



# 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

## ODHALENÍ KLÍČOVÝCH FAKTORŮ VZNIKU NESHODNÝCH KUSŮ V SÉRIOVÉ VÝROBĚ

DETECTION OF KEY FACTORS OF NON-STANDARD PIECES IN SERIES PRODUCTION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Beňo

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Bednář, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Tomáš Beňo</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	<b>Ing. Josef Bednář, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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:

## **Odhalení klíčových faktorů vzniku neshodných kusů v sériové výrobě**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V důsledku neznalosti konkrétního technického procesu vzniká velký podíl neshodných kusů z různých příčin. Úkolem práce bude tyto příčiny identifikovat, kvantifikovat, roztřídit a navrhnout účinná opatření pro eliminaci neshod.

### **Cíle diplomové práce:**

- Popis konkrétního problému.
- Stručný popis statistických nástrojů použitelných k řešení problému.
- Vytipování faktorů ovlivňujících proces a sběr dat.
- Analýza problému a návrh opatření.
- Verifikace, pokud kapacity firmy dovolí před odevzdáním práce.
- Vyhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praxi.

### **Seznam doporučené literatury:**

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2013. ISBN 9781118146811.

Statistická regulace procesů (SPC): příručka. 2. vyd. Přeložil Jiří MICHÁLEK. Praha: Česká společnost pro jakost, 2006. ISBN 80-02-01810-9.

TOŠENOVSKÝ, Josef. Statistické metody pro zlepšování jakosti. Ostrava: Montanex, 2000. ISBN 80-7225-040-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Predkladaná diplomová práca sa venuje problematike štatistického riadenia kvality konkrétneho výrobného procesu. Teoreticky uvádza spektrum štatistických nástrojov, ktoré môže poslúžiť pre odhalenie faktorov spôsobujúcich vysoký podiel nezhodných kusov. Záverečná práca prakticky uvádza aplikáciu uvedených nástrojov riadenia kvality do výrobného procesu charakteristického zvýšeným podielom nezhodných kusov, v ktorom sú faktory spôsobujúce ich vznik neznáme a následne podrobne uvádza spôsob, akým tieto faktory odhaliť. Posledná časť práce sumarizuje odporúčenia predané podniku za účelom verifikácie záverov práce.

## **ABSTRACT**

The presented thesis deals with the issue of statistical quality control of a specific production process. The thesis presents a range of statistical tools that can be used to identify the factors causing a high proportion of non-standard pieces. The diploma thesis practically introduces the application of these quality management tools to the production process characterized by an increased proportion of non-standard pieces, in which the factors causing their occurrence are unknown, and as following the thesis in detail introduces the approach how to detect these factors. The last part of the work summarizes the recommendations handed over to the company in order to verify the conclusions of the thesis.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Nezhodné kusy, štatistické riadenie procesu, Binárna logistická regresná analýza, čiastočné výboje, vizuálne vady

## **KEYWORDS**

Non-standard pieces, statistical process control, binary logistic regression analyses, partial discharges, visual defects



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

BEŇO, Tomáš. *Odhalení klíčových faktorů vzniku neshodných kusů v sériové výrobě*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125594>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Josef Bednář, Ph.D.





## **POĎAKOVANIE**

Týmto odstavcom by som sa chcel poďakovať Ing. Josefovi Bednářovi, Ph.D. za vedenie a jeho ochotnú pomoc pri vypracovaní predkladanej záverečnej práce i za okolností a prekážok, ktoré priniesol uplynulý semester. Ďalej by som rád vyjadril vďaku svojim kolegom zo spoločnosti, v ktorej bola práca realizovaná.



## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Josefa Bednáře, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brně dne 26.6.2020

.....

Beňo Tomáš



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ K POUŽITÝM ŠTATISTICKÝM NÁSTROJOM</b> .....	<b>17</b>
2.1	Hypotézy v štatistike.....	17
2.1.1	Hypotézy a ich delenie.....	17
2.1.2	Testovanie hypotéz .....	17
2.1.3	Študentov t-test pre jeden výber .....	19
2.2	Chí-kvadrát test.....	20
2.3	Regresná analýza .....	21
2.3.1	Základné úlohy regresnej analýzy .....	21
2.3.2	Regresná funkcia .....	21
2.3.3	Binárna logistická regresia.....	22
2.4	Paretova analýza .....	22
2.5	Stabilita procesu .....	24
2.5.1	I-MR diagram .....	25
2.5.2	P-diagram .....	27
<b>3</b>	<b>PROCES</b> .....	<b>29</b>
3.1	Technologický proces .....	29
3.1.1	Vetva 1 - hmota .....	29
3.1.2	Vetva 2 – funkčné časti.....	30
3.1.3	Odlievanie .....	31
3.1.4	Spracovanie po odlievaní.....	33
3.2	Defekty v procese .....	34
<b>4</b>	<b>ZBER A ANALÝZA DÁT</b> .....	<b>37</b>
4.1	Zber dát .....	37
4.1.1	Vytvorenie vzorky pre analýzu dát.....	40
4.2	Analýza dát.....	42
4.2.1	Stabilita vstupných premenných a výstupných atribútov .....	42
4.2.2	Nedostatky v procese a ich príčiny všeobecne.....	46
4.2.3	Vada 1 – čiastočné výboje.....	53
4.2.4	Vada 2 – vizuálne vady.....	60
4.3	Odporúčenia pre zvýšenie kvality výstupu procesu .....	63
4.3.1	Všeobecné zlepšenia a štandardizácia .....	64
4.3.2	Úpravy hodnôt procesných veličín a parametrov .....	65
<b>5</b>	<b>ZÁVER</b> .....	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b> .....	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK, GRAFOV A OBRÁZKOV</b> .....	<b>71</b>
7.1	Zoznam tabuliek .....	71
7.2	Zoznam grafov.....	71
7.3	Zoznam obrázkov .....	72



# 1 ÚVOD

V dobe 21. storočia má svet výrazné špecifiká oproti dobám minulým. S pribúdajúcim množstvom ľudí na Zemi je potrebné viac než kedykoľvek predtým nastaviť produkciu výrobných podnikov na čo najvyššiu úroveň efektivity. Efektívna výroba je, okrem maximalizácie finančnej výkonnosti podniku, kľúčom k úspechu v ďalšej, dnes často skloňovanej oblasti, ktorou je ekológia. Ako ekologickú, môžeme vnímať výrobu produktu, pri ktorom je v čo najvyššej miere optimalizované množstvo spotrebovaného materiálu. V praxi to znamená, že výrobný podnik neprodukuje nekvalitné výrobky, ktoré nie sú využiteľné zákazníkom. Dosahovaním vyššej kvality produkcie v organizácii sme schopní využívať materiály efektívnejšie, s nižšou mierou plytvania a vyššou mierou zisku.

Riadenie kvality procesov a ich výstupov je neoddeliteľnou súčasťou managementu všetkých organizácií, nielen výrobných. I keď je paleta nástrojov používaných k týmto účelom rozsiahla, jedným z tých najvýznamnejších je štatistické riadenie procesov. Pomocou namerania údajov o procese a ich následného štatistického spracovania je možné presne definovanými postupmi lepšie pochopiť správanie procesu a z neho plynúcu úroveň kvality výstupu. Taktiež dokážeme odhaliť dôležité oblasti, na ktoré sa potrebujeme v podniku zamerať, aby bola dosahovaná kvalita výstupu čo najvyššia.

Cieľom predkladanej diplomovej práce je odhalenie kľúčových faktorov vzniku nezhodných kusov v zložitej elektrotechnickej výrobe práve s použitím metód a nástrojov štatistického riadenia. Celkový výsledok má byť dosiahnutý pomocou dielčích cieľov, ktorými sú:

- Popis problému a štatistických nástrojov použitých k jeho riešeniu
- Vytipovanie faktorov, ktoré môžu mať dopad na výrobu nezhodných kusov a zber údajov v priebehu času o týchto faktoroch
- Analýza nazbieraných dát, návrh opatrení, vyhodnotenie výsledkov a odporúčenie pre prax

K tvorbe záverečnej práce v uvedenej oblasti ma viedla chuť a potreba hľadať cestu k riešeniu inžinierskeho problému v praxi. Chcem prakticky využiť znalosti nadobudnuté počas štúdia vysokej školy a tiež ponúknutú možnosť podieľať sa na tomto projekte v spolupráci s priemyselným podnikom. Verím, že v budúcnosti práca poslúži ako istý typ metodiky pre riešenie kvalitatívnych nedostatkov výrobného procesu konkrétneho podniku. V rovine osobného rozvoja by som rád posunul ďalej svoje vedomosti v oblasti aplikácií štatistických metód, získané počas štúdia tak, aby som mohol obdobné prístupy aplikovať vo svojom budúcom zamestnaní.





