневног покретања линије и раније су у овлаштеној лабораторији измјерене вриједности свих електричних величина овог електромотора.

На основу упутства за студију Тип 1 извршено је 25 мјерења вриједности електричних карактеристика мастер узорака. Вриједност мјерених параметара су очитане са монитора мјерног система, такође резултати мјерења су смјештени у електронској бази компаније. Провјерено је да ли је извршена калибрација уређаја и да ли је уређај подешен према упутству произвођача.

За анализу одабране су сљедеће електричне величине: индуктивност фазе АВ и електрична отпорност фазе СА, а техничком документацијом су дефинисане као параметри од великог значаја за функционалност производа.

У табели 6.1 приказани су резултати поновљених мјерења електричне индуктивности за еталон који се користи у производном процесу,

Табела 6.1: Вриједности индуктивности фазе АВ (у μH).

i	x_i	i	x_i	i	x_i	i	x_i	i	x_i
1	433,18	6	431,58	11	435,96	16	433,72	21	435,92
2	431,87	7	434,99	12	433,51	17	434,56	22	432,14
3	432,09	8	434,79	13	435,08	18	431,84	23	431,74
4	434,50	9	431,86	14	433,70	19	434,75	24	431,74
5	432,59	10	434,61	15	432,40	20	434,75	25	431,90

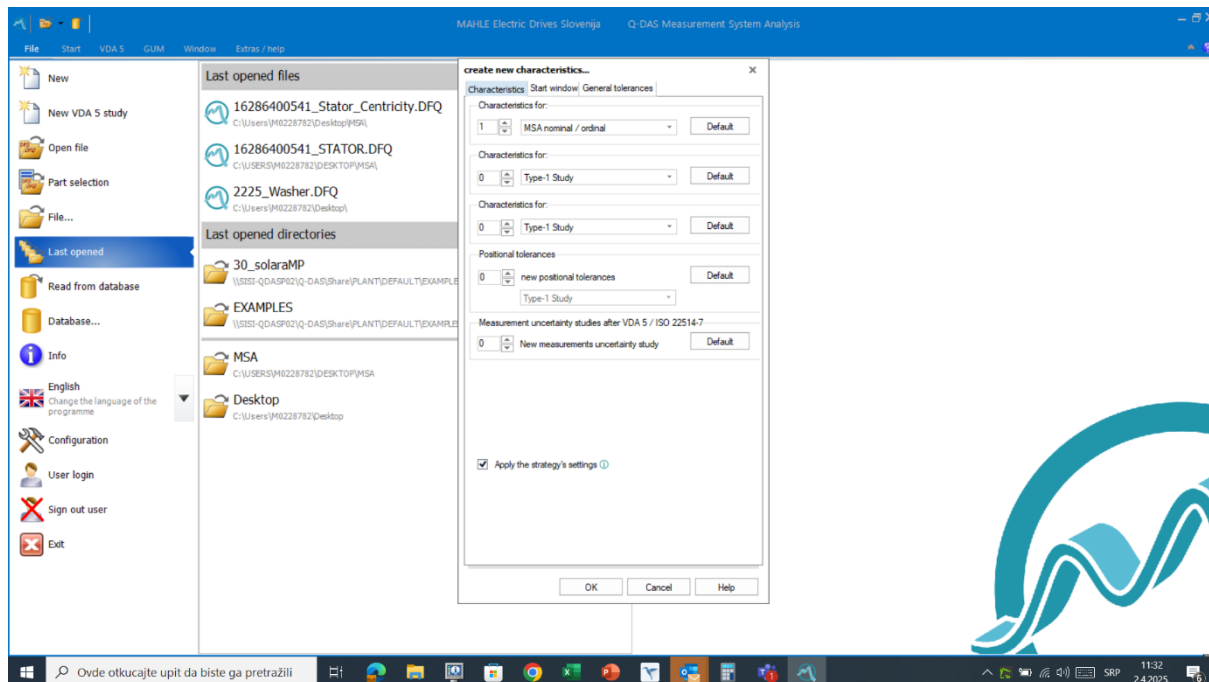
Поред вриједности индуктивности преузете су и вриједности електричне отпорности еталона, дате у табели 6.2

Табела 6.2: Вриједности отпорности фазе СА (у $\text{m}\Omega$).

i	x_i	i	x_i	i	x_i	i	x_i	i	x_i
1	106,87	6	106,69	11	106,40	16	106,96	21	106,77
2	106,50	7	106,80	12	106,53	17	106,74	22	106,82
3	106,64	8	106,96	13	106,64	18	106,66	23	106,90
4	106,65	9	106,63	14	106,85	19	106,74	24	106,79
5	106,72	10	106,27	15	106,81	20	106,74	25	106,81

Након извршених мјерења и записа резултата вршимо унос података у софтверски пакет *Q-Das*²⁰. Захваљујући чињеници да се сва мјерења чувају у електронској бази података у сваком моменту можемо извршити провјеру да ли смо направили грешку приликом уписа мјерења са монитора за приказ резултата.

Изглед радног окружења након покретања програма приказан је на слици 6.1.



Слика 6.1: Радно окружење софтверског пакета *Q- Das*

Првобитна активност јесте избор типа студије. Наиме, у првом случају бира се студија тип 1, студија тип 3 ће бити изабрана у наредној обради података.

Након избора одговарајућег типа студије на располагању је окружење са пољима у која се уносе општи подаци о производу, разлогу тестирања, оператеру, купци и сличне податке који нам могу бити од користи на званичном извјештају, слика 6.2

²⁰ *Q – DAS* – је софтверски пакет развијен од стране компаније *Hexagon* из Индије. Намијењен је за статистичке анализе у индустрији и тренутно се користи у различитим компанијама у 55 земаља свијета

Parts mask

Part Number: 11213526555 Description: Kora Motor Contr.item: ☐ Amendment status:		Test Facility Number: Description: Reason for Test: MSA Test Begin: Test End:	
Manufacturer Number: Name: MAHLE		Test Location Aleksandrovac	
Material Description:		Contract Contract: Contractor: Vedran Mišić	
Drawing Number: Amendment:		Customer Number: Name: BRP	
Status Inspection type: Test Plan Creator: Date acceptance: Name Customer: Decision Gage capability (customer):			
Remark 			

Слика 6.2: Изглед програма приликом уноса опитних података о производу.

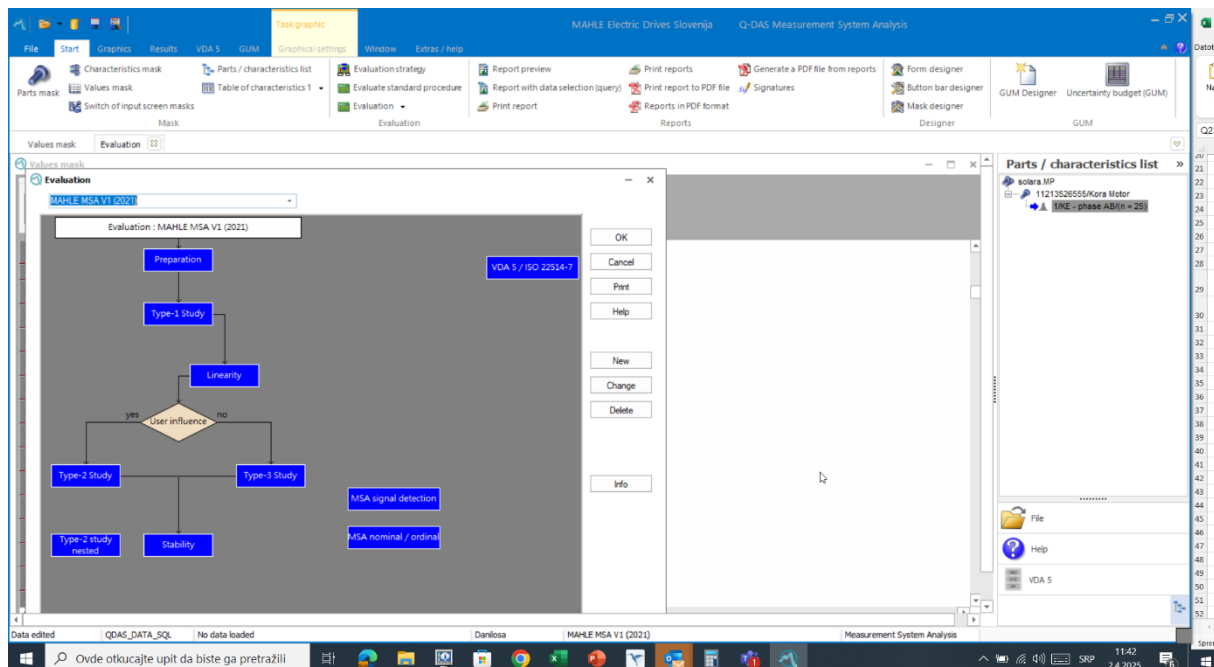
Наредни корак представља унос података о електричној величини која се испитује. Уносимо назив величине, горњу граничну вриједност, доњу граничну вриједност и јединицу мјере. Изглед програма приликом уноса података о величини која се мјери приказан је на слици 6.3. Битно је напоменути да због природе величине која се мјери (индуктивност/отпорност фазе) према упутству за студију Тип 1 није потребно да се уноси x_m (референтна вриједност) пошто је у питању величина која је дата толеранцијским пољем а не референтном вриједношћу тако да у резултатима у резултатима нећемо имати податке за Cgk .

