VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

ZABEZPEČOVANÍ KVALITY ULTRAZVUKOVÝCH NÁSTROJŮ

QUALITY ASSURANCE OF ULTRASONIC INSTRUMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Ivana Macková**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Karla Maradová**

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	**Bc. Ivana Macková**
Studijní program:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	**Ing. Karla Maradová**
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zabezpečovaní kvality ultrazvukových nástrojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provedení rešerše ultrazvukových nástrojů a navrhnout systém pro efektivní zabezpečení kvality ve výrobě. Výsledky zhodnotit formou vlastních závěrů a/nebo doporučení.

Cíle diplomové práce:

Rozbor a popis současného stavu používaných ultrazvukových nástrojů.
Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.
Statistické zpracování a vyhodnocení výsledků u vybraného procesu.
Návrh a aplikace zvoleného přístupu řešení k zabezpečení kvality.
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

Komentované vydání normy ČSN EN ISO 9001:2016: systémy managementu kvality - Požadavky. Praha: Česká společnost pro jakost, 2016. ISBN 978-80-02-02642-6.

Norma pro systém managementu kvality v automobilovém průmyslu IATF 16949:2016: požadavky na systém managementu kvality v organizacích zajišťujících sériovou výrobu a výrobu příslušných náhradních dílů v automobilovém průmyslu = Automotive quality management system standard IATF 16949:2016 : quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. Přeložil Ivana PETRAŠOVÁ. Praha: Česká společnost pro jakost, 2016. ISBN 978-80-02-02699-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá zabezpečovaním kvality ultrazvukových nástrojov. V práci sú uvedené ultrazvukové technológie, druhy v súčasnosti používaných ultrazvukových nástrojov a požiadavky kladené na ich kvalitu. V práci je riešená problematika časovo náročnej kontroly kvality ultrazvukových nástrojov. Riešenie danej problematiky spočíva vo využití štatistickej regulácie procesu a aplikácii štatistickej prebierky. Podľa preberacieho plánu je určené preberacie číslo a rozsah výberu, ktorý má byť kontrolovaný pri výstupnej kontrole. Znížením počtu kontrolovaných kusov sa dosiahnu časové a finančné úspory.

ABSTRACT

The master's thesis deals with quality assurance of ultrasonic instruments. The thesis presents the ultrasonic technologies, the types of ultrasonic tools used nowadays and the requirements for their quality. The thesis addresses the issue of time-consuming quality control of ultrasonic instruments. The solution of the given problem consists in the use of statistical process control and application of acceptance sampling. According to the sampling plan, the acceptance number and the sample size to be checked during the output inspection is determined. By reducing the number of pieces to be inspected, time and financial savings are achieved.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

ultrazvukové nástroje, spôsobilosť, štatistická regulácia procesu, Shewhartove regulačné diagramy, štatistická prebierka

KEYWORDS

ultrasonic instruments, capability, statistical process control, Shewhart control charts, acceptance sampling

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MACKOVÁ, Ivana. *Zabezpečovaní kvality ultrazvukových nástrojů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139850. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Karla Maradová.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcej mojej diplomovej práce pani Ing. Karle Maradovej za odborné vedenie, ochotu, trpezlivosť a cenné rady, ktoré mi poskytla pri vypracovávaní práce.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Karly Maradovej a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 19.5.2022 ……

Macková Ivana

OBSAH

1 ÚVOD 15

2 ULTRAZVUKOVÉ TECHNOLÓGIE 17
2.1 Ultrazvukové zváranie 17
2.1.1 Zvárané materiály 17
2.2 Ultrazvukové rezanie 18
2.3 Ultrazvukové zatláčanie 18
2.4 Zostava pre ultrazvukové technológie 19

3 ULTRAZVUKOVÉ NÁSTROJE 23
3.1 Materiál ultrazvukových nástrojov 23
3.2 Druhy ultrazvukových nástrojov 24
3.2.1 Valcové sonotródy 24
3.2.2 Sonotródy s drážkami 25
3.2.3 Kompozitné sonotródy 26
3.2.4 Sonotródy na rezanie a zatláčanie 27
3.2.5 Špeciálne ultrazvukové nástroje 28
3.3 Požiadavky kladené na ultrazvukové nástroje 28
3.3.1 Frekvencia a priebeh vibrácii 30
3.3.2 Výkon bez záťaže 30
3.3.3 Amplitúda a jej rozmiestnenie 30
3.3.4 Napätie v materiáli 31
3.3.5 Geometria a kvalita pracovného povrchu 31
3.3.6 Regulácia teploty 32
3.4 Kontrola kvality ultrazvukových nástrojov 32
3.4.1 Analyzátor ultrazvukových nástrojov 32
3.4.2 Bezkontaktný merač frekvencie 34
3.4.3 Meranie amplitúdy 34

4 ŠTATISTICKÉ RIADENIE KVALITY 35
4.1 Variabilita procesu 36
4.2 Popisná štatistika 36
4.3 Shewhartove regulačné diagramy 37
4.3.1 Typy Shewhartových regulačných diagramov 38
4.4 Shewhartove regulačné diagramy pre reguláciu meraním 39
4.4.1 Stanovenie regulačných medzí a centrálnej priamky 40
4.4.2 Regulačný diagram pre individuálne hodnoty a kĺzavé rozpätia 41
4.5 Analýza spôsobilosti 41
4.5.1 Spôsobilosť procesu 41
4.5.2 Spôsobilosť systému merania 43
4.6 Štatistická prebierka porovnávaním 44
4.6.1 Preberacie plány jedným výberom pre normálnu kontrolu 45
4.6.2 Operatívna charakteristika 47

5 SYSTÉMOVÝ ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A NÁVRH RIEŠENIA 49
5.1 Definovať 49
5.2 Merať 51
5.3 Analyzovať 53

5.4 Zlepšovať 54
5.5 Riadiť 54
6 APLIKÁCIA VYBRANÝCH ŠTATISTICKÝCH METÓD 55
6.1 Analýza spôsobilosti meracieho systému 55
6.2 Aplikácia SPC 56
6.2.1 Namerané hodnoty 56
6.2.2 Popisná štatistika nameraných dát 58
6.2.3 Test normality nameraných dát 58
6.2.4 Regulačné diagramy 59
6.2.5 Hodnotenie spôsobilosti procesu 64
6.3 Aplikácia štatistickej prebierky 65
6.3.1 Návrh systému zabezpečovania kvality 65
6.4 Teoretický ekonomický a časový prínos 66
6.5 Vlastné závery a odporúčanie pre prax 67
7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA 69
8 ZÁVER 71
9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV 72
10 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK 75
10.1 Zoznam skratiek 75
10.2 Zoznam značiek 75
10.3 Zoznam tabuliek 76
10.4 Zoznam obrázkov 76

1 ÚVOD

Rozšírením výroby plastových dielov využívaných v rôznych odvetviach sa zvyšujú nároky na ich efektívnu a ekonomickú výrobu. Rozsiahlou technológiou na spájanie plastových dielov je ultrazvukové zváranie. Táto technológia našla uplatnenie najmä v automobilovom priemysle a balení výrobkov do plastových fólii. Skúmaním vlastností ultrazvuku sa začala využívať aj technológia ultrazvukového rezania. Najviac sa využíva v potravinárskom a gumárenskom priemysle. Aplikácia týchto technológii často vyžaduje na mieru vyrobený ultrazvukový nástroj – sonotródu. Na niektoré aplikácie postačujú bežne vyrábané dizajny sonotród, ktoré nájdu uplatnenie vo viacerých aplikáciách. Výhodou ultrazvukových technológií je ich čistota a hygienické podmienky vhodné aj na použitie v potravinárskom priemysle. Používanie technológie ultrazvukového zvárania plastových dielov je využívané najmä v automobilovom priemysle. V teoretickej časti práce sú popísané technológie ultrazvukového zvárania, rezania, zatláčania a ultrazvuková zostava so zameraním na ultrazvukové nástroje a ich druhy.

Dôležitou časťou zostavy na aplikáciu ultrazvukových technológii je ultrazvukový nástroj. Väčšina aplikácií ultrazvukového zvárania vyžaduje vývoj nového tvaru sonotródy, ktorý kopíruje tvar zváraných dielov. Spomedzi požiadaviek kladených na ultrazvukové nástroje je ich najdôležitejším parametrom pracovná frekvencia. Práve na tento parameter je zameraná praktická časť práce. Zameriava sa na aplikáciu štatistických metód a štatistické riadenie procesu výroby ultrazvukových nástrojov z hľadiska ich pracovnej frekvencie. Hodnota tohto parametru je závislá na viacerých faktoroch a súvisí s ďalšími parametrami ultrazvukových nástrojov. Preto je vývoj a výroba ultrazvukového nástroja spĺňajúceho špecifikované požiadavky veľmi komplikovaná.

S narastajúcim využitím ultrazvukových nástrojov narastá aj dopyt a požiadavka na zväčšenie objemu výroby. Zvýšením objemu výroby sa pri stopercentnej kontrole kvality zvýši objem jednotiek podliehajúcich kontrole. Pri zvyšujúcom sa objeme výroby nie je možné kontrolovať každú vyrobenú jednotku bez zavedenia určitých opatrení.

Diplomová práca obsahuje systémový rozbor riešenej problematiky a návrh riešenia. Zahŕňa štatistické spracovanie vybraného procesu, analýzu spôsobilosti procesu a vyhodnotenie výsledkov. Okrem štatistického spracovania procesu sú v práci uvedené odporúčania pre prax súvisiace so zabezpečovaním kvality ultrazvukových nástrojov.

2 ULTRAZVUKOVÉ TECHNOLÓGIE

Ultrazvuk má veľa rozličných aplikácii. Jeho fyzikálne vlastnosti sa využívajú v rôznych oblastiach technológií. Najznámejšími a najviac používanými aplikáciami ultrazvuku sú ultrazvukové čistenie a zváranie plastových materiálov. Na podobnom princípe ako ultrazvukové zváranie funguje aj ultrazvukové rezanie či ultrazvukové zatláčanie. [1]

2.1 Ultrazvukové zváranie

Technológia ultrazvukového zvárania využíva fyzikálne princípy ultrazvuku na spájanie materiálov bez použitia prídavných materiálov. Pri zváraní ultrazvukom sa mení elektrická energia na mechanické vibrácie. Frekvencia týchto vibrácii leží vo frekvenčnom pásme približne od 20000 Hz. Koncentrovaním vibrácii s nízkou amplitúdou na určitú oblasť materiálu sa rozvibrujú molekuly zváraného materiálu v danej oblasti, čím vzniká teplo. Zvyšovaním teploty materiálu dochádza k jeho roztaveniu. Natavením, súčasným pritlačením spájaných dielov k sebe a následným ochladnutím vzniká zvar. [2]

Vznik zvaru medzi termoplastami sa uskutočňuje pomocou ultrazvukového nástroja. Tento nástroj vibruje s frekvenciou od 20 kHz do 40 kHz. Vytvorené spojenie plastových materiálov má vkusné prevedenie a spĺňa požadované mechanické vlastnosti. [3]

Technológia ultrazvukového zvárania je ekonomicky veľmi výhodná pre sériovú výrobu. Hlavnými výhodami sú rýchlosť zvárania a jednoduchá automatizácia zváracieho procesu. Zvárací čas zvyčajne netrvá dlhšie ako 1 sekundu. Medzi výhody zvárania ultrazvukom patrí čistota procesu. Pri zváraní nedochádza k degradácii alebo kontaminácii materiálu. Flexibilita výroby je zaistená možnosťou rýchlej výmeny zváracieho nástroja. [4]

Ultrazvukové zváranie a spájanie materiálov má aj určité obmedzenia. Môže spôsobiť poškodenie elektrických zariadení vysokou frekvenciou. Obmedzený je aj rozmer zváraných dielov. Veľké diely a diely s výraznejšími tvarovými prevýšeniami zváraných plôch nie sú vhodné na zváranie ultrazvukom kvôli jeho fyzikálnym zákonitostiam. [2] [4]

Využíva sa najmä na spájanie fólií a dosiek ručným alebo strojovým zváraním. Zváranie pomocou ultrazvuku sa používa v mnohých odvetviach, napr. v automobilovom, elektrickom a elektronickom priemysle i v textilnom priemysle. Aplikuje sa aj v baliacom priemysle na plastové balenia rôznych veľkostí a tvarov. Vďaka čistote procesu sa táto metóda zvárania využíva tiež v potravinárskom a medicínskom priemysle. [4] [5]

2.1.1 Zvárané materiály

Technológia ultrazvukového zvárania sa využíva najmä na spájanie plastových materiálov. Najčastejšie ide o termoplasty, ktoré majú schopnosť mäknúť. V závislosti od štruktúry termoplastov a ich vlastností sa určuje ich spôsobilosť na zváranie ultrazvukom. Termoplasty môžu mať štruktúru amorfnú alebo semikryštalickú. Materiály s amorfnou štruktúrou sú ľahšie zvárateľné oproti štruktúre semikryštalickej. K nataveniu semikryštalickej štruktúry je nutné dodať väčšie množstvo tepelnej energie. Materiály s takouto štruktúrou z časti tlmia vibrácie a horšie ich prenášajú. [2] [6] [7]

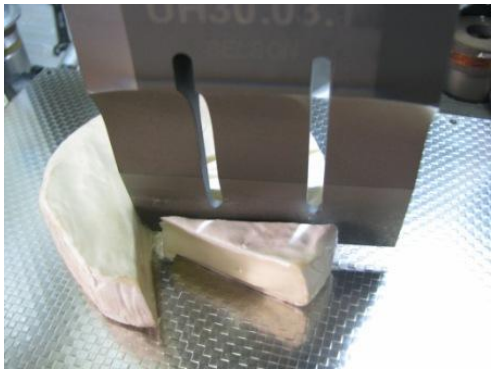
Sila zvaru je závislá na vlastnostiach termoplastov. Dobrý zvar pri spájaní rozdielnych materiálov vzniká, ak majú spájané materiály skoro totožnú teplotu zmäknutia a sú chemicky zlučiteľné. Natavenie dvoch chemicky nezlučiteľných termoplastov nevytvorí chemická väzba medzi molekulami. [2] [7]

Často používané materiály sú polyamid, polymetylmetakrylát, polystyrén, polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid, fluoropolyméry a ďalšie. Okrem odstrekovaných polotovarov sa touto metódou spájajú fólie, dosky a netkané textílie, ktoré obsahujú plastové vlákna. [6]

2.2 Ultrazvukové rezanie

Princíp ultrazvukového rezania vychádza z princípu ultrazvukového zvárania. Všetky diely zostavy sú rovnaké. Rozdielny je len ultrazvukový nástroj, ktorý je určený na ultrazvukové rezanie. Pri ultrazvukovom rezaní nie je potrebná na rezanie taká sila ako pri bežnom rezaní materiálu. Veľkosť použitej sily v axiálnom smere k rezanému materiálu je až o 75 % menšia. Energia potrebná na rezanie ultrazvukom je výrazne menšia ako pri iných technológiách delenia materiálu. [3]

Technológia rezania ultrazvukom sa využíva v mnohých priemyselných odvetviach. Využíva sa najmä v potravinárskom priemysle (obr. 2.1). Vzniknutý rez je čistý a estetický. Ďalšie rozšírené využitie rezania ultrazvukom je v textilnom priemysle. Látky a materiály sa v reze oddelia a zároveň sa zatavia odrezané vlákna. Ultrazvukovým rezaním je možné deliť materiály, ktoré sa inými metódami len ťažko alebo vôbec dajú deliť. Takýmito predmetmi sú napríklad automobilové pneumatiky, ktoré sa vyrábajú z nevulkanizovaného gumeného materiálu. [3]

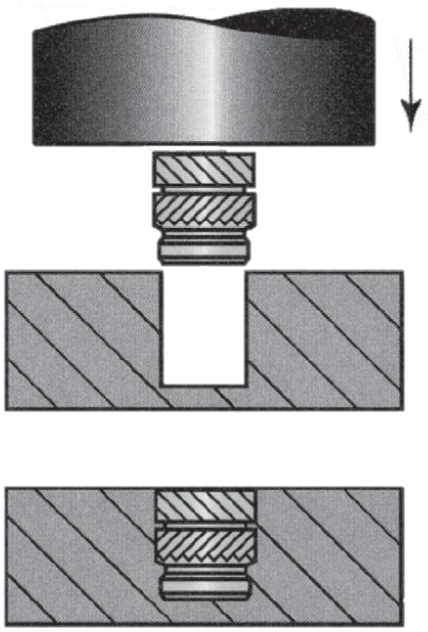


Obr. 2.1 Použitie ultrazvukového rezania v potravinárskom priemysle [8]

2.3 Ultrazvukové zatláčanie

Princíp ultrazvukového zatláčania (inserting) spočíva vo vtláčaní súčasti z kovového materiálu do termoplastového materiálu (obr. 2.2). Zatláčanie je rýchle a spojenie, ktoré má vysokú pevnosť vzniká s minimálnym indukovaným napätím v materiáli. Postup pri ultrazvukovom zatláčaní kovovej súčasti začína vytvorením otvoru v termoplastovom materiáli. Do otvoru sa vloží zatláčaná kovová súčasť, ktorá je následne pritlačená ultrazvukovým nástrojom. Ten vibráciami spôsobí roztavenie termoplastového materiálu v okolí, čím vznikne spojenie kovu s termoplastom. Zatláčanie sa môže realizovať dvoma spôsobmi. Buď je s ultrazvukovým nástrojom v kontakte zatláčaný kovový diel, alebo sa nástroj prikladá k termoplastu. Pri kontakte s termoplastom sa nástroj menej opotrebováva.

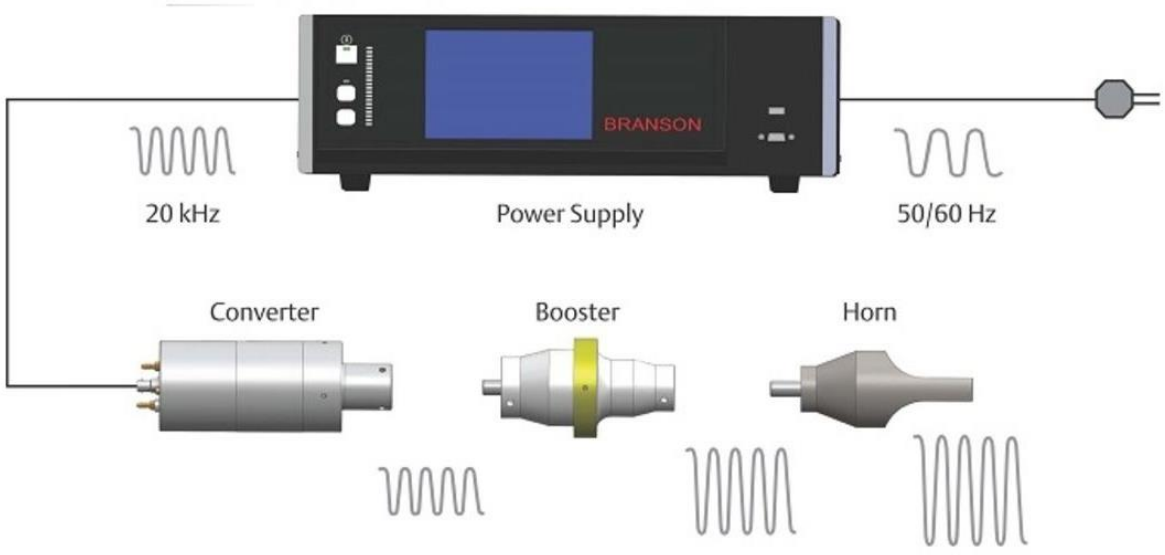
Ultrazvukové zatláčanie sa využíva pri výrobe počítačových skríň, televíznych skríň a spotrebičov. Využíva sa tiež v automobilovom priemysle. [4]



Obr. 2.2 Schematické znázornenie technológie ultrazvukového zatláčania [4]

2.4 Zostava pre ultrazvukové technológie

Zariadenie pre zváranie ultrazvukom pozostáva z viacerých častí (obr. 2.3). Generátor vytvára striedavé napätie. Konvertor mení vytvorené striedavé napätie na mechanické kmity, preto sa nazýva aj menič. Booster má schopnosť v určitom pomere zvyšovať alebo znižovať amplitúdu kmitov. Sonotróda sa opiera o zváraný diel a prenáša naň vibrácie od boostra. [4]



Obr. 2.3 Zmena frekvencie a veľkosti amplitúdy v zostave [9]

Spojenie sonotródy, boostra a konvertora je nazývané aj zváracia jednotka. Zváracia jednotka môže byť použitá v zariadení na ručné zváranie alebo ako súčasť zváracej zostavy s pridaným aktuátorom, ktorý zabezpečuje automatický pohyb zváracej jednotky k zváranému dielu. [10]

Sonotródam – nástrojom pre ultrazvukové zváranie bude venovaná samostatná kapitola, preto popis jednotlivých častí zostavy začína od boostra.

Booster sa nazýva tiež transformátor kvôli jeho vlastnosti meniť amplitúdu kmitov. Tieto kmity sú pomocou boostra prenášané z konvertora do sonotródy. Booster môže tiež zväčšovať alebo zmenšovať veľkosť amplitúdy prenášaných kmitov. V strede je k telu boostra pripevnený krúžok, ktorý slúži ako montážny bod pre pohon zváracieho ultrazvukového zariadenia. [4] [6]

Schopnosť zväčšovať alebo zmenšovať amplitúdu mechanických kmitov je zaistená tvarom boostra. V strede boostra sa nachádza nulový, inak nazývaný centrálny alebo nodálny bod, na ktorom je pripevnený krúžok. Pre zmenu amplitúdy je potrebné, aby bola jedna strana od centrálneho bodu iná ako druhá. Booster bez zmeny amplitúdy je symetrický. Ak je na strane, kde je pripevnená sonotróda menej materiálu, amplitúda je zväčšovaná. Naopak, ak je na strane pri sonotróde materiálu viac, booster spôsobuje zmenšenie amplitúdy kmitov do nej prenášaných. Veľkosť zväčšenia alebo zmenšenia (tab. 2.1) závisí na pomere materiálu na jednotlivých stranách. Veľkosť na konci boostra pripevneného ku konvertoru je zmenená a na konci pri sonotróde už je požadovaná veľkosť amplitúdy. Booster s pomerom 2:1 zväčší amplitúdu prenášaných kmitov dvojnásobne. Pomer 0,5:1 zmenší veľkosť amplitúdy na polovicu. Podľa zváraného materiálu sa určí požadovaná veľkosť amplitúdy. Veľkosť amplitúdy je tiež závislá na spôsobe aplikácie. [2] [4]

Tab. 2.1 Označenie boostrov podľa zosilnenia [11]

Zosilnenie	**Názov**	**Farba**
1,0:0,6	Purple	Fialová
1,0:1,0	Green	Zelená
1,0:1,5	Gold	Zlatá
1,0:2,0	Silver	Strieborná
1,0:2,5	Black	Čierna

Materiál, z ktorého je booster vyrobený závisí od jeho predpokladanej aplikácie. Pri požadovanom odvode tepla pri ultrazvukovom zváraní je vhodný hliníkový booster. Titánový vydrží viacej opakovaní montáže a demontáže, čo vyplýva z vlastností materiálu. Napriek vyššej cene titánu je v určitých aplikáciách ekonomicky výhodnejší ako hliníkový. [2]

Vlastnosti boostra sa volia podľa zamýšľanej aplikácie. Delia sa podľa troch základných kritérií – frekvencia, materiál a zosilnenie: [11]

- Podľa frekvencie sa delia na:
  - 20 000 Hz,
  - 30 000 Hz,
  - 40 000 Hz.

- Podľa materiálu tela boostra sú:
  - Titánové,
  - Hliníkové.
- Podľa pomeru zosilnenia sa delia na:
  - 1,0:0,6,
  - 1,0:1,0,
  - 1,0:1,5,
  - 1,0:2,0,
  - 1,0:2,5.

Titánové boostre s frekvenciou 20 000 Hz a rôznymi pomermi zosilnenia sú na obr. 2.4.