## 2 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ K POUŽITÝM ŠTATISTICKÝM NÁSTROJOM

Keďže práca ma charakter štatistickej analýzy vybraného výrobného procesu v priemyslovom podniku, pre konkrétnu analýzu budú použité určité štatistické metódy a prostriedky. V nasledujúcich kapitolách bude z tohto dôvodu popísaná faktická stránka daných štatistických nástrojov.

### 2.1 Hypotézy v štatistike

Ako vyplýva z názvu práce, pokúsime sa odhaliť najvýznamnejšie parametre, ktoré majú vplyv na kvalitu sledovaného výrobného procesu. Pre odhalenie týchto parametrov budeme, na základe nazbieraných dát, stanovovať a testovať hypotézy.

#### 2.1.1 Hypotézy a ich delenie

Štatistickou hypotézou sa rozumie tvrdenie o vlastnostiach rozdelenia pravdepodobnosti pozorovanej náhodnej veličiny  $X$  s prislúchajúcou distribučnou funkciou  $F(x, \vartheta)$ , kde  $x$  sú zaznamenané hodnoty náhodnej veličiny a  $\vartheta$  je určitý parameter. Stanovenú hypotézu podrobujeme takzvanému testu štatistickej hypotézy. Testovanú hypotézu nazývame tiež nulovou hypotézou a označujeme ju  $H_0$ . Oproti testovanej hypotéze potom stojí alternatívna hypotéza  $\bar{H}$  zvolená podľa požiadaviek danej úlohy. Pokiaľ uvažujeme práve jednu hodnotu parametru, teda  $\vartheta = \vartheta_0$ , hovoríme o jednoduchej hypotéze. V opačnom prípade, ak tvrdíme, že parameter  $\vartheta \neq \vartheta_0$ , jedná sa o zloženú hypotézu. Hypotézy môžu byť ďalej parametrické a neparametrické. Pri parametrických hypotézach súvisí tvrdenie s parametrom pozorovanej náhodnej veličiny  $X$ . Neparametrické hypotézy hodnotia vlastnosti náhodnej veličiny kvalitatívne [1].

#### 2.1.2 Testovanie hypotéz

Pri testovaní hypotéz je nutné vytvoriť vhodnú štatistiku pre náhodnú veličinu  $X$  označovanú aj ako testové kritérium. Testové kritérium má obor hodnôt  $T(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , ktorý sa za predpokladu, že platí hypotéza  $H_0 : \vartheta = \vartheta_0$ , rozdeľuje na dve disjunktívne podmnožiny – teda podmnožiny, ktoré nemajú žiadny spoločný prvok. Tieto dve podmnožiny sú:

- a) Kritický obor  $W_\alpha$
- b) Doplnok kritického oboru  $\bar{W}_\alpha$

Kritický obor  $W_\alpha$  stanovujeme vzhľadom k alternatívnej hypotéze  $\bar{H}$  tak, aby sme s určitou pravdepodobnosťou boli schopní povedať, že testové kritérium  $T(X_1, X_2, \dots, X_n)$  nadobudne hodnotu patriacu kritickému oboru  $W_\alpha$ . Táto pravdepodobnosť sa označuje  $\alpha$ , respektíve hladina významnosti, pričom platí rovnica 2.1 .

$$\alpha > 0 \tag{2.1}$$

Hladinu významnosti volíme blízku nule, najčastejšie 0,05 alebo 0,01 (niekedy ju uvádzame v % - teda buď 5% alebo 1%) [1].

Pre potvrdenie alebo vyvrátenie testovanej hypotézy používame nasledovnú konvenciu: Ak hodnota pozorovaného testového kritéria, ktorej tvar môžeme vidieť v rovnici 2.2

$$t = T(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.2)$$

získaná na štatistickom súbore  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , patrí do kritického oboru  $W_\alpha$ , teda pokiaľ  $t \in W_\alpha$ , zamietame hypotézu  $H_0$  a nezamietame alternatívnu hypotézu  $\bar{H}$  na danej hladine významnosti  $\alpha$ . Naopak, pokiaľ sledované testové kritérium nepatrí do kritického oboru -  $t \notin W_\alpha$ , respektíve patrí do doplnku kritického oboru  $t \in \bar{W}_\alpha$ , nezamietame hypotézu  $H_0$  a zamietame hypotézu  $\bar{H}$  na danej hladine významnosti  $\alpha$ . Fakt, že nezamietneme hypotézu  $H_0$  alebo  $\bar{H}$  však ešte nutne neznamená preukázanie jej platnosti ale len nedostatok informácií získaných z výberu potrebných k jej zamietnutiu. Pokiaľ je to možné, odporúča sa pred prijatím danej hypotézy zväčšiť rozsah testovaného štatistického súboru a hypotézu opätovne testovať [1].

Pri testovaní hypotézu môžu nastať štyri možnosti uvedené v tabuľke 3.1:

H	Platí	Neplatí
Zamietame	<i>Chyba I. druhu</i>	-
Nezamietame	-	<i>Chyba II. druhu</i>

Tabuľka 2.1: Správnosť výsledku pri testovaní hypotéz [1]

Z tabuľky 3.1 je zrejmé, že pokiaľ zamietame neplatnú hypotézu, respektíve nezamietame platnú hypotézu, je výsledok nášho testu správny. V tabuľke môžeme potom rovnako vidieť naznačené dva druhy chýb, ktorých sa pri testovaní hypotéz môžeme dopustiť:

- **Chyba I. druhu:** nastáva v prípade, pokiaľ je hypotéza  $H_0$  platná, avšak  $t \in W_\alpha$ , takže hypotézu zamietneme. Pravdepodobnosť chyby prvého druhu je popísaná hladinou významnosti v rovnici 2.3:

$$\alpha = P(T \in W_\alpha | H_0) \quad (2.3)$$

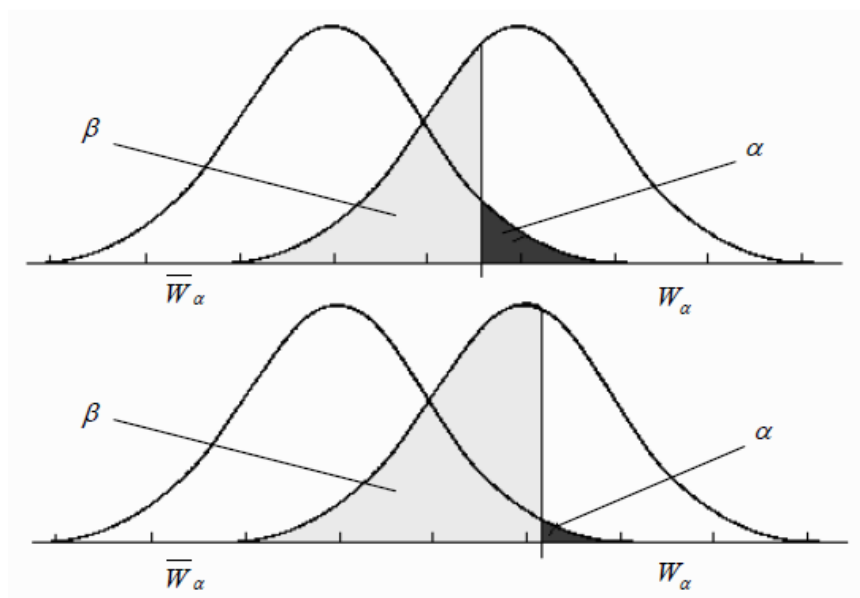
- **Chyba II. druhu:** nastáva v prípade, pokiaľ je hypotéza  $H_0$  neplatná, ale  $t \in \bar{W}_\alpha$ , teda testové kritérium patrí doplnkovému oboru kritického oboru a hypotézu nezamietneme. Pravdepodobnosť vzniku tejto chyby môžeme opäť označiť ako hladinu významnosti, v tomto prípade  $\beta$  a môžeme ju vidieť v rovnici 2.4:

$$\beta = P(T \notin W_\alpha | \bar{H}) \quad (2.4)$$

V rovnici 2.5 môžeme potom vidieť matematické vyjadrenie sily daného testu:

$$1 - \beta = P(T \in W_\alpha | \bar{H}) \quad (2.5)$$

Hladinu významnosti môžeme označiť aj ako pravdepodobnosť chyby I. druhu. Jej praktický význam spočíva v tom, že pokiaľ zrealizujeme mnoho opakovaní náhodného výberu (za predpokladu platnosti hypotézy  $H_0$ ), zmýlime sa približne v  $100\alpha\%$  testov tejto hypotézy – chybou I. druhu, teda zamietame platnú hypotézu. Podobne, pokiaľ hypotéza  $H$  neplatí, zmýlime sa približne v  $100\beta\%$  - hypotézu teda nezamietneme. Z toho vyplýva, že znižovaním hladiny významnosti  $\alpha$  sa pri zachovaní pôvodného rozsahu štatistického súboru zníži  $\beta$  (a naopak), takže pri určitej zvolenej hladine významnosti  $\alpha$  sme schopní znížiť riziko vzniku chyby prvého aj druhého druhu zväčšením štatistického súboru. Vzájomný vzťah medzi  $\alpha$  a  $\beta$  môžeme sledovať na obrázku číslo 2.1 [1].