Characteristics mask

Characteristic Number: 1 Description: KE - phase A8 Measured quantity: undefined Recording Type: manual Events Cat: Events Catalogue		Nominal value: Unit: Vs/rad Decimal Pl: 5 Up.Spec.Lim: 0,09377 Up.Allowance: Up.nat.bound: ☐ Lo.Spec.Lim: 0,08483 Lo.Allowance: Low.nat.bound: ☐	
Reference Figure Calc.Tol: 0,009 Process Var: 0 req. Cp:		Master Number: Description: Actual value: Calib. uncertainty: Coverage factor: 2,0000	
Gage Number: Description: Resolution: Group: Test Location:			
Evaluation Type Type-1 Study No. of Ref. Meas: 25			
Remark 			

Слика 6.3: Унос опитних података о величини која се мјери.

Последњи корак је избор типа извјештаја који желимо и начин евалуације. Софтверски пакет *Q-Das* у својој бази посједује много образаца стандардних извјештаја а према стандарду компаније одабран је *Mahle MSA – V1 (2021)*, верзија коју компанија тренутно користи за анализе и која је призната од стране купаца. Графички приказ евалуације приказан је на Слици 6.4.



Слика 6.4: Избор стандарда обраде података.

Након што програм изврши анализу добијамо резултате за Студију Тип 1 индуктивности фазе АВ приказане на Слици 6.5.

MAHLE		Measurement System Analysis Type-1 Study		9 / 14																																																																	
Cust.Name		Supp.Name		Date/Time 17.6.2025.																																																																	
Part no. 11213526555		Char.No. 058		Gage No. 1-ZK094																																																																	
Part descr. Fusion Motor		Char.Descr. Inductivity AB Phase		Gage Descr. Electrical Gauge																																																																	
Drw.No.		Nominal value 442.20 uH		Test Reas. MSA																																																																	
Master No.		USL 464.31 $\hat{\Delta}_u$ 22.11		Evaluation from 17.6.2025. 08:20:11																																																																	
Master Descr.		LSL 420.09 $\hat{\Delta}_l$ -22.11		to 17.6.2025. 08:20:11																																																																	
Remark																																																																					
i	x _i	i	x _i	i	x _i	i	x _i	i	x _i																																																												
1	433,18	6	431,58	11	435,96	16	433,72	21	435,92																																																												
2	431,87	7	434,99	12	433,51	17	434,56	22	432,14																																																												
3	432,09	8	434,79	13	435,08	18	431,84	23	431,74																																																												
4	434,50	9	431,86	14	433,70	19	434,75	24	431,74																																																												
5	432,59	10	434,61	15	432,44	20	434,75	25	431,90																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Drawing Values</th> <th colspan="2">Collected Values</th> <th colspan="2">Statistics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Standard actual x_m</td> <td>---</td> <td>Maximum value x_{max g}</td> <td>435.96</td> <td>Average $\bar{x}_g$</td> <td>433.4324</td> </tr> <tr> <td>LSL</td> <td>420.09</td> <td>Minimum value x_{min g}</td> <td>431.58</td> <td>Standard dev. s_g</td> <td>1.460</td> </tr> <tr> <td>USL</td> <td>464.31</td> <td>n_{tot}</td> <td>25</td> <td>Range R_g</td> <td>4.38</td> </tr> <tr> <td>Tolerance T</td> <td>44.22</td> <td>n_{eff}</td> <td>25</td> <td> Bi = $\bar{x}_g - x_m$</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>%RE</td> <td>= 0.02%</td> <td colspan="2"> </td> <td>T_{min} (%RE)</td> <td>= 0.200</td> </tr> <tr> <td>C_g = $\frac{0.2 \times T}{4 \times s_g}$</td> <td>= 1.51</td> <td colspan="2"> </td> <td>T_{min} (C_g)</td> <td>= 38.95</td> </tr> <tr> <td>C_{gk} = $\frac{0.1 \times T - \bar{x}_g - x_m }{2 \times s_g}$</td> <td>= --- 916</td> <td colspan="2"> </td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="6">Overall evaluation Measurement system capable (%RE,min,C_g) </td> </tr> <tr> <td colspan="6">Calculation method MAHLE MSA V1 (2021): Type 1</td> </tr> </tbody> </table>										Drawing Values		Collected Values		Statistics		Standard actual x _m	---	Maximum value x _{max g}	435.96	Average $\bar{x}_g$	433.4324	LSL	420.09	Minimum value x _{min g}	431.58	Standard dev. s _g	1.460	USL	464.31	n _{tot}	25	Range R _g	4.38	Tolerance T	44.22	n _{eff}	25	Bi = $ \bar{x}_g - x_m $	---	%RE	= 0.02%			T _{min} (%RE)	= 0.200	C _g = $\frac{0.2 \times T}{4 \times s_g}$	= 1.51			T _{min} (C _g)	= 38.95	C _{gk} = $\frac{0.1 \times T - \bar{x}_g - x_m }{2 \times s_g}$	= --- 916					Overall evaluation Measurement system capable (%RE,min,C _g)						Calculation method MAHLE MSA V1 (2021): Type 1					
Drawing Values		Collected Values		Statistics																																																																	
Standard actual x _m	---	Maximum value x _{max g}	435.96	Average $\bar{x}_g$	433.4324																																																																
LSL	420.09	Minimum value x _{min g}	431.58	Standard dev. s _g	1.460																																																																
USL	464.31	n _{tot}	25	Range R _g	4.38																																																																
Tolerance T	44.22	n _{eff}	25	Bi = $ \bar{x}_g - x_m $	---																																																																
%RE	= 0.02%			T _{min} (%RE)	= 0.200																																																																
C _g = $\frac{0.2 \times T}{4 \times s_g}$	= 1.51			T _{min} (C _g)	= 38.95																																																																
C _{gk} = $\frac{0.1 \times T - \bar{x}_g - x_m }{2 \times s_g}$	= --- 916																																																																				
Overall evaluation Measurement system capable (%RE,min,C _g)																																																																					
Calculation method MAHLE MSA V1 (2021): Type 1																																																																					

Confidentiality:

MAHLE: Full access
Customer: Requires approval of the quality manager

Software Q-DAS solara.MP
File name 11213526555_Fusion Motor_P70_Type 1.DFQ

Слика 6.5: Студија Тип 1 – индуктивност фазе АВ.

Извјештај настао на овај начин поред података о мјереној вриједности, доњој и горњој граници, генерише и податке кад је анализа рађена те податке о мотору за који је рађена те који оператер је радио анализу.

Извјештај садржи $\bar{x}$ контролну карту која прати однос средња вриједност/стандардна девијација, софтверско рјешење је такво да се подаци налазе на истом графикону, на десној страни су означене линије три стандардне девијације и централна линија, а постављене су према претходно наведеним математичким формулама. Анализом контролне карте видимо да нема критичних мјерења која би нам указивала на проблем.

У извјештају се налази табела с 25 података унесених у програм и наредни битни подаци:

- Средња вриједност мјерења: $\bar{x}_g=433,4324 \text{ mN}$
- Стандардна девијација поновљених мјерења: $s_g=1,460$
- Распон поновљених мјерења: $R_g=4,38$
- Толеранција: $T=44,22$
- Индекс способности мјерног система: $C_g=1,51$
- Проценат грешке поновљивости у односу на толеранцију: $Re=0,02\%$

Из података је видљиво да $C_g > 1,33$ што нам указује да је мјерни систем, кад је у питању ова величина, поновљив односно да је испуњен први услов за студију Тип 3, односно да је студија Тип 1 изведена и да показује да је мјерни систем поновљив.