Obr. 2.4 Titánové 20 kHz boostre [12]

Dôležitou časťou zariadenia pre ultrazvukové zváranie je konvertor (menič). Ku generátoru je pripojený káblom. Premieňa generované elektrické napätie na mechanické vibrácie s rovnakou frekvenciou. Konvertor je zložený z piezoelektrických keramických meničov uložených medzi titánovými blokmi. Piezoelektrické jednotky majú tvar disku. Elektróda je tvorená tenkou platňou z kovu. Platne sú uložené medzi jednotlivými piezoelektrickými diskami. Disky sa rozťahujú a sťahujú podľa dodávaného elektrického signálu, ktorý má sínusový priebeh. Najviac používané frekvencie vibrácií sú 20 kHz alebo 40 kHz. Peak-to-peak amplitúdy pre jednotlivé frekvencie sú uvedené v tab. 2.2. [4]

Tab. 2.2 Peak-to-peak amplitúdy rôznych frekvencií konvertora [2]

Frekvencia [kHz]	**Amplitúda [µm]**
15	31
20	20
30	13,5
40	9
50	8

Obr. 2.5 40 kHz, 30 kHz a 20 kHz konvertor [12]

Generátor premieňa nízkofrekvenčnú elektrickú energiu zo sieťového napätia, zvyčajne o frekvencii 50 Hz, na striedavé vysoké napätie. Frekvencia výstupného napätia leží v pásme ultrazvuku od 20 kHz. Generátory majú výkon od 100 W do 6 kW. Môžu byť vybavené riadiacim členom alebo mikroprocesorom na nastavenie rôznych funkcií, napríklad zváracích programov. [4]

3 ULTRAZVUKOVÉ NÁSTROJE

Sonotróda (horn) prenáša vibrácie od boostra priamo k zváraným dielom. Plocha, ktorá dosadá na plastový diel je prispôsobená jeho tvaru a spôsobu aplikácie. Podľa frekvencie kmitov sa sonotróda rozťahuje a sťahuje. Konštrukcia sonotródy pripomína rezonančné tyče. Je konštruovaná tak, že ňou prejde polvlna alebo celá vlna kmitu. Tvarom sonotródy je možné dosiahnuť ďalšie zväčšenie amplitúdy. [4]

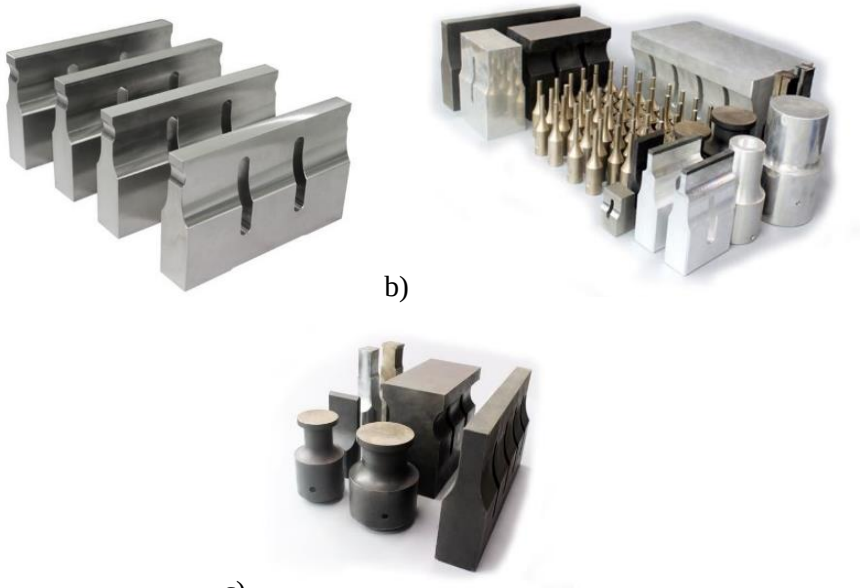
Pri procese vývoja a návrhu sonotródy je dôležitý správny tvar sonotródy vzhľadom na jej aplikáciu. Navrhnutý tvar musí byť vhodný na požadovanú amplitúdu a frekvenciu. Podľa aplikácie je dôležitý aj správny výber materiálu na výrobu sonotródy. Nesprávne zvolené parametre môžu spôsobiť poškodenie ďalších častí zostavy. [13]

3.1 Materiál ultrazvukových nástrojov

Materiály, z ktorých sa sonotródy vyrábajú sú najčastejšie hliník alebo titán. V niektorých prípadoch môžu byť vyrobené z tvrdenej ocele (obr. 3.1c). Výber materiálu, ktorý bude použitý závisí od jeho vlastností – mechanických aj akustických. [2]

Hliníkové sonotródy (obr. 3.1b) sa používajú najmä kvôli dobrým akustickým vlastnostiam hliníku. Je ľahko obrábateľný, preto sa využíva aj na výrobu sonotród väčších či zložitejších tvarov. Výroba hliníkových prototypov je vďaka jeho nižšej cene a dobrej dostupnosti ekonomicky výhodná. Povrchová tvrdosť hliníka nie je dostatočná, preto sa robí povrchová úprava karbidom, chrómom alebo niklom. [2]

Sonotródy z titánu (obr. 3.1a) majú výborné akustické vlastnosti. Na rozdiel od hliníkových majú aj dobrú povrchovú tvrdosť a únavovú pevnosť. Titán nie je dobre obrábateľný. Sonotródy vyrobené z titánu majú obmedzenie vo veľkosti. Ďalšou nevýhodou titánu je jeho cena. Pri požadovanom tvrdom povrchu a vysokej amplitúde sa vykonáva povrchová úprava sonotród. Materiál povrchovej úpravy môže byť teflón. Rovnako ako pri hliníkových sa tiež používa nikel či karbid. [2]



a) b)

c)

Obr. 3.1 Ultrazvukové nástroje a) titánové, b) hliníkové, c) oceľové [14]

3.2 Druhy ultrazvukových nástrojov

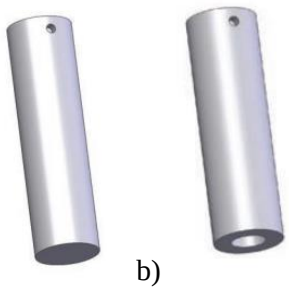
Ultrazvukových nástrojov je veľa druhov. Existuje viacero kritérií, podľa ktorých sa ultrazvukové nástroje dajú rozdeliť. Ich rozličnými kombináciami vzniká veľké množstvo rozdielnych nástrojov. Hlavné kategórie, podľa ktorých sa sonotródy rozdeľujú sú frekvencia, materiál a východzí základný tvar sonotródy. Ďalšie kategórie sa volia podľa zamýšľanej aplikácie ultrazvukového nástroja v praxi. Rôzne druhy ultrazvukových nástrojov podľa rozličných kritérií sú uvedené v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Základné rozdelenie ultrazvukvých nástrojov

Podľa frekvencie	20 000 Hz
	30 000 HZ
	40 000 Hz
Podľa materiálu	Titánové
	Hliníkové
	Oceľové
Podľa technológie	Na zváranie
	Na rezanie
	Na zatláčanie
Podľa počtu častí	Jednodielne
	Kompozitné
	S hrotmi
Podľa tvaru	Valcové
	Stupňovité
	Katenoidálne
	Exponenciálne
	Obdĺžnikové
	Blokové

3.2.1 Valcové sonotródy

Valcové sonotródy s jednoduchou geometriou sa delia na plné a duté. Plnú alebo dutú konštrukciu môžu mať sonotródy bez zmeny priemeru alebo s rôznymi geometrickými prechodmi z priemeru väčšieho na menší. Duté sonotródy sú vhodné na použitie, kde je kontakt nástroja s dielom požadovaný len po obvode. Na obrázku je znázornená jednoduchá plná (obr. 3.2 a) a dutá (obr. 3.2 b) valcová sonotróda bez zmeny priemeru. [13]



a) b)

Obr. 3.2 Valcová sonotróda a) plná, b) dutá [13]

Stupňovité sonotródy

Stupňovitá sonotróda (stepped horn) je zložená z kruhových častí s rozdielnymi priemermi. Veľkosti týchto priemerov sú unifikované. V oblasti prechodu alebo v strede sonotródy je vysoké napätie v materiáli. Prechod z väčšieho priemeru na menší je realizovaný rádiusom a nachádza sa v blízkosti nulového bodu sonotródy. Stupňovité sonotródy sú schopné zväčšiť amplitúdu až do pomeru 9:1 [4]. Sonotródy s takýmto veľkým zväčšením sa nazývajú aj high gain sonotródy (obr. 3.3 c) [13].

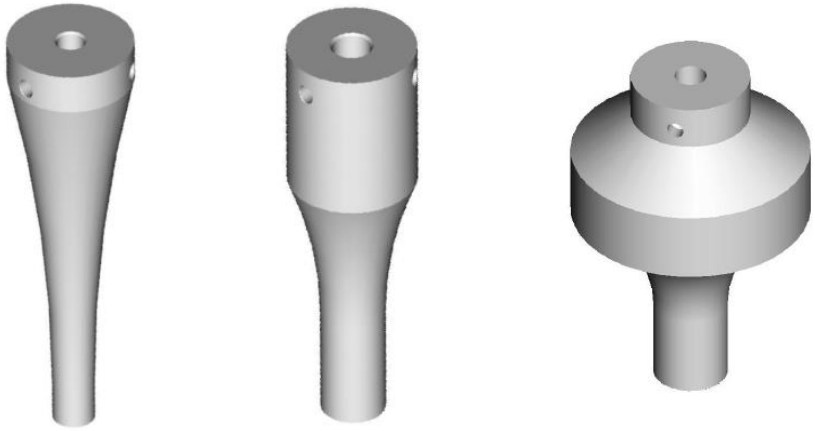
Katenoidálne sonotródy

Katenoidálne sonotródy (obr. 3.3 b) sú veľmi podobné stupňovitým. Rozdiel je v tom, že oproti stupňovitým majú katenoidálne pozvoľnejší prechod z väčšieho priemeru na menší. Polomer prechodu cez nulový bod je postupný. Zväčšenie amplitúdy je možné aj pri tomto tvare sonotródy. Výhodou je menšia koncentrácia napätia ako pri stupňovitých. [4]

Použitie katenoidných sonotród je výhodné najmä pri zváraní plastových dielov s menšími rozmermi. Pri bodovom zváraní sa k sonotróde pripevní hrot. Takáto sonotróda obsahuje závit, aby sa dal hrot pripevniť. Sonotródu s hrotom je vhodné aplikovať vo výrobe, kde nebude príliš často využívaná. [13]

Exponenciálne sonotródy

Sonotródy s exponenciálnou geometriou (obr. 3.3 a) majú najoptimálnejšie rozloženie napätia v materiáli. Postupné zužovanie tela sonotródy zabezpečuje rozloženie napätia v materiáli na väčšiu dĺžku ako pri stupňovitom či katenoidnom tvare nástroja. Použitie exponenciálnej sonotródy je vhodné pri aplikácii vyžadujúcej vysokú silu a malú amplitúdu. [13]



a) b) c)

Obr. 3.3 Sonotróda a) exponenciálna, b) katenoidálna, c) stupňovitá (high-gain) [2]

3.2.2 Sonotródy s drážkami

Rozloženie amplitúdy na pracovnej ploche sonotródy závisí od tvaru a veľkosti nástroja. Dosiahnutie požadovaného rozloženia amplitúdy vo väčších nástrojoch zabezpečujú drážky v nástroji. Drážky z pohľadu rozloženia vĺn rozdeľujú nástroj na menšie časti, čím sa dosiahne rovnomerné rozloženie amplitúdy na čelnej ploche nástroja. Drážky sa zvyčajne využívajú v nástrojoch väčších ako 88,9 mm alebo v nástrojoch s priemerom väčším ako 101,6 mm. Na obr. 3.4 sú uvedené príklady blokových, obdĺžnikových a valcových ultrazvukových nástrojov. [2]

Obr. 3.4 Ultrazvukové nástroje s drážkami [2]

3.2.3 Kompozitné sonotródy

Kompozitné ultrazvukové nástroje (obr. 3.5) sa skladajú z viacerých častí. Preto sa nazývajú aj zložené. Kompozitný nástroj sa skladá z veľkej spojovacej sonotródy a jednej alebo viacerých sonotród pripojených k spojovacej. Tie sa nazývajú aj hroty (tips). Kompozitnými sonotródami neprechádza len polvlna ale celá dĺžka vlny kmitu. Materiál veľkej spojovacej sonotródy býva titán alebo hliník, hroty sú z titánu alebo ocele. Výber materiálu závisí od požiadaviek na aplikáciu. Konštrukcia kompozitného nástroja by mala byť symetrická a vyvážená. [2]

Kompozitné nástroje sú požadované v aplikáciách, kde nie je možné využiť jednodielne sonotródy. Jeden z dôvodov použitia kompozitného nástroja je špecifický tvar dielu, ktorý neumožňuje prístup jednodielneho nástroja k zváraným bodom. Ďalším dôvodom je požiadavka väčšej amplitúdy kmitania. Možnosť väčšej amplitúdy bez koncentrácie napätia v materiáli patrí k hlavným výhodám týchto nástrojov. Aplikácia kompozitného nástroja je riešením na problémy s opotrebovávaním nástroja pri viacnásobnom používaní. [2]

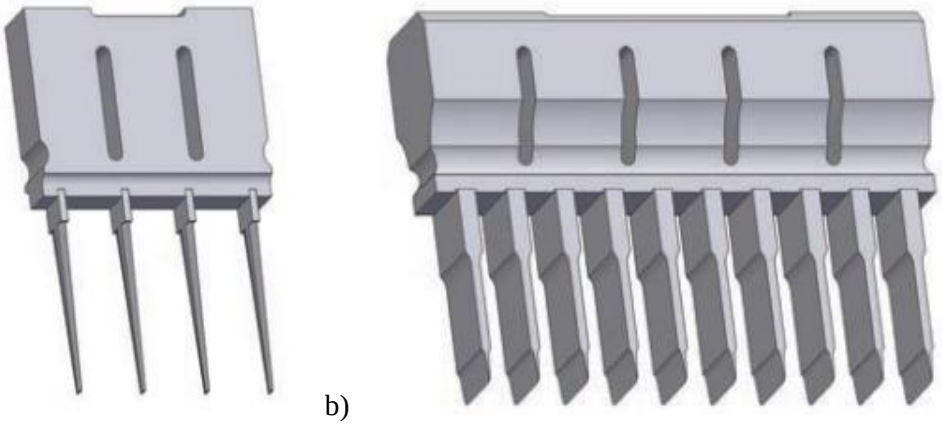
Obr. 3.5 Kompozitný ultrazvukový nástroj

3.2.4 Sonotródy na rezanie a zatláčanie

Sonotródy na rezanie (obr. 3.6) sa využívajú najmä v potravinárskom priemysle. Ultrazvukové nástroje určené na rezanie sa vyrábajú z titánu. Titánové nástroje spĺňajú požiadavky hygieny a sú schopné samočistenia. Jednou z hlavných výhod rezania ultrazvukom je rovný a uhladený rez bez deformácii. Rezanie ultrazvukom znižuje koeficient trenia pri rezaní. Rezanie je rýchlejšie a je možné vytvárať veľmi tenké rezy. [15]

Obr. 3.6 Jednoduchá sonotróda na rezanie

Kompozitné sonotródy s bočným rezaním majú efekt pílenia s vysokou frekvenciou pohybu. Sonotródy s rezaním na konci sú vhodné na rezanie potravín s vysokou hustotou. Sú vhodné na aplikáciu rezania rýchlo sa pohybujúcich výrobkov. [13]



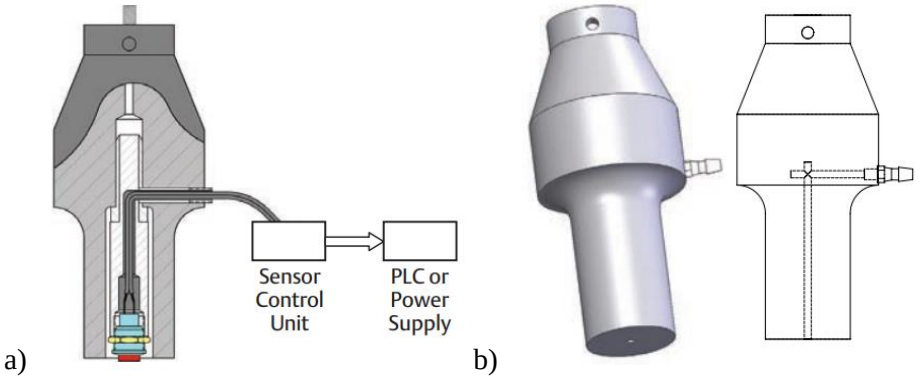
a) b)

Obr. 3.7 Kompozitné sonotródy na rezanie a) bočnou hranou, b) spodnou hranou [13]

Ultrazvukové nástroje určené na zatláčanie kovových dielov do termoplastických materiálov sa vyrábajú z titánu alebo kalenej ocele. Ak sa pri aplikácii sonotróda dotýka kovového dielu, je výhodnejšie zvoliť sonotródu z ocele. Hoci má titán vyššiu pevnosť v ťahu, sonotróda z kalenej ocele je odolnejšia voči opotrebovaniu. Pracovná plocha sonotródy má byť minimálne trikrát väčšia ako plocha kovového dielu. Tým sa zabráni spojeniu kovového dielu a sonotródy. [4]

3.2.5 Špeciálne ultrazvukové nástroje

Existujú aplikácie ultrazvukového zvárania, pri ktorých nie je možné využiť niektorý z typických ultrazvukových nástrojov. Pri niektorých aplikáciách je požiadavka na ultrazvukové nástroje veľmi špeciálna. Ultrazvukový nástroj môže obsahovať prídavné funkcie, ktoré zabezpečia, aby ich aplikácia spĺňala požiadavky. Pre príklad sú nižšie uvedené nástroje, ktoré sú doplnené o senzory na snímanie dielov (obr. 3.8a), či prichytávanie dielov pomocou vákua (obr. 3.8b). Podľa požadovanej aplikácie je možné navrhnúť rôzne iné funkcie. [13]



Obr. 3.8 Ultrazvukový nástroj a) so snímačom dielov b) s vákuom [13]

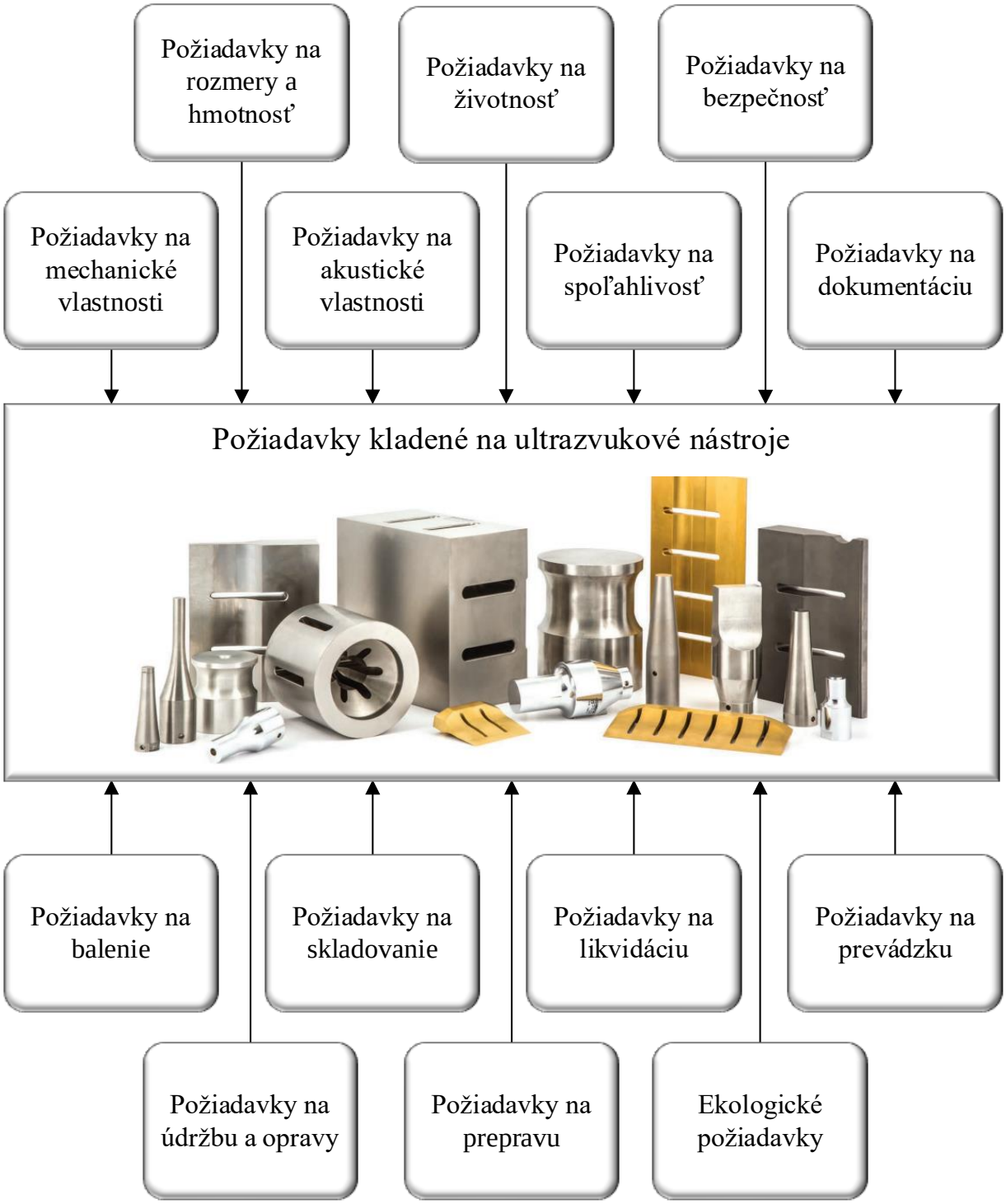
Booster-sonotróda (obr. 3.9) vznikla spojením funkcie boostra a ultrazvukového nástroja do jedného dielu. Má uplatnenie v aplikáciách, kde je nedostatok miesta na celú zváraciu jednotku. Takýto typ nástroja má v nulovom bode umiestnený krúžok na uchytenie, ktorý sa zvyčajne nachádza na boostri. [13]

Obr. 3.9 Booster-sonotróda [13]

3.3 Požiadavky kladené na ultrazvukové nástroje

Požiadavky na kvalitu sú stanovené očakávania, ktoré sa týkajú kvality. Kvalita je definovaná ako stupeň splnenia požiadaviek skupinou inherentných vlastností. [16]

Produkty a služby ponúkané na trhu, musia spĺňať určité požiadavky. Produkty a služby musia spĺňať predpísané požiadavky stanovené zákazníkom, ale aj také, ktoré zákazník nešpecifikoval, ale sú nevyhnutné pre zákazníkom plánovanú aplikáciu. Musia byť splnené legislatívne požiadavky, ak sú pre daný produkt alebo službu stanovené. V neposlednom rade musia byť splnené požiadavky predpísané organizáciou. Všeobecné požiadavky kladené na ultrazvukové nástroje sú uvedené na obr. 3.10. [16]



Obr. 3.10 Požiadavky kladené na ultrazvukové nástroje

Dôsledkom nesplnenia niektorých požiadaviek a použitia sonotródy môže nastať poškodenie ostatných častí zváracej jednoty či generátora. Medzi najčastejšie príčiny zlyhania sonotródy patrí zlý návrh nástroja alebo jeho nesprávna výroba. Zlyhanie sonotródy následkom jej prasknutia má príčinu v nesprávnej aplikácii zvárania. Pri dodržaní správnej aplikácie dobre navrhnutej a vyrobenej sonotródy môže nastať jej zlyhanie vplyvom vád v materiáli. [10]

Vybrané požiadavky kladené na konštrukciu a funkciu sonotródy pre správne prevedenie UZ zvárania: [10]

- frekvencia,
- priebeh vibrácii,
- výkon bez záťaže,
- amplitúda,
- rozmiestnenie amplitúdy,
- nulový bod,
- materiál,
- napätie v materiáli,
- geometria pracovného povrchu,
- kvalita pracovného povrchu,
- regulácia teploty.

3.3.1 Frekvencia a priebeh vibrácii

Voľba frekvencie sonotródy vychádza z plánovanej aplikácie zvárania vo fáze vývoja a návrhu sonotródy. Pri voľbe frekvencie je nutné poznať materiály a veľkosť dielov, ktoré majú byť zvárané. Na zabezpečenie vibrovania na zvolenej frekvencii celej zváracej jednotky je dôležitá voľba generátora, ktorý generuje zhodnú frekvenciu. Generátor nemá len jednu hodnotu frekvencie ale určitý rozsah frekvencií, ktoré je schopný zachytiť. Frekvencia sonotródy ďaleko od tohto rozsahu nie je generátorom zachytená. [10]

Správna frekvencia sonotródy musí byť zároveň aj jej rezonančná frekvencia. Vplyvom malej budiacej energie vlastného kmitania s frekvenciou rovnakou ako rezonančná frekvencia je kmitanie zosilnené – nastáva rezonančný jav. Ak má sonotróda frekvenciu, ktorá však nie je jej rezonančná je nutné jej na kmitanie dodať väčšie množstvo energie, čo vedie k preťaženiu systému. Frekvencia sonotródy má súvis s ďalším požadovaným parametrom – výkon bez zaťaženia. [10]

Rezonančná frekvencia sonotródy nezaručuje priebeh vibrácii podľa požiadaviek. Vyššia hodnota výkonu bez záťaže nepriamo signalizuje zhoršenú kvalitu priebehu vibrácii. V ideálnom priebehu vibrácii sa nachádzajú len pozdĺžne vibrácie a nevyskytujú sa vibrácie priečne. Tento stav nie je možné dosiahnuť, preto sa za optimálne považuje čo najmenšie množstvo priečnych vibrácii. Vlny kolmé na zváraný povrch sú požadované a takýto priebeh vibrácii je pre zváranie žiadaný. Výskyt veľkého množstva priečnych vĺn môže byť spôsobený aj nevhodným tvarom sonotródy. [10]

3.3.2 Výkon bez záťaže

Výkon bez záťaže je ekvivalentom energie, ktorá vyvolá kmitanie na vlastnej rezonančnej frekvencii. Cieľom je dosiahnuť hodnotu výkonu bez záťaže čo najnižšiu. Ak je nízka, blíži sa k nule, je to známka toho, že frekvencia je skutočne rezonančná. Vyššia hodnota je vhodná pri väčšej odchýlke frekvencie sonotródy od frekvencie generátora. [10]

3.3.3 Amplitúda a jej rozmiestnenie

Veľkosť amplitúdy kmitajúcej sonotródy je v rádoch mikrometrov. Veľkosť amplitúdy závisí od veľkosti amplitúdy kmitania vychádzajúceho z konvertora. Ďalej je ovplyvnená typom boostra – môže byť rovnaká pri pomere boostra 1:1, podľa iných pomerov zosilnená alebo zoslabená. Určitými tvarmi sonotródy môže byť ešte viac zosilnená. Pri návrhu sonotródy je

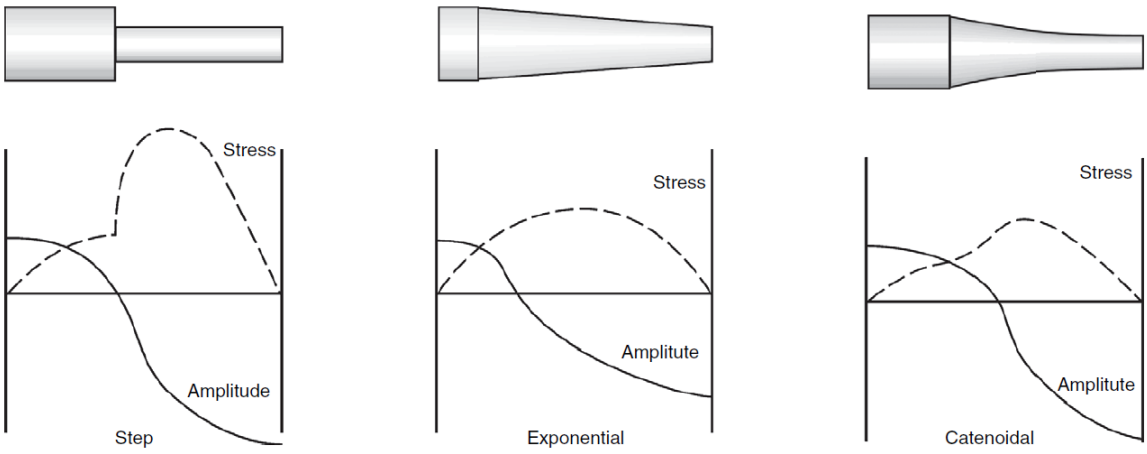
nutné poznať požadovanú amplitúdu, ktorej veľkosť závisí od materiálu, na ktorý má byť proces zvárania aplikovaný. [10]