Obrázok 2.1: Vzájomný vzťah medzi  $\alpha$  a  $\beta$  [1]

Pre zjednodušenie sú obe hypotézy – nulová i alternatívna považované za jednoduché. Pravdepodobnostné funkcie, ktoré sú na obrázku umiestnené vpravo odpovedajú testovému kritériu  $T$  pri platnosti alternatívnej hypotézy  $\bar{H}$ , pričom tie, ktoré sú umiestnené vľavo odpovedajú testovému kritériu  $T$  pri platnosti hypotézy  $H_0$  [1].

### 2.1.3 Študentov t-test pre jeden výber

Tento spôsob testovania hypotéz používame, ak zisťujeme napríklad parametre normálneho rozdelenia. V prípade, že sa nejedná o normálne rozdelenie, test stráca na sile [3]. Ako príklad t-testu si môžeme uviesť testovanie hypotézy  $H_0 : \mu = \mu_0$  pri neznámom rozptyle  $\sigma^2$ . Hodnotu testového kritéria môžeme vidieť v rovnici 2.6 [1]:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s} \sqrt{n - 1} \quad (2.6)$$

kde  $t$  je hodnota testového kritéria,  $\bar{x}$  je priemer výberového súboru,  $\mu_0$  je stredná hodnota, ktorú testujeme a  $n$  je celkový počet uskutočnených pozorovaní [1]. Ďalej zisťujeme či testové kritérium padá do kritického oboru, respektíve jeho doplnku  $\overline{W}_\alpha$  interval doplnkového oboru je popísaný v rovnici 2.7:

$$\overline{W}_\alpha = \langle -t_{1-\alpha/2}, t_{1-\alpha/2} \rangle, \quad (2.7)$$

kde  $t_{1-\alpha/2}$  je  $(1 - \frac{\alpha}{2})$  – kvantil Študentovho rozdelenia  $S(k)$ , ktoré má  $k = n - 1$  stupňov voľnosti.

## 2.2 Chí-kvadrát test

Chí-kvadrát test, inak nazývaný aj test dobrej zhody alebo Pearsonov Chí-kvadrát test, je štatistický neparametrický nástroj, ktorým môžeme overiť rozdiely medzi jednotlivými triedami dát. Chí-kvadrát test umožňuje získať informácie nielen o štatisticky významných rozdieloch medzi triedami, ale poskytuje nám podrobnú informáciu o tom, ktoré triedy odpovedajú zisteným rozdielom [4].

Chí-kvadrát môžeme využiť napríklad ak chceme testovať či daný súbor dát podlieha určitému štatistickému rozdeleniu. Testujeme teda nulovú hypotézu  $H_0$ , že náhodná veličina  $X$  má distribučnú funkciu  $F(x)$ . Alternatívna hypotéza  $\bar{H}$  tvrdí, že náhodná veličina  $X$  nemá distribučnú funkciu  $F(x)$ . Získaný štatistický súbor  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , roztriedime do  $m$  tried, z ktorých každá bude mať početnosť  $f_j$ , pričom  $j = 1, 2, \dots, m$ . Nasledovať bude výpočet teoretickej absolútnej početnosti jednotlivých tried  $f_j$  podľa rovnice (2.8 [1]):

$$\tilde{f}_j = n (F(x_j^+) - F(x_{j-1}^+)) \quad (2.8)$$

kde  $x_j^+$  značí na číselnej osi pravý koncový bod triedy  $j$ , pričom konvencia hovorí, že  $x_0^+ = -\infty$  a  $x_m^+ = +\infty$ . Roztriedenie štatistického súboru musí byť také, aby v jednotlivých triedach bola dostatočne vysoká teoretická absolútna početnosť  $\tilde{f}_j$ , kedy obvykle požadujeme, aby  $\tilde{f}_j > 5$ . V prípade, že je početnosť nižšia, zlučujeme susedné triedy tak, aby sme túto podmienku splnili. Hodnotu testového kritéria vypočítame zo vzťahu 2.9:

$$t = \sum_{j=1}^m \frac{(f_j - \tilde{f}_j)^2}{\tilde{f}_j} = \left( \sum_{j=1}^m \frac{f_j^2}{f_j} \right) - n \quad (2.9)$$

Doplnok kritického oboru je interval uvedený v rovnici 2.10

$$\overline{W}_\alpha = \langle 0, \chi^2_{1-\alpha} \rangle, \quad (2.10)$$

pričom  $\chi^2_{1-\alpha}$  je  $(1 - \alpha)$  – kvantil Pearsonovho rozdelenia  $\chi^2(k)$  s  $k = m - q - 1$ , ktoré reprezentuje počet stupňov voľnosti. Pod číslom  $q$  sa ukrýva teoretický počet parametrov teoretického rozdelenia danej náhodnej veličiny  $X$ . Toto číslo odhadujeme z roztriedeného štatistického súboru pre určenie hodnôt distribučnej funkcie rozdelenia  $F(x)$ .

## 2.3 Regresná analýza

Pod pojmom regresná analýza sa ukrýva štatistická metóda, ktorej úlohou je nachádzať súvislosti medzi jednotlivými parametrami. Keďže do sledovaného procesu vstupuje mnoho premenných faktorov, ktoré môžu mať dopad na kvalitu výsledného produktu, regresná analýza bude nástrojom, ktorý nám posluží pre zisťovanie súvislostí medzi jednotlivými parametrami.

### 2.3.1 Základné úlohy regresnej analýzy

Regresná analýza nie je jednoúčelovou metódou. V aplikáciách regresnej štatistiky sa stretávame s piatimi typmi základných úloh:

1. Určenie ako je určitý faktor ovplyvnený iným faktorom
2. Predikcia výstupu na základe dostupných dát z minulosti
3. Predpovedať výskyt javu podľa prítomnosti určitého faktoru
4. Zistiť podiel jednotlivých faktorov na výstupe
5. Skúmanie závislostí medzi jednotlivými parametrami [2]

$$y = \varphi(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) = E(Y|\mathbf{X} = \mathbf{x}), \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Regresná funkcia

Pri skúmaní závislosti premenných, ktorých hodnoty sme získali realizáciou experimentov je naším cieľom zistiť tvar takzvanej regresnej funkcie, ktorá popisuje matematickú závislosť jednotlivých parametrov. Nezávislé parametre sú reprezentované náhodným vektorom, ktorý má tvar popísaný rovnicou 2.11 [1]:

Závislé náhodné veličiny sú potom popísané ako  $Y$ . Aby sme popísali vzťah medzi závislými a nezávislými premennými, respektíve závislosť závislých náhodných veličín  $Y$  na nezávislých premenných  $\mathbf{X}$ , používame regresnú analýzu. Funkčný vzťah medzi nimi je vyjadrený regresnou funkciou, ktorej tvar môžeme vidieť v rovnici 2.11 [1], kde  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  reprezentuje vektor nezávislých premenných,  $y$  je závislá premenná,  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  je vektor parametrov, respektíve regresných koeficientov. Vektor nezávislých premenných  $\mathbf{x}$  odpovedá hodnote náhodného vektoru  $\mathbf{X}$  a závislá premenná  $y$  odpovedá hodnote náhodnej veličiny  $Y$ . Posledná časť rovnice  $E(Y|\mathbf{X} = \mathbf{x})$  reprezentuje podmienenú strednú hodnotu [1].

Uskutočnením určitého počtu experimentov získavame štatistický súbor, ktorý má tvar  $((\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n))$ , pričom  $y_i$  je pozorovaná hodnota závislej náhodnej veličiny  $Y_i$  pri konkrétnych realizáciách experimentu a  $\mathbf{x}_i$  je pozorovaná hodnota vektoru nezávisle premenných  $\mathbf{X}$  [1].

Posledným krokom pre určenie samotnej regresnej funkcie je aplikácia vhodnej metódy, ktorá nám pomôže odhaliť funkčnú závislosť. Cieľom je odhad regresných koeficientov – teda zložiek vektoru  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ . Jednou z najvyužívanejších metód je takzvaná metóda najmenších štvorcov, kde minimalizujeme reziduálny súčet štvorcov popísaná rovnicou 2.12 [1]:

$$S^* = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\beta})]^2 \quad (2.12)$$

Pred samotným úkonom optimalizácie reziduálnych štvorcov, musíme ešte správne odhadnúť tvar regresnej funkcie na základe dát získaných experimentálne.