Софтверски пакет нам није тражио податке о референтној вриједности тако да у извјештају немамо вриједност C_{gk} .

Исти поступак је поновљен и за анализу електричне отпорности фазе СА. Подаци приказани у табели 6.2 унесени су у софтверски пакет и обрађени на исти начин генерисали су извјештај приказан на слици 6.6.

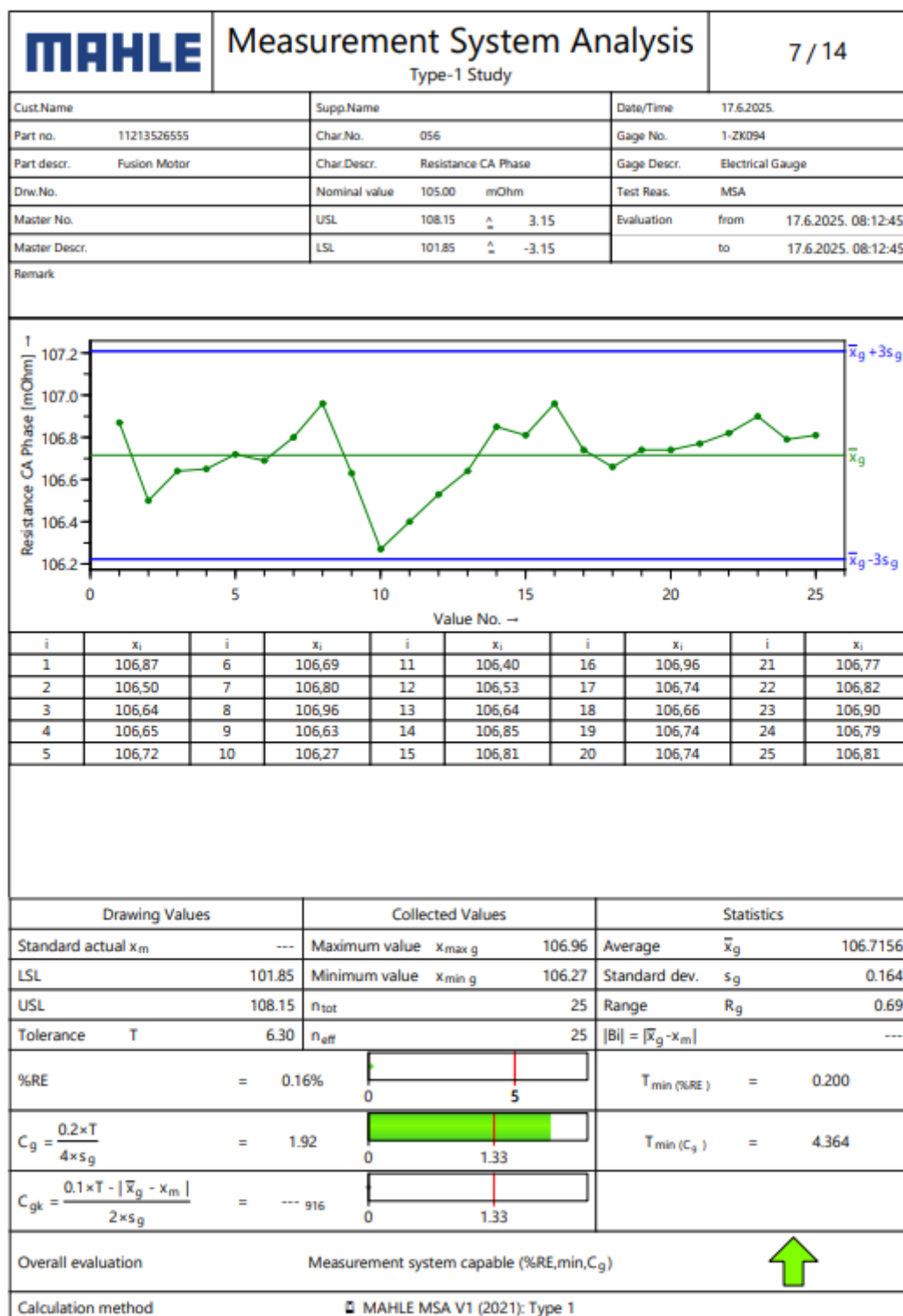
У извјештају за мјерења електричне отпорности на мјерном уређају имамо све податке као у претходном извјештају с тим да су добијене вриједности у овом случају:

- Средња вриједност мјерења: $\bar{x}_g=106,7156 \text{ m}\Omega$
- Стандардна девијација поновљених мјерења: $s_g=0,164$
- Распон поновљених мјерења: $R_g=0,69$
- Толеранција: $T=6,30$
- Индекс способности мјерног система: $C_g=1,92$
- Проценат грешке поновљивости у односу на толеранцију: $Re=0,16\%$

Специфично за извјештај је да на контролној карти можемо видјети шест узастопно растућих мјерења које према правилима указују на неправилност у процесу међутим ова ставка још није укључена у захтјеве купца ни у софтверски пакет тако да још није препозната као проблем и као таква не утиче на позитиван резултат анализе.

На овај начин с вриједностима C_g који су већи од прописаних 1,33 и вриједношћу Re која је испод 5% можемо закључити да су испуњени услови како би се студија Тип 1 прогласила позитивном.

Наредни корак је анализа студије Тип 3.



Confidentiality:

MAHLE: Full access
Customer: Requires approval of the quality manager

Software Q-DAS solara.MP
File name 11213526555_Fusion Motor_F70_Type 1.DFQ

Слика 6.6: Студија Тип 1 - електричне отпорности фазе СА.

6.2. Студија Тип 3

Након што су одрађене анализе студије Тип 1, провјерене све карактеристике мјерног система (установљено да није било никаквих промјена у односу на студију Тип 1) испуњени су услови за студију Тип 3.

Процес прикупљања података чини неколико корака. Прво је потребно изабрати 25 електромотора који ће бити измјерени на станици за контролу електричних карактеристика са понављањем мјерења два пута. Неопходно је извршити евиденцију резултата мјерења, а по потреби могуће је извршити поређење вриједности са подацима из електронске базе.

За потребе студије Тип 3, кад је у питању индуктивност фазе АВ, извршено је 50 мјерења 25 електромотора и подаци се налазе у табели 6.3.

Табела 6.3: Резултати мјерење индуктивности (μH) за потребе студије Тип 3.

n	x_{i1}	x_{i2}	n	x_{i1}	x_{i2}
1	444,26	446,43	14	438,96	441,96
2	447,03	446,46	15	442,26	443,52
3	438,72	439,65	16	439,15	439,73
4	442,45	443,66	17	448,60	448,79
5	439,86	439,07	18	438,29	439,10
6	448,53	448,76	19	441,30	441,97
7	434,60	434,01	20	445,49	446,22
8	444,56	445,11	21	429,47	430,85
9	448,96	447,43	22	448,47	449,82
10	437,18	438,24	23	446,58	445,98
11	442,96	443,91	24	439,12	439,97
12	433,48	437,96	25	441,86	441,86
13	438,94	437,96			

За потребе студије Тип 3, кад је у питању електрична отпорност фазе АВ, извршено је 50 мјерења 25 електромотора и подаци се налазе у табели 6.4.

Табела 6.4: Резултати мјерење индуктивности ($\text{m}\Omega$) за потребе студије Тип 3.

n	x_{i1}	x_{i2}	n	x_{i1}	x_{i2}
1	105,16	104,71	14	104,95	104,73
2	105,22	104,71	15	104,92	104,65
3	105,06	104,67	16	105,00	104,69
4	104,99	104,62	17	104,98	104,76
5	105,01	104,67	18	105,07	104,81
6	105,17	104,79	19	105,17	104,72
7	105,07	104,86	20	105,07	104,84
8	104,93	104,65	21	104,97	104,64
9	105,08	104,78	22	105,00	104,84
10	105,35	104,85	23	105,05	104,78
11	105	104,68	24	104,90	104,70
12	104,95	104,83	25	104,77	104,77
13	105,01	104,75			

Податке уносимо у софтверски пакет како је описано у студији Тип 1 само приликом избора студије бирамо у софтверском пакету *Mahle MSA V1 (2021): Type 3*. Податак о изабраној студији, која је раније верификована од стране купца налази се на сваком извјештају.