Rozmiestnenie amplitúdy na funkčnej ploche sonotródy by malo byť rovnomerné. Problém vzniká pri geometrii plochy obsahujúcej prevýšenia a pri nesymetrických tvaroch sonotród. Vtedy je dôležitý návrh tvaru sonotródy, v ktorom je rozloženie amplitúdy čo najrovnomernejšie, v rámci možností požadovanej aplikácie. Existujú zaužívané tvary sonotród, ktoré majú funkčnú plochu v jednej rovine a amplitúda je v každom mieste približne rovnaká. Preto sú takéto tvary preferované a prispôsobuje sa tomu tvar zváraných dielov. [10]

Nulový bod sa nachádza v sonotróde aj v boostri. Väčšinou sa nejedná o jeden konkrétny bod ale o skupinu bodov – priamku či rovinu. Je to miesto, kde teoreticky nedochádza k žiadnemu lineárnemu pohybu, amplitúda je v danom bode nulová. Vlny majú sínusový priebeh. Nulový bod sa nachádza v mieste, kde sínusový priebeh mení svoju polaritu. V tomto mieste dochádza aj k zmene veľkosti amplitúdy, ak je sonotróda navrhnutá s iným pomerom veľkosti vstupnej a výstupnej amplitúdy ako 1:1. [2] [10]

3.3.4 Napätie v materiáli

Rozloženie a koncentrácia napätia závisí od tvaru a geometrie sonotródy. Preto je pri návrhu dôležité zvoliť vhodný tvar sonotródy. Typické miesta, kde sa napätie koncentruje sú okolo otvoru na závit alebo v okolí štrbín. V týchto miestach potom často vznikajú trhliny, následkom ktorých sonotróda stratí svoju funkciu. Rozloženie napätia v niektorých typoch sonotród je na obr. 3.11 [10]



Obr. 3.11 Priebeh napätia a amplitúdy [4]

3.3.5 Geometria a kvalita pracovného povrchu

Geometria plochy sonotródy, ktorá je v kontakte so zváraným materiálom závisí od geometrie zváraného dielu. Ideálny prípad je, keď sa konštruktér navrhujúci sonotródu podieľa aj na návrhu dielu, ktorý má byť zvarený. Konštruktér vie odhadnúť, aká geometria dielu je problémová a takémuto tvaru sa vyhnúť. Tento problém vzniká hlavne pri sonotródach vyrábaných na zákazku, ktoré majú presne kopírovať tvar zváraného dielu. Nestačí vyrobiť sonotródu s plochou, ktorá kopíruje tvar dielu. Je to obťažnejšie, ako sa na prvý pohľad zdá, aby sonotróda požadovaného tvaru spĺňala všetky požadované parametre, uvedené v tejto kapitole. Funkcia sonotródy je ovplyvňovaná veľmi malými odchýlkami, preto je požadovaná vysoká presnosť pri jej výrobe. [10]

Pracovný povrch sonotródy prichádza do styku so zváranými alebo rezanými materiálmi. Preto musí mať určitú kvalitu. Pokiaľ nespĺňa požiadavky, nástroj je povrchovo upravený. Využíva sa kalenie nástroja na zabezpečenie jeho požadovaných vlastností podľa aplikácie. Pri rezaní je dôležité, aby mal nástroj čo najostrejšiu hranu. Na dosiahnutie tejto požiadavky sa využíva technológia brúsenia. [10]

3.3.6 Regulácia teploty

Sonotródy sa pri ultrazvukovom zváraní zahrievajú. Príčinou je nedokonalá premena elektrickej energie na mechanickú. Časť energie sa premení na tepelnú, čím sa sonotróda zahrieva. Okrem nebezpečenstva popálenia operátora o horúce časti to má vplyv aj na funkciu sonotródy. Jej teplota súvisí s rezonančnou frekvenciou. Teplota sonotródy sa môže zmeniť natoľko, že frekvencia sonotródy bude mimo frekvenčný rozsah generátora, a ten nebude schopný danú frekvenciu zachytiť. Problém so zahrievaním rastie s veľkosťou sonotródy. Pri väčších rozmeroch sa využíva chladenie sonotródy vzduchom. [10]

3.4 Kontrola kvality ultrazvukových nástrojov

Funkcia ultrazvukových nástrojov súvisí s ich pracovnou frekvenciou. Pracovná frekvencia je kritickým parametrom z pohľadu kvality ultrazvukových nástrojov. Pracovnou frekvenciou pre ultrazvukové zváranie a rezanie je antirezonančná frekvencia, v ultrazvukových čistiacich systémoch je využívaná frekvencia rezonančná [17]. Na analýzu pracovnej frekvencie ultrazvukového nástroja, boostra či konvertora sa používajú špeciálne zariadenia, ktoré umožňujú testovanie ultrazvukových súčastí. Analyzátor sonotród (Horn Analyzer) sa využíva na stanovenie viacerých charakteristík, frekvencia môže byť meraná aj bezkontaktným meračom a veľkosť amplitúdy sa meria pomocou prístroja na to určeného.

Pracovná frekvencia (rezonančná či antirezonančná) ultrazvukového nástroja je ovplyvňovaná viacerými faktormi. Medzi najvýznamnejšie patria rozmery sonotródy. Závislosť rezonančnej frekvencie a dĺžky sonotródy je nasledovná. Skracovaním dĺžky sonotródy naberá jej pracovná frekvencia vyšších hodnôt. V praxi sa sonotróda vyrobí dlhšia a jej pracovná frekvencia sa dolaďuje jej skracovaním. Zmenu pracovnej frekvencie je možné dosiahnuť aj zmenou iných parametrov sonotródy, ak nie je zmena dĺžky možná. Pracovnú frekvenciu sonotródy ovplyvňuje rádius na sonotróde či veľkosť drážok pri sonotróde s drážkami. Pracovná frekvencia sonotródy je ovplyvnená aj materiálom, z ktorého je sonotróda vyrobená. [18] [19]

3.4.1 Analyzátor ultrazvukových nástrojov

Analyzátor ultrazvukových nástrojov TRZ (obr. 3.12) je zariadenie používané na analýzu niektorých parametrov ultrazvukových nástrojov. Pomocou tohto zariadenia je možné vykonať frekvenčnú analýzu a zmerať výkon ultrazvukovej zostavy bez záťaže, čím sa zjednodušuje ladenie sonotródy na požadovanú frekvenciu. Princíp zisťovania týchto parametrov spočíva v stanovení pracovnej frekvencie sonotródy, jej impedancie a prúdu. Analyzátor zmeria impedanciu ako funkciu frekvencie. Vyšle signál so sínusovým priebehom a amplitúdou s konštantnou veľkosťou. V testovanom zariadení sa zaznamenáva priebeh elektrického prúdu v závislosti na frekvencii. Z týchto informácii software zistí frekvenciu rezonančnú a antirezonančnú a hodnoty ich impedancií. [17]

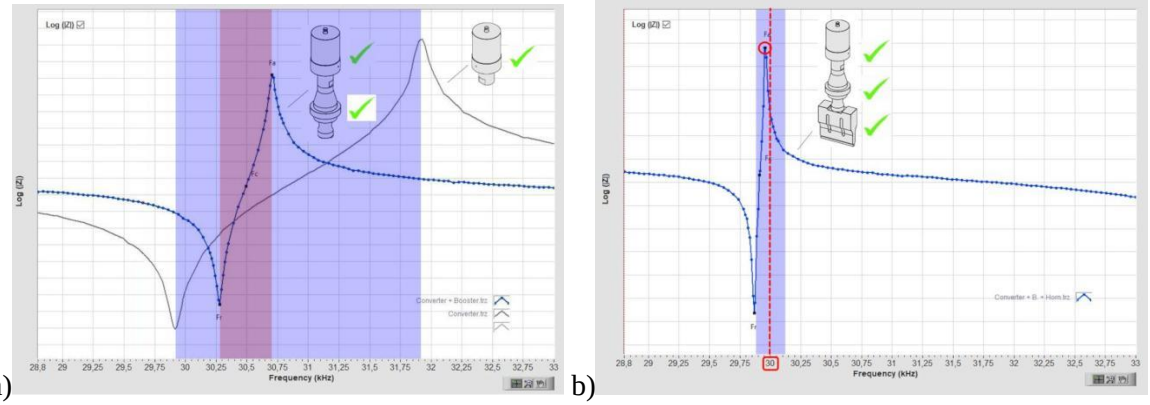
Zariadenie má rozpätie frekvencie, ktorú vie zmerať v intervale 1 kHz až 200 kHz. Rozlíšenie zariadenia je 1 Hz. Neistota merania frekvencie je ±0,05 % pri stanovených

podmienkach teploty 25°C. K zariadeniu je vybavenie na jeho kalibráciu, ktoré obsahuje ultrazvukový nástroj s pracovnou frekvenciou 100 kHz. Analyzátor je schopný zobraziť hodnotu pracovnej frekvencie sonotródy. Analyzátor spolu so softwarom umožňuje aj grafické zobrazenie výsledkov testovania. Testovanie sonotródy prebieha spolu s konvertorom a boostrom. Na zariadení je možné testovať aj samotný konvertor alebo konvertor spolu s boostrom. [19]

Obr. 3.12 TRZ analyzátor ultrazvukových nástrojov [19]

Po nevyhovujúcom výsledku testu zostavy konvertora, boostra a sonotródy, je potrebné zistiť, ktorý komponent je nezhodný. Test konvertora a boostra bez sonotródy vyhovujúci požiadavkám indikuje, že frekvencia sonotródy nie je vyhovujúca, inak je chybný iný komponent zostavy. Nefunkčnosť zostavy môže byť zapríčinená aj nefunkčnosťou sonotródy. Sonotróda sa stáva nefunkčnou po prasknutí. Vtedy sa stáva neopraviteľným nezhodným kusom. Každý ultrazvukový komponent v zostave funguje ako pásmový filter (obr. 3.13). Nevyladené frekvencie jednotlivých komponentov neznamenajú nefunkčnosť zostavy. Ak ich frekvencie nie sú vyladené, dochádza k prehrievaniu zostavy a preťažovaniu generátora. Preto je dôležité, aby bola sonotróda naladená na určitú frekvenciu, v rámci stanovenej tolerancie. Rovnako dôležité je naladenie konvertora a boostra na frekvenciu, ktorá spadá do stanoveného intervalu. Interval frekvencií konvertora a boostra je niekoľkonásobne väčší ako interval frekvencií, v ktorom musí byť naladená sonotróda. [18] [19]

a) b)



Obr. 3.13 Test a) konvertora a boostra, b) ultrazvukovej zostavy [18]

3.4.2 Bezkontaktný merač frekvencie

Pracovnú frekvenciu ultrazvukového nástroja je možné merať aj bezkontaktne. Merač SonicSniffer (obr. 3.14) je bezkontaktný merač pracovnej frekvencie, ktorý je vhodný na použitie priamo vo výrobnej hale. Je vhodný na meranie frekvencie v súvislosti s preventívnou údržbou ultrazvukových zostáv. Zaznamenávaním pracovnej frekvencie v pravidelných intervaloch môže prispieť k odhaleniu blížiacej sa poruche zariadenia, či varovať pred prípadnými nežiadúcimi udalosťami. Zmeny pracovnej frekvencie v čase indikujú degradáciu nástroja a opotrebovávanie styčných plôch. Degradovanie sonotródy vedie až k jej prasknutiu, čím sa sonotróda stáva nefunkčnou bez možnosti opravy. [20]

Meranie prebieha priamo počas prevádzky. Zariadenie pomocou analýzy zvukových signálov od ultrazvukovej zostavy určí pracovnú frekvenciu ultrazvukového nástroja. Frekvenčný rozsah zariadenia je od 1 do 80 kHz. Rozlíšenie je 10 Hz s neistotou merania ±8 Hz pre signály s trvaním dlhším ako 0,35 ms. [20]

Obr. 3.14 Bezkontaktný merač frekvencie SonicSniffer+ [21]

3.4.3 Meranie amplitúdy

Meranie veľkosti amplitúdy ultrazvukových kmitov je možné realizovať nasledovnými spôsobmi. Meranie amplitúdy vyžaduje veľkú presnosť, pretože kmity majú vysokú frekvenciu a zároveň malú amplitúdu. Amplitúda ultrazvukových kmitov je rádovo v jednotkách až desiatkach mikrometrov. Laserový interferometer či optické snímače sú najvhodnejšie na meranie veľkosti amplitúdy ultrazvukových kmitov. Tieto metódy sú však ekonomicky nákladné a na používanie v praxi nepraktické. [22]

V praxi sa na zisťovanie veľkosti amplitúdy ultrazvukových kmitov používa špeciálne zariadenie (obr. 3.15). Meradlo používané na meranie veľkosti amplitúdy v praxi funguje tak, že indikátor sa oprie o funkčnú plochu sonotródy, spustí sa mód zvárania. Skúšobná tyč vykoná teleskopický pohyb a na displeji sa zobrazí veľkosť amplitúdy kmitov. Meradlo je možné použiť pre interval frekvencií od 10 do 100 kHz. Merací rozsah je 3 až 100 µm s rozlíšením 1 µm. Presnosť, s ktorou je meradlo schopné merať je 2,5 %. Používa sa na meranie amplitúdy ultrazvukových nástrojov na zváranie, rezanie či sonochémiu. Týmto zariadením je možné merať nielen výstupnú amplitúdu ultrazvukových nástrojov, ale aj amplitúdu boostra či konvertora. [22]

Obr. 3.15 Zaradenie na meranie amplitúdy v praxi model YP0901B [22]

4 ŠTATISTICKÉ RIADENIE KVALITY

Kvalita je súčasťou každej činnosti vykonávanej v spoločnosti. Cieľom je zabezpečiť, aby výrobky a služby spĺňali požiadavky a očakávania zákazníkov. Plánovaný a náhodný účinok na zainteresovaných účastníkov a schopnosť vyhovieť požiadavkám zákazníkov stanovuje kvalitu produktu. Pri kontrole kvality výrobku vystupujúceho z procesu je dôležité vyselektovať kusy, ktoré tieto požiadavky a stanovené parametre nespĺňajú. [16]

Štatistické metódy sú súčasťou procesov zameraných na zlepšovanie kvality. Efektívne riadenie kvality sa skladá z troch hlavných činností. Plánovanie kvality je strategická činnosť, ktorá zahŕňa identifikáciu interných a externých zákazníkov a ich potrieb. Zabezpečovanie kvality je súbor činností, ktoré zaisťujú úroveň kvality pomocou dokumentovania systému kvality. Dokumentované sú štyri oblasti: politika kvality, postupy, pracovné inštrukcie a záznamy. Riadenie a zlepšovanie kvality zabezpečuje, aby boli splnené požiadavky. Produkt má v oblasti kvality kľúčové charakteristiky, ktoré sú štatisticky riadené. Cieľom kontroly a zlepšovania kvality je dosiahnutie čo najnižšej variability týchto charakteristík. Vysoká variabilita je často prameňom nízkej kvality, preto je dôležité identifikovať faktory, ktoré variabilitu zvyšujú a eliminovať ich. [16]

Štatistické riadenie kvality využíva rozličné nástroje. Výber vhodných nástrojov na riadenie kvality závisí od mnohých faktorov. Primárne sa tieto nástroje delia na dve skupiny. Do prvej skupiny patria nástroje, ktoré monitorujú kvalitu priebežne a do druhej tie, ktoré neumožňujú bezprostredné monitorovanie procesu. Druhý spôsob kontroly kvality výrobkov je postavený na základe odhalenia nezhodných kusov zo súboru hotových výrobkov. Medzi takéto nástroje patrí napríklad plánovaný experiment. Využíva sa na identifikáciu faktorov ovplyvňujúcich proces najmä počas fáze vývoja a v počiatočnom štádiu výroby. Vďaka identifikácii významných faktorov je možné znížiť variabilitu. Po stanovení významných premenných, ktoré majú vplyv na variabilitu procesu sa využíva priebežné štatistické riadenie kvality. Spočíva v predchádzaní problému priebežnou kontrolou s možnosťou zasiahnuť do procesu v prípade potreby. Spomedzi nástrojov na online riadenie kvality sa často využívajú regulačné diagramy. Štatistická regulácia procesu (SPC) a plánované experimenty sú využívané na riadenie a zlepšovanie kvality. [23]

Medzi sedem základných nástrojov riadenia kvality patria: [24]

- histogramy,
- Paretove diagramy,
- Ishikawove diagramy inak nazývané aj diagramy rybacej chrbtice alebo diagramy príčiny a následku,
- vývojové diagramy,
- kontrolné tabuľky a záznamy,
- bodové diagramy,
- štatistická regulácia procesu – regulačné diagramy.

Riadenie kvality môže byť zabezpečované aj pomocou štatistickej prebierky. Je úzko spätá s kontrolou a testovaním výrobku v rôznych štádiách výrobného procesu. Základom metódy štatistickej prebierky je kontrola náhodnej vzorky z dávky. Riadenie kvality pomocou štatistickej prebierky nedáva spätnú väzbu pre proces vývoja, návrhu či výroby. [23]

4.1 Variabilita procesu

Každý proces má určitú variabilitu. Celková variabilita procesu sa delí na dve podskupiny Prvý typ variability je náhodný, druhý reprezentuje reálne zmeny. Tieto podskupiny sú určené tým, aký pôvod majú príčiny, ktoré variabilitu procesu spôsobujú. [25]

Náhodná variabilita má pôvod príčin náhodný. Sú to príčiny, ktoré sú procesu prirodzené, obvyklé, inherentné. Tieto príčiny sú nekontrolovateľné, sú stále prítomné, ťažko sa dajú identifikovať. Jednotlivo tieto príčiny nemajú veľký vplyv na celkovú variabilitu procesu, ale spolu je ich podiel v rámci celkovej variability významný. Náhodné príčiny majú vplyv na rozdelenie pravdepodobnosti charakteristík kvality. Toto rozdelenie je zásluhou účinku náhodných príčin stabilné s možnosťou odhadu parametrov rozdelenia. Na základe toho je možné očakávať určité správanie procesu. Pomocou tohto javu je možná regulácia procesu. Ak sa v procese nevyskytujú iné príčiny, len náhodné, je považovaný za štatisticky zvládnutý. [24] [25]

Variabilita procesu spôsobená vymedziteľnými príčinami indikuje kolísanie procesu alebo nejakú reálnu zmenu v jeho priebehu. Nie je náhodná, ale nie je možné predpovedať jej výskyt. Vymedziteľné príčiny sa nevyskytujú v procese permanentne. Je možné ich spozorovať, a tým pádom môžu byť odstránené. Vymedziteľné príčiny nie sú prirodzené, sú umelo vytvorené a je možné ich kontrolovať. Po zistení výskytu takýchto príčin je možné ich odstrániť, čím bude proces opäť považovaný za štatisticky zvládnutý. [25] [26]

4.2 Popisná štatistika

Popisná štatistika patrí medzi štatistické metódy. Podáva kvantitatívne informácie o hodnotených dátach. Základnými charakteristikami dát analyzovaných pomocou popisnej štatistiky sú stredné hodnoty, rozptyl dát. Stredná hodnota býva vyjadrená pomocou priemeru. Charakteristika rozptylu môže byť vyjadrená dvoma spôsobmi, a to výberovým rozptylom alebo výberovou smerodajnou odchýlkou. Tieto charakteristiky, ale aj iné informácie, ktoré popisná štatistika poskytuje bývajú vyjadrené graficky pre lepšiu názornosť. Na zobrazenie informácií v grafickej podobe sa využívajú niektoré nástroje riadenia kvality, napríklad histogramy, bodové diagramy či diagramy trendov. [27]

Vzorka zo základného súboru má byť náhodná a má byť pre celý súbor dát reprezentatívna. Dáva objektívny pohľad na celý súbor. Náhodná vzorka je vyberaná podľa kritéria, že jednotlivé pozorovania nie sú na sebe závislé a majú rovnaké rozdelenie (normálne, binomické, Poissonovo). Z konečne veľkého súboru s veľkosťou N je vybraná vzorka s veľkosťou n. Každá náhodná vzorka zo základného súboru má rovnakú pravdepodobnosť, že bude vybraná. [23]

Náhodná vzorka má niekoľko štatistických parametrov na jej objektívny popis. Vzorku reprezentuje odhad strednej hodnoty (najčastejšie aritmetický priemer) a odhad variability (výberový rozptyl, výberová smerodajná odchýlka a rozpätie). Rozpätie vyjadruje rozdiel najvzdialenejších hodnôt zo súboru dát, teda maximálnej a minimálnej hodnoty. Výberový rozptyl podáva informáciu o tom, ako sú dáta vzdialené od vyjadrenej strednej hodnoty. Priemerné vzdialenosti sú vyjadrené pomocou smerodajnej odchýlky, ktorá je odmocninou rozptylu. Súčet jednotlivých rozptylov je výsledný rozptyl procesu. Smerodajné odchýlky nie je možné spolu sčítať. Výberový rozptyl je určený vzťahom 4.1: [26]

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1} \tag{4.1}$$

Kde: s^2 – výberový rozptyl
X_i – individuálna hodnota
$\bar{X}$ – priemer individuálnych hodnôt
n – počet individuálnych hodnôt

Odhad strednej hodnoty môže byť vyjadrený troma charakteristikami. Modus vyjadruje najviac sa vyskytujúcu hodnotu v súbore dát. Prostredná hodnota v zostupne alebo vzostupne zoradenom súbore dát sa nazýva medián. Ak sú v zoradenom súbore dát prostredné dve hodnoty, medián tohto súboru je ich priemer. Na rozdiel od aritmetického priemeru, medián nie je ovplyvnený odľahlými hodnotami dát. Okrem normálneho rozdelenia je medián a modus rozdielny. Aritmetický priemer vybranej vzorky, nazývaný aj výberový priemer je určený vzťahom: [26]

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \tag{4.2}$$

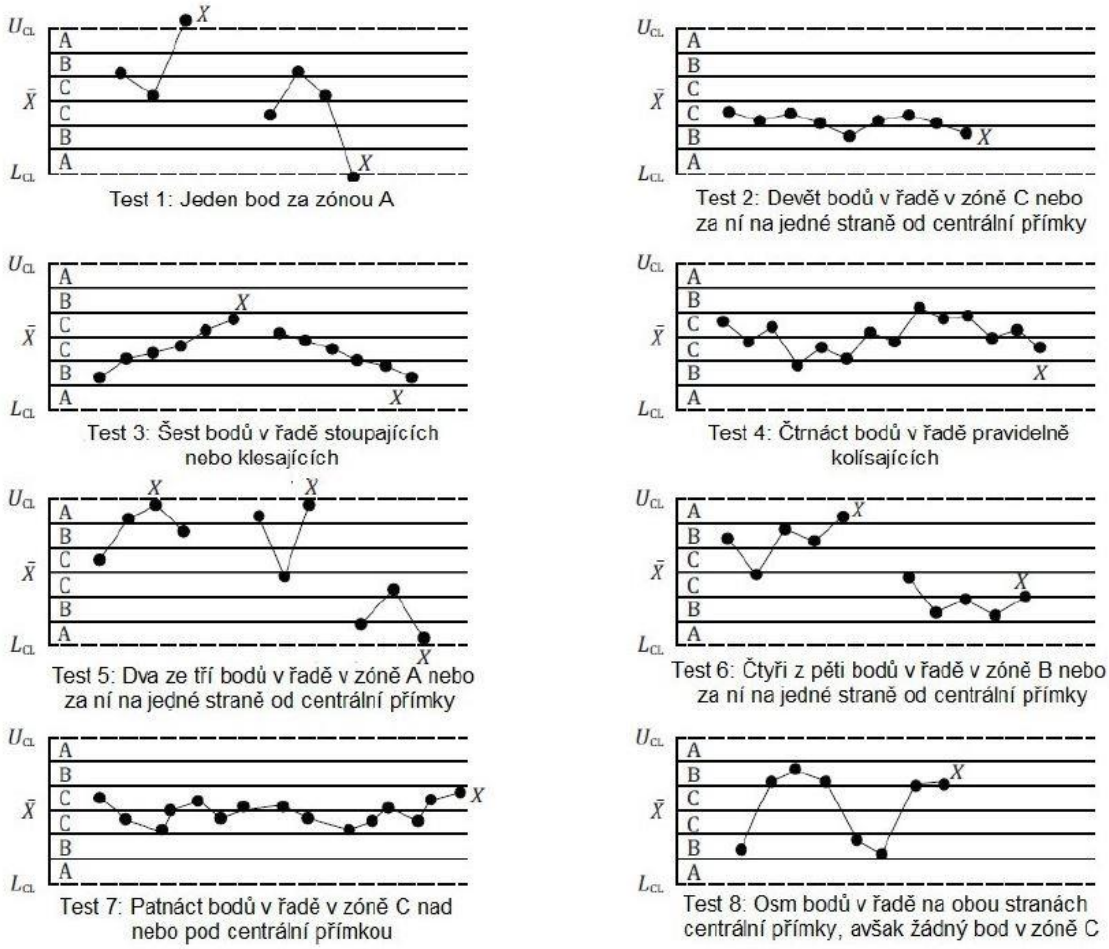
4.3 Shewhartove regulačné diagramy

Regulačný diagram je nástroj na zabezpečenie stabilného procesu štatistickou reguláciou. Regulácia procesu napomáha k plneniu požiadaviek na produkty. Regulačné diagramy v časovom slede vyobrazujú dáta, ktoré boli zozbierané v procese. Znázorňujú aktuálny stav procesu. Regulačné diagramy prehľadne graficky znázorňujú regulačné medze a namerané dáta. Medze sú stanovené variabilitou procesu, ktorá je vyjadrená smerodajnou odchýlkou. Zaznamenáva priebeh určitého znaku kvality v procese. Na základe regulačných diagramov sa dá posúdiť, či je proces štatisticky zvládnutý – vyskytujú sa len prirodzené zoskupenia dát. [25]