### 2.3.3 Binárna logistická regresia

V technickom priemysle, v obchodných transakciách i v mnohých iných odvetviach, ktoré používajú klasickú regresnú analýzu na predikciu hodnôt určitých veličín, môže byť premenná  $y$  atribút, ktorý podlieha binomickému rozdeleniu, nie normálnemu. V takom prípade by štandardná lineárna regresia nebola postačujúca. Binárna logistická regresia je nástroj, ktorý využívame v podobných prípadoch z dôvodu, že nepredpovedá priamo hodnotu danej veličiny, ale hodnotí pravdepodobnosť, s akou jav nastane [5].

V nasledujúcej kapitole sa budeme zaoberať prevažne technickou stránkou výpočtu, respektíve jeho princípom a mechanizmom. Pre binárnu závislú premennú  $Y$  a vysvetľujúcu premennú  $X$ , uvažujeme podmienenú pravdepodobnosť  $\pi(x)$  [9]:

$$\pi(x) = P(Y = 1|X = x) = 1 - P(Y = 0|X = x) \quad (2.13)$$

pričom odpovedajúci model logistickej regresie môžeme vidieť v rovnici 2.14 [9]:

$$\pi(x) = \frac{\exp(\alpha + \beta x)}{1 + \exp(\alpha + \beta x)} \quad (2.14)$$

obdobne potom logaritmus šance, ktorý sa nazýva aj logit má lineárnu podobu uvedenú v rovnici 2.15 [9]:

$$\text{logit}[\pi(x)] = \log \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} = \alpha + \beta x \quad (2.15)$$

Po uvedených matematických úpravách môžeme použiť lineárnu regresiu pre predikciu logitu, ktorá je uvedená vo vzťahu 2.16 [9]:

$$\text{logit}[Y = 1] = b_0 + b_1 x \quad (2.16)$$

V nasledujúcej časti vysvetlíme jednotlivé časti vyššie uvedených rovníc. Znamienko pred koeficientom  $\beta$  v rovnici 2.15 hovorí o tom, či šanca  $\pi(x)$  rastie alebo klesá s rastom premennej  $x$ . Koeficient  $|\beta|$  – jeho absolútna hodnota – značí rýchlosť rastu alebo poklesu funkcie podmienenej pravdepodobnosti  $\pi(x)$ , pričom, ak sa  $\beta$  blíži nule, krivka sa sploští. Pokiaľ je  $\beta$  rovná nule, veličina  $Y$  je nezávislá od veličiny  $X$ . Pokiaľ je  $\beta$  väčšia ako 0, funkcia  $\pi(x)$  pre rôzne hodnoty parametra  $x$  má tvar distribučnej funkcie logistického rozdelenia. Pretože hustota pravdepodobnosti logistického rozdelenia je symetrická, funkcia podmienenej pravdepodobnosti  $\pi(x)$  sa približuje hodnote 1 rovnako ako sa približuje hodnote 0 [9].

Umocnenie oboch strán rovnice 2.15 ukáže, že šanca je exponenciálnou funkciou  $x$ . Takýmto spôsobom môžeme ukázať rozsah koeficientu  $\beta$ : šance rastú násobne s  $e^\beta$  pre každý nárast o jednotku  $x$ . Číslo  $e^\beta$  môžeme považovať za koeficient šance, ktorý dáva do pomeru šancu výskytu sledovaného javu v  $X = x + 1$  k šanci výskytu daného javu v  $X = x$  [9].

## 2.4 Paretova analýza

Paretova analýza je jedným zo základných štatistických nástrojov v oblasti riadenia kvality, je však využiteľná takmer vo všetkých oblastiach života. Prvé zaznamenané použitie tohto typu analýzy pochádza od talianskeho ekonóma Vilfreda Pareto, ktorý pozoroval rozloženie bohatstva v Taliansku. Dospel k poznaniu, že približne 80 % majetku v Taliansku vlastní 20 % obyvateľstva. Ďalším skúmaním sa prišlo k poznaniu, že podobné rozloženie – 20 % vstupov

spôsobuje 80 % výstupov možno nájsť v mnohých oblastiach. Jednou z nich je aj kvalita výroby, kde empirickým výskumom prideme k faktu, že 80 % všetkých defektov vo výrobe je spôsobených 20 % príčin [6].

Hlavnou úlohou Paretovej analýzy je identifikácia kľúčových problémov alebo premenných. Keďže práca ma za cieľ odhaliť najdôležitejšie premenné, ktoré spôsobujú vznik defektov, budeme Paretovu analýzu aplikovať na odhalenie najčastejších väd nezhodných kusov. Postup Paretovej analýzy je nasledujúci [6]:

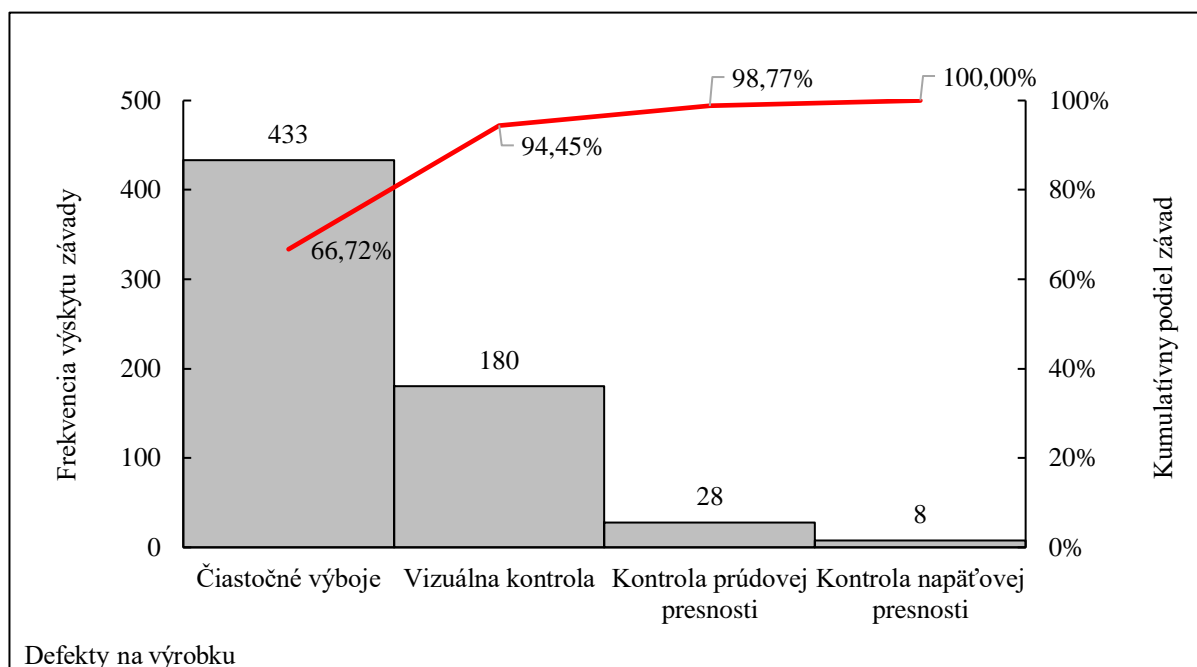
1. **Odhalenie všetkých prvkov:** v konkrétnom príklade sa bude jednať o skúšky správnosti vykonané pri testovaní daného výrobku.
2. **Meranie prvkov:** Je potrebné zaviesť pre každý typ defektu rovnakú jednotku. V tomto prípade sa jedná o početnosť výskytu daného nedostatku. Vo všeobecnom prípade posudzovania dôležitosti väd pri nekvalite, by mohla byť ako merná jednotka použitá napríklad finančná strata vyvolaná danou chybou. V konkrétnom prípade sa však jedná o produkt, ktorý je pri akejkol'vek chybe potrebné vytvoriť opätovne a teda Paretova analýza finančných strát by vyzerala rovnako pri početnosti výskytu väd.
3. **Zoradenie podľa výskytu:** V Paretovej analýze sú prvky vždy zoradené od toho s najväčšou frekvenciou výskytu po ten s najmenšou. Toto je jeden zo zásadných rozdielov medzi klasickým histogramom a Paretovým diagramom.
4. **Výpočet kumulatívneho rozdelenia:** Kumulatívne rozdelenie je súčtom podielov po sebe nasledujúcich prvkov (zoradených podľa frekvencie výskytu) na celkovom počte všetkých prvkov. Je reprezentované krivkou kumulatívnej početnosti v Paretovom diagrame
5. **Pareto diagram:** V momente, keď sú zoradené všetky prvky a vypočítané kumulatívne rozdelenie, môžu byť tieto dve veličiny spojené graficky do Paretoho diagramu.
6. **Vyvodenie záveru:** Po zhotovení Paretoho diagramu z neho môžeme vyčítať aká časť vstupov (vady) spôsobuje konkrétny počet výstupov (nezhodné kusy) a zistiť tak najvýznamnejšie príčiny nezhody kusov.