Након што су испуњени сви услови унесени су сви подаци у софтверски пакет, генерише извјештај студије Тип 3 као што је приказано на слици 6.7.

Извјештај се састоји од информација о производу, датуму анализе, оператеру који је вршио анализу и унос податке у софтвер. Поред тога извјештај посједује информације о производу за који је рађена анализа, његовом идентификацијском броју, величини која је предмет анализе затим, номиналној вриједности и толеранцијском пољу.

Форма извјештаја генерисана је на начин да су по колонама разврстане вриједности поновљених мјерења електричних величина на 25 различитих производа. Трећа колона резервисана је за средњу вриједност два мјерења и посљедња четврта за стандардну девијацију мјерења. Поред табеле са измјереним вриједностима у извјештају се налази и контролна карта у којој су унесене све добијене вриједности и *RF* карта.

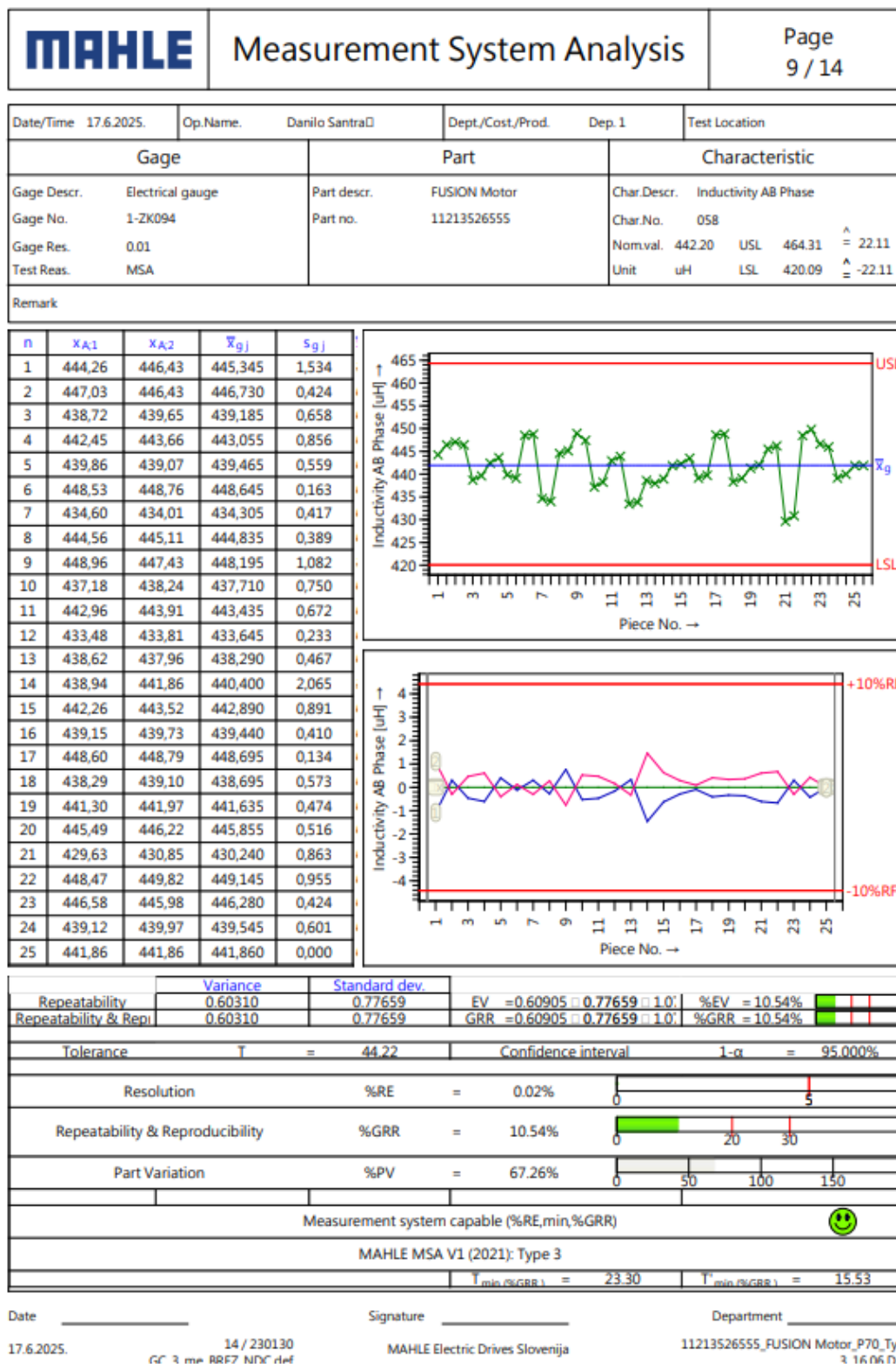
Даље су у извјештају дати подаци за *%RE*, *%EV*, *%GRR* на основу којих се даје оцјена да ли је студија Тип 3 прихваћена или не.

За анализу индуктивности фазе *AB* добијени су сљедећи подаци:

- *%RE* = 0,02 %
- *%GRR* = 10,54 %.

Добијени подаци указују нам да је студија Тип 3 за индуктивност фазе *AB* прихваћена на шта указује и зелени емотикон (смијешак) у доњем десном углу.

Након завршене анализе за индуктивност фазе *AB* може се приступити анализи електричне отпорности фазе *CA* прикупљајући податке и уносећи их на исти начин као и у првом случају.

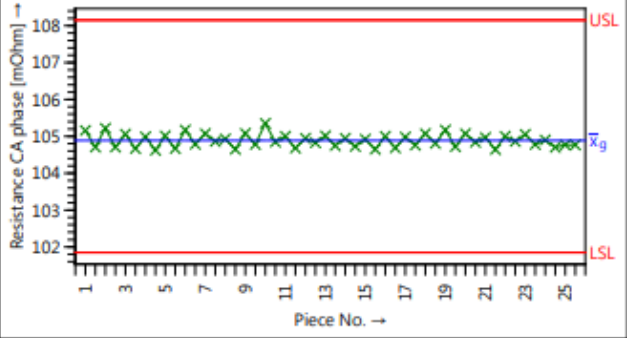
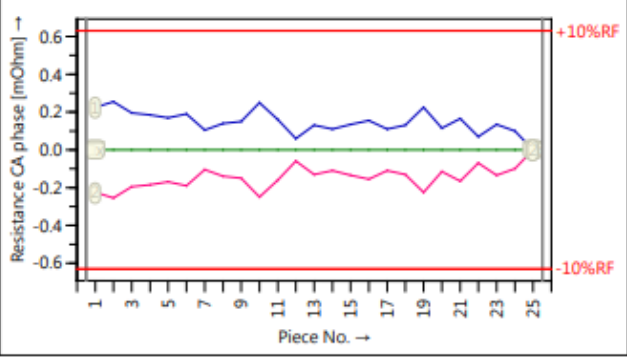


Слика 6.7: Студија Тип 3 – индуктивност фазе АВ.

Прикупљени подаци за студију Тип 3 електричне отпорности електричне отпорности фазе СА дати су на слици 6.8.

MAHLE		Measurement System Analysis		Page 7 / 14	
Date/Time	17.6.2025.	Op. Name.	Danilo Santra	Dept./Cost./Prod.	Dep. 1
Gage		Part		Characteristic	
Gage Descr.	Electrical gauge	Part descr.	FUSION Motor	Char. Descr. Resistance CA phase	
Gage No.	1-ZK094	Part no.	11213526555	Char. No.	056
Gage Res.	0.01			Norm. val.	105.00 USL 108.15 Δ = 3.15
Test Reas.	MSA			Unit	mOhm LSL 101.85 Δ = -3.15
Remark					

n	X _{A1}	X _{A2}	$\bar{X}_{gj}$	S _{gj}
1	105,16	104,71	104,935	0,318
2	105,22	104,71	104,965	0,361
3	105,06	104,67	104,865	0,276
4	104,99	104,62	104,805	0,262
5	105,01	104,67	104,840	0,240
6	105,17	104,79	104,980	0,269
7	105,07	104,86	104,965	0,148
8	104,93	104,65	104,790	0,198
9	105,08	104,78	104,930	0,212
10	105,35	104,85	105,100	0,354
11	105,00	104,68	104,840	0,226
12	104,95	104,83	104,890	0,085
13	105,01	104,75	104,880	0,184
14	104,95	104,73	104,840	0,156
15	104,92	104,65	104,785	0,191
16	105,00	104,69	104,845	0,219
17	104,98	104,76	104,870	0,156
18	105,07	104,81	104,940	0,184
19	105,17	104,72	104,945	0,318
20	105,07	104,84	104,955	0,163
21	104,97	104,64	104,805	0,233
22	105,00	104,86	104,930	0,099
23	105,05	104,78	104,915	0,191
24	104,90	104,70	104,800	0,141
25	104,77	104,77	104,770	0,000