Všeobecne regulačný diagram obsahuje tri priamky. Stredná priamka predstavuje priemernú hodnotu skúmaného znaku kvality. Horná a dolná regulačná medza znázorňujú hranice pásma, ktoré s určitou pravdepodobnosťou obsahuje získané hodnoty. Predpokladom je štatisticky zvládnutý proces, ktorý je ovplyvnený len náhodnými príčinami. V prípade prekročenia týchto hraníc ide o štatisticky nezvládnutý proces a mali by byť vykonané nápravné opatrenia, preto sa nazývajú aj akčné medze. Pri vzdialenosti medzi hornou regulačnou medzou (UCL) a dolnou regulačnou medzou (LCL) vyjadrenou ako ±3 smerodajné odchýlky je pravdepodobnosť, že hodnoty zo základného súboru s normálnym rozdelením budú ležať v pásme medzi LCL a UCL 99,73 %. [24]

V regulačných diagramoch bývajú znázornené aj medze na úrovni ±2 smerodajné odchýlky. Tie majú signalizovať, že proces sa môže dostať do stavu, kedy nebude štatisticky zvládnutý. Prekročenie medzí nevyžaduje nutne vykonanie nápravných opatrení ale varuje, preto sa nazývajú varovné medze. [25]

Medze na úrovni ±1, ±2 a ±3 smerodajné odchýlky rozdeľujú regulačný diagram na zóny A, B a C. Tieto zóny napomáhajú v odhalení vymedziteľných príčin pôsobiacich na proces. Jednotlivé body ležia vždy v niektorej zo zón alebo mimo nich v určitom zoskupení. Podľa tohto zoskupenia bodov existujú testy vymedziteľných príčin (obr. 4.1). [25]



Obr. 4.1 Testy vymedziteľných príčin [25]

V hodnotení procesu pomocou regulačných diagramov sa môžu vyskytovať dva druhy chýb. Chyba prvého druhu je typ chyby, ktorý vznikne pri zdanlivo štatisticky nezvládnutom procese, ktorý je v skutočnosti zvládnutý. Znázornený bod je náhodou mimo pásma medzi dolnou a hornou regulačnou medzou. Veľkosť rizika chyby prvého druhu je 0,27 %, pokiaľ sa využívajú hraničné medze vo vzdialenosti 3 sigma a regulované dáta majú normálne rozdelenie. Chyba druhého druhu nastáva, ak je proces zdanlivo štatisticky zvládnutý, pretože regulované dáta náhodou ležia v stanovenom pásme. V skutočnosti je však proces nezvládnutý. Veľkosť rizika pri chybe druhého druhu nie je možné určiť. Výskyt oboch chýb spôsobuje ekonomické následky. V prvom prípade je hľadaná príčina, ktorá v skutočnosti neexistuje. V druhom prípade sa príčiny nehľadajú a proces sa zdá byť v poriadku. Napriek tomu sa môžu vyrábať nezhodné kusy, ktoré nebudú včas odhalené. [25]

4.3.1 Typy Shewhartových regulačných diagramov

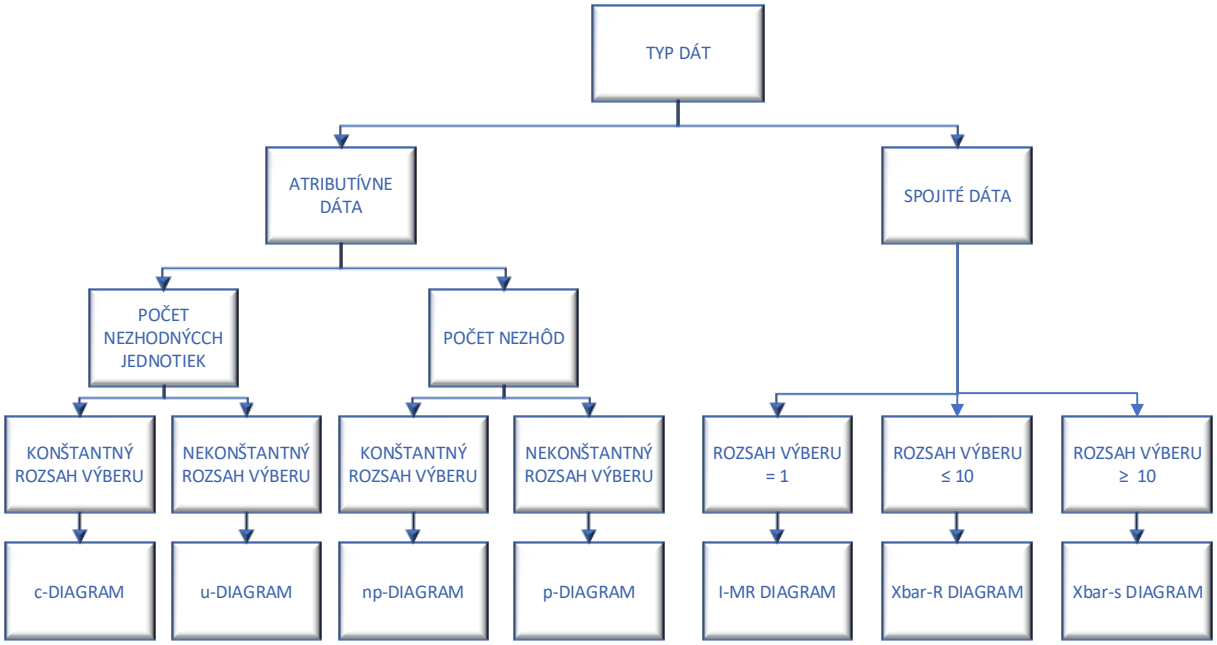
Typ regulačného diagramu sa volí na základe informácie o type skúmaných dát. Pre spojité dáta sa volia Shewhartove regulačné diagramy pre reguláciu meraním. Ďalej sa podľa počtu dát v podskupine volí jeden z diagramov: [26]

- RD pre priemer a smerodajnú odchýlku,
- RD pre priemer a rozpätie,
- RD pre individuálne hodnoty a kĺzavé rozpätie.

Pre dáta atributívne sa RD rozdeľujú podľa toho, či sa skúma počet nezhodných kusov alebo počet defektov, chýb. Dáta, ktoré udávajú počet nezhodných kusov majú zvyčajne binomické rozdelenie, dáta o počte defektov mávajú rozdelenie Poissonovo: [26]

- RD pre podiel nezhodných kusov v jednotlivých podskupinách (p-diagram),
- RD pre počet nezhodných kusov v podskupinách (np-diagram),
- RD pre počet defektov vo vybranej vzorke (c-diagram),
- RD pre počet defektov na jednotku vybranej vzorky (u-diagram).

Diagramy sa líšia sa v tom, že pri np-diagrame a c-diagrame je počet vybraných jednotiek do podskupiny rovnaký. V p-diagrame a u-diagrame je vyjadrený pomer, čo nepožaduje podmienku rovnakého počtu jednotiek v podskupinách. Kritériá voľby regulačného diagramu sú na obr. 4.2. [26]



Obr. 4.2 Kritériá voľby regulačného diagramu [25]

Ďalej budú bližšie popísané len regulačné diagramy meraním so zameraním na regulačné diagramy individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí, pretože budú využívané v praktickej časti práce.

4.4 Shewhartove regulačné diagramy pre reguláciu meraním

Regulačné diagramy pre reguláciu meraním sú využívané pri regulovaní procesu, ktorého vybraný znak kvality je možné zmerať, je možné ho numericky vyjadriť. Z nameraných hodnôt sa vypočíta aritmetický priemer a variabilita dát vyjadrená pomocou smerodajnej odchýlky alebo rozpätia. [23]

Regulačné diagramy meraním poskytujú komplexnejšie informácie o procese ako iný typ regulačných diagramov. Graficky znázorňujú správanie procesu, na ktorý sú aplikované. Vedia odhaliť možnú vznikajúcu zmenu v procese, kým prekročí hranice, kedy začnú vznikať nezhodné kusy. Získavanie údajov meraním vyžaduje menší rozsah výberu. Získavanie dát je finančne náročnejšie, ale keďže nevyžaduje také množstvo vzoriek ako regulačné diagramy porovnávaním, v konečnom dôsledku môže byť z ekonomického hľadiska výhodnejšie. [25]

Predpokladom je, že namerané dáta majú normálne rozdelenie – Gaussovo. Tento predpoklad je základom pre určenie vzťahov na výpočet regulačných medzí. Normálne rozdelenie je dôležité najmä pre analýzu spôsobilosti procesu. [25]

4.4.1 Stanovenie regulačných medzí a centrálnej priamky

Odhadované regulačné medze UCL a LCL v Shewhartových regulačných diagramoch meraním sa určia pomocou matematických operácií a konštánt uvedených v tab. 4.1. Všetky koeficienty do n=25 sú uvedené v norme ČSN ISO 7870-2. [25]

Tab. 4.1 Súčinitele pre výpočet regulačných medzí [25]

Súčinitele pre regulačné medze						
n	A_2	A_3	B_3	B_4	D_3	D_4
2	1,880	2,659	-	3,267	-	3,267
3	1,023	1,954	-	2,568	-	2,575
4	0,729	1,628	-	2,266	-	2,282
5	0,577	1,427	-	2,089	-	2,114
6	0,483	1,287	0,030	1,970	-	2,004
7	0,419	1,182	0,118	1,882	0,076	1,924
8	0,373	1,099	0,185	1,815	0,136	1,864
9	0,337	1,032	0,239	1,761	0,184	1,816
10	0,308	0,975	0,284	1,716	0,223	1,777

Centrálne priamky diagramu $\bar{X}$-R sa pre $\bar{\bar{X}}$ určia ako priemer z priemerov v podskupinách a pre $\overline{R}$ ako priemer z rozpätia v podskupinách. Regulačné medze pre priemer regulačného diagramu $\bar{X}$-R sú stanovené vzťahmi 4.3 a 4.4: [26]

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A_2\overline{R} \tag{4.3}$$

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A_2\overline{R} \tag{4.4}$$

Kde LCL – dolná regulačná medza
UCL – horná regulačná medza
$\bar{\bar{X}}$ – priemer z priemerov v podskupinách
$\overline{R}$ – priemer z rozpätia v podskupinách
A_2, A_3, B_3, B_4, D_3, D_4 – súčinitele

Regulačné medze pre regulačný diagram rozpätia sa určia pomocou vzťahov 4.5 a 4.6: [26]

$$LCL = D_3\overline{R} \tag{4.5}$$

$$UCL = D_4\overline{R} \tag{4.6}$$

Centrálna priamka pre priemer sa stanoví rovnako ako v predchádzajúcom type diagramu. Pre smerodajné odchýlky sa určí ako priemer zo smerodajných odchýlok v podskupinách $\overline{s}$. Regulačné medze pre priemer regulačného diagramu $\bar{X}$-s sú stanovené vzťahmi 4.7 a 4.8: [26]

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A_3\overline{s} \tag{4.7}$$

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A_3\overline{s} \tag{4.8}$$

Kde $\overline{s}$ – priemer smerodajných odchýlok v podskupinách

Pre diagram smerodajných odchýlok sa regulačné medze určia vzťahmi 4.9 a 4.10: [26]

$$LCL = B_3\overline{s} \tag{4.9}$$

$$UCL = B_4\overline{s} \tag{4.10}$$

Regulačný diagram individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí nevyžaduje koeficienty, ktoré sa menia s rozsahom podskupiny, pretože n je vždy rovné 1. Centrálne priamky sú priemerné hodnoty nameraných dát a kĺzavých rozpätí. Pre individuálne hodnoty sú regulačné medze určené vzťahmi 4.11 a 4.12: [25]

$$LCL = \bar{X} - 2{,}660\overline{MR} \tag{4.11}$$

$$UCL = \bar{X} + 2{,}660\overline{MR} \tag{4.12}$$

Kde $\bar{X}$ – priemer individuálnych hodnôt

$\overline{MR}$ – priemer kĺzavých rozpätí

Dolná regulačná medza pre kĺzavé rozpätie je 0. Horná regulačná medza sa stanoví zo vzťahu 4.13: [25]

$$UCL = 3{,}267\overline{MR} \tag{4.13}$$

4.4.2 Regulačný diagram pre individuálne hodnoty a kĺzavé rozpätia

Regulačné diagramy individuálnych hodnôt graficky zobrazujú priamo namerané hodnoty bez vytvárania podskupín. Využívajú sa, keď sa dáta nedajú logicky rozdeliť do podskupín alebo ak nie je dostatok dát na vytvorenie iného typu regulačného diagramu. Nedostatok dát môže mať viacero príčin. Jednou z nich je, že množstvo vyrobeného produktu je nedostatočné na tvorbu podskupín. Ďalším dôvodom je ekonomické hľadisko deštruktívneho testovania vzoriek. Regulačné diagramy individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí sa používajú aj v situáciách, kedy sa vplyv okolitých podmienok mení príliš rýchlo. Aplikuje sa najmä pri 100% kontrole výrobkov. [23] [26]

Kĺzavé rozpätie MR vyjadruje rozdiel medzi po sebe nameranými individuálnymi hodnotami. Je definované vzťahom 4.14: [23]

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}| \tag{4.14}$$

4.5 Analýza spôsobilosti

V tejto kapitole bude popísaná analýza spôsobilosti. Prvá časť je zameraná na analýzu spôsobilosti procesu. Okrem analýzy spôsobilosti procesu sa stanovuje aj analýza spôsobilosti meracieho systému. Obsahom bude postup stanovenia indexov spôsobilosti a vyhodnotenie stavu procesu či spôsobilosti meracieho systému pri zadanej tolerancii.

4.5.1 Spôsobilosť procesu

Na kvalitu produktu má vplyv aj kvalita výrobného procesu. Výsledkom správne nastaveného procesu je produkt, ktorý spĺňa požiadavky naň kladené. Tolerancia procesu a rozptyl dát sú hlavné charakteristiky procesu z hľadiska požiadaviek zákazníka. Tolerancia procesu je určená rozdielom hornej a dolnej medze špecifikácie. Spôsobilosť procesu je adekvátnym kritériom na posudzovanie kvality procesu. Spôsobilosť poskytuje relevantné informácie o schopnosti procesu stabilne vyrábať výrobky splňujúce špecifikáciu, čím napomáha

k správnemu riadeniu kvality. Spôsobilosť procesu sa vyjadruje pomocou indexov spôsobilosti procesu. [24] [28]

Index spôsobilosti procesu c_p vyjadruje pomer požadovanej variability procesu a jeho skutočnej variability. Index c_p nezohľadňuje vychýlenie procesu. Vyjadruje schopnosť analyzovaného znaku kvality vojsť sa do tolerančného poľa. Index spôsobilosti procesu sa stanoví pomocou vzťahu 4.15. [24]

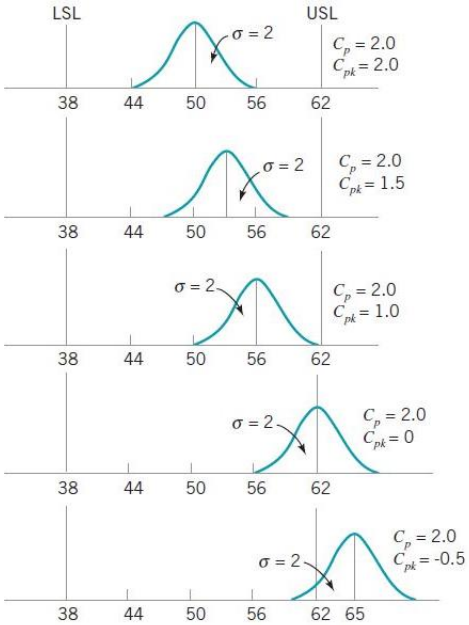
$$c_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \tag{4.15}$$

Kde USL – horná medza špecifikácie (upper specification limit)
LSL – dolná medza špecifikácie (lower specification limit)
σ – štandardná odchýlka procesu (vyjadrená smerodajnou odchýlkou s)

Štandardná odchýlka σ často nie je známa, preto sa pri stanovovaní indexu spôsobilosti procesu c_p aj c_{pk} nahrádza výberovou smerodajnou odchýlkou s. Index spôsobilosti procesu sa využíva na vyjadrenie spôsobilosti vycentrovaného procesu s hornou aj dolnou tolerančnou medzou. [23]

Na vyjadrenie spôsobilosti procesu s ohľadom na polohu strednej hodnoty procesu sa využíva kritický index spôsobilosti c_{pk}. Preto je kritický index spôsobilosti menší alebo rovný ako index c_p. V prípade, že sú tieto indexy rovnaké, znamená to, že proces je centrovaný. Rozdielne hodnoty indexov c_p a c_{pk} v závislosti na variabilite a polohe procesu sú znázornené na obr. 4.3. Spôsobilosť procesu sa vyjadruje pomocou kritického indexu spôsobilosti aj v prípade jednostrannej tolerancie, kedy sa použije len ten člen, ktorého tolerančná medza je známa. Kritický index spôsobilosti procesu sa určí podľa vzťahu 4.16: [23]

$$c_{pk} = min\left\{\frac{USL - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right\} \tag{4.16}$$



Obr. 4.3 Vzťah medzi indexami c_p a c_{pk} [23]

Na správne stanovenie spôsobilosti procesu musí byť splnených niekoľko predpokladov. Prvým predpokladom je, že analyzovaný znak kvality musí mať normálne rozdelenie. Ďalším predpokladom je štatisticky zvládnutý proces. Ak má proces hornú aj

dolnú tolerančnú medzu, teda jeho tolerancia je obojstranná, pridáva sa aj tretí predpoklad. Tretím predpokladom je poloha strednej hodnoty procesu. Musí byť centrovaná a nachádzať sa v tolerančnom poli. [23]

Na vyhodnotenie spôsobilosti procesu sa index spôsobilosti porovnáva s hodnotou 1,33 (tab.4.2). Pod vplyvom prísnejších požiadaviek na kvalitu a vývojom technológií sa táto hodnota zvyšuje. Proces je považovaný za spôsobilý ak je hodnota indexu vyššia alebo rovná ako stanovená hodnota (najčastejšie 1,33). Hodnota 1,33 vyjadruje, že vzdialenosť strednej hodnoty analyzovaného procesu od tolerančných medzí je 4σ. [24]

Tab. 4.2 Hodnoty indexov spôsobilosti [29]

Hodnota indexu	Hodnotenie procesu / systému merania
c_p, $c_g < 1$	nespôsobilý
c_{pk}, $c_{gk} < 1$	
$1 \leq c_p$, $c_g < 1{,}33$	podmienečne spôsobilý
$1 \leq c_{pk}$,$c_{gk} < 1{,}33$	
c_p, $c_g \geq 1{,}33$	spôsobilý
c_{pk},$c_{gk} \geq 1{,}33$	

Dôvodom nespôsobilosti procesu môže byť viacero príčin. Nespôsobilosť z dôvodu nesprávneho nastavenia stroja sa prejaví tým, že proces má požadovanú variabilitu, ale nie je centrovaný. Keďže index c_p zahŕňa iba variabilitu procesu, hodnota $c_p \geq 1{,}33$. Po zohľadnení centrovania procesu $c_{pk} < 1{,}33$. Pri zistení nespôsobilosti z dôvodu vysokej variability sú oba indexy menšie ako hodnota 1,33. [24]

4.5.2 Spôsobilosť systému merania

Meranie je neoddeliteľnou súčasťou kvality. Spôsobilosť systému merania popisuje zložku celkovej variability, ktorou prispieva meradlo a celý systém merania. Vyjadruje aj vhodnosť použitia konkrétneho meradla na dané meranie. Prvým krokom v určovaní spôsobilosti systému merania je zber dát. Dáta sa získavajú pomocou merania na meracom zariadení. Zariadenie na meranie môže byť meradlo, referenčný materiál či pomocné zariadenie potrebné k vykonaniu procesu merania. Systém merania sa skladá z prístrojov na meranie, etalónov, postupov merania. Zahŕňa aj personálne zabezpečenie, software či prostredie. [23] [30]

Spôsobilý systém merania zabezpečuje získavanie správnych dát o procese pomocou štatistických charakteristík. Základnou vlastnosťou merania je jeho presnosť, ktorá sa skladá z dvoch zložiek. Zhodnosť zachytáva vplyv náhodných chýb na meranie. Nezhodnosť je vyjadrená pomocou smerodajnej odchýlky nameraných dát. Strannosť (bias) merania vyjadruje celkovú systematickú chybu merania. Vyjadruje vzdialenosť medzi referenčnou a strednou hodnotou procesu získanou opakovaným meraním. Strannosť zahŕňa strannosť operátora, meradla a ďalšie formy strannosti. Do iných foriem strannosti je zahrnutý vplyv miesta a prostredia. Reprodukovateľnosť (reproducibility) merania vyjadruje variabilitu priemeru merania spôsobenú ľudským činiteľom. Vyjadruje rozdiely v nameraných dátach zmeraných rôznymi operátormi. Opakovateľnosť (repeatability) merania vyjadruje zložku variability spôsobenej pri opakovanom meraní rovnakého parametru, rovnakým meradlom a jedným pracovníkom. Stabilita (stability) merania znamená, že sa nemení strannosť merania v dlhšom časovom úseku. Linearita (linearity) merania vyjadruje, že namerané dáta budú mať

relatívne rovnaké hodnoty. Tieto vlastnosti prispievajú k variabilite nameraných dát. Identifikáciou jednotlivých vlastností merania je možné identifikovať príčiny vzniku variability. [23] [24] [26]

Spôsobilosť meracieho systému sa vyjadruje pomocou indexov c_g a c_{gk}. Princíp stanovovania indexov spôsobilosti meracieho systému je podobný ako pri stanovovaní indexov spôsobilosti procesu c_p a c_{pk}. Index vyjadruje pomer variability merania voči stanovenej tolerancii. Na stanovenie indexov spôsobilosti je potrebné získať dáta. Dáta majú byť merané jedným pracovníkom opakovane na určenom produkte. Odporúčaný počet meraní je 50, najmenej 25. Meranie sa má uskutočniť v krátkom časovom intervale a za rovnakých podmienok. Indexy vyjadrujú, či výsledok merania leží v zvolenom tolerančnom poli meracieho prístroja s pravdepodobnosťou 99,73 %. Zvolené tolerančné pole je zvyčajne stanovené na 20 % z tolerancie meraného parametru.

Index c_g vyjadruje opakovateľnosť merania, stanoví sa podľa vzťahu 4.17: [30]

$$c_g = \frac{0{,}2T}{6s} \tag{4.17}$$

Kde T – tolerancia meraného rozmeru
s – výberová smerodajná odchýlka

Kritický index spôsobilosti systému merania informuje o opakovateľnosti merania so zohľadnením strannosti procesu. Index c_{gk} je vždy menší alebo rovný indexu c_g. Rovnako ako pri indexoch spôsobilosti procesu, ak sa rovnajú, poloha merania je centrovaná. Kritický index spôsobilosti sa stanoví podľa vzťahu 4.18: [30]

$$c_g = \frac{0{,}1T - |\bar{x} - x_r|}{6s} \tag{4.18}$$

Kde $\bar{x}$ – priemer meranej charakteristiky
x_r – referenčná hodnota

Vyhodnotenie spôsobilosti systému merania sa vyhodnocuje podobne ako spôsobilosť procesu. Hodnoty indexov sa porovnávajú s hodnotou 1,33 (tab. 4.2). [30]

4.6 Štatistická prebierka porovnávaním

Jeden z aspektov zabezpečovania kvality je kontrola materiálu či produktov v rozličných štádiách spracovania a výroby. Štatistická prebierka je jednou z najstarších metód, ktoré sú používané v súvislosti s kontrolou a rozhodovaním o produktoch pri zabezpečovaní ich kvality. Primárne sa využíva pri vstupnej kontrole materiálu alebo produktov od dodávateľa, ktoré sú dodávané v dávkach. Veľkosť dávky určuje veľkosť vybranej vzorky. Podľa výsledkov kontroly kvality určitých charakteristík a vlastností súboru vzoriek z dávky je celá dávka prijatá alebo zamietnutá. Štatistická prebierka nemá využitie len na vstupnej kontrole. Ďalšie využitie je odobratie vzoriek a ich následná kontrola vlastných produktov v rôznych fázach výroby. Na základe kontroly týchto vzoriek je dávka posunutá na ďalšie spracovanie alebo je zamietnutá a určená na opravu, prepracovanie alebo je určená na vyradenie. [23]

Existujú dva extrémne prípady rozhodovania o prijatí dávky. Prvý prípad je prijatie dávky bez akejkoľvek kontroly. Druhým extrémnym prípadom je kontrola každého kusu dávky. Pri kontrole každého kusu je odhalený každý nezhodný kus. Takýto spôsob kontroly je časovo náročný, teda aj ekonomicky nevýhodný. Medzi týmito dvoma hraničnými prípadmi je kompromisom štatistická prebierka. Využitie štatistickej prebierky je ekonomicky

výhodnejšie, ak je kontrola každého kusu príliš nákladná, vyžaduje množstvo času alebo testovanie produktov je deštruktívne. Nevyžaduje toľko personálnych zdrojov ako 100% kontrola. Ekonomické hľadisko štatistickej prebierky je ovplyvnené správnym výberom preberacieho plánu. Hlavnou nevýhodou štatistickej prebierky je riziko prijatia dávky s nezhodnými kusmi a zamietnutie dávky s jednotkami, ktoré vyhovujú špecifikácii a požiadavkám zákazníka. [23] [24]

Vybrané vzorky majú byť náhodné a majú dávku reprezentovať. Nenáhodným výberom vzoriek vzniká skreslený pohľad na celú dávku a efektívnosť kontroly tak klesá. Efektivita štatistickej prebierky závisí aj na vlastnostiach dávky. Homogenita dávky je prvou dôležitou vlastnosťou. Jednotlivé kusy v dávke majú byť vyrobené za rovnakých podmienok, na tom istom stroji obsluhovanom rovnakým operátorom v krátkom časovom úseku. Vstupný materiál sa tiež v rámci jednej dávky nemá výrazne odlišovať. Pomocou štatistickej prebierky je ekonomicky výhodnejšie kontrolovať väčšiu dávku. [23]