Paretovu analýzu sme následne aplikovali na defekty vzniknuté ako výsledok uvažovaného technologického procesu. Výsledok môžeme vidieť v tabuľke 2.2, ktorá popisuje vady v procese zoradené podľa ich frekvencie výskytu. V ďalších stĺpcoch tabuľky je uvedený podiel jednotlivých väd na celkovom počte defektov a kumulatívny výskyt týchto väd.

Defekt	Počet pozorovaní - absolútny	Počet pozorovaní - relatívny	Kumulatívny počet - absolútny	Kumulatívny počet - relatívny
Čiastočné výboje	374	65,73 %	374	65,73 %
Vizuálna vada	166	29,17 %	540	94,90 %
Prúdová presnosť	25	4,39 %	565	99,30 %
Napäťová presnosť	4	0,70 %	569	100,00 %
Spolu	569	100%		

Tabuľka 2.2 Sumár dát o defektoch slúžiaci pre Paretovu analýzu

Dáta uvedené v Tabuľke 1 sme použili pre vytvorenie Paretoho diagramu, z ktorého môžeme vizuálne posúdiť, ktoré defekty sú kľúčové. Výsledok môžeme vidieť v grafe 2.1:



Graf 2.1 Pareto diagram pre frekvenciu jednotlivých defektov v procese

Po vykonaní všetkých úkonov je vyvodený záver. Z Paretovej analýzy skúmaného procesu jednoznačne vyplýva, že najväčší podiel na nekvalite procesu majú defekty čiastočné výboje a vizuálne nedostatky. Ich celkový kumulatívny podiel na všetkých defektoch tvorí 94,90 %. Ďalšou analýzou v praktickej časti predkladanej práce sa budeme snažiť odhaliť prevažne premenné vstupy procesu, ktoré majú za následok vznik týchto dvoch väd.

## 2.5 Stabilita procesu

Každý výrobný proces, bez ohľadu na to, ako dobre je vytvorený a udržiavaný podlieha určitým náhodným vplyvom, ktoré eliminovať nedokážeme. Túto prirodzenú variabilitu procesov môžeme považovať za určitý „šum v pozadí,“ ktorý je vo výsledku spôsobený kumuláciou väčšieho množstva príčin, ktorým sa nedokážeme v procesoch vyhnúť. Avšak, určitou kvantifikáciou tohto „šumu v pozadí,“ dokážeme ohodnotiť, do akej veľkej miery je proces a jeho výsledná kvalita ovplyvňovaná týmito náhodnými vplyvmi [7].

Pre lepšie vysvetlenie správania procesu z hľadiska jeho výslednej kvality používame 7 základných nástrojov pre štatistické riadenie kvality procesov [5]:

1. Histogramy
2. Kontrolné listy
3. Paretova analýza
4. Analýza príčin a následkov
5. Vývojový diagram väd
6. Regresná a korelačná analýza
7. Regulačné diagramy



V rámci skúmania súčasného stavu budú ďalej použité, okrem Paretovej analýzy (viz. kap. 2.4), Shewhartove regulačné diagramy pre overenie stability vstupných premenných a výstupu v podobe informácie o kvalite daného produktu.

Pri skúmaní Shewhartových diagramov sa zaoberáme hľadaním určitých vzorov, ktoré poukazujú na to, že skúmaná veličina je mimo našu kontrolu. Schopnosť vysvetliť tieto nenáhodné vzory v regulačných diagramoch vyžaduje vysokú mieru poznania procesu. Znalosť regulačných diagramov nie je postačujúcou pre vyhodnotenie stability procesu. Vzory, ktoré hľadáme sú dnes známe pod názvom testy identifikovateľných príčin [7]:

1. Jeden alebo viac bodov sa nachádza viac ako tri smerodajné odchýlky od centrálnej čiary regulačného diagramu
2. Dva z troch po sebe idúcich bodov sa nachádzajú viac než dve ale menej ako tri smerodajné odchýlky od centrálnej čiary
3. Štyri z piatich bodov sú vzdialené od centrálnej čiary viac ako jednu smerodajnú odchýlku
4. Osem bodov za sebou leží na rovnakej strane od centrálnej čiary
5. Šesť bodov v rade za sebou buď stúpa alebo klesá
6. Pätnásť bodov v rade za sebou leží vzdialených menej než jednu smerodajnú odchýlku od centrálnej čiary na oboch jej stranách
7. Štrnásť bodov v rade za sebou striedavo stúpa a klesá
8. Osem bodov v rade za sebou leží vzdialených od centrálnej čiary viac než jednu smerodajnú odchýlku na oboch stranách od centrálnej čiary
9. V záznamoch je prítomný nenáhodný vzor
10. Jeden alebo viacero bodov sa nachádza v blízkosti dolného alebo horného limitu špecifikácie

V našom prípade boli testy automaticky vykonané v prostredí Minitab, kde boli použité nasledujúce testy identifikovateľných príčin z vyššie uvedeného zoznamu: 1 – 8 [7].

### 2.5.1 I-MR diagram

Štatistické riadenia procesov je založené na rade základných princípov, ktoré sú aplikovateľné na akýkoľvek typ procesu, vrátane takých, kde sú veličiny merané spojito, napríklad meranie teploty či vlhkosti, ktoré môžeme nájsť v chemickom, farmaceutickom alebo potravinárskom priemysle, ale aj v iných odvetviach. Jedným z týchto princípov je to, že určitá variabilita v akomkoľvek procese je nevyhnutná. Variabilita procesov môže mať dva typy príčin [6]:

- náhodné príčiny
- priraditeľné príčiny

Náhodné príčiny nie možné jednoducho identifikovať samostatne ale sú to tie, ktoré v konečnom dôsledku určujú hranice pre presnosť procesu, zatiaľ čo priraditeľné príčiny poukazujú na konkrétnu zmenu v procese, bez ohľadu na to, či sa vyskytla zámerne alebo nie [6].

Pre monitorovanie respektíve riadenie procesov, ktoré poskytujú dáta aktuálne v čase je vhodné použiť diagram I-MR (*Individuals – Moving Range*). Tento typ Shewhartovho diagramu popisuje jednotlivé namerané hodnoty s kľzavým rozpätím. To znamená, že skúma rozdiel medzi dvomi po sebe idúcimi meraniami tak, ako je uvedené v rovnici 2.17 [7]:

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}| \quad (2.17)$$

kde  $X_i$  a  $X_{i-1}$  sú po sebe idúce merania, ďalej odhadneme smerodajnú odchýlku podľa rovnice 2.18 [7]:

$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.18)$$

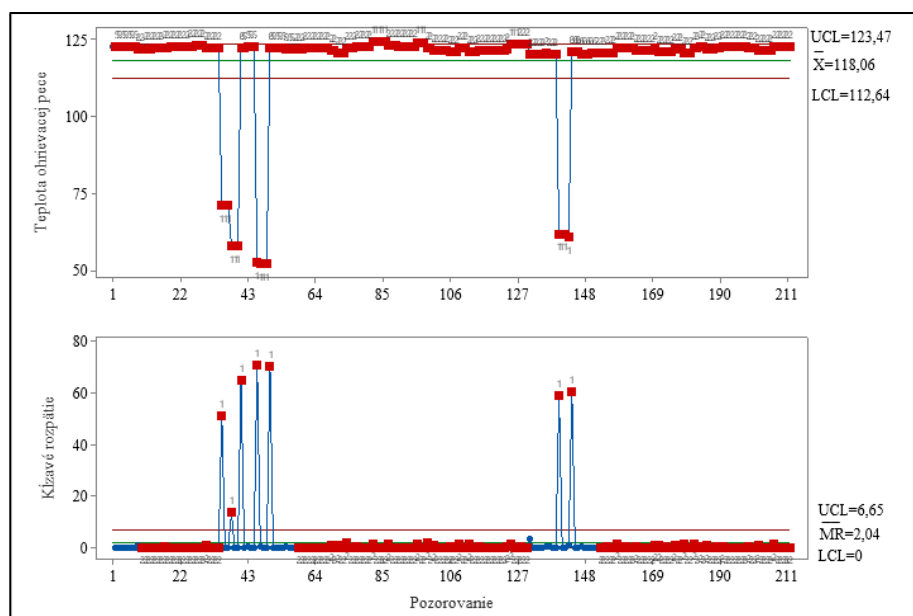
pričom  $\overline{MR}$  je priemerná hodnota kľazového rozpätia a  $d_2$  je tabuľková hodnota. S vypočítaným odhadom smerodajnej odchýlky môžeme určiť CL, UCL a LCL. V tomto prípade je CL aritmetický priemer nameraných hodnôt  $\bar{x}$ . Výpočet medzi UCL a LCL je daný vzťahom 2.19 [7]:

$$UCL, LCL = \bar{x} \pm 3\hat{\sigma} \quad (2.19)$$

Vyššie uvedené rovnice nám umožňujú zostaviť I-MR diagram.