Repeatability		Variance	0.049774	Standard dev.	0.22310	EV = 0.17497 / 0.22310 / 0.31	%EV = 21.25%	
Repeatability & Repi		0.049774		0.22310		GRR = 0.17497 / 0.22310 / 0.31	%GRR = 21.25%	
Tolerance		T	=	6.30	Confidence interval		1-α	= 95.000%
Resolution		%RE	=	0.16%				
Repeatability & Reproducibility		%GRR	=	21.25%				
Part Variation		%PV	=	0.00%				
Measurement system marginally capable (%RE,min,%GRR) 😊								
MAHLE MSA V1 (2021): Type 3								
					T _{min} (%GRR)	=	6.693	T _{min} (%GRR)
					T _{min} (%GRR)	=	4.462	

Date	Signature	Department
17.6.2025.	MAHLE Electric Drives Slovenija	11213526555_FUSION Motor_P70_Type

Слика 6.8: Студија Тип 3 – електрична отпорност фазе СА.

Извјештај студије Тип 3 за случај електричне отпорности има исте облик као и код индуктивности с разликом у добијеним подацима. За анализу индуктивности фазе АВ добијени су следећи подаци:

- $\%RE = 0,16 \%$
- $\%GRR = 21,25 \%$

Овај примјер нам даје случај када је анализа условно прихватљива односно $\%GRR$ се налази између 20-30 % што нас упућује да је потребно реаговати. У конкретном случају купац је прихватио анализу, међутим како би заштитили свој процес и избјегли могућност угрожавања купца добијени подаци у овом случају су аларм за реаговање.

Уопштено, мјерни процеси морају бити способни када се мониторинг или мјерење користе за потврду усаглашености производа са прописаним захтјевима. Уколико се покаже да је мјерни систем или процес условно прихваћен или неприхваћен, неопходно је спровести детаљну анализу узрока и предузети одговарајуће корективне мјере како би се процес побољшао и довео на потребан ниво способности.

6.3. Реакциони план у случају неуспјешне *MSA* анализе

Планови реакције се обично разликују од компаније до компаније али имају исту суштину и постоје два типа плана реакције:

- план реакције када мјерни систем добије оцјену неприхватљив,
- план реакције када је мјерни систем добио оцјену условно прихватљив.

Уколико мјерни систем или процес буде оцијењен као неприхватљив, неопходно је одмах спровести реакциони план како би се утврдили ризици и предузеле корективне мјере. Први корак обухвата процјену утицаја неисправног мјерног система, што подразумијева анализу валидности претходних резултата мјерења и утврђивање могућих посљедица по производ. У случају да постоји могућност да је неодговарајући материјал или производ испоручен купцу, купац мора бити благовремено обавијештен. Након тога приступа се побољшању мјерног система или процеса, што укључује смањење утицаја фактора који ремете процес мјерења, као што су опрема, испитни узорци, оператер или услови околине. По спроведеним побољшањима, *MSA* студија се мора поновити. Уколико побољшање постојећег система није могуће, потребно је развити или набавити нови мјерни систем са нижом несигурношћу мјерења. Ако ни једна од ових опција није изводљива, морају се предузети мјере за спрјечавање производње или испоруке неусаглашених дијелова, што може укључивати смањење инспекцијске толеранције за износ неизвјесности мјерења (уз очекиван раст отпада), проширење толеранције уз одобрење купца, лабораторијска упоредна мјерења на поузданијем систему, вишеструка мјерења са провјеравањем резултата или контролу алтернативних корелирајућих карактеристика. Коначно, пуштање у употребу мјерног система који није прихваћен могуће је искључиво уз формално одобрење купца.

Уколико је мјерни систем или процес оцијењен као условно прихватљив, неопходно је спровести одговарајуће корективне активности како би се мјерна способност довела на потребан ниво. Први корак обухвата побољшање самог мјерног система или процеса, што подразумијева смањење утицаја фактора који могу реметити стабилност и поузданост мјерења, као што су мјерна опрема, испитни узорци, оператер или услови околине. Након спроведених побољшања, *MSA* студија се мора поновити како би се потврдио напредак. Уколико побољшање постојећег система није могуће или не даје задовољавајуће резултате, потребно је размотрити употребу мјерних система са нижом несигурношћу мјерења, што може укључивати развој или набавку нове опреме. Ако ни једна од ових опција није примјењива, морају се предузети мјере за спрјечавање производње или испоруке неусаглашених дијелова, што може обухватати процјену ризика (нпр. *P-FMEA*), анализу процесне способности, рекалибрацију мјерног система

прије сваког мјерења или скраћивање интервала тестирања у студији стабилности. Коначно, пуштање у употребу условно прихватљивог мјерног система или процеса мора бити формално одобрено од стране представника погона, уколико не постоје специфични захтјеви купца који регулишу ову област [16].

7. SPC АНАЛИЗА ЕЛЕКТРИЧНИХ КАРАКТЕРИСТИКА EPS МОТОРА

Поштујући стратегију израде SPC анализе израђена на основу захтјева купаца и одговарајућих стандарда, за анализу су изабране електричне карактеристике мотора²¹.

За потребе анализе преузета су мјерења 25 првих комада који су произведени у пет дана седмице (у првој смјени) што нам даје 125 мјерења по свакој електричној карактеристици.

За потребе анализе индуктивности прикупљена мјерења налазе се у табели 7.1 односно у табели 7.2 мјерења електричне отпорности фазе AC.

Табела 7.1: Резултати мјерења индуктивности фазе AB (μH).

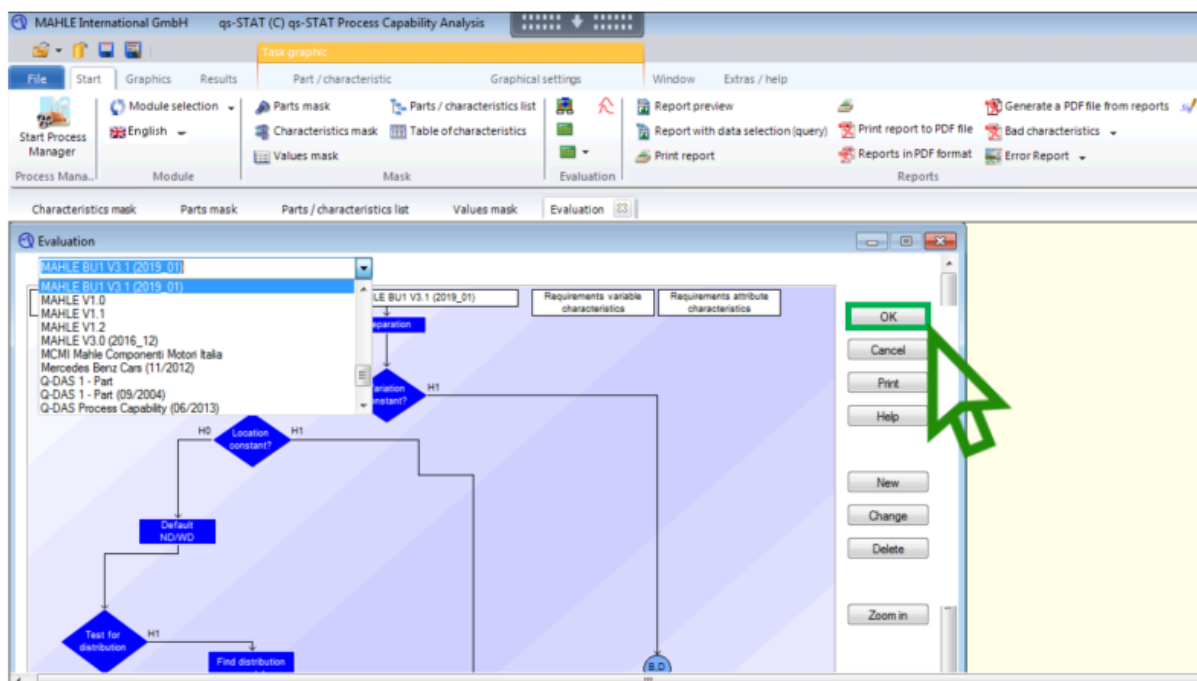
n	xi	n	xi	n	xi	n	xi	n	xi
1	452,03	26	438,69	51	454,95	76	445,64	101	448,47
2	449,32	27	441,26	52	446,17	77	447,18	102	451,98
3	444,35	28	443,46	53	439,21	78	446,3	103	445,8
4	444,27	29	443,48	54	445,21	79	451,2	104	447,56
5	446,71	30	440,06	55	442,3	80	452,02	105	441,24
6	440	31	443,8	56	439,4	81	446,63	106	444,46
7	446,76	32	448,11	57	444,34	82	440,1	107	441,51
8	448,95	33	444,62	58	444,12	83	439,6	108	448,57
9	447,56	34	440,33	59	444,69	84	439,69	109	447,79
10	445,4	35	442,58	60	442,59	85	441	110	449,98
11	434,58	36	433,74	61	436,16	86	434,06	111	431,18
12	447,37	37	445,09	62	431,55	87	430,51	112	431,14
13	432,15	38	433,57	63	431,35	88	433,08	113	436,58
14	429,94	39	447,64	64	428,16	89	448,63	114	445,63
15	431,79	40	433,61	65	441,33	90	447,89	115	445,37
16	429,48	41	443,29	66	441,23	91	430,22	116	434,82
17	434,63	42	430,68	67	434,47	92	433,51	117	434,13
18	441,37	43	435,12	68	432,45	93	434,25	118	432,03
19	431,84	44	432,3	69	431,58	94	430,64	119	437,13
20	443,21	45	439,93	70	430,21	95	434,84	120	434,25
21	432,86	46	445,81	71	450,98	96	444,12	121	435,45
22	443,73	47	441,81	72	443,28	97	445,88	122	440,8
23	450,89	48	434,62	73	441,8	98	450,62	123	439,94
24	439,01	49	446,64	74	443,31	99	440,9	124	435,86
25	436,47	50	442,27	75	441	100	448,97	125	436,81