Štatistická prebierka sa delí podľa niekoľkých kritérií. Prvé kritérium rozlišuje štatistickú prebierku meraním a porovnávaním. Kontrole môže podliehať každá dávka alebo je aplikovaná občasná prebierka, kedy sa nekontroluje každá jedna dávka, ale kontrole podlieha pravidelne určitá dávka v poradí. Podľa spôsobu ako sa naloží s dávkou po jej zamietnutí sa delia na opravnú a bezopravnú. Opravný (rektifikačný) spôsob spočíva v tom, že zamietnutá dávka nie je vrátená dodávateľovi. Jednotky, ktoré nespĺňajú špecifikáciu sú identifikované po kontrole každej jednotky v dávke. Nezhodné jednotky sa nahradia zhodnými a dávka je prijatá. Pri nerektifikačnom spôsobe prebierky je zamietnutá dávka celá vrátená dodávateľovi. [24]

Pri kontrole porovnávaním môže byť jednotka len zhodná alebo nezhodná. Nemôže mať žiadne iné označenie. Kontrola porovnávaním zahŕňa aj kontrolu, pri ktorej sa určuje počet nezhôd na jednotku. Zhodnosť sa určuje vzhľadom na špecifikované požiadavky. Dôležitým termínom štatistickej prebierky porovnávaním je prípustná medza kvality (AQL). Označenie AQL (acceptance quality limit) sa používa na vyjadrenie najhoršieho prijateľného stupňa kvality vyjadreného ako priemer procesu. Priemer procesu popisuje výrobný proces. Stanovená hodnota AQL má byť menšia ako priemer, aby nedochádzalo k nadbytočnému zamietaniu dávok. AQL sa vyjadruje buď ako percento nezhodných kusov, kedy hodnota AQL nesmie byť väčšia ako 10 %, alebo ako počet nezhôd na 100 kusov, kedy je povolená maximálna hodnota AQL 1000 nezhôd na 100 kusov. Hodnota AQL môže byť rôzna pre malé, veľké a kritické chyby. Typická hodnota AQL pre malé chyby je 2,5 %, pre veľké chyby 1 % a kritické chyby nie sú prijateľné. [23] [31]

4.6.1 Preberacie plány jedným výberom pre normálnu kontrolu

Preberacie plány podľa počtu výberu delia na preberacie plány jedným výberom, dvojitým alebo viacnásobným, či preberacie plány postupným výberom (sekvenčné). Preberací plán jedným výberom je najmenej náročný, ale zároveň nedosahuje taký ekonomický prínos pri rovnakej účinnosti kontroly ako iný typ preberacieho plánu. Rozsah výberu pri jednom výbere je väčší, takže musí byť skontrolovaných viac jednotiek. Na základe preberacieho plánu jedným výberom sa stanoví jednoznačné rozhodnutie o prijatí alebo zamietnutí dávky. [24]

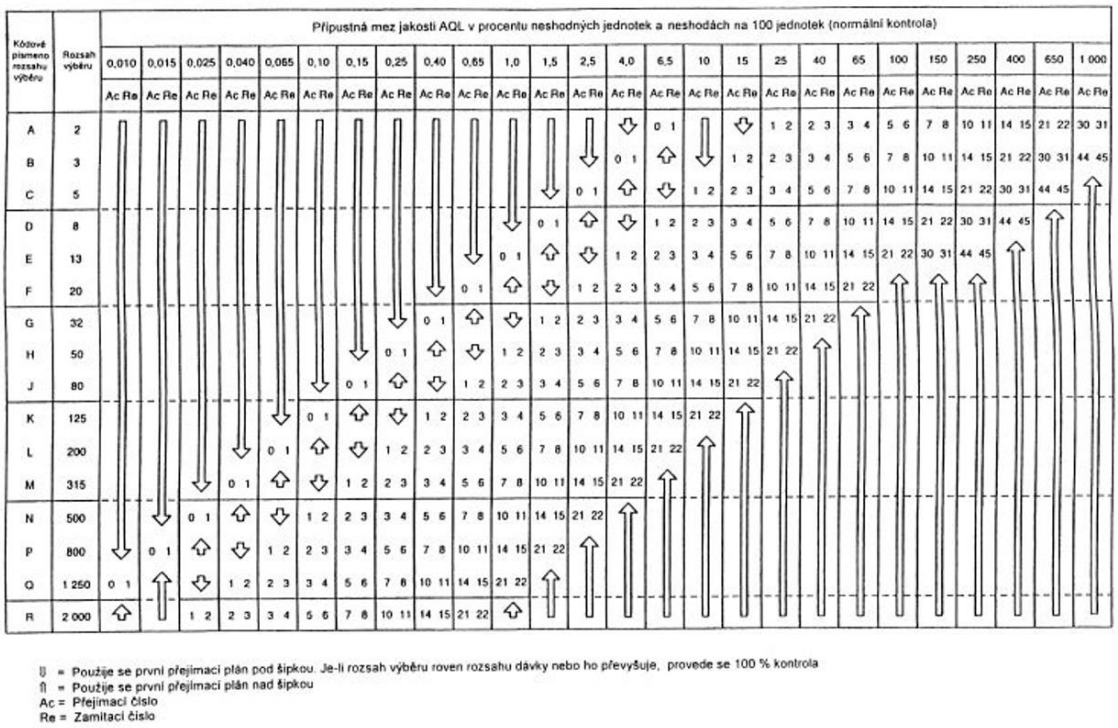
Množstvo kontrolovaných jednotiek v závislosti na veľkosti dávky je určené kontrolnou úrovňou (obr. 4.4). Všeobecné úrovne kvality sú tri, označujú sa I, II, III. Špeciálne úrovne, označované S-1 až S-4 sú využívané v prípadoch, kde sú požadované malé rozsahy výberov. Použitím špeciálnych kontrolných úrovní musí byť prijateľné väčšie riziko.

Musí byť použitá všeobecná kontrolná úroveň II, pokiaľ sa dodávateľ a odoberateľ nedohodnú inak. [31]

Rozsah dávky	Speciální kontrolní úrovně				Obecné kontrolní úrovně		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2 až 8	A	A	A	A	A	A	B
9 až 15	A	A	A	A	A	B	C
16 až 25	A	A	B	B	B	C	D
26 až 50	A	B	B	C	C	D	E
51 až 90	B	B	C	C	C	E	F
91 až 150	B	B	C	D	D	F	G
151 až 280	B	C	D	E	E	G	H
281 až 500	B	C	D	E	F	H	J
501 až 1 200	C	C	E	F	G	J	K
1 201 až 3 200	C	D	E	G	H	K	L
3 201 až 10 000	C	D	F	G	J	L	M
10 001 až 35 000	C	D	F	H	K	M	N
35 001 až 150 000	D	E	G	J	L	N	P
150 001 až 500 000	D	E	G	J	M	P	Q
500 001 a výše	D	E	H	K	N	Q	R

Obr. 4.4 Kontrolné úrovne a kódové písmená [31]

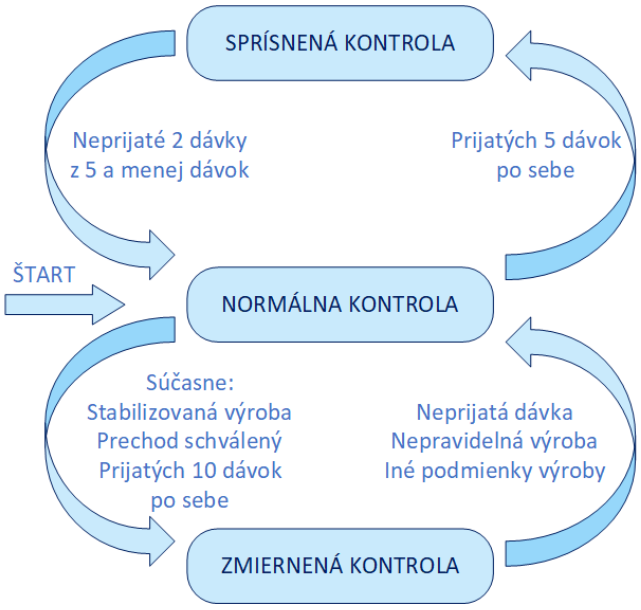
Princíp preberacieho plánu jedným výberom (obr. 4.5) je veľmi jednoduchý. Na základe veľkosti dávky a kontrolnej úrovne sa stanoví kódové písmeno. Kódové číslo určuje rozsah výberu n. Zo stanovenej prípustnej medze kvality AQL a kódového písmena sa stanoví hodnota preberacieho čísla (Ac – acceptance number). Podľa preberacieho plánu s parametrami (n, Ac) sa skontroluje stanovený počet výrobkov n. Ak je z rozsahu výberu nezhodných viac kusov ako hodnota Ac, dávka je zamietnutá. [24] [31]



⇩ = Použije se první přejímací plán pod šipkou. Je-li rozsah výběru roven rozsahu dávky nebo ho převyšuje, provede se 100 % kontrola
⇧ = Použije se první přejímací plán nad šipkou
Ac = Přejímací číslo
Re = Zamítací číslo

Obr. 4.5 Preberacie plány jedným výberom (normálna kontrola) [31]

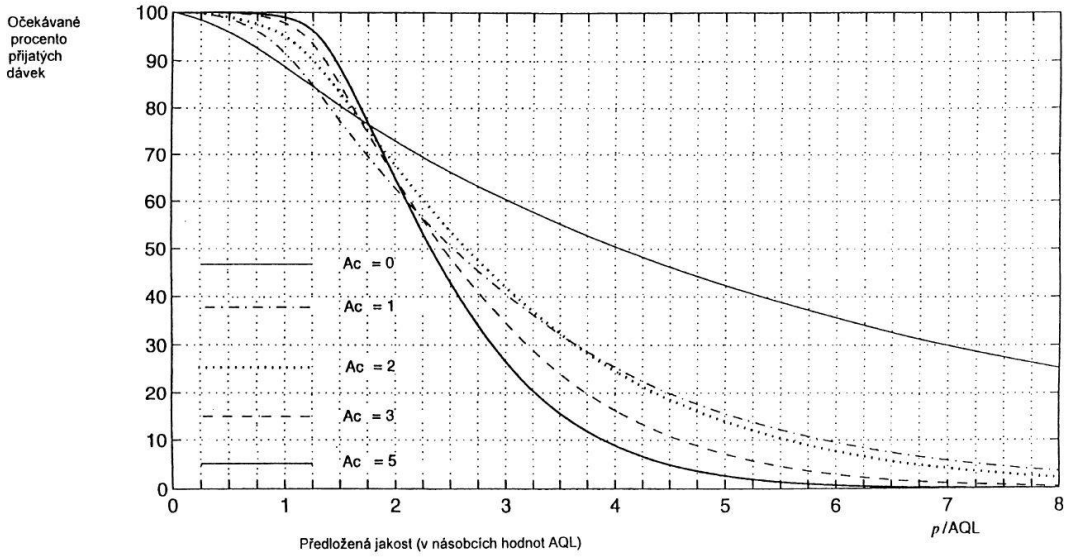
Preberacie plány sa delia aj podľa toho, či sa použije preberací plán pre normálnu kontrolu, sprísnenú alebo zmiernenú kontrolu. Preberacie plány spolu s pravidlami pre zmenu preberacích plánov sú označované ako schéma prebierky. Pridaním kritérií podľa ktorých bude zvolený konkrétny preberací plán sa jedná o systém štatistických prebierok. Na začiatku aplikácie štatistickej prebierky sa používa normálna kontrola. Podľa určitých pravidiel (obr. 4.6) sa prechádza na preberacie plány pre sprísnenú, zmiernenú kontrolu, alebo sa kontrola úplne vynechá. [23] [31]



Obr. 4.6 Schéma prebierky [23]

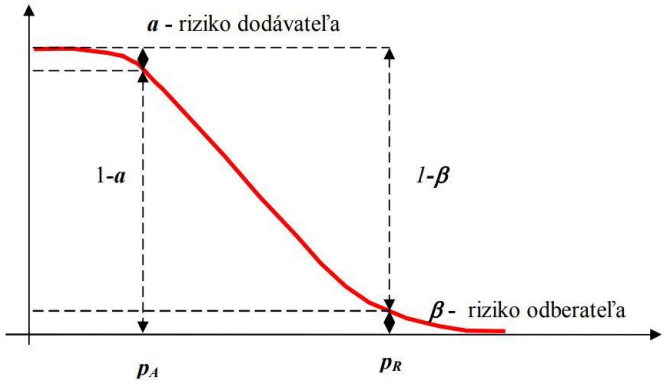
4.6.2 Operatívna charakteristika

Pravdepodobnosť prijatia dávky na základe kontroly podľa stanoveného preberacieho plánu je vyjadrená pomocou operatívnej charakteristiky. Operatívna charakteristika (obr. 4.7) vyjadruje schopnosť preberacieho plánu rozlíšiť prijateľnú dávku od tej, ktorá podľa preberacieho plánu nemá byť prijatá. Vyjadruje pravdepodobnosť, že dávka s určitým množstvom nezhodných kusov pri kontrole podľa normy ČSN ISO 2859-1 bude prijatá alebo zamietnutá. [23]



Obr. 4.7 Priebehy operatívnych charakteristík [31]

Pri aplikovaní štatistickej prebierky môže dôjsť k chybám. Pravdepodobnosť výskytu chyby prvého druhu sa nazýva aj riziko dodávateľa α. Vyjadruje pravdepodobnosť neprijatia dávky s kvalitou, ktorá podľa preberacieho plánu má byť prijatá. Chyba druhého druhu vyjadruje prijatie dávky s úrovňou kvality, ktorá nie je prijateľná. Pravdepodobnosť výskytu je rizikom odoberateľa β (obr. 4.9). Úroveň kvality je stanovená hodnotou AQL. Riziko dodávateľa a riziko odoberateľa sa okrem tabuliek uvedených v norme ČSN ISO 2859-1 dá stanoviť aj pomocou kriviek operatívnych charakteristík (obr. 4.8). Predpokladá sa, že bude prijatých 10 % dávok, ak kvalita zodpovedá riziku odoberateľa. [31] [32]



Obr. 4.8 Riziko dodávateľa a odoberateľa [32]

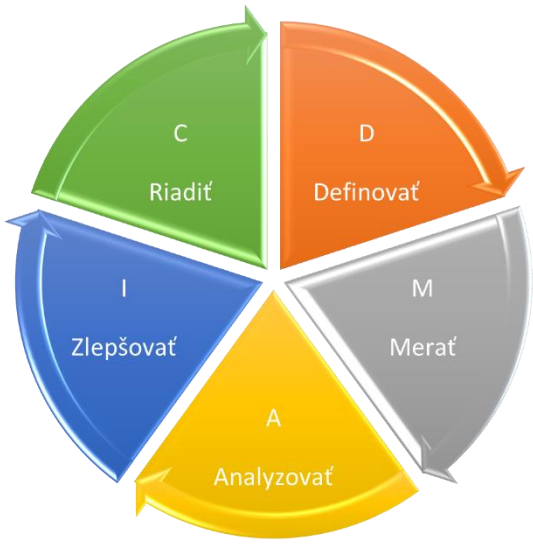
Kódové písmeno rozsahu výběru	Rozsah výběru	Přípustná mez jakosti AQL, procento neshodných jednotek															
		0,010	0,015	0,025	0,040	0,065	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	10
A	2															68,4	69,0*
B	3														53,6	54,1*	57,6*
C	5													36,9	37,3*	39,8*	58,4
D	8												25,0	25,2*	27,0*	40,6	53,8
E	13											16,2	16,4*	17,5*	26,8	36,0	44,4
F	20										10,9	11,0*	11,8*	18,1	24,5	30,4	41,5
G	32									6,94	7,01*	7,50*	11,6	15,8	19,7	27,1	34,0
H	50								4,50	4,54*	4,87*	7,56	10,3	12,9	17,8	22,4	29,1
J	80							2,84	2,86*	3,07*	4,78	6,52	8,16	11,3	14,3	18,6	24,2
K	125						1,83	1,84*	1,97*	3,08	4,20	5,27	7,29	9,24	12,1	15,7	21,9
L	200					1,14	1,16*	1,24*	1,93	2,64	3,31	4,59	5,82	7,60	9,91	13,8	
M	315				0,728	0,735*	0,788*	1,23	1,68	2,11	2,92	3,71	4,85	6,33	8,84		
N	500			0,459	0,464*	0,497*	0,776	1,06	1,33	1,85	2,34	3,06	4,00	5,60			
P	800		0,287	0,290*	0,311*	0,485	0,664	0,833	1,16	1,47	1,92	2,51	3,51				
Q	1 250	0,184	0,186*	0,199*	0,311	0,425	0,534	0,741	0,940	1,23	1,61	2,25					
R	2 000	0,116*	0,124*	0,194	0,266	0,334	0,463	0,588	0,769	1,00	1,41						

Obr. 4.9 Kvalita zodpovedajúca riziku odoberateľa (normálna kontrola) [31]

5 SYSTÉMOVÝ ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A NÁVRH RIEŠENIA

Spoločnosť, v ktorej bola riešená problematika zabezpečovania kvality ultrazvukových nástrojov má systém manažmentu kvality založený na štandardoch podľa noriem ISO, konceptu LEAN a Six Sigma. Z normy ČSN EN ISO 9001 je využívaný Demingov cyklus neustáleho zlepšovania PDCA, kde P – plan (plánuj), D – do (vykonaj), C – check (over), A – act (jednaj). Požiadavku neustáleho zlepšovania procesov spĺňajú aj metódy ako Kaizen či DMAIC. [33]

Systémový rozbor práce bude vykonaný v súlade so systémovým prístupom DMAIC, pretože sa používa pri vykonávaní štatistických analýz a je vhodný na riešenie dlhodobých problémov. Six Sigma metóda DMAIC vychádza z Demingovho cyklu PDCA podľa normy ČSN EN ISO 9001. Prvá fáza procesu D – define (definovať) je zameraná na preskúmanie procesu a identifikáciu problému. Druhá fáza modelu M – measure (merať) sa orientuje na zistenie súčasného stavu procesu. Stav procesu je stanovený na základe zozbieraných dát. V tejto fáze sa tiež stanovuje spôsobilosť meracieho systému. V ďalšej fáze A – analyze (analyzovať) sa skúma variabilita procesu a jej zdroje. Príčiny variability procesu sa delia na náhodné a vymedziteľné. Fáza I – improve (zlepšovať) je založená na kreativite členov tímu a ich nápadoch na zlepšenie procesu. Výsledkom tejto fázy je proces, ktorý vyhovie očakávaniam zákazníkov. Výsledný zlepšený proces je stabilizovaný. Posledná fáza procesu DMAIC C – control (riadiť) sa zameriava na kontrolu a riadenie vylepšeného procesu. V tejto fáze sa dokončia všetky potrebné činnosti, aby boli dosiahnuté ciele projektu a zavedené zlepšenie. V tejto fáze sa na štatistické overenie výsledku využívajú najmä regulačné diagramy. [23] [33]

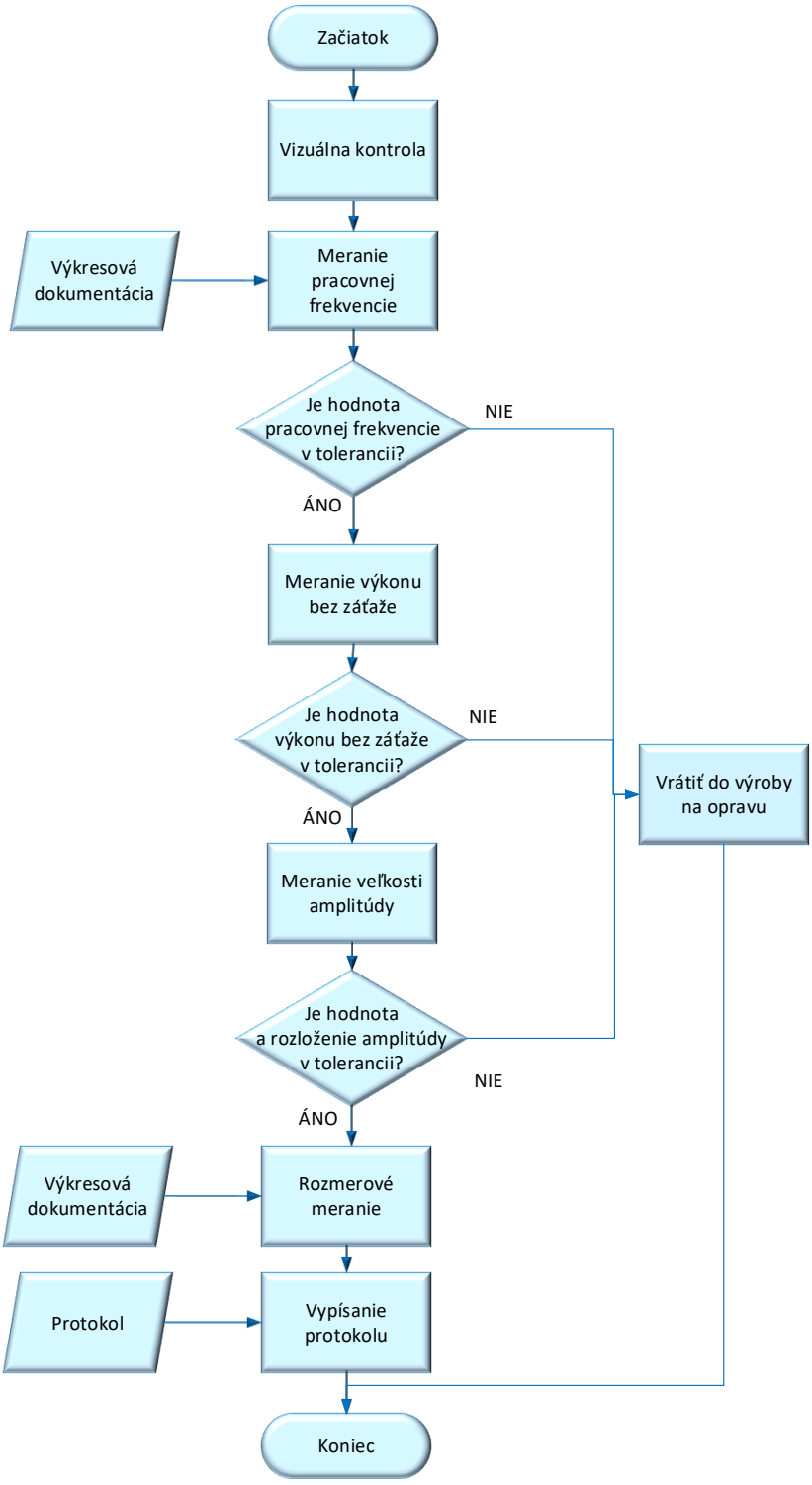


Obr. 5.1 Cyklus DMAIC podľa [33]

5.1 Definovať

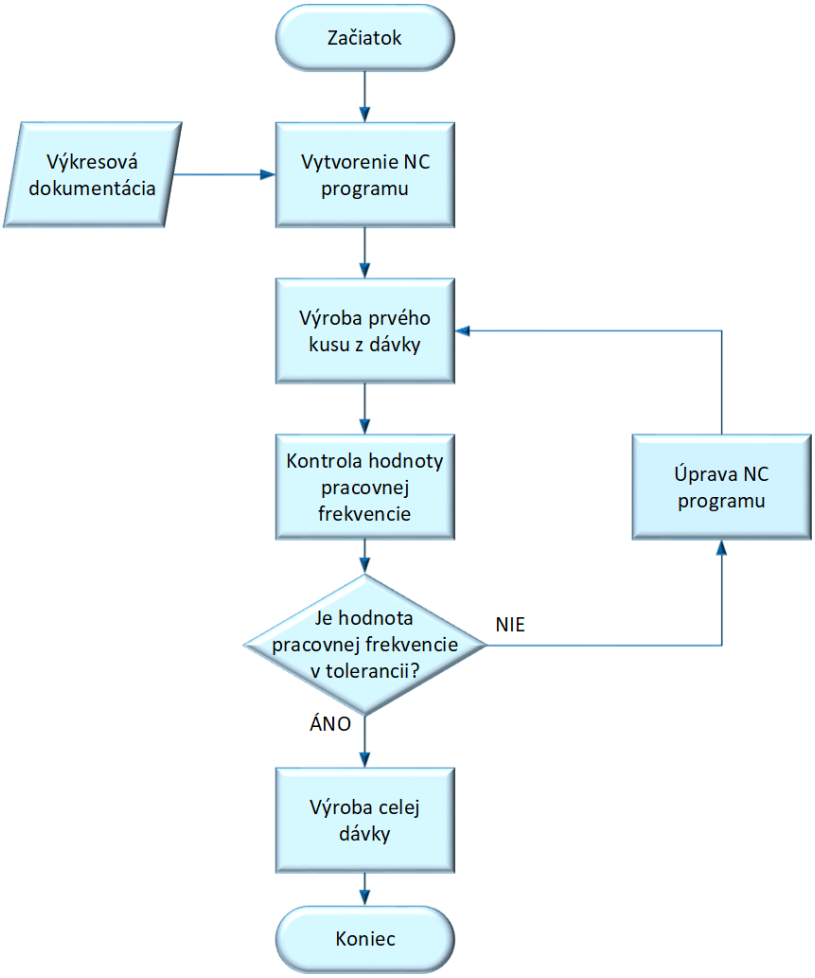
V rámci prvej fázy metódy DMAIC definuj bol identifikovaný problém. Problematika práce sa zaoberá zabezpečovaním kvality ultrazvukových nástrojov. Vo firme sa vykonáva 100% kontrola každého ultrazvukového nástroja. Kontrola každého vyrobeného kusu je časovo

náročná. Proces kontroly kvality ultrazvukových nástrojov vyrábaných v dávkach je rovnaký ako pri nástrojoch vyrábaných kusovo. Dávka je vyrábaná v krátkom časovom úseku, preto sa predpokladá, že celá dávka bude ovplyvnená rovnakými faktormi. Dôvodom výroby nezhodných kusov sú príčiny, ktoré majú vplyv na celú dávku, preto sa predpokladá, že je dávka celá dobrá alebo celá zlá. Spôsob kontroly každého kusu je neefektívny, už pri momentálnom objeme výroby. Objem výroby sa v blízkej budúcnosti plánuje navyšovať, preto je nutné proces kontroly urýchliť. Proces kontroly ultrazvukových nástrojov je znázornený na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Vývojový diagram kontroly ultrazvukových nástrojov