V konkrétnom prípade sme tieto diagramy používali na testovanie stability vstupných veličín. Naším cieľom bolo zistiť či sú hodnoty jednotlivých procesných parametrov stabilné alebo nie, a teda či ich v súčasnosti regulujeme správne.

Pre ukážku stability veličín v jednotlivých procesoch ukážeme I-MR diagramy priemernej teploty počas procesu ohrievania kusov. Ďalšie I-MR diagramy skúmajúce stabilitu vstupných procesných veličín nájdeme v prílohách tejto práce. Nastavenie teploty ohrievacej pece je 122°C. Pec sa však ohrieva v cykloch, kedy sa táto teplota môže aj prekročiť, a zároveň sa ochladzuje otvaraním a vkladáním ďalších kusov. Jej teplota sa teda v skutočnosti pohybuje v určitých intervaloch. V grafe 2.2 je vyobrazený I-MR diagram priemernej teploty v ohrievacej peci pri daných kusoch:

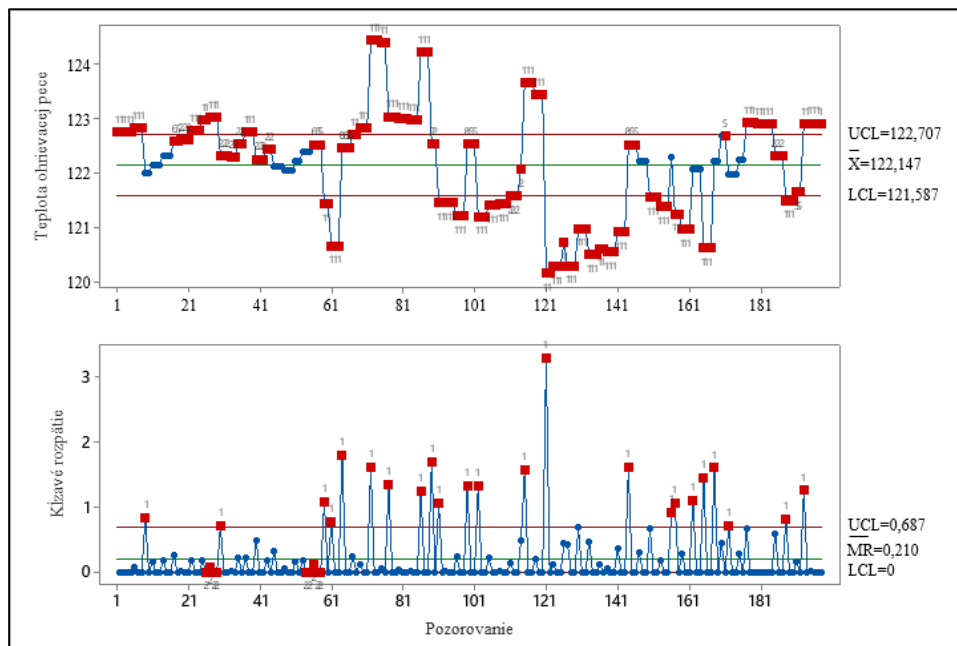


Graf 2.2: I-MR diagram priemernej teploty ohrievania pri kusoch v sledovanej vzorke

Procesná veličina teplota ohrievacej pece podľa programu Minitab neprešla piatimi z ôsmich dostupných testov identifikovateľných príčin. Najviac bodov neprešlo testami 4 (osem bodov v rade leží na rovnakej strane od stredovej čiary) a 8 (osem bodov v rade leží vzdialených viac

než jednu smerodajnú odchýlku od stredovej čiary). V regulačnom diagrame však môžeme pozorovať, že niekoľko bodov je mimoriadne ďaleko od spodného regulačného limitu LCL. To je zapríčinené vypnutím pece cez víkend, pričom dané kusy v nej počas tohto obdobia ostali. Pec je vypnutá v piatok poobede, teplota v nej klesá až do nedeľného dopoludnia, kedy je opätovne spustená. To však zníži priemernú dosiahnutú teplotu o desiatky stupňov, aj keď sa napokon kusy vždy ohrejú na požadovanú teplotu.

Keďže poznáme príčinu prečo tieto sú tieto body vzdialené od regulačnej medze, mohli sme ich odstrániť, z čoho sme dostali nový regulačný diagram uvedený ako graf 2.3:



Graf 2.3: I-MR diagram priemernej teploty ohrievacej pece pri kusoch sledovanej vzorky očistený o body preukázanou príčinou

Odstránenie vzdialených bodov od regulačných medzí malo za následok zmenšenie smerodajnej odchýlky sledovaného súboru a tým zmenšenie regulačných medzi ako vyplýva z rovníc 2.17, 2.18 a 2.19. V tomto prípade bol najčastejšími testami identifikovateľných príčin, ktorými vzorka dát neprešla test číslo 2 (dva z troch bodov sú vzdialené viac ako dve smerodajné odchýlky od stredovej čiary) a test číslo 1 (jeden alebo viac bodov leží ďalej ako tri smerodajné odchýlky od stredovej čiary). Keďže tieto príčiny ani po dôkladnom zvážení nepoznáme, procesnú veličinu môžeme označiť za nestabilnú.

## 2.5.2 P-diagram

P-diagram používame v prípade, že nie je možné zaobstarať vzorku konštantného rozsahu. Týmto typom Shewhartovho regulačného diagramu popisujeme napríklad podiel nezhodných kusov v procese na celkovom množstve vyrobených kusov. Pre vytvorenie tohto diagramu potrebujeme poznať rozsah vzorky a počet nevyhovujúcich kusov. Podiel nezhodných kusov vypočítame podľa rovnice 2.20 [6]:

$$p_i = \frac{x_i}{n_i} \quad (2.20)$$

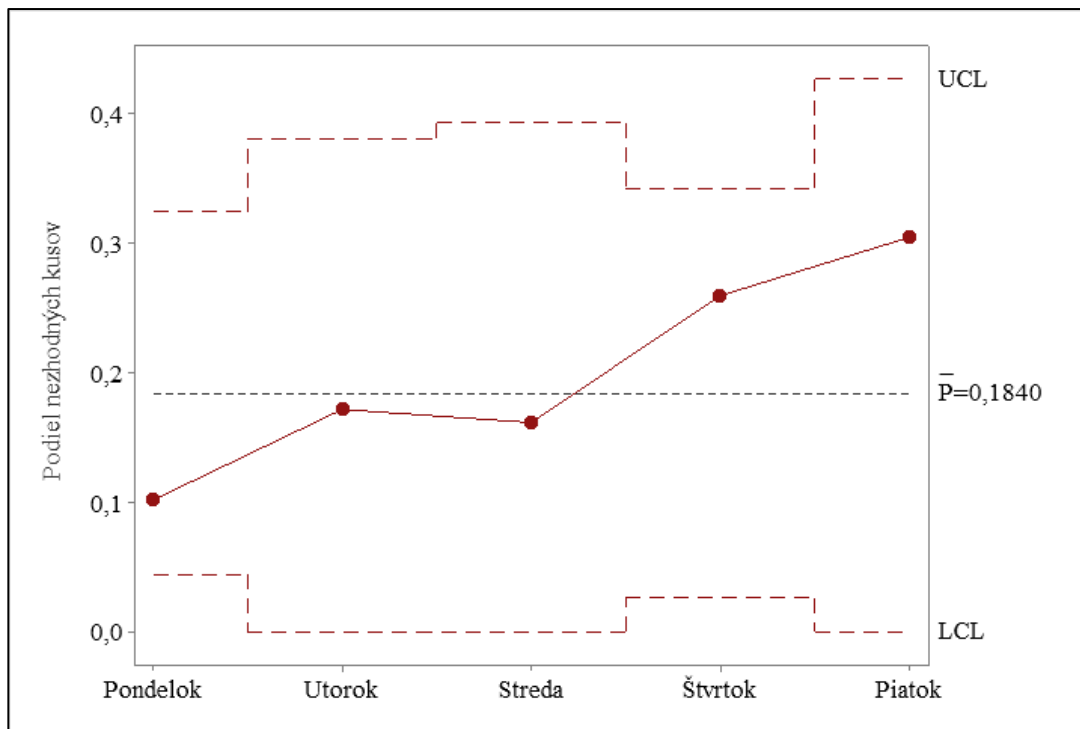
pričom  $p_i$  je podiel nezhodných kusov v  $i$ -tej vzorke,  $x_i$  je počet nezhodných kusov v  $i$ -tej vzorke a  $n_i$  je celkový počet kusov v  $i$ -tej vzorke. Centrálnou čiarou p-diagramu je čiara

s hodnotou priemerného podielu nezhodných kusov na celku. Čiary pre dolnú a hornú regulačnú medzu sú počítané pre každú vzorku podľa jej rozsahu samostatne podľa rovnice 2.21 [6]:

$$USL, LSL = \bar{p} \pm 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n_i}} \quad (2.21)$$

Kde  $\bar{p}$  priemerný podiel nezhodných kusov a  $n_i$  je celkový počet kusov vo vybranej vzorke [6].