²¹ SPC анализа се према стандарду и захтјевима купаца ради за сваку електричну карактеристику означену на техничком цртежу, што представља укупно 14 електричних величина. За примјер су изабране двије електричне величине Индуктивност фазе AB и електрична отпорност фазе AC.

Табела 7.2: Резултати мјерења електричне отпорности фазе AC (mΩ).

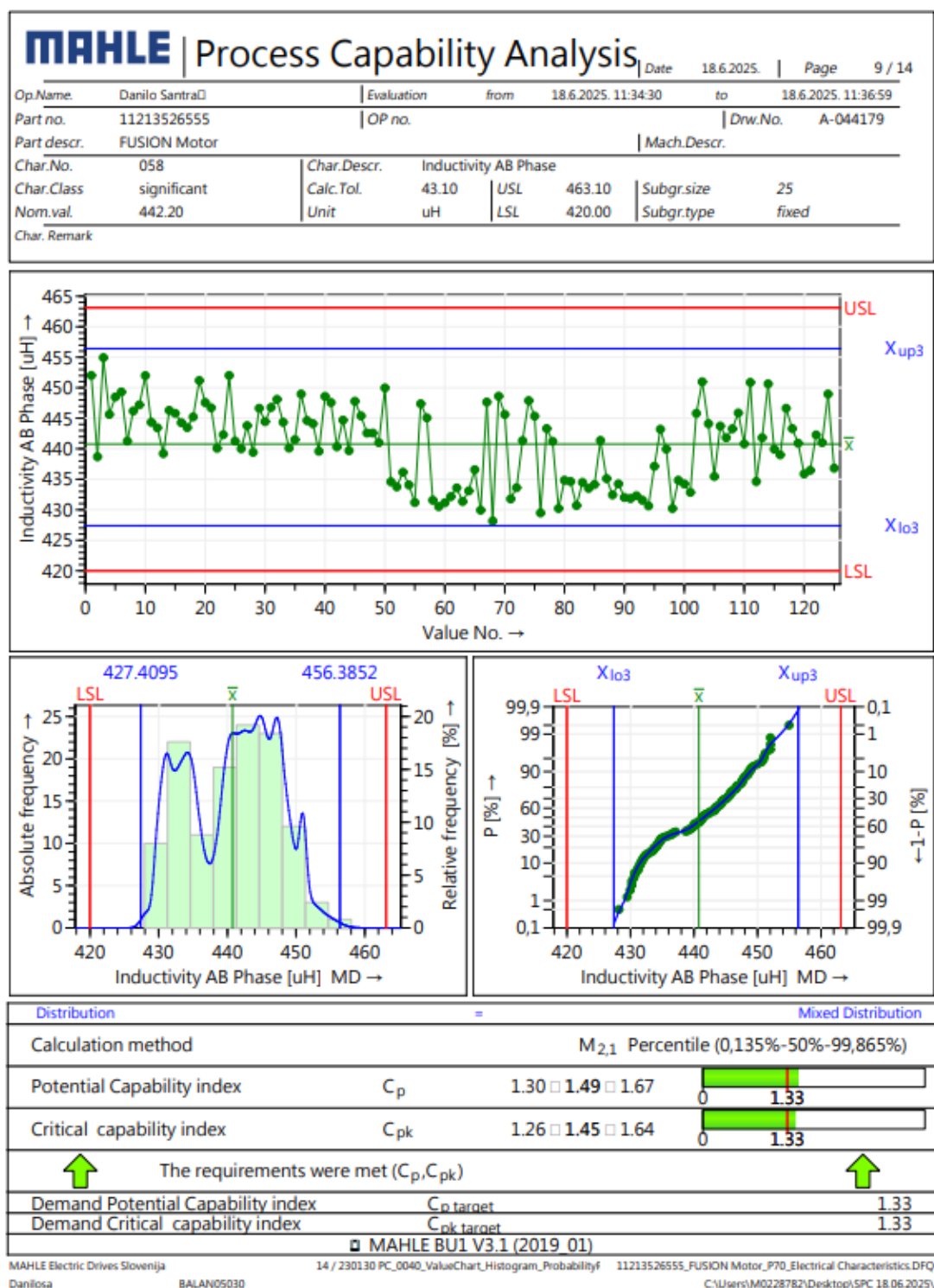
n	x_i	n	x_i	n	x_i	n	x_i	n	x_i
1	104,89	26	104,9	51	104,85	76	104,89	101	104,84
2	104,89	27	104,83	52	104,77	77	104,86	102	104,81
3	104,81	28	104,85	53	104,83	78	104,91	103	104,81
4	104,87	29	104,78	54	104,88	79	104,85	104	104,89
5	104,82	30	104,76	55	104,83	80	104,77	105	104,92
6	104,96	31	104,76	56	104,83	81	104,8	106	104,77
7	104,86	32	104,82	57	104,86	82	104,84	107	104,99
8	104,81	33	104,78	58	104,82	83	104,74	108	104,73
9	104,8	34	104,77	59	104,92	84	104,72	109	104,82
10	104,81	35	104,74	60	104,93	85	104,85	110	104,73
11	104,66	36	104,64	61	104,68	86	104,66	111	104,85
12	104,77	37	104,83	62	104,86	87	104,81	112	104,85
13	104,82	38	104,68	63	104,67	88	104,74	113	104,77
14	104,67	39	104,76	64	104,65	89	104,77	114	104,74
15	104,73	40	104,75	65	104,67	90	104,69	115	104,68
16	104,6	41	104,56	66	104,58	91	104,61	116	104,52
17	104,54	42	104,72	67	104,76	92	104,82	117	104,7
18	104,66	43	104,66	68	104,59	93	104,7	118	104,6
19	104,6	44	104,68	69	104,77	94	104,7	119	104,68
20	104,75	45	104,78	70	104,62	95	104,77	120	104,71
21	104,71	46	104,62	71	104,65	96	104,66	121	104,65
22	104,61	47	104,66	72	104,66	97	104,6	122	104,64
23	104,63	48	104,66	73	104,77	98	104,7	123	104,67
24	104,68	49	104,66	74	104,69	99	104,61	124	104,57
25	104,62	50	104,56	75	104,67	100	104,64	125	104,73

Након прикупљања података исте је потребно унијети у софтверски пакет на исти начин као и код *MSA* анализе с тим да у овом случају бирамо други тип анализе *Mahle BU1 V3 (2019_01)* као што је приказано на слици 7.1.