Výroba ultrazvukových nástrojov vyrábaných v dávkach (minimálne 2 kusy) prebieha tak, že pracovník výroby na základe výkresovej dokumentácie zostaví NC program. Vyrobí prvý kus, ten sa skontroluje a podľa výsledku kontroly sa stanoví ďalší postup. Ak nástroj spĺňa požiadavky, výrobný pracovník vyrobí celú dávku bez priebežnej kontroly podľa napísaného programu. V prípade ak nevyhovuje, výrobný pracovník vykoná korekciu a znova sa nástroj skontroluje. Tento postup sa opakuje, kým prvý kus nie je správne naladený a podľa neho sa vyrobí celá dávka. Pracovná frekvencia ultrazvukových nástrojov je citlivá na materiál, z ktorého sú nástroje vyrobené. Každá dávka materiálu má určité odchýlky, ktoré sa prejavia na hodnote pracovnej frekvencie sonotródy. Preto je tento proces a NC program potrebné odlaďovať pri každej dávke. Vývojový diagram výroby ultrazvukových nástrojov je na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Vývojový diagram výroby ultrazvukových nástrojov

5.2 Merať

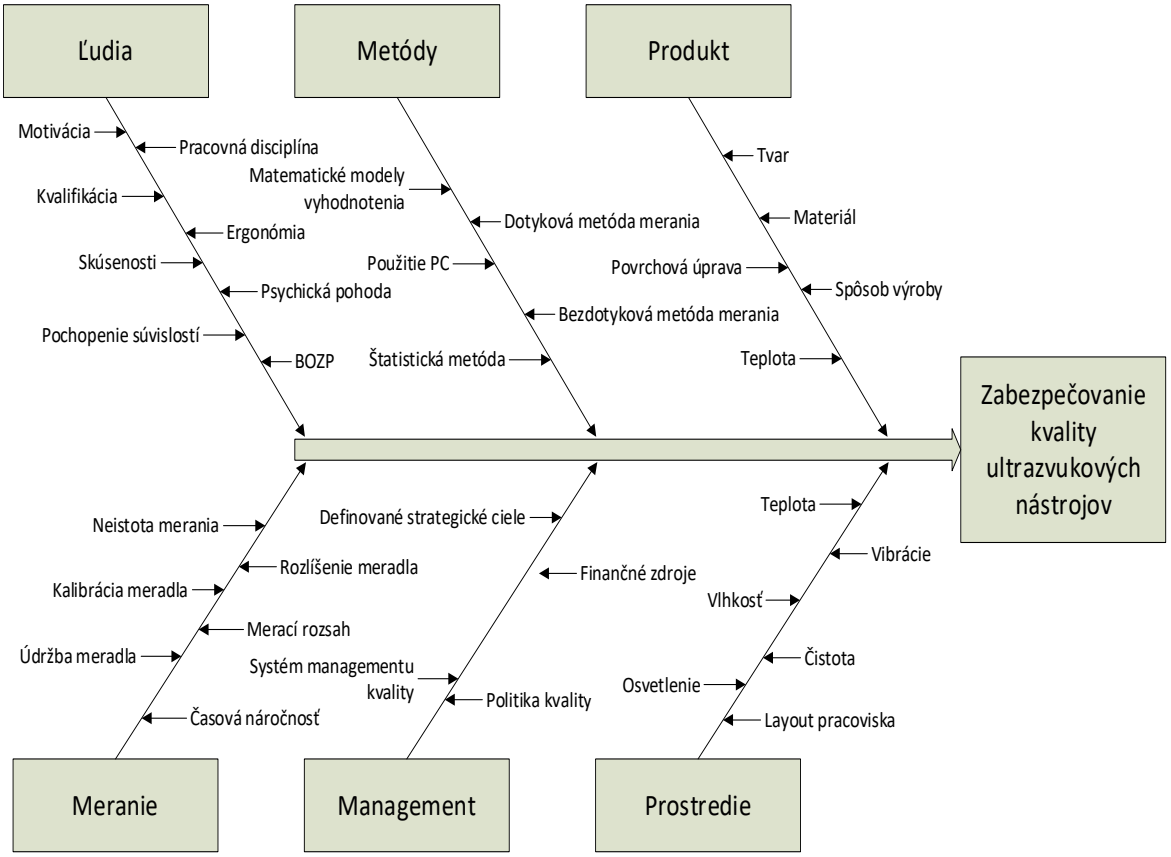
Druhá fáza sa zameriava na systém zberu dát. Bol vytvorený formulár na zaznamenávanie dát (obr. 5.4). Nástroje sa pri zistení nezhody so špecifikáciou vrátia do výroby, kde sú opravené a následne znova prebehne celý proces kontroly tohto nástroja. Takéto opakované testovanie a kontrola neboli zaznamenávané. Zaznamenávala sa až konečná kontrola, kedy bol nástroj vyhovujúci. Ďalším dôsledkom je, že sa neidentifikujú problematické typy nástrojov alebo chyby vzniknuté pri výrobe a pri výrobe ďalšieho rovnakého kusu nie sú tieto chyby odstránené. Nedostatky odhalené pri kontrole sú komunikované len ústne a nie sú

zaznamenané v písomnej forme. Pri výmene pracovníkov vo výrobe sa preto tieto chyby môžu opakovať.

EDP:		Názov:			
Dátum výroby: Dátum kontroly: **Ladiť na:**		**39950 - 40050 Hz**			
		Generátor			
		Frekvencia	**Výkon**	**Amplitúda**	**Oprava**
Num.	**Označ.**	**f [Hz]**	**Po [W]**	**A [µm]**	
1					
2					
3					
4					
5					

Obr. 5.4 Formulár na zaznamenávanie dát

Dôležitou súčasťou zabezpečovania kvality je meranie pre kvalitu kritických parametrov. Na výsledok má vplyv spôsobilosť meradla a neistota merania. Výsledky merania sonotródy sú ovplyvnené aj ľudským činiteľom. Pracovník vykonávajúci kontrolu kvality musí byť riadne zaškolený a dodržiavať pracovné postupy. Chyba môže nastať aj pri odčítavaní nameraných hodnôt z meracích prístrojov či ich prepisovaní do protokolov. Kvalita ultrazvukových nástrojov je ovplyvňovaná viacerými faktormi. Najdôležitejší parameter – pracovná frekvencia je závislý na teplote nástroja, mení sa s dĺžkou sonotródy, materiálom, a ďalšími faktormi. Pri zabezpečovaní kvality ultrazvukových nástrojov musia byť tieto vplyvy zohľadnené. Pracovná frekvencia sonotródy sa mení s každou dávkou materiálu. Po zohľadnení vplyvov okolitého prostredia musia ultrazvukové nástroje spĺňať požiadavky stanovené zákazníkom a internými dokumentami spoločnosti. Významný vplyv majú financie a ekonomika firmy. Financie pridelené na zabezpečovanie kvality nie sú neobmedzené. Firma sa snaží minimalizovať náklady spojené s kvalitou. Pridelením vyšších finančných balíčkov na zabezpečovanie kvality ultrazvukových nástrojov by bolo možné zakúpenie modernejších automatizovaných meracích prístrojov či navýšenie počtu pracovníkov na oddelení kontroly. Faktory ovplyvňujúce zabezpečovanie kvality ultrazvukových nástrojov sú na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Ishikawov diagram pre zabezpečovanie kvality ultrazvukových nástrojov

5.3 Analyzovať

Zvolený postup riešenia stanoveného problému spočíva v aplikovaní vhodných nástrojov na redukciu množstva kontrolovaných ultrazvukových nástrojov. Najdôležitejším parametrom ultrazvukových nástrojov pre požadovanú funkciu je pracovná frekvencia, preto je analýza zameraná práve na tento parameter. Predpokladom je závislosť medzi pracovnou frekvenciou a ostatnými parametrami sonotródy.

Na začiatku bola overená spôsobilosť meracieho systému. Nespôsobilosť znamená, že systém merania nie je vhodný a výsledky merania nie je možné považovať za správne. Návrh riešenia zahŕňa získanie relevantných dát, ich analýzu a vyhodnotenie. Analýza systému merania určuje spôsobilosť systému na konkrétnu aplikáciu. Výstupom analýzy procesu pomocou Shewhartových regulačných diagramov, je informácia o tom, či je proces štatisticky zvládnutý. Pomocou regulačných diagramov je možné sledovať trendy v kvalite ultrazvukových nástrojov a podľa nich včas stanoviť určité opatrenia. Dôvodom výberu tejto štatistickej metódy je aj možnosť včasného zasiahnutia do procesu pri nepriaznivých trendoch, ktoré šetrí financie vynaložené na nekvalitu. Zároveň zavedenie štatistickej regulácie nevyžaduje kúpu nového softwaru, ale je možné využiť software, ktorým firma disponuje. Ďalej bola stanovená spôsobilosť procesu.

5.4 Zlepšovať

Vo fáze zlepšovania procesu bol realizovaný brainstorming. Návrhy na zlepšenie a urýchlenie procesu kontroly ultrazvukových nástrojov boli:

- vytvorenie ďalšieho pracoviska na kontrolu kvality ultrazvukových nástrojov,
- zabezpečenie ďalšieho kontrolóra kvality zameraného na ultrazvukové nástroje,
- upustiť od stopercentnej kontroly pri určitých typoch nástrojov, ktoré boli v minulosti bezproblémové,
- zaviesť štatistické riedenie procesu,
- vynechanie kontroly určitých parametrov, ktoré sú stabilné a nie sú citlivé na zmeny v procese.

Čas testovania jediného vyrobeného kusu nie je možné výrazne skrátiť. Avšak pri výrobe dostatočne veľkých dávok je možné aplikovať určité štatistické nástroje na predpokladanie výskytu nezhodného výrobku. Podľa frekvencie výroby určitého typu sonotródy je možné určiť veľkosť dávky. Náklady vynaložené na skladovanie dávky nesmú byť vyššie ako náklady spojené s výrobou a testovaním každého vyrobeného kusu. V opačnom prípade je ekonomicky nevýhodná výroba v dávkach namiesto kusovej výroby.

Návrhom riešenia stanoveného problému je znížiť počet kontrolovaných výrobkov na základe štatistickej regulácie procesu a aplikácii štatistickej prebierky (kapitola 6). Štatistická prebierka stanovuje počet jednotiek, ktoré majú byť kontrolované na základe rozsahu dávky. Norma stanovuje presný počet kusov, preto bola zvolená táto metóda. Predpokladom na zabezpečovanie kvality pomocou štatistickej prebierky je spôsobilosť procesu analyzovaná v predchádzajúcej fáze. Aplikácia štatistickej prebierky stanoví počet kontrolovaných jednotiek podľa veľkosti dávky. Vybrané metódy je možné aplikovať na rôzne druhy nakupovaných výrobkov či pri medzioperačnej kontrole produktov vyrábaných priamo vo firme.

5.5 Riadiť

Posledná fáza metódy DMAIC bola zameraná na overenie zlepšenia. V tejto fáze boli vypracované nové pracovné postupy pre zabezpečovanie kvality ultrazvukových nástrojov a prebehlo preškolenie pracovníkov. Vypracovala sa dokumentácia k aplikácii zvoleného riešenia. Monitorovanie riešenia prebieha pomocou zavedenia regulačných diagramov kontrolovaných jednotiek po zavedení kontroly prvého kusu z dávky a ďalších kusov náhodným výberom s rozsahom výberu podľa stanoveného preberacieho plánu.

6 APLIKÁCIA VYBRANÝCH ŠTATISTICKÝCH METÓD

Aplikácia vybraných nástrojov na kontrolu ultrazvukových nástrojov je zameraná na meranie frekvencie ultrazvukových nástrojov. Zisťovanie frekvencie prebieha pomocou špeciálneho meracieho prístroja a počítačového softwaru. Počítač je prepojený so zostavou na testovanie, ktorá pozostáva z generátora, konvertora, boostra, testovanej sonotródy a držiaka. Rozloženie pracoviska je znázornené na obr. 6.1. Software má schopnosť identifikovať pracovnú frekvenciu sonotródy. Generátor zachytí frekvenciu od 38900 Hz do 40900 Hz [34]. So sonotródou s pracovnou frekvenciou v tomto rozmedzí je schopný pracovať (zvárať, rezať zatláčať). Tento interval je pomerne široký, preto nie je požiadavka na frekvenciu sonotródy prísna. Predpísaná pracovná frekvencia zvoleného typu sonotródy je 40000 ± 50 Hz [34]. Sonotróda je plne funkčná aj v prípade, že o niekoľko desiatok hertzov túto toleranciu presahuje, preto je vplyv neistoty merania v ďalších krokoch zanedbaný. Dôležitejšia je funkčnosť sonotródy prenášať vibrácie ako presná hodnota jej pracovnej frekvencie.

Obr. 6.1 Pracovisko kontroly ultrazvukových nástrojov

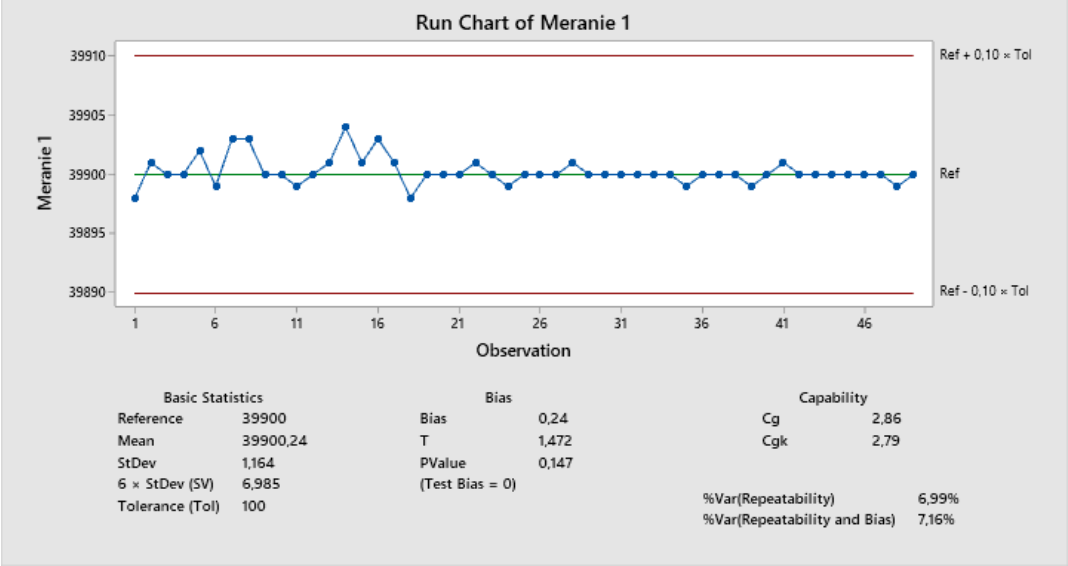
6.1 Analýza spôsobilosti meracieho systému

Zisťovanie pracovnej frekvencie sonotródy prebieha pomocou zariadenia a softwaru, ktorý analyzuje sonotródu. Princíp merania je rovnaký ako pri TRZ analyzátore ultrazvukových nástrojov (kap. 4.3.1). Zariadenie, na ktorom prebieha meranie nie je pravidelne kalibrované. Z toho dôvodu bola pred aplikáciou štatistických metód overená spôsobilosť systému merania. Ako etalón na overenie spôsobilosti bola použitá jednoduchá valcová sonotróda s frekvenciou 39900 Hz. Frekvencia tejto sonotródy bola zmeraná 25-krát. Sonotróda sa počas kmitania zahrieva, čím sa mení aj jej rezonančná frekvencia. Táto skutočnosť bola zohľadnená pri meraní frekvencie dlhšími prestávkami medzi jednotlivými meraniami, aby sa teplota sonotródy vyrovnala s teplotou okolia. Počas celého merania bola v miestnosti udržiavaná konštantná teplota 21°C. Namerané hodnoty sú uvedené v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Namerané dáta pre analýzu spôsobilosti meracieho systému

Č.m.	F [Hz]	Č.m.	F [Hz]	Č.m.	F [Hz]	Č.m.	F [Hz]	Č.m.	F [Hz]
1	39898	6	39899	11	39899	16	39903	21	39900
2	39901	7	39903	12	39900	17	39901	22	39901
3	39900	8	39903	13	39901	18	39898	23	39900
4	39900	9	39900	14	39904	19	39900	24	39899
5	39902	10	39900	15	39901	20	39900	25	39900

Namerané dáta boli vyhodnotené pomocou softwaru Minitab. Bol stanovený priebehový diagram, charakteristiky popisnej štatistiky (priemer, smerodajná odchýlka) a indexy spôsobilosi testovacej zostavy pre toleranciu 100 Hz (obr. 6.2).



Obr. 6.2 Analýza spôsobilosti meracieho systému

Index spôsobilosti meracieho systému c_g= 2,86. Hodnota indexu je vyššia ako 1,33, čo znamená že merací systém je spôsobilý. Hodnota kritického indexu c_{gk} je 2,79. Hodnota je nižšia ako hodnota indexu c_g, čo značí, že stredná hodnota vyjadrená priemerom je posunutá voči referenčnej hodnote. Analýzou spôsobilosti systému bolo zistené, že merací systém je spôsobilý.

6.2 Aplikácia SPC

Pre proces výroby ultrazvukových nástrojov nie je vo firme zavedená štatistická regulácia procesu. V súčasnosti sa kontroluje každý vyrobený kus a namerané hodnoty nie sú zaznamenávané do žiadneho grafického spracovania. Nie je možné sledovať vývoj procesu v čase. Stopercentná forma kontroly je časovo náročná a pri väčšom objeme výroby vyžaduje viac pracovníkov. Preto navrhujem zavedenie regulačných diagramov a analýzu spôsobilosti procesu.

6.2.1 Namerané hodnoty

Dáta boli zbierané v období od 1.7.2021 do 30.11.2021. Na zvolenom type sonotródy (obr. 6.3) bol skúmaný parameter pracovnej frekvencie (ďalej len „frekvencia“). Frekvencia sonotród bola zisťovaná na pracovisku vybaveného generátorom, počítačom so softwarom na

zaznamenávanie frekvencie a držiakom na testovanú ultrazvukovú zostavu. Hodnoty parametrov boli merané pri výstupnej kontrole nástrojov.

Prvým krokom v postupe merania je montáž dielov ultrazvukovej zostavy. Jednotlivé diely majú predpísaný krútiaci moment, ktorým majú byť dotiahnuté. Zostava sa upevní do držiaka a pripojí sa kábel. Na prepojenom počítači sa spustí program testovania pre 40 kHz ultrazvukové nástroje. Pomocou vysielaného signálu je stanovená hodnota rezonančnej a antirezonančnej frekvencie. Tieto hodnoty je možné vyčítať z grafu. Na displeji sa zobrazí hodnota pracovnej frekvencie sonotródy.

Obr. 6.3 Zvolený typ ultrazvukového nástroja

Tab. 6.2 Namerané hodnoty frekvencie

Mesiac/rok	**7/2021**	**8/2021**	**9/2021**	**10/2021**	**11/2021**
Číslo merania	**Frekvencia [Hz]**				
1	39983	40002	39995	40000	40004
2	39994	40014	40005	39990	40000
3	40012	40016	40016	39990	40012
4	39987	39995	40021	39990	40009
5	39993	40025	39992	39994	40000
6	40011	40005	40014	40000	40004
7	40005	39998	40000	39980	40017
8	40017	40000	40012	40012	40012
9	39994	40005	40027	39995	40015
10	40001	39995	40017	39996	40008
11	40013	39994	40018	40005	40002
12	40009	39989	40013	39987	40006
13	39990	39981	39995	40006	40000
14	40014	39999	39994	39985	40003
15	40008	40002	40016	40002	40016
16	40018	40012	40002	39997	40012
17	40004	39988	40004	40037	40000
18	40012	39989	40001	40016	40005
19	40011	39992	40003	40000	40001
20	40020	39994	40012	40007	40006

6.2.2 Popisná štatistika nameraných dát

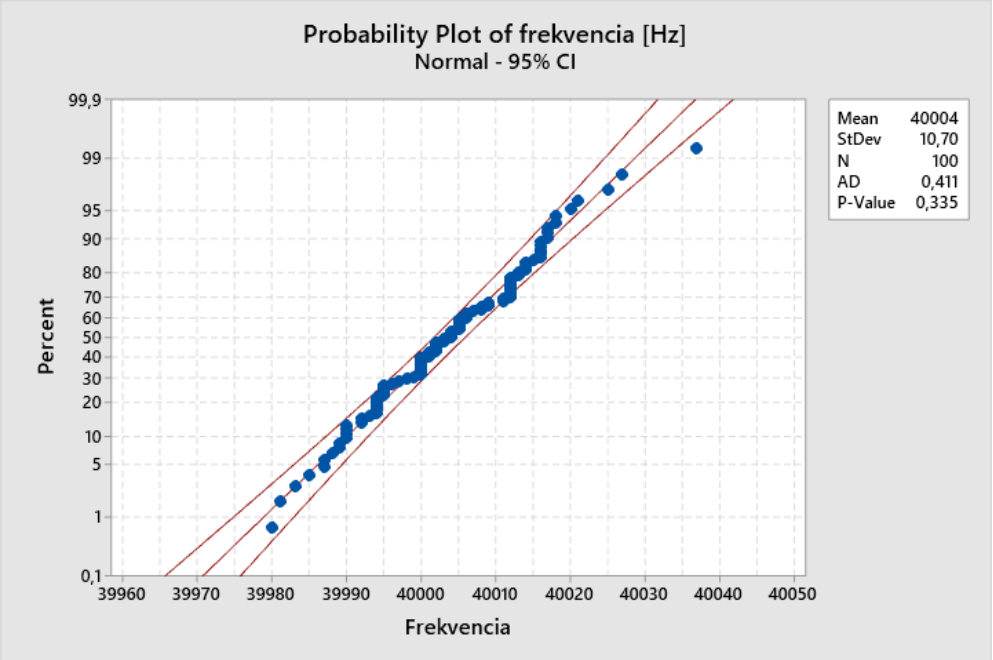
Charakteristiky popisnej štatistiky podávajú objektívne informácie o analyzovaných dátach. V tab. 6.3 sú vyjadrené základné charakteristiky nameraných dát frekvencie. V tabuľke sú uvedené maximálne (X_{max}) a minimálne (X_{min}) hodnoty z nameraných dát v jednotlivých mesiacoch. Ďalej sú stanovené charakteristiky priemer ($\bar{X}$), rozpätie (R), rozptyl (s^2) a smerodajná odchýlka (s).

Tab. 6.3 Popisná štatistika nameraných dát

Mesiac/rok	**7/2021**	**8/2021**	**9/2021**	**10/2021**	**11/2021**
	Frekvencia [Hz]				
X_{max} [Hz]	40020,00	40025,00	40027,00	40037,00	40017,00
X_{min} [Hz]	39983,00	39981,00	39992,00	39980,00	40000,00
($\bar{X}$) [Hz]	40004,80	39999,75	40007,85	39999,45	40006,60
R [Hz]	37,00	44,00	35,00	57,00	17,00
s^2 [Hz^2]	121,75	116,62	101,08	160,89	32,57
s [Hz]	11,03	10,80	10,05	12,68	5,71

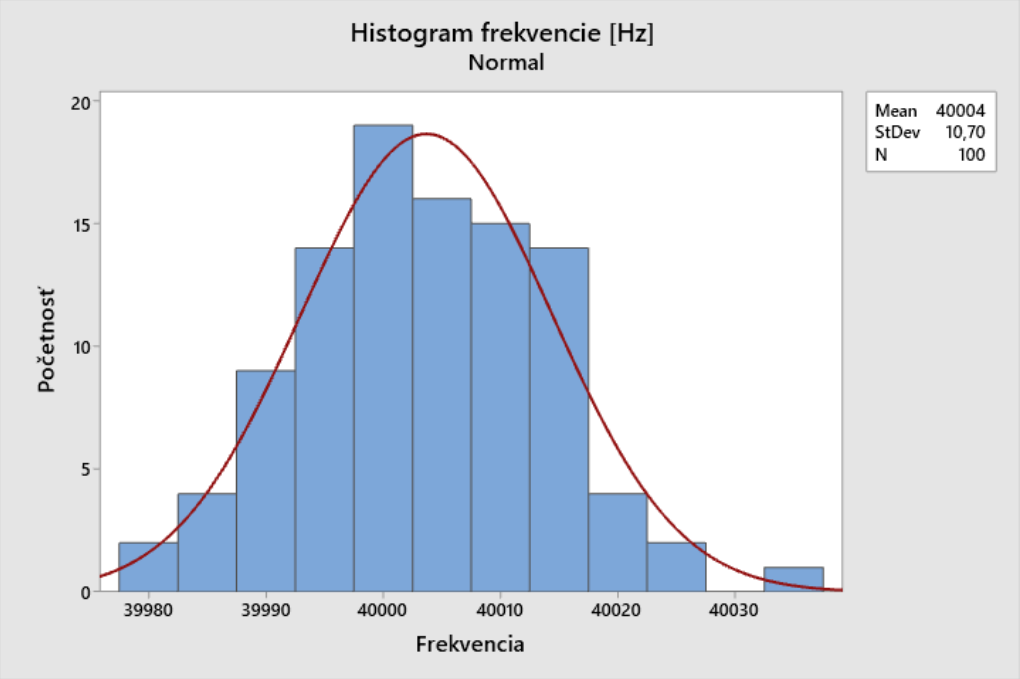
6.2.3 Test normality nameraných dát

Pred samotným zavedením regulačných diagramov je nutné overiť podmienku normálneho rozdelenia dát. Test normality dát (obr. 6.3) bol vykonaný v software Minitab. P-hodnota je väčšia ako 0,05, konkrétne 0,335. Výsledok Anderson-Darlingovho testu normality dát nezamieta hypotézu o normalite dát na hladine významnosti 95 %.



Obr. 6.4 Test normality dát

O normalite dát vypovedá aj tvar histogramu (obr. 6.4). Normálny histogram má dáta rozdelené súmerne s najväčšou početnosťou v blízkosti strednej hodnoty [26]. Najväčšia početnosť dát je v triede v okolí frekvencie 40000 Hz. Priemer je 40004 Hz, čo znamená že histogram nie je úplne centrovaný a je posunutý smerom k vyšším hodnotám. Príčinou posunutia je odľahlejšia jediná hodnota frekvencie 40037 Hz.