V praxi sme tento diagram použili pre overenie trendu vývoja počtu nezhodných kusov v priebehu týždňa. Zdôvodnenie je nasledujúce: určité časti procesu sa v závislosti na dni v týždni menia kvôli možnostiam organizácie práce. Táto zmena organizácie môže mať za následok rast podielu nezhodných kusov u sérií vyrobených vo štvrtok a v piatok. Jedná sa o elektrickú vadu. Skúmanú vzorku dát sme rozdelili podľa dňa v týždni a vytvorili sme p-diagram podielu nezhodných kusov podľa dňa v týždni, v ktorom boli vyrobené. Výsledok môžeme vidieť v grafe 2.4:



Graf 2.4 Vývoj podielu nezhodných kusov na čiastočné výboje podľa dňa v týždni

V grafe 2.4 môžeme sledovať dve veci:

1. Podiel nezhodných kusov je stabilný v priebehu týždňa. Vzhľadom na to, že podiel bol počítaný z rozličného množstva kusov, hranice UCL a LCL majú pohyblivú hodnotu
2. I napriek stabilite procesu, trend vývoja podielu nezhodných kusov na všetkých vyrobených má, vo vybranej vzorke, jednoznačne stúpajúci trend v priebehu týždňa.

## 3 PROCES

V najbližšej kapitole popíšeme jednotlivé procesné úseky, z ktorých sa skladá výrobný proces ako celok. Pre lepšie pochopenie analytickej časti bude dôležité poznať procesné úseky, vetvy z ktorých sa proces skladá a premenné, ktoré vstupujú do konkrétnych častí procesu. Bližšie sa pozrieme aj na dôvody, prečo bol pre analýzu zvolený konkrétny výrobný produkt a na vady, ktoré u neho vznikajú.

### 3.1 Technologický proces

Zložitosť konkrétneho technologického procesu je jedným z dôvodov prečo je podiel nezhodných kusov v procese tak vysoký.

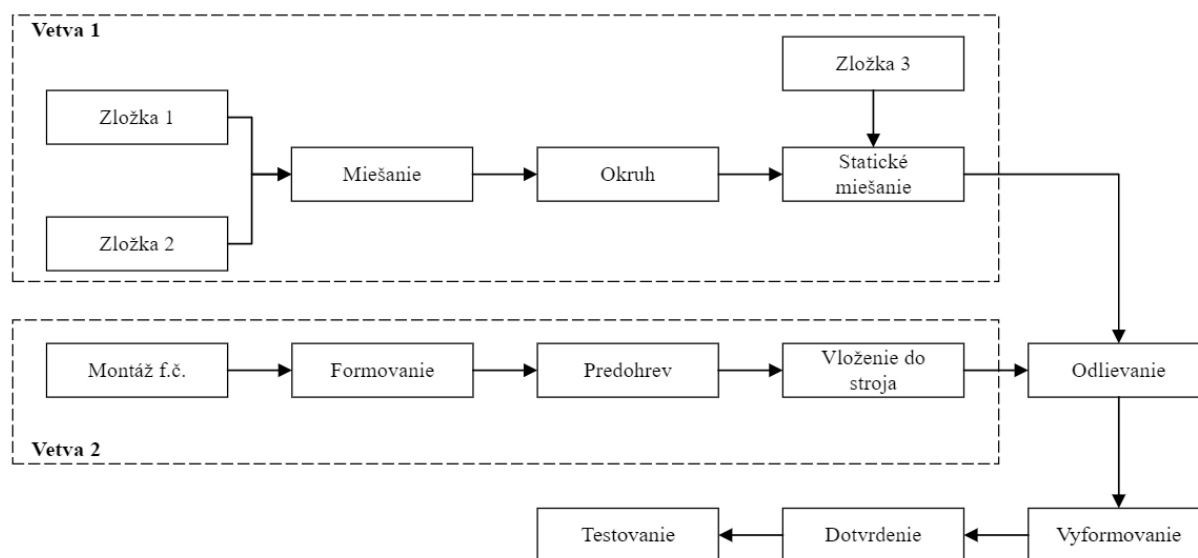


Diagram 3.1: Vývojový diagram procesu

Na vývojovom diagrame 3.1 môžeme pozorovať jednotlivé vetvy procesu, pričom tie sa spájajú do jednej pri samotnom odlievaní daného kusu. V rôznych častiach procesu sú definované procesné premenné, pomocou ktorých možno kontrolovať dodržanie správneho postupu v špecifických bodoch procesu.

#### 3.1.1 Vetva 1 - hmota

Prvú časť procesu, ktorú sme označili ako *Vetva 1* považujeme za časť procesu, v ktorej sa pripravuje odlievacia hmota polymérového charakteru. Jadrom tejto časti je prvý krok – miešanie. Pri miešaní sa za určitej špecifickej teploty vo vákuu miešajú dohromady základné zložky hmoty.

Hmota ďalej vstupuje do okruhu, ktorý je vyhrievaný a udržiava ju pri stálej teplote. V okruhu sa pohybuje hmota dovtedy, kým nie je na ňu vytvorená požiadavka z odlievacieho zariadenia, čo znamená, že kusy sú pripravené na odlievanie. Vtedy sa zmení poloha trojcestného ventilu a hmota vstupuje do statického mixéru. V ňom sa zmieša s poslednou zložkou, ktorá je kľúčová pre naštartovanie reakcie v hmote. Hmota ďalej prejde posledným úsekom priamo do hlavy odlievacieho zariadenia, odkiaľ sa začína plnenie série troch kusov súčasne. Sledované premenné v tejto fáze procesu aj s ich stručným popisom, môžeme vidieť v tabuľke 3.1:

Parameter	Popis	Odôvodnenie
Teplota v statickom mixéri	Teplota hmoty pri prechode statickým mixérom	Výrazné odlišnosti oproti štandardnej teplote môžu mať vplyv na správanie hmoty pri jej tuhnutí, čo sa môže negatívne odraziť na kvalite finálneho výrobku
Teplota skleneného prechodu hmoty	Špecifická veličina pri polymérovej štruktúre materiálu. Charakterizuje amorfné chovanie polyméru pri rôznych teplotách. Hmota je stave, kedy nie je tuhá, ale zároveň ani kvapalná, pretože pri deformácii nedochádza k nevratnému toku, ktorý charakterizuje kvapalné skupenstvo [8]	Rozličná teplota skleneného prechodu vedie k rôznej kombinácii času a teploty, ktorý je potrebný k tomu, aby sa hmota po odlievaní nachádzala v tuhom skupenstve
Čas tuhnutia hmoty	Čas, ktorý je potrebný k tomu, aby sa hmota, po odštartovaní reakcie v nej, dostala do tuhého skupenstva	Pri výrazných rozdieloch času tuhnutia hmoty od štandardnej hodnoty môže dochádzať k tomu, že hmota zatuhne už počas plnenia formy. To vedie k nedostatočnému previazaniu chemického reťazca a má to za následok vznik bublín v hmote

Tabuľka 3.1: Sledované premenné procesu vo Vetve I.

### 3.1.2 Vetva 2 – funkčné časti

Ako aktívne alebo funkčné časti sledovaného výrobku označujeme tie, ktoré plnia úlohu, pre ktorú je daný výrobok určený. Ich príprava zahŕňa kroky obsiahnuté vo vetve 2 na schéme 3.1. V tejto sekcii výroby sledujeme viacero procesných premenných.

Po montáži všetkých dielov do aktívnych častí, umiestňuje operátor tieto časti do odlievacej formy. Z hľadiska procesu sledujeme teplotu prostredia a jeho vlhkosť (veličiny), pričom vždy používame informácie o priemernej teplote, smerodajnej odchýlke teploty, maxime teploty či minime teploty (parametre). Kombinácia týchto veličín a od nich odvodených parametrov by mala pokryť významné odchýlenia od štandardu. Jednou z väd, ktoré môžu nastať v dôsledku zlých teplotných a vlhkosťných podmienok je vznik bublín medzi aktívnymi časťami a hmotou. Tie majú za následok, že produkt neprejde všetkými testami.