Слика 7.1: Избор анализе у софтверском пакету.

Након обраде података софтверски пакет даје нам извјештај анализа у облику који је приказан на Сlici 7.2 и који се односи на индуктивност фазе *AB*.



Слика 7.2: Анализа SPC за индуктивност фазе АВ.

Извјештај се састоји од контролне карте, на једној контролној карти обједињени су подаци мјерења, централна линија затим линије које представљају $\pm$ стандардне девијације и горња и доња граница толеранцијског поља. На извјештају се налази и хистограм (125 мјерења распоређено је у 5 подгрупа по 25 мјерења) затим *Probability Plot* који служи за процјену да ли подаци прате нормалну расподелу. Уколико подаци прате

нормалну распоdjелу тачке ће бити распоређене близу плаве линије, у случају да подаци одступају од нормалне распоdjеле односно од плаве линије то указује да се одступа од нормалне распоdjеле односно имамо утицај на тачност анализе. Референтна плава линија представља идеалну линију нормалне распоdjеле.

На извјештају се налазе информације који је метод кориштен у којем периоду те измјерене вриједности и границе за C_p и C_{pk} . Поред тога постоји и индикација у виду зелене стрелице која одговара коначној оцјени да ли је анализа показала стабилност или нестабилност процеса.

На основу контролне карте можемо закључити да су сва мјерења у А пољу односно да нема мјерења изван три стандардне девијације а самим тим ни изван толеранцијског поља, што указује да не постоје системске грешке или неочекиване варијације.

Хистограм нам показује двије доминантне групе вриједности (хистограм типа двоструког врха) овај податак указује нам на двије могуће популације унутар узорка што може бити резултат различитих серија. Већина вриједности се налази унутар прописаних граница толеранције без екстремних одступања. Дистрибуција није савршено симетрична, постоји блага асиметрија али она нема велики утицај на укупно способност процеса.

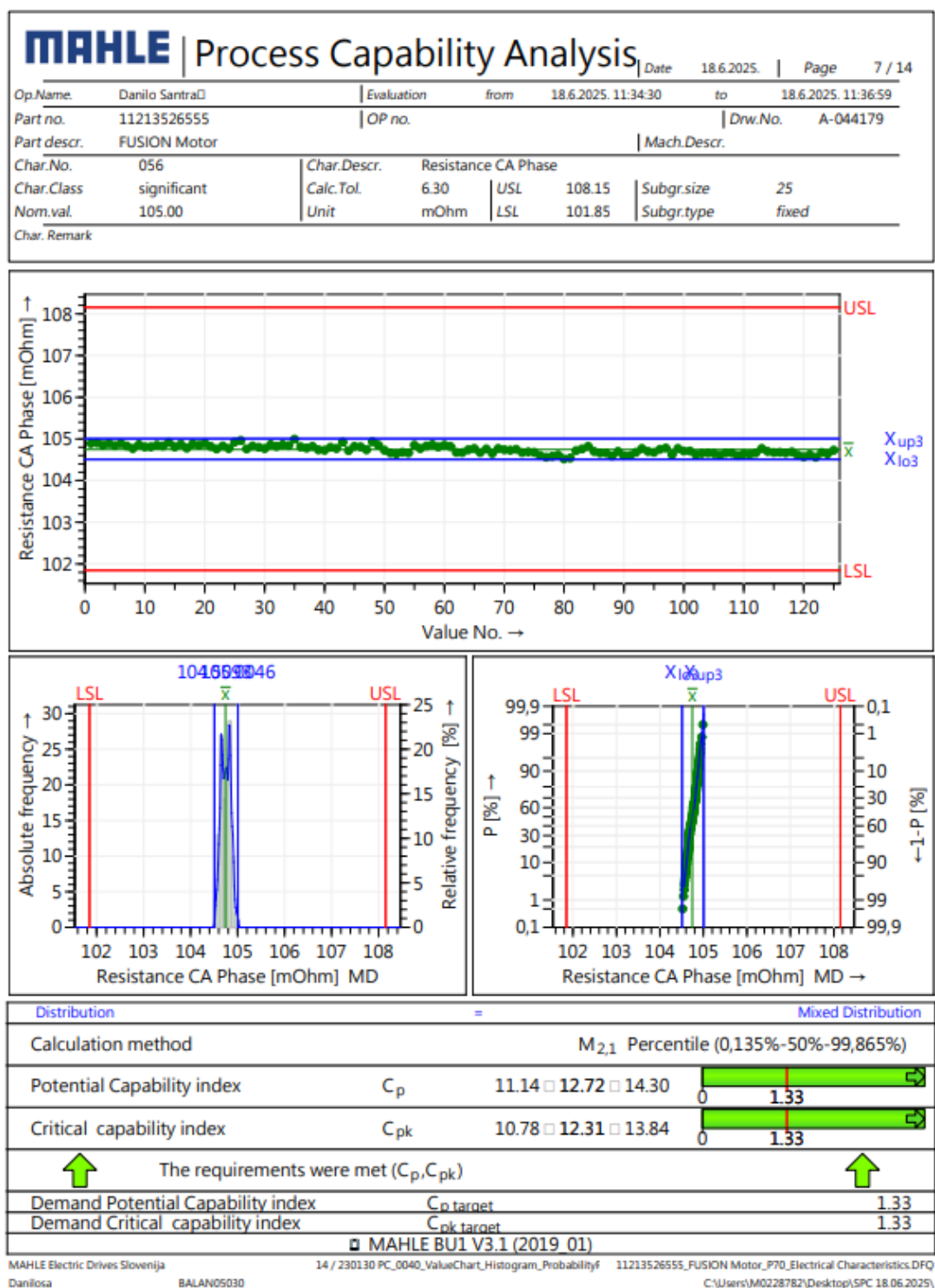
Probability Plot показује да је процес стабилан са високом вјероватноћом да се произведени мотори налазе унутар спецификација.

На основу математичког апарата добијене су и вриједности :

- $C_p = 1,49$
- $C_{pk} = 1,45$.

Добијени резултати у извјештају указују нам да су испуњени услови , да је процес у контроли и способан да испуни техничке захтјеве. *SPC* анализа је добро изведена, индекси су изнад циљаних, а графички прикази потврђују контролисано понашање процеса.

На исти начин уносом података прикупљених истим начином узорковања: 25 мјерења на почетку прве смјене у трајању од 5 дана, у софтверски пакет добијамо *SPC* анализу електричне отпорности фазе АС која је приказана на Слици 7.3.



Слика 7.3: SPC анализа електричне отпорности фазе CA.

Контролна карта указује да се сва мјерења налазе у пољу A односно у интервалу $\pm 3\sigma$. Нема постоје вриједности мјерења изван три стандардне девијације а самим тим ни изван толеранцијског поља, из чега се види да не постоје системске грешке или неочекиване варијације.

Хистограм указује да се мјерења налазе око средње вриједности али поново имамо хистограм с два врха који указује да је могуће да су кориштени подаци двије различите серије. Расподјела је близу нормалне али благо асиметрична што може указивати на различите услове мјерења или производње. С аспекта хистограма расподјела је прихватљива али би било пожељно истражити услове асиметрије.

Probability Plot указује да је расподјела података у близини референтне плаве линије тако да немамо велика одступања од нормалне расподјеле.

На основу математичког апарата добијене су и вриједности :

- $C_p = 12,72$
- $C_{pk} = 12,31$.

Добијени резултати у извјештају указују нам да су испуњени услови и да је процес способан што се на извјештају симболише зеленом стрелицом у доњем десном углу. *SPC* анализа је добро изведена, индекси су изнад циљаних, а графички прикази потврђују контролисано понашање процеса.

На овај начин показали смо да имамо стабилан процес.

7.1. Реакциони план у случају неуспјешне *SPC* анализе

Уколико статистичка контрола процеса (*SPC*) покаже да процес није стабилан или способан, неопходно је одмах активирати дефинисани план реакције како би се спријечила производња и испорука неусаглашених дијелова. Реакциони план представља скуп корака који се примјењују у тренутку када контролне карте, индекси процесне способности или други *SPC* индикатори сигнализирају одступање од контролисаног стања. Циљ овог плана је брза идентификација узрока нестабилности, предузимање корективних мјера и повратак процеса у статистички контролисано стање, уз истовремено осигурање да се ризик по купца сведе на минимум.