Obr. 6.5 Histogram

6.2.4 Regulačné diagramy

Ďalej bol proces skúmaný so zameraním na frekvenciu sonotród. Frekvencia analyzovaného typu má byť podľa internej dokumentácie firmy naladená na 39950 Hz až 40050 Hz [34].

Vzhľadom na objem výroby bol zvolený regulačný diagram individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí (I-MR). Regulačné diagramy sú rozdelené podľa mesiacov, v ktorých sa nástroje testovali. Regulačný diagram obsahuje vždy 20 nameraných hodnôt. Z nameraných hodnôt frekvencie nástrojov boli vypočítané hodnoty kĺzavých rozpätí. Výpočet kĺzavého rozpätia vychádza z rozdielu dvoch po sebe nameraných hodnôt v absolútnej hodnote (vzťah 4.14). Keďže prvá nameraná hodnota nemá byť s akou hodnotou porovnávaná, vypočítaných hodnôt kĺzavého rozpätia je vždy o jednu hodnotu menej ako nameraných hodnôt frekvencie. Vypočítané hodnoty kĺzavých rozpätí z nameraných hodnôt frekvencie sú uvedené v tab. 6.4. Uvedené hodnoty boli použité na zostavenie jednotlivých diagramov. V diagramoch boli sledované trendy nameraných dát a tvorba nenáhodných zoskupení. Sledované bolo aj centrovanie procesu voči tolerančným medziam. Podmienka normality dát na stanovenie regulačných medzí bola splnená.

Tab. 6.4 Výpočet kĺzavých rozpätí (MR) nameraných hodnôt a pracovnej frekvencie (F)

7/2021		8/2021		9/2021		10/2021		11/2021	
F [Hz]	**MR [Hz]**	**F [Hz]**	**MR [Hz]**	**F [Hz]**	**MR [Hz]**	**F [Hz]**	**MR [Hz]**	**F [Hz]**	**MR [Hz]**
39983	-	40002	-	39995	-	40000	-	40004	-
39994	11	40014	12	40005	10	39990	10	40000	4
40012	18	40016	2	40016	11	39990	0	40012	12
39987	25	39995	21	40021	5	39990	0	40009	3
39993	6	40025	30	39992	29	39994	4	40000	9
40011	18	40005	20	40014	22	40000	6	40004	4
40005	6	39998	7	40000	14	39980	20	40017	13
40017	12	40000	2	40012	12	40012	32	40012	5
39994	23	40005	5	40027	15	39995	17	40015	3
40001	7	39995	10	40017	10	39996	1	40008	7
40013	12	39994	1	40018	1	40005	9	40002	6
40009	4	39989	5	40013	5	39987	18	40006	4
39990	19	39981	8	39995	18	40006	19	40000	6
40014	24	39999	18	39994	1	39985	21	40003	3
40008	6	40002	3	40016	22	40002	17	40016	13
40018	10	40012	10	40002	14	39997	5	40012	4
40004	14	39988	24	40004	2	40037	40	40000	12
40012	8	39989	1	40001	3	40016	21	40005	5
40011	1	39992	3	40003	2	40000	16	40001	4
40020	9	39994	2	40012	9	40007	7	40006	5

Uvedený výpočet kĺzavých rozpätí bol použitý na zostavenie regulačných diagramov individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí. Tento druh regulačného diagramu bol zvolený z dôvodu nedostatočného počtu dát kvôli menšiemu objemu výroby. Neexistuje logické roztriedenie do podskupín nameraných dát, čo je tiež potrebné pre ostatné typy regulačných diagramov.

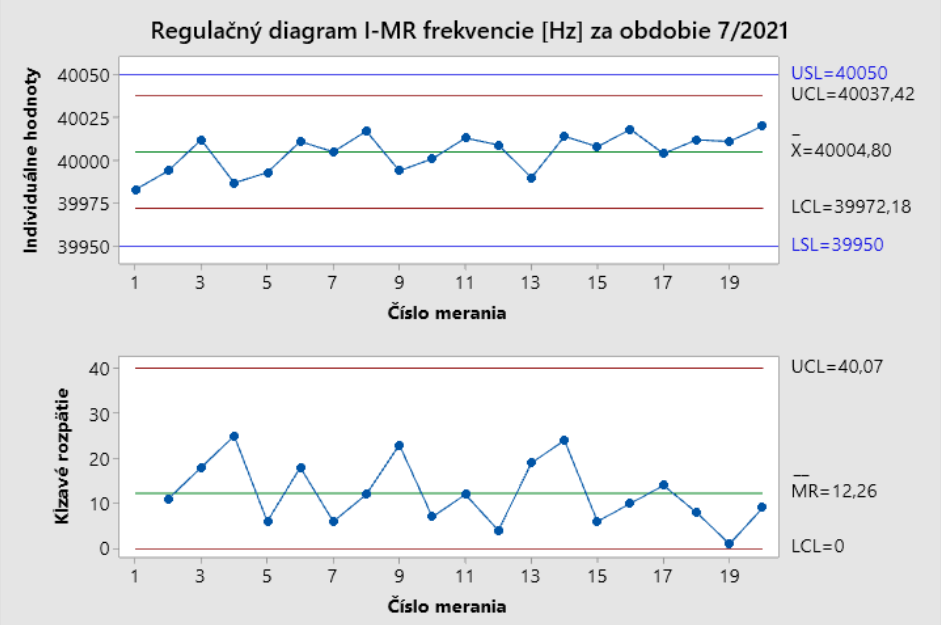
Pred zostavením regulačných diagramov je potrebné určiť hornú (UCL) a dolnú (LCL) regulačnú medzu pre regulačný diagram individuálnych hodnôt podľa vzťahov 4.11 a 4.12. Podľa vzťahu 4.13 je určená horná regulačná medza pre regulačný diagram kĺzavých rozpätí. Dolná regulačná medza je v tomto type diagramu vždy 0. Stanovené regulačné medze za jednotlivé analyzované obdobia pre regulačné diagramy individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí sú uvedené v tab. 6.5. Hodnoty regulačných medzí boli stanovené pomocou uvedených vzťahov. Vypočítané regulačné medze boli zakreslené do diagramov k nameraným individuálnym hodnotám frekvencie a vypočítaným hodnotám kĺzavých rozpätí. Zaznamenaním regulačných aj tolerančných medzí do diagramov je názornejšie zobrazené centrovanie procesu. Na vytvorenie regulačných diagramov bol použitý štatistický software Minitab, ktorý automaticky stanoví regulačné medze. Hodnoty regulačných medzí

stanovených softwarom sú zhodné s hodnotami stanovenými pomocou vzťahov uvedených v tejto práci.

Tab. 6.5 Stanovené regulačné medze

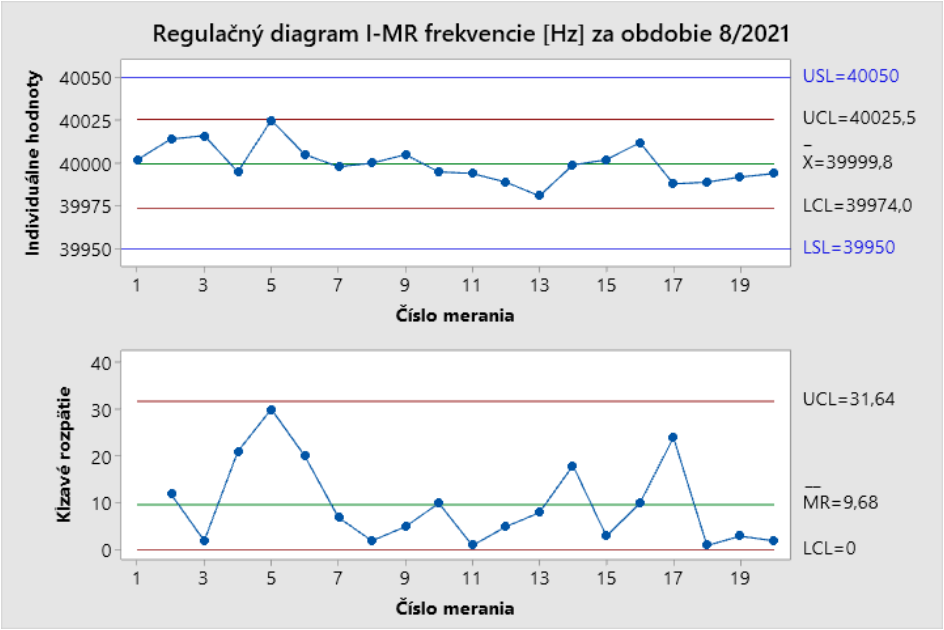
Mesiac/rok	RD	UCL	CL	LCL
7/2021	I	40037,42	40004,80	39972,18
	MR	40,06	12,26	0,00
8/2021	I	40025,51	39999,75	39973,99
	MR	31,64	9,68	0,00
9/2021	I	40036,55	40007,85	39979,15
	MR	35,25	10,79	0,00
10/2021	I	40036,27	39999,45	39962,63
	MR	45,22	13,84	0,00
11/2021	I	40023,68	40006,60	39989,52
	MR	20,98	6,42	0,00

Na vytvorenie regulačných diagramov bol použitý štatistický software Minitab. Do regulačných diagramov bola pridaná horná (USL) a dolná (LSL) tolerančná medza. Pridaním týchto medzí do grafov je lepšie pozorovateľné centrovanie procesu. Pri všetkých regulačných diagramoch boli aplikované testy vymedziteľných príčin.



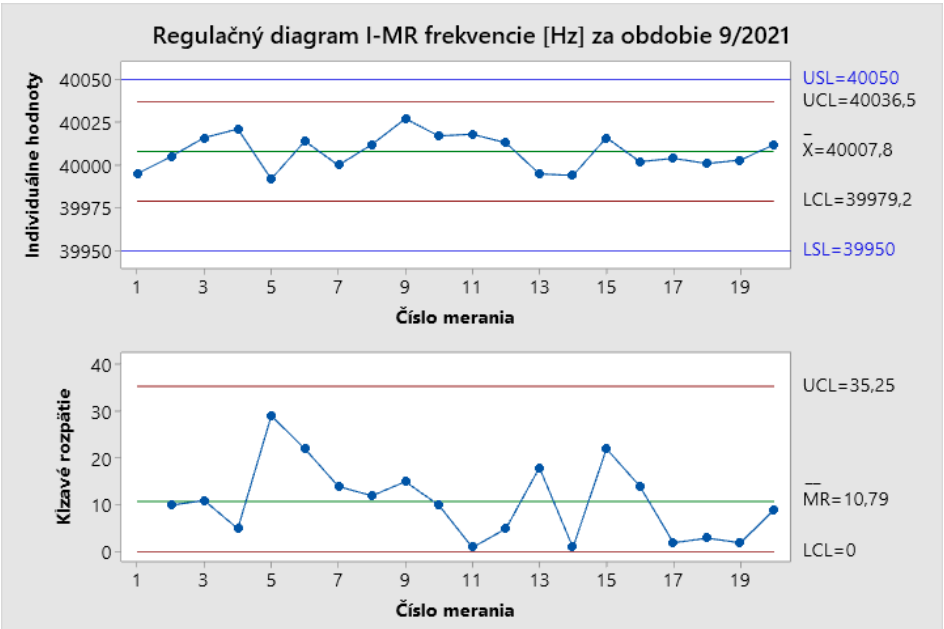
Obr. 6.6 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 7/2021

V regulačnom diagrame individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí za júl 2021 (obr. 6.6) sú graficky uvedené hodnoty kĺzavých rozpätí nameraných frekvencií a namerané individuálne hodnoty. Proces nie je úplne centrovaný, od ideálnej strednej hodnoty je posunutý o 4,8 Hz bližšie k hornej hranici. Neboli vymedzené žiadne príčiny pri aplikovaní testov vymedziteľných príčin. Proces je štatisticky zvládnutý.



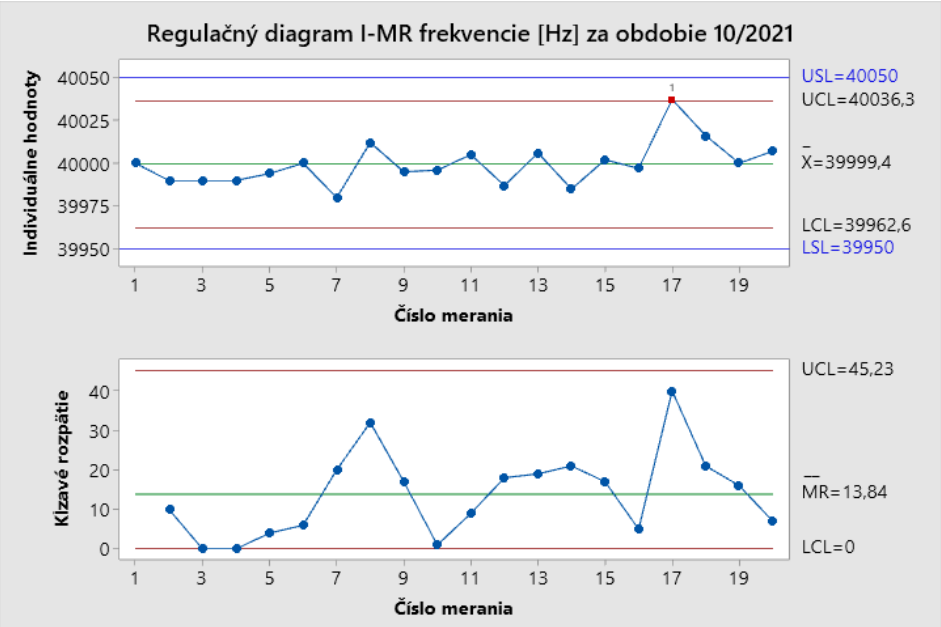
Obr. 6.7 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 8/2021

Regulačné diagramy za mesiac august sú na obr 6.7. Priemer procesu, centrálna priamka je nižšie ako v predošlom období. V tomto období bol proces veľmi dobre vycentrovaný. Od ideálnej strednej hodnoty je vzdialený len o 0,2 Hz smerom k dolnej hranici. Opäť neboli vymedzené žiadne vymedziteľné príčiny, preto je možné proces aj v tomto mesiaci považovať za štatisticky zvládnutý.

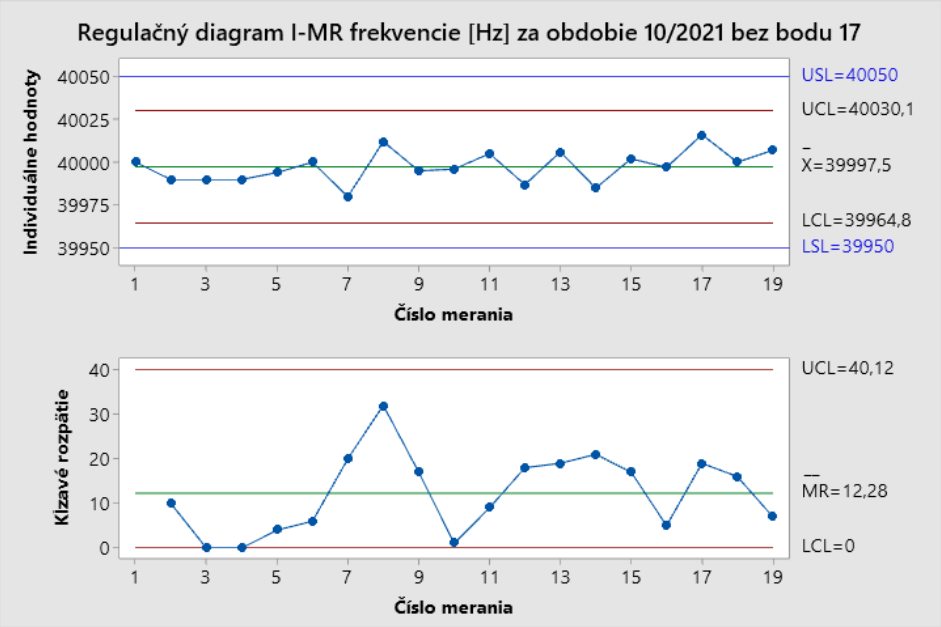


Obr. 6.8 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 9/2021

Regulačné diagramy za obdobie mesiaca september (obr. 6.8) majú nastavené regulačné medze aj centrálnu priamku posunutú bližšie k hornej hranici. V diagrame kĺzavých rozpätí ani v diagrame individuálnych hodnôt neboli zistené vymedziteľné príčiny. Na proces majú vplyv iba náhodné príčiny, ktoré spôsobujú určitú variabilitu procesu. Proces je za mesiac september v štatisticky zvládnutom stave.

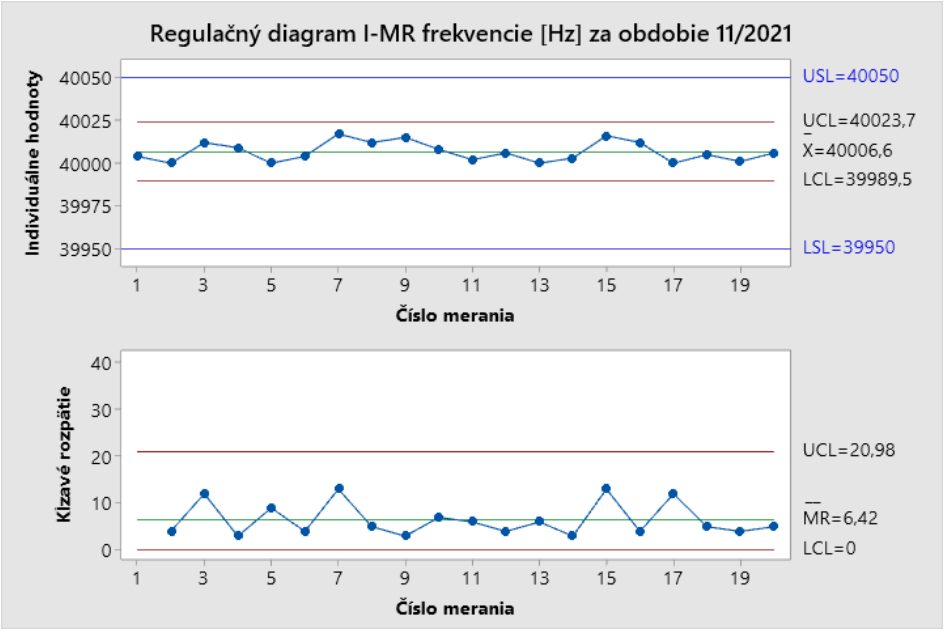


Obr. 6.9 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 10/2021



Obr. 6.10 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 10/2021 upravený

Regulačný diagram individuálnych hodnôt za mesiac október (obr. 6.9) vykazuje znaky štatisticky nezvládnutého procesu. Sedemnásta nameraná hodnota frekvencie prekračuje hornú regulačnú medzu. Po preskúmaní bolo zistené, že nedošlo k zmene podmienok v procese výroby. Hodnota frekvencie v tomto bode prekračuje hornú regulačnú medzu len o 1 Hz. Hodnota však neprekračuje tolerančné medze, takže sa nejedná o nezhodný výrobok. Tento bod bol z regulačných diagramov odstránený (obr. 6.10). Po odstránení bodu, ktorý nevyhovel testu č.1 a prekročil hornú regulačnú medzu je proces aj v tomto období štatisticky zvládnutý.



Obr. 6.11 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 11/2021

Regulačný diagram individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí za obdobie 11/2021 (obr. 6.11) vykazuje najmenšiu variabilitu spomedzi RD za všetky skúmané obdobia. Neboli vymedzené žiadne vymedziteľné príčiny. Variabilita je spôsobená náhodnými príčinami. Centrálna priamka je od ideálnej strednej hodnoty posunutá o 6 Hz smerom k hornej regulačnej medzi. Proces je napriek tomuto posunutiu relatívne centrovaný voči tolerančným medziam. V tomto období je možné proces považovať za štatisticky zvládnutý. Na základe malej variability dát je možné predpokladať, že index spôsobilosti procesu v tomto období bude dosahovať najvyšších hodnôt.

6.2.5 Hodnotenie spôsobilosti procesu

Spôsobilosť procesu po odstránení vymedziteľných príčin bola podľa vzťahov 4.15 a 4.16 stanovená pre jednotlivé mesiace. Stanovené hodnoty indexov spôsobilosti c_p a c_{pk} sú uvedené v tab. 6.6.

Tab. 6.6 Spôsobilosť alanyzovaného procesu

Mesiac/rok	**7/2021**	**8/2021**	**9/2021**	**10/2021**	**11/2021**
Spôsobilosť					
c_p [-]	1,51	1,54	1,66	1,78	2,92
c_{pk} [-]	1,37	1,54	1,40	1,69	2,54

Kritické indexy spôsobilosti c_{pk} majú byť nižšie alebo rovnaké ako indexy spôsobilosti procesu c_p. V období 8/2021 sú indexy rovnaké vplyvom zaokrúhľovania. Zároveň bol v tomto období proces najlepšie vycentrovaný, preto sa indexy po zaokrúhlení nelíšia. Index spôsobilosti procesu je vždy vyšší ako v predchádzajúcom období. Výsledok indikuje, že proces je dostatočne spôsobilý ale nie vždy ideálne vycentrovaný. Napriek tejto skutočnosti je proces celkovo považovaný za spôsobilý. Najmenší index spôsobilosti procesu z jednotlivých období je zároveň aj index spôsobilosti celého procesu. Po porovnaní celkového kritického indexu spôsobilosti 1,37 s hodnotami uvedenými v tab. 4.2 je proces výroby vybraného typu sonotródy spôsobilý.

6.3 Aplikácia štatistickej prebierky

Na urýchlenie procesu kontroly bol aplikovaný princíp štatistickej prebierky. Keďže nie je možné samotnú kontrolu jedného kusu urýchliť, pomocou štatistickej prebierky a preberacieho plánu bol znížený počet kontrolovaných kusov. Pre správnu aplikáciu bola navrhnutá výroba skúmaného typu sonotródy v dávkach. Jedná sa o relatívne malý diel, preto na výrobu v dávkach a jej následné skladovanie nie je potrebné vynaložiť extra náklady. Na základe počtu objednaných kusov z historických dát bola navrhnutá výroba v dávkach po 20 ks. Napriek tomu, že je skúmaný parameter merateľný, výsledná hodnota je len orientačná a parameter sa v konečnom dôsledku hodnotí ako vyhovujúci alebo nevyhovujúci. Preto bola zvolená štatistická prebierka porovnávaním, nie meraním.

Hodnota AQL bola vedením stanovená na 1 %. Bola zvolená všeobecná kontrolná úroveň II a normálna kontrola. Rozsah dávky 20 ks spadá do rozsahu dávky 16 až 25. Priesečník so stĺpcom všeobecnej kontrolnej úrovne II stanovuje kódové písmeno C (tab. 6.7).

Tab. 6.7 Voľba kódového písmena [31]

Rozsah dávky	**Všeobecné kontrolné úrovne**		
	I	II	III
16 až 25	B	C	D

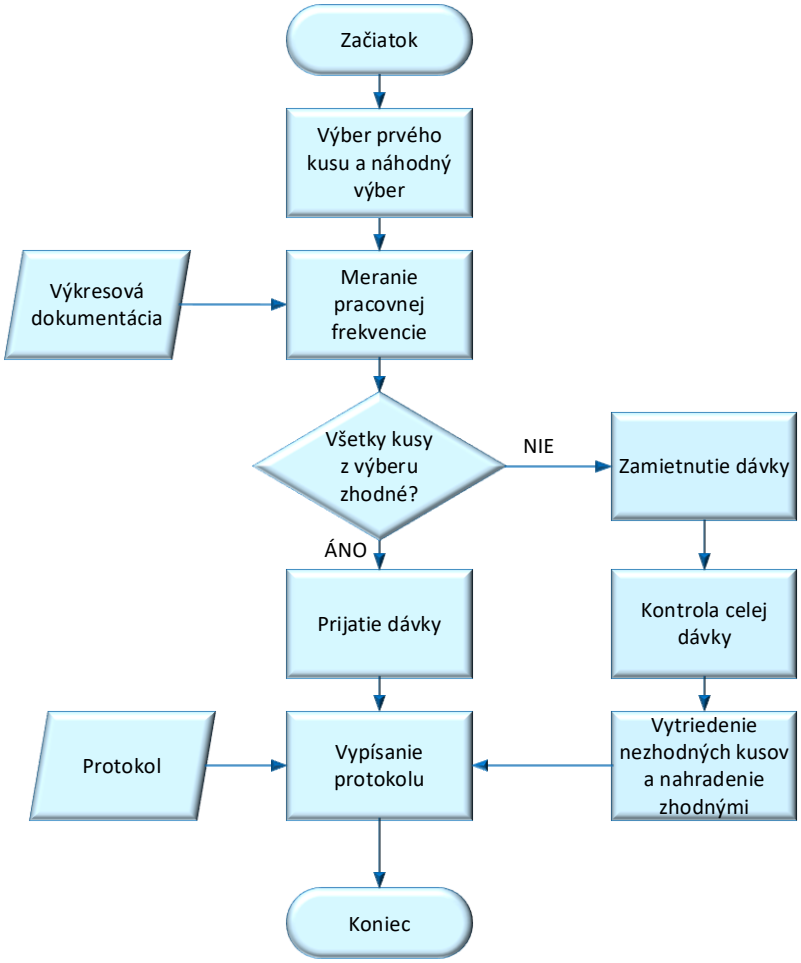
Na základe kódového písmena C a stanoveného AQL 1 % sa podľa tab. 6.8 určí rozsah výberu. Určí sa tiež preberacie a zamietacie číslo. Podľa normy ČSN ISO 2859-1 je pre AQL menšie ako 2,5 % pre rozsah dávky 20 ks stanovené použiť najbližšie nasledujúce kódové písmeno, pre ktoré je preberací plán stanovený [31]. Pri požadovanej hodnote AQL 1 % je potrebné zvoliť preberací plán s väčším rozsahom dávky. Podľa tab. 4.5 je kódové písmeno E a rozsah dávky 13 ks. Pri tomto rozsahu je preberacie číslo 0 a zamietacie 1. Z toho vyplýva, že ak pri kontrole bude jeden kus nezhodný, celá dávka bude zamietnutá. Pre hodnotu AQL 1 % pre riziko odoberateľa 10 % je podiel nezhodných jednotiek 16,2 % (tab. 4.9).

Tab. 6.8 Preberací plán [31]

Kódové písmeno	**Rozsah výberu**	**Prípustná medza kvality AQL v % nezhodných jednotiek**					
		1		1,5		2,5	
		Ac	Rc	Ac	Rc	Ac	Rc
C	5	↓	↓	↓	↓	0	1
D	8	↓	↓	0	1	0	1
E	13	0	1	0	1	1	2

6.3.1 Návrh systému zabezpečovania kvality

Navrhujem skontrolovať vždy prvý kus v dávke a ostatné kusy náhodným výberom podľa preberacieho plánu. Preberací plán je aplikovaný na výstupnú kontrolu a výrobky budú ďalej distribuované koncovému zákazníkovi. Navrhujem neprechádzať na zmiernenú kontrolu podľa prechodových pravidiel. Zmenšenie rozsahu výberu vedie k zvýšenému riziku zamietnutia dávky. Po zamietnutí dávky od dodávateľa – výroby, navrhujem vykonať stopercentnú kontrolu celej dávky. Nezhodné kusy budú následne vrátené do výroby na opravu. Po oprave budú sonotródy opäť skontrolované. Návrh systému zabezpečovania kvality po aplikovaní preberacieho plánu je na obr. 6.12.



Obr. 6.12 Návrh systému zabezpečovania kvality

6.4 Teoretický ekonomický a časový prínos

Zavedením kontroly rozsahu výberu menším ako je rozsah dávky sa skráti čas celkovej kontroly dávky. Dôvodom znižovania počtu kontrolovaných kusov je najmä časová úspora. S časovou úsporou je spojená aj úspora finančná. Ak by sa počet kontrolovaných kusov neznížil, proces kontroly by sa urýchlil minimálne. Spoločnosť by musela vynaložiť finančné prostriedky na zamestnanie a mzdu ďalšieho kontrolóra kvality ultrazvukových nástrojov alebo vynaložiť náklady na prácu kontrolóra nad rámec pracovnej doby. Finančné aj časové úspory sú vyčíslené orientačne. Výpočty sú stanovené pre ideálny prípad, kedy žiadna dávka nebude odoberateľom zamietnutá – žiadna dávka nebude podliehať stopercentnej kontrole.

V prípade zvoleného výrobku v tejto diplomovej práci sa z rozsahu dávky 20 ks skontroluje 13 ks, čím sa dosiahne časová úspora oproti predchádzajúcemu spôsobu kontroly 35 %. Kontrola jedného kusu trvá 680 s [34]. Počíta sa s výrobou jednej dávky s rozsahom 20 kusov mesačne. Znížením počtu kontrolovaných kusov z 20 na 13 kusov je časová úspora 79,3 minút mesačne (tab. 6.9). Zabezpečovaním kvality aj iných typov ultrazvukových nástrojov, ktoré je možné vyrábať v dávkach na základe preberacieho plánu môže byť časová úspora omnoho väčšia. Tento čas môže byť využitý na kontrolu ďalších typov ultrazvukových nástrojov. Okrem financií vynaložených na mzdu zamestnanca vznikne finančná úspora aj režijných nákladov (tab. 6.10). Medzi režijné náklady patria náklady na spotrebovanú elektrickú energiu – osvetlenie pracoviska, klimatizácia, spotreba elektrickej

energie testovacím zariadením a počítačovej jednotky. Ďalej sem patria náklady na údržbu používaných nástrojov.

Tab. 6.9 Mesačná časová úspora

Časová úspora mesačne	
Testovanie 1 jednotky	11,3 min
Testovanie dávky 20 ks	226,0 min
Testovanie rozsahu výberu 13 ks	146,9 min
Celková časová úspora	**79,1 min**

Tab. 6.10 Náklady na hodinu prevádzky pracoviska

Náklady na hodinu prevádzky pracoviska	
Hodinové mzdové náklady na zamestnanca	10 €
Režijné náklady prepočítané na hodinu	2 €
Náklady na údržbu	0,50 €
Celkové náklady na hodinu	12,50 €
Celkové náklady na 79,1 min	**16,48 €**

Diplomová práca sa zameriava na testovanie jedného typu ultrazvukových nástrojov, preto časová ani finančná úspora nie je veľká. Aplikovaním kontroly podľa preberacieho plánu na ďalšie typy ultrazvukových nástrojov vhodných na výrobu v dávkach sa časová aj finančná úspora zvýši. Počet typov vhodných na výrobu v dávkach po 20 ks je ďalších 7 typov. Čas kontroly jedného kusu je vždy rovnaký. Aplikovaním daného riešenia na všetkých 8 typov sa časová úspora zvýši na 10,55 hodín mesačne. Finančná úspora sa zvýši na 131,84 € mesačne, za rok je to ušetrených 1582,08 €.

6.5 Vlastné závery a odporúčanie pre prax

Zavedením kontroly kvality ultrazvukových nástrojov inšpirovaných štatistickou prebierkou sa zníži časová náročnosť kontroly celej dávky, hoci sa neskráti čas kontroly jedného kusu. Diplomová práca bola zameraná na zvolený typ ultrazvukových nástrojov ale zvolené riešenie je možné aplikovať na viacero typov nástrojov, čím sa časové aj ekonomické úspory zvýšia. Štatistickou reguláciou procesu je možné sledovať úroveň kvality vyrábaných ultrazvukových nástrojov.

V tejto podkapitole je uvedených niekoľko odporúčaní na možné zlepšenie procesu vo firme. Odporúčania boli stanovené na základe pozorovania a preskúmania procesu.

Prvým odporúčaním je pravidelná kalibrácia všetkých meracích prístrojov. Ak prístroj nie je možné kalibrovať, navrhujem zvážiť kúpu nového zariadenia na analýzu a testovanie ultrazvukových nástrojov, ktoré možnosť kalibrácie ponúka. Pred používaním meracích zariadení je nutné overiť ich spôsobilosť a vhodnosť na meranie daného parametra. Z kalibračného listu a na základe rozptylu nameraných hodnôt stanoviť neistotu merania. Neistotu merania uvádzať aj pri nameranej hodnote v protokole.

V súvislosti s protokolmi odporúčam zavedenie digitálnych protokolov, ktoré sa ukladajú do databáz. Elektronické dáta sú výhodnejšie aj pre zákazníka. Je možné ich kedykoľvek a jednoducho opätovne vyhľadať v prípade potreby. Zaznamenávanie všetkých

získaných dát počas výstupnej ale aj medzioperačných kontrol prináša viac informácii o procese. Umožňuje vyhľadať každý kontrolovaný kus a zistiť históriu jeho opráv. So zavedením digitalizácie sa proces kontroly jednotlivých dielov urýchli a zjednoduší. V rámci digitalizácie navrhujem zaobstarať meradlá s bezkontaktným prenosom dát. Tým sa eliminuje čas na ručné zapisovanie nameraných hodnôt a chyby ľudského činiteľa pri odčítavaní z displeja.

Ďalším odporúčaním je vyrábať ultrazvukové nástroje v dávkach, ak to situácia umožňuje. Pomocou princípu štatistickej prebierky stanoviť rozsah výberu na základe rozsahu dávky. Kontrola menšieho počtu kusov výberu je rýchlejšia ako stopercentná kontrola celej dávky. Zavedením regulačných diagramov do procesu kontroly ultrazvukových nástrojov je možné sledovať trendy. Včasná identifikácia výroby nezhodných výrobkov na základe pozorovaných trendov umožňuje zaviesť určité opatrenia na minimalizovanie spôsobenej škody. Zavedením regulačných diagramov je možné pozorovať nenáhodné zoskupenia, identifikovať ich príčinu a zabrániť výrobe nezhodných jednotiek. Aby zavedenie regulačných diagramov nepredĺžilo čas kontroly, odporúča sa používať na ich tvorbu vhodný štatistický software.

7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA

Výroba ultrazvukových nástrojov je veľmi špecifický proces. Vlastnosti ultrazvukových nástrojov sú ovplyvňované rôznymi faktormi. Pri zabezpečovaní kvality je dôležité tieto faktory poznať, predpokladať ako sa prejavia a včas ich korigovať. Teplota sonotródy má vplyv na jej pracovnú frekvenciu. Vplyv okolitej teploty je zanedbateľný. Počas sledovaného obdobia sa menila teplota v hale vplyvom počasia. Vplyv teploty okolia sa na analyzovaných vlastnostiach sonotród nepreukázal. Na frekvenciu sonotród má vplyv aj materiál. Nie len typ materiálu, ale aj jednotlivé dávky rovnakého materiálu. S touto skutočnosťou je treba počítať a ladiť sonotródy pomocou ich dĺžky vždy, keď sa použite nový polotovar. Vplyv vyššie spomenutých faktorov na výrobu ultrazvukových nástrojov je možné minimalizovať výrobou nástrojov v dávkach, kedy na celú dávku pôsobia rovnaké podmienky.

Zabezpečovanie kvality ultrazvukových nástrojov nie je jednoduché. Využívanie regulačných diagramov napomáha proces regulovať. Regulačné diagramy zobrazujú trendy vo výrobe ultrazvukových nástrojov. Tie indikujú možný vznikajúci problém. Regulovaním procesu je možné potenciálny problém predpokladať a včas zasiahnuť. Náklady na opatrenia stanovené na zabránenie výroby nezhodných kusov sú ekonomicky prijateľnejšie pre firmu ako oprava, v horšom prípade likvidácia a následná výroba nových kusov.

Aplikáciou regulačných diagramov sa proces kontroly neurýchli. Ďalšia pracovná sila nie je ekonomicky výhodná, preto bolo toto riešenie zamietnuté. Aplikovaním kontroly inšpirovanej preberacím plánom sa proces kontroly urýchli, avšak s rizikom neodhalenia nezhodných kusov. To sa v budúcnosti môže prejaviť na výskyte reklamácii. Podľa počtu a závažnosti reklamácii v snahe neprísť o zákazníka je možné, že sa bude musieť zvýšiť rozsah výberu. V najhoršom prípade bude nutné sa vrátiť späť k stopercentnej kontrole ultrazvukových nástrojov. Princíp štatistickej prebierky je vhodnejšie aplikovať na dávky s výrazne väčším rozsahom.

8 ZÁVER

Diplomová práca bola zameraná na problematiku zabezpečovania kvality ultrazvukových nástrojov. Práca bola zameraná na akustický parameter – pracovnú frekvenciu zvoleného typu ultrazvukových nástrojov používaných na ultrazvukové rezanie.

Prvým cieľom práce bolo vykonať rozbor v súčasnosti využívaných ultrazvukových nástrojov. Popis princípu ultrazvukových technológii je predmetom kapitoly 3. Kapitola 4 je zameraná na popis funkcie ultrazvukových nástrojov, ich rozdelenie podľa rôznych parametrov. Obsahuje tiež požiadavky kladené na ultrazvukové nástroje so zameraním na ich akustické vlastnosti.

Systémový rozbor riešenej problematiky bol ďalším cieľom diplomovej práce. Systémový rozbor bol vykonaný podľa modelu DMAIC. Zahŕňa popis súčasného stavu zabezpečovania kvality ultrazvukových nástrojov v spoločnosti a definovanie problému. Súčasťou systémového rozboru je návrh riešenia danej problematiky a zdôvodnenie vybraného spôsobu riešenia.

Ďalším cieľom práce bolo štatistické spracovanie vybraného procesu. Štatistické spracovanie procesu výroby ultrazvukových nástrojov z hľadiska ich pracovnej frekvencie je uvedené v kapitole 6. Na štatistickú reguláciu procesu boli zvolené Shewhartove regulačné diagramy individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí. Tento typ diagramu bol zvolený z dôvodu malého objemu výroby. Kapitola 6 zahŕňa aj analýzu spôsobilosti procesu počas analyzovaného obdobia. Stav procesu po stanovení indexov spôsobilosti procesu bol hodnotený ako spôsobilý.

Návrh riešenia obsahuje výrobu zvoleného typu ultrazvukových nástrojov v dávkach a následne aplikáciu štatistickej prebierky. Bol stanovený preberací plán, na základe ktorého bol stanovený počet kontrolovaných kusov v závislosti od veľkosti dávky. Zvolená veľkosť dávky vychádza z historických dát o počte vyrobených kusov za mesiac. Keďže ide o výstupnú kontrolu, návrh redukovania počtu kontrolovaných kusov neobsahuje prechod na zmiernenú ani sprísnenú kontrolu. Sprísnená kontrola by znamenala stopercentnú kontrolu celej dávky, čo bol východzí stav riešenej problematiky. Preberacie plány sú použité bez prechodu na zmiernenú alebo sprísnenú kontrolu, preto kontrola neprebieha v súlade s ISO 2859. Preberací plán bol stanovený na overovanie kvality ultrazvukových nástrojov.

Bol stanovený odhad ekonomického prínosu a časová úspora kontroly kvality ultrazvukových nástrojov v ideálnej modelovej situácii, kedy nie je žiadna dávka zamietnutá. Časová úspora kontroly kvality jednej dávky bola stanovená na 79,1 minúty. Ekonomický prínos zavedenia kontroly zvoleného typu ultrazvukového nástroja podľa preberacieho plánu je 16,48 €. Táto suma nie je pre firmu významná, ale pri zvýšení objemu výroby nie je nutné na kontrolu kvality vynaložiť ďalšie finančné náklady.

Práca obsahuje odporúčania pre prax, ktorými je možné proces ešte zlepšovať a urýchliť. Odporúčanie pre prax zahŕňa štatistickú reguláciu procesu I-MR regulačnými diagramami rozsahu výberu a sledovanie trendov v čase. Dôležitou súčasťou kvality je pravidelná kalibrácia meracích prístrojov. Zavedenie digitalizácie v spoločnosti znižuje časovú náročnosť kontroly kvality jedného kusu.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

[1] BELANČÍK, František. Ultrazvukové technológie v praxi. In: *Technika* [online]. 2008, (5) [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: http://www.belson-sk.sk/domain/belson-sk/files/ultrazvukove-cistenie-a-zvaranie%20-%20%C4%8Dl%C3%A1nok%20.pdf

[2] DUKANE. *Guide to Ultrasonic Plastics Assembly* [online]. USA, © 1996-2011 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://documents.dukane.com/DesignGuides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf

[3] BELANČÍK, František. Ultrazvukové zváranie a delenie termoplastov. *Strojárstvo* [online]. 2010, (4) [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: http://www.belson-sk.sk/domain/belson-sk/files/1284743267ultrazvukove-zvaranie-a-rezanie-..pdf

[4] TROUGHTON, Michael J. *Handbook of Plastics Joining* [online]. 2nd ed. William Andrew Publishing, 2008 [cit. 2022-02-26]. ISBN 978-0-8155-1976-8. Dostupné z: https://app-knovel-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/kn/resources/kpHPJAPGE2/toc?b-q=Ultrasonic%20welding&include_synonyms=no&issue_id=kt00684BT1&hierarchy=undefined

[5] PRIEMYSEL DNES. *Branson Ultrasonics, a.s.* [online]. 7.1.2021 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://www.priemyseldnes.sk/exkluzivne-rozhovory/branson-ultrasonics-as-210107

[6] LOYDA, Miloslav. *Svařování termoplastů*. 2., dopl. a rozš. vyd. Praha: UNO Praha, 2011. ISBN 978-80-904949-0-9.

[7] SOBOTKOVÁ, Lýdia. Poznatky o zváraní plastov ultrazvukom a jeho využitie v praxi. In: *Transfer inovácií* [online]. Košice, 2005 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/8-2005/pdf/124-129.pdf

[8] BELSON. *Ultrazvukové rezanie* [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: http://www.belson-sk.sk/produkty/ultrazvukove-rezanie/

[9] EMERSON. *Ultrasonic Plastic Welding: Conversion Sequence* [online]. ©2022 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: https://www.emerson.com/cs-cz/automation/welding-assembly-cleaning/ultrasonic-plastic-welding

[10] BE-RI. *Lousy Waves* [online]. 2013 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: https://rittmeyer-beri.de/wp-content/uploads/2015/06/Lausige-Wellen-2013-en.pdf

[11] BRDASON MACHINERY. *Branson Ultrasonic Booster* [online]. © 2017 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: http://www.brdason.com/en/html/Product_113.html

[12] EMERSON. *Converters and Boosters Now Available for Next Day Delivery* [online]. © 2020 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: https://www.emerson.com/documents/automation/next-day-delivery-converters-boosters-branson-en-us-6652050.pdf

[13] BRANSON. *Ultrasonic Horn Catalog* [online]. ©2014 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-ultrasonic-horn-branson-en-us-160126.pdf

[14] JIAYUANDA TECHNOLOGY. *JiayuandaTech* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: https://www.jydultrasonic.com/

[15] BELSON. *Ultrasonic food cutting* [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: http://www.belson-sk.sk/domain/belson-sk/files/ultrasonic-food-cutting.pdf

[16] ČSN EN ISO *9000. Systémy* managementu kvality – Základní principy a slovník. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[17] ROCHESTER INDUSTRIAL SERVICES. *TRZ Ultrasonic Horn Analyzer* [online]. ©2002-2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.rochesterindustrialservices.com/ultrasonic-welding-equipment-repairs/ultrasonic-troubleshooting/trz-ultrasonic-horn-analyzer

[18] ATCP PHYSICAL ENGINEERING. *TRZ® Analyzer – Ultrasonic transducer and horn analyzer* [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.atcp-ndt.com/en/products/trz

[19] ATCP PHYSICAL ENGINEERING. *TRZ Ultrasonic Transducer and Horn Analyzer* [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.atcp-ndt.com/images/TRZ/Flyer-TRZ-EN.pdf

[20] ROCHESTER INDUSTRIAL SERVICES. *SonicSniffer* [online]. ©2002-2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.rochesterindustrialservices.com/ultrasonic-welding-equipment-repairs/ultrasonic-troubleshooting/sonicsniffer

[21] ATCP PHYSICAL ENGINEERING. *SonicSniffer+: Non-contact ultrasonic frequency meter* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://media.cmsmax.com/dvkfciohhjuutxxkrh7tj/sonic-sniffer.pdf

[22] FYCG. *Ultrasonic Amplitude Measuring Instrument* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.fycgultrasonic.com/product/ultrasonic-amplitude-measuring-instrument.html

[23] C. MONTGOMERY, Douglas. *Introduction to Statistical Quality Control*. 6th ed. USA: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.

[24] NENADÁL, Jaroslav a kol. *Moderní management jakosti: Principy, postupy a metody*. Praha: Management Press, 2008. ISBN 978-800-7261-186-7.

[25] ČSN ISO 7870-2. *Regulační diagramy – Část 2: Shewartovy regulační diagramy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[26] L. GEORGE, Michael, David ROWLANDS, Mark PRICE a John MAXEY. *Kapesní příručka Lean Six Sigma*. Brno: SC&C Partner, 2010. ISBN 978-80-904099-2-7.

[27] ČSN ISO/TR 10017. *Návod k aplikaci statistických metod v ISO 9001:2000*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[28] SVOZILOVÁ, Alena. *Zlepšování podnikových procesů*. Praha: Grada Publishing, 2011. ISBN 978-80-247-3938-0..

[29] JANKOVÝCH, Róbert. *Způsobilost procesů*. Brno, 2021. Prednáška. VUT.

[30] ANDREJIOVÁ, Miriam a Zuzana KIMÁKOVÁ. Indices Cg and Cgk in the assessment if the measuring device capability. In: *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering* [online]. 2014 [cit. 2022-04-17]. ISSN 1584-2673. Dostupné z: https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2014/ANNALS-2014-4-17.pdf

[31] ČSN ISO 2859-1. *Statistické přejímky srovnáváním: Část 1: Přejímací plány AQL pro kontrolu každé dávky v sérii*. Praha: Český normalizační institut, 2000.

[32] BENKOVÁ, Marta. *Zabezpečovanie kvality procesov*. Košice, 2007. Skripta. TUKE

[33] ČSN ISO 13053-1. *Kvantitativní metody zlepšování procesu – Six Sigma: Část 1: Metodologie DMAIC*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[34] Interné dokumenty spoločnosti Branson Ultrasonics, a.s.

10 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

10.1 Zoznam skratiek

AQL	prípustná medza kvality
CL	centrálna priamka
DMAIC	definovať, merať, analyzovať, zlepšovať, riadiť
I-MR	regulačný diagram individuálnych hodnôt a kĺzavých rozpätí
LCL	dolná regulačná medza
LSL	dolná medza špecifikácie
NC	číslicovo riadené
PDCA	plánuj, vykonaj, over, jednaj
RD	regulačný diagram
SPC	štatistická regulácia procesu
UCL	horná regulačná medza
USL	horná medza špecifikácie

10.2 Zoznam značiek

A_2, A_3, B_3, B_4, D_3, D_4	súčinitele pre výpočet regulačných medzí
Ac	preberacie číslo
c_g	index spôsobilosti systému merania
c_{gk}	kritický index spôsobilosti systému merania
c_p	index spôsobilosti procesu
c_{pk}	kritický index spôsobilosti procesu
F	frekvencia
Hz, kHz	hertz, kilohertz
ks	kus
MR	kĺzavé rozpätie
n	počet
R	rozpätie
s	výberová smerodajná odchýlka
s^2	výberový rozptyl
T	tolerancia meraného rozmeru
W	watt
x	individuálna hodnota
x_r	referenčná hodnota

α	chyba prvého druhu
β	chyba druhého druhu
µm	mikrometer
σ	štandardná odchýlka procesu

10.3 Zoznam tabuliek

Tab. 2.1 Označenie boostrov podľa zosilnenia [11] 20
Tab. 2.2 Peak-to-peak amplitúdy rôznych frekvencií konvertora [2] 21
Tab. 3.1 Základné rozdelenie ultrazvukvých nástrojov 24
Tab. 4.1 Súčinitele pre výpočet regulačných medzí [25] 40
Tab. 4.2 Hodnoty indexov spôsobilosti [29] 43
Tab. 6.1 Namerané dáta pre analýzu spôsobilosti meracieho systému 56
Tab. 6.2 Namerané hodnoty frekvencie 57
Tab. 6.3 Popisná štatistika nameraných dát 58
Tab. 6.4 Výpočet kĺzavých rozpätí (MR) nameraných hodnôt a pracovnej frekvencie (F) 60
Tab. 6.5 Stanovené regulačné medze 61
Tab. 6.6 Spôsobilosť alanyzovaného procesu 64
Tab. 6.7 Voľba kódového písmena [31] 65
Tab. 6.8 Preberací plán [31] 65
Tab. 6.9 Mesačná časová úspora 67
Tab. 6.10 Náklady na hodinu prevádzky pracoviska 67

10.4 Zoznam obrázkov

Obr. 2.1 Použitie ultrazvukového rezania v potravinárskom priemysle [8] 18
Obr. 2.2 Schematické znázornenie technológie ultrazvukového zatláčania [4] 19
Obr. 2.3 Zmena frekvencie a veľkosti amplitúdy v zostave [9] 19
Obr. 2.4 Titánové 20 kHz boostre [12] 21
Obr. 2.5 40 kHz, 30 kHz a 20 kHz konvertor [12] 22
Obr. 3.1 Ultrazvukové nástroje a) titánové, b) hliníkové, c) oceľové [14] 23
Obr. 3.2 Valcová sonotróda a) plná, b) dutá [13] 24
Obr. 3.3 Sonotróda a) exponenciálna, b) katenoidálna, c) stupňovitá (high-gain) [2] 25
Obr. 3.4 Ultrazvukové nástroje s drážkami [2] 26
Obr. 3.5 Kompozitný ultrazvukový nástroj [vlastný zdroj] 26
Obr. 3.6 Jednoduchá sonotróda na rezanie [vlastný zdroj] 27
Obr. 3.7 Kompozitné sonotródy na rezanie a) bočnou hranou, b) spodnou hranou [13] 27
Obr. 3.8 Ultrazvukový nástroj a) so snímačom dielov b) s vákuom [13] 28
Obr. 3.9 Booster-sonotróda [13] 28
Obr. 3.10 Požiadavky kladené na ultrazvukové nástroje [vlastný zdroj] 29
Obr. 3.11 Priebeh napätia a amplitúdy [4] 31
Obr. 3.12 TRZ analyzátor ultrazvukových nástrojov [19] 33
Obr. 3.13 Test a) konvertora a boostra, b) ultrazvukovej zostavy [18] 33
Obr. 3.14 Bezkontaktný merač frekvencie SonicSniffer+ [21] 34
Obr. 3.15 Zaradenie na meranie amplitúdy v praxi model YP0901B [22] 34
Obr. 4.1 Testy vymedziteľných príčin [25] 38
Obr. 4.2 Kritériá voľby regulačného diagramu [25] 39

Obr. 4.3 Vzťah medzi indexami c_p a c_{pk} [23] 42
Obr. 4.4 Kontrolné úrovne a kódové písmená [31] 46
Obr. 4.5 Preberacie plány jedným výberom (normálna kontrola) [31] 46
Obr. 4.6 Schéma prebierky [23] 47
Obr. 4.7 Priebehy operatívnych charakteristík [31] 47
Obr. 4.8 Riziko dodávateľa a odoberateľa [32] 48
Obr. 4.9 Kvalita zodpovedajúca riziku odoberateľa (normálna kontrola) [31] 48
Obr. 5.1 Cyklus DMAIC podľa [33] 49
Obr. 5.2 Vývojový diagram kontroly ultrazvukových nástrojov 50
Obr. 5.3 Vývojový diagram výroby ultrazvukových nástrojov 51
Obr. 5.4 Formulár na zaznamenávanie dát 52
Obr. 5.5 Ishikawov diagram pre zabezpečovanie kvality ultrazvukových nástrojov 53
Obr. 6.1 Pracovisko kontroly ultrazvukových nástrojov 55
Obr. 6.2 Analýza spôsobilosti meracieho systému 56
Obr. 6.3 Zvolený typ ultrazvukového nástroja 57
Obr. 6.4 Test normality dát 58
Obr. 6.5 Histogram 59
Obr. 6.6 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 7/2021 61
Obr. 6.7 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 8/2021 62
Obr. 6.8 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 9/2021 62
Obr. 6.9 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 10/2021 63
Obr. 6.10 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 10/2021 upravený 63
Obr. 6.11 Regulačný diagram I-MR frekvencie za obdobie 11/2021 64
Obr. 6.12 Návrh systému zabezpečovania kvality 66