Уколико анализа процесне способност покаже да процес није способан, односно да је C_{pk} мањи од прописаног захтјева, неопходно је одмах активирати дефинисане мјере како би се спријечила производња и испорука неусаглашених дијелова. У таквим ситуацијама први корак је увођење 100 % инспекције умјесто узорковања, како би се обезбиједила пуна контрола сваког произведеног комада. Паралелно с тим, мора се изградити и спровести акциони план за побољшање процеса, усмјерен на отклањање узрока ниске процесне способност. Након дефинисања корективних мјера, потребно је ажурирати контролни план како би одражавао нове активности и ниво ризика. У случају да 100 % контрола није технолошки изводљива или економски одржива, неопходно је прибавити формално одобрење купца прије наставка производње.

У ситуацији када *SPC* анализа покаже да процес није стабилан, односно када се појаве вриједности изван контролних граница или јасни трендови раста или пада, неопходно је одмах предузети корективне активности како би се процес вратио у контролисано стање. Први корак је подешавање процеса ка циљној, односно номиналној вриједности, након чега се мора извршити провјера првог комада како би се потврдило да је подешавање дало очекивани резултат. Све предузете радње морају бити документоване директно на *SPC* карти, како би се осигурало потпуно праћење и омогућило праћење понашања процеса у времену. Уколико се одступања изван контролних граница понове, то представља јасан сигнал да је потребно повећати учесталост узорковања, као и да је неопходно поново провјерити процесну способност (C_{pk}) како би се утврдило да ли процес и даље испуњава захтјеве [12].

8. ЗАКЉУЧАК

Управљање квалитетом у савременим производним системима представља сложен и вишеслојан процес који обухвата контролу варијација, поузданост мјерних система и континуирано унапрјеђење свих активности унутар организације. Истраживање представљено у овом раду показује да се стабилан и способан процес не може посматрати изоловано од квалитета мјерења, нити се мјерни систем може сматрати адекватним уколико не подржава статистичку контролу процеса. Управо интеграција *MSA* и *SPC* метода представља темељ савременог приступа квалитету, посебно у индустријама са високим захтјевима за поузданост и безбједност, као што је аутомобилска индустрија.

Теоријски дио рада показао је да је концепт квалитета кроз историју пролазио кроз бројне трансформације, али да је суштина остала непромијењена: квалитет је способност производа или процеса да досљедно испуњава захтјеве купца. Савремене парадигме квалитета, као што су Квалитет 4.0 и Квалитет 5.0, додатно наглашавају значај дигитализације, прикупљања података и аналитике у управљању варијацијама и доношењу одлука. У том контексту, *SPC* и *MSA* представљају кључне алате који омогућавају да се процеси разумију, контролишу и унапрјеђују на основу објективних података.

Практични дио рада, који се односи на производњу *EPS* мотора, показао је да је квалитет електричних карактеристика директно условљен стабилношћу процеса и поузданошћу мјерног уређаја. Спроведене анализе електричних карактеристика *EPS* мотора показала је да статистичка контрола процеса омогућава рано откривање варијација, идентификацију узрока нестабилности и процјену способности процеса у односу на спецификације. Контролне карте, индекси способности процеса и анализа хистограма пружили су јасну слику о понашању процеса у реалним условима производње. У случају одступања, дефинисани реакциони планови омогућавају брзу интервенцију, чиме се минимизира ризик од производње неусаглашених дијелова и смањују трошкови неусаглашености.

Синтеза резултата *MSA* и *SPC* анализа показује да се квалитет не може посматрати као крајњи исход, већ као континуирани процес који захтијева системски приступ, дисциплину и досљедност. Само стабилан процес и поуздан мјерни систем могу обезбиједити да производ испуни све техничке и безбједносне захтјеве. У случају *EPS* мотора, то је од посебног значаја јер се ради о компонентама које директно утичу на управљивост и безбједност возила.

На основу свега наведеног може се закључити да интегрисана примјена *MSA* и *SPC* метода представља неопходан предуслов за успостављање ефикасног система управљања квалитетом. Рад показује да комбинација статистичких метода, техничког знања и практичне примјене омогућава дубље разумијевање процеса, смањење варијација и повећање поузданости производа. У будућности, са даљим развојем дигиталних технологија, очекује се да ће *SPC* и *MSA* постати још интегрисанији, а процеси контроле квалитета све више аутоматизовани, што ће додатно унаприједити прецизност, брзину и ефикасност производних система.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shewhart, W.A. Economic Control of Quality of Manufactured Product, D. Van Nostrand Company, Inc. Toronto, New York, London, 1930.
- [2] Janjic Goran, Tanasic Zorana, Sokovic Mirko, Upravljanje Kvalitetom, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, 2021.
- [3] Statistical Process Control, John S. Oakland, Butterworth Heinemann, Oakland, Fifth Edition 2003.
- [4] Dijana M. Tadić - Faze razvoja kvaliteta – zaključno sa konceptom Kvaliteta 5.0, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, Pregledni rad, 2022.
- [5] Sabahudin Jašarević, Suvad Isaković, Almira Softić, Upravljanje kvalitetom: principi i filozofije najutjecajnijih gurua kvaliteta, Politehnički fakultet Zenica, Zenica, 2020.
- [6] Tereza Smajdorova, Journey to Quality 6.0: Evolution of quality management across industrial revolutions, Trends in Computer Science and Information Technology, 2024.
- [7] Angel Swastik Duggal, Preveen Kumar Malik, Anita Geholt, Rejesh Singh, Gurjot Singh Gaba, Mehedi Masud, Jehad F. Al-Amri, A sequential roadmap to Industry 6.0: Exploring future manufacturing trends, IET Communications, The Institution of Engineering and Technology, Wiley, 2021.
- [8] Ashish Saroha, Comprehensive Analysis of SPC, Process Capability Analysis, and FMEA, Journal of Advanced Research in Quality Control and Management, Volume 8, Print Issue 1 -2023.
- [9] Er. Harpreet Singh Oberoi, Mamta Parmar, Harpreet Kaur, Rahul Mehra, SPC (Statistical Process Control): A Quality Control Technique for Confirmation to Ability of process, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 03, Issue:06 , 2016.
- [10] Statistical Process Control (SPC) Reference Manual, Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Corporation, and General Motors Corporation, Automotive Industry Action Group, Michigan, 2005.
- [11] Statistical Process Control SPC including reliability testing, Methodological Expertise at Mahle, Mahle Internacional GmBh, CQC, Stuttgart, 2011.
- [12] Patryk Michalowski, Quality Management Engine System and Components, BU1 Inspection Strategy – Handling CC/SC in Production Training, Mahle GmbH, 2024.
- [13] Lloyd S. Nelson, The Shewhart Control Chart – Tests for Special Causes, Journal of Quality Technology, 16:4, 237-239, 1984.
- [14] Branko Štrbac, Miodrag Hadžistević, Metode planiranja i obrade eksperimenata, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2023.
- [15] Stevo Borojević, Vid Jovišević, Standardizacija i industrijska legislative, Mašinski fakultet Banja Luka, Univerzitet u Banjoj Luci, 2024.
- [16] Measurment System Analysis, Standard Operating Procedure, Mahle Group, 2024.

Изјава 1

Изјава о ауторству

Изјављујем да је мастер рад

Приказ студије случаја контроле квалитета у производњи примјеном *MSA* и *SPC*

(Title: Case study presentation of production process quality control using MSA and SPC)

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да мастер рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци, 10.03.2026.

Потпис кандидата

Изјава 2

Изјава којом се овлашћује Машински факултет Универзитета у Бањој Луци да мастер рад учини јавно доступним

Овлашћујем Машински факултет Универзитета у Бањој Луци да мој мастер рад под називом:

Приказ студије случаја контроле квалитета у производњи примјеном MSA И SPC, који је моје ауторско дјело учини јавно доступним.

Мастер рад са свим прилозима предао сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Мој мастер рад, похрањен у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце

Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - дијелити под истим условима

У Бањој Луци, 10.03.2026.

Потпис кандидата

Изјава 3

Изјава о идентичности штампане и електронске верзије
мастер рада:

Ведран Мишић,

Приказ студије случаја контроле квалитета у производњи примјеном *MSA* и *SPC*
Др Горан Јотић, доцент

Изјављујем да је штампана верзија мог мастер рада идентична електронској
верзији коју сам предао за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци , 10.03.2026.

Потпис кандидата