Nasledujúcim procesným úsekom po formovaní funkčných častí do odlievacej formy je ohrev sústavy funkčné časti – forma na stanovenú teplotu. Bez vyššej teploty ako špecifická minimálna by reakcia v hmote, prebiehala len veľmi pomaly a hmota by sa nestala pevnou za požadovaný čas. Ďalším dôvodom je, že reakciu hmoty chceme najrýchlejšie dosiahnuť v oblasti funkčných častí, aby sme minimalizovali riziko vzniku bublín o oblasti aktívnych častí. Procesné premenné sledované v procese sú uvedené v tabuľke 3.2:

Parameter	Popis	Odôvodnenie
Teplota okolitého prostredia	Sledovanie priemernej teploty, maximálnej teploty, minimálnej teploty a smerodajnej odchýlky teploty počas procesu montáže a formovania funkčných častí produktu	Sledovanie veličín teplota a vlhkosť okolia prebiehalo za účelom získania informácie, či tieto veličiny a od nich odvodené parametre môžu mať súvis s výrobou nezhodných kusov v dôsledku ovplyvňovania rôznych častí procesu – napríklad na stálosť teploty v peciach a podobne. Dáta o teplote a vlhkosti boli párované so všetkými fázami procesu (nielen s Vetvou II.)
Vlhkosť okolitého prostredia	Sledovanie priemernej vlhkosti, maximálnej vlhkosti, minimálnej vlhkosti a smerodajnej odchýlky počas procesu montáže a formovania funkčných častí produktu.	
Teplota v ohrievacej peci	Sledovanie priemernej teploty, maximálnej teploty, minimálnej teploty a smerodajnej odchýlky teploty počas ohrievania funkčných častí v ohrievacej peci pred počiatkom odlievania	V prípade, že teplota v ohrievacej peci by sa výrazne odlišovala od definovaného štandardu, mohlo by dochádzať k nedostatočnému ohriatiu funkčných častí, čo by mohlo viesť k nesprávnemu tuhnutiu hmoty
Vlhkosť v ohrievacej peci	Sledovanie priemernej vlhkosti, maximálnej vlhkosti, minimálnej vlhkosti a smerodajnej odchýlky počas ohrievania funkčných častí v ohrievacej peci pred počiatkom odlievania	Vyššia miera vlhkosti v ohrievacej peci by mohla viesť k vzniku vlhkosti, respektíve k vzniku kondenzátu vo forme, čo by mohlo mať za následok výrobu defektného kusu
Čas v ohrievacej peci	Celková dĺžka procesného úseku ohrievania funkčných častí od ich vloženia do ohrievacej pece do výberu z odlievacej pece	Krátky čas v ohrievacej peci môže viesť nedostatočnému ohriatiu funkčných častí a formy, čím by došlo k nesprávnemu tuhnutiu hmoty po odlievaní

Tabuľka 3.2 Sledované premenné vo Vetve II.

### 3.1.3 Odlievanie

Odlievanie je z technologického hľadiska najzložitejším procesným úsekom v rámci výroby konkrétneho produktu. Po vložení foriem do stroja sa začínajú plniť hmotou, ktorá je privedená do hlavy odlievacieho zariadenia. Po naplnení sa v ohriatej forme začína reakcia, pri ktorej tvrdne hmota smerom od stredu produktu – teda od funkčných častí zariadenia k vonkajšiemu obvodu. Počas tvrdnutia sa hmota zmršťuje a odlievacie zariadenie postupne kompenzuje túto stratu objemu dotláčaním ďalšej hmoty do formy. Po tom, čo je tento proces dotláčania ukončený, hmota vo forme uloženej v zariadení tuhne do doby, než je možné celý produkt vybrať z odlievacieho zariadenia a následne z formy.

Počas odlievania má na výrobok vplyv veľké množstvo premenných, pričom všetky nie je možné podrobne odsledovať. V analýze vyrobených kusov budeme sledovať tie premenné,

ktoré môžu mať na kvalitu finálneho výrobku vplyv, a ktoré sme schopní kvantifikovať. Súhrn sledovaných premenných nájdeme v tabuľke 3.3:

Parameter	Popis	Odôvodnenie
Čas odlievania - celkový	Veličina sledovaná z riadiaceho počítača odlievacieho okruhu. Začína sa v momente, kedy do odlievacieho stroja začína prúdiť hmota z okruhu. Koniec operácie je zaznamenaný v momente, keď sú kusy pripravené na výber z odlievacieho zariadenia	Obe časové zložky procesu odlievania majú kontrolnú úlohu. Čas je pevne nastavený programom podľa ktorého sa daný produkt odlieva, veľké odchýlky od štandardu vždy znamenajú problém počas odlievania, ktorý takmer s určitosťou vedie k vyrobeniu nezhodného kusu.
Čas odlievania – po naplnení formy	Tento čas sa začína merať od momentu, kedy odlievanie prechádza do druhej fázy – hmota dotláčaná do formy je kompenzáciou zmršťovania hmoty počas tuhnutia polymérovej hmoty	
Pozícia pumpy	Pumpa vtláča hmotu do zariadenia. Sledujeme jej pozíciu na osi z, vzhľadom k referenčnej hodnote 0	Na základe rozdielu pozície pumpy medzi jednotlivými po sebe nasledujúcimi kusmi vieme povedať či sa medzi ich odlievaním vyskytol nejaký problém. Takisto vieme povedať, kedy bol kus odliaty a začalo sa dotláčanie hmoty do foriem kompenzujúce zmršťovanie hmoty pri tuhnutí
Tlak	Sledovanie maximálneho a minimálneho tlaku hmoty počas procesu.	Vysoký tlak môže naznačovať, že v okruhu alebo v zariadení sa nachádza určité množstvo hmoty, ktorá tuhne, sedimentuje alebo inak upcháva cesty
Pozícia kusu v zariadení	V zariadení sa súčasne odlievajú 3 kusy súčasne, umiestnené vedľa seba	Vzhľadom na fakt, že sa odlievajú tri kusy súčasne, existuje predpoklad, že hmota netečie do foriem na všetkých pozíciách rovnomerne. Keďže odlievacie zariadenia nie je izolované od okolitého prostredia, môže dochádzať k nerovnomernému ochladzovaniu foriem na rôznych pozíciách. Obe spomenuté okolnosti môžu mať vplyv na výslednú kvalitu, respektíve nekvalitu výrobku



Forma	Funkčné časti sú umiestnené do formy vždy jednotlivo. Máme k dispozícii 9 rôznych foriem	Keďže formy boli nakupované v rozličných časových úsekoch, je na nich vykonávaná údržba a nie sú používané rovnomerne (každá forma má mierne odlišný počet absolvovaných odlievacích cyklov), môže sa objaviť vplyv opotrebenia formy na kvalite výstupu z procesu
Teplota okolia	Sledovanie priemernej teploty, maximálnej teploty, minimálnej teploty a smerodajnej odchýlky teploty počas procesu montáže a formovania funkčných častí produktu	Dáta, respektíve popisná štatistika spracovaná na ich základe nám pri týchto dvoch veličinách môže poskytovať informáciu o tom, či môžu veľké výkyvy teploty alebo vlhkosti spôsobovať zvýšený podiel defektov
Vlhkosť okolia	Sledovanie priemernej vlhkosti, maximálnej vlhkosti, minimálnej vlhkosti a smerodajnej odchýlky počas procesu montáže a formovania funkčných častí produktu.	

Tabuľka 3.3: Sledované premenné pri odlievaní produktu

### 3.1.4 Spracovanie po odlievaní

Po odliatí série kusov a ich následnom zatvrdnutí do tuhého stavu nasleduje niekoľko ďalších úkonov.

Prvým z nich je vyformovanie kusu, kedy operátor vyberie odliaty produkt z formy a očistí ho. Takýto produkt následne putuje do poslednej fázy – dotvrdenia. Vytvrdzovanie je jednou z kľúčových častí celého procesu výroby daného produktu. Pri odlievaní sa produkt, respektíve hmota nechá zatuhnúť len do tej miery, aby bolo možné s produktom manipulovať bez poškodenia. Úplnú tuhosť však hmota dosiahne až v peci, kde sa vytvrdí. Počas tohto procesu, ktorý prebieha pôsobením vysokej teploty sa jednotlivé polymérové reťazce predlžujú. Hovoríme o tom, že hmota sa „zosieťuje,“ čo má za následok jej výslednú pevnosť. Premenné sledované v tomto procese môžeme vidieť v tabuľke 3.4:

Parameter	Popis	Odôvodnenie
Čas v peci	Veličina podáva informáciu o tom, koľko hodín strávili v tvrdiacej peci jednotlivé kusy	Významné odchýlky od štandardizovaných hodnôt môžu mať za následok vznik nezhodných kusov
Teplota v peci	Sledovanie priemernej teploty, maximálnej teploty, minimálnej teploty a smerodajnej odchýlky teploty počas vytvrdzovania odliatych kusov	Pre zabezpečenie pokračovania reakcie v hmote je potrebné udržiavanie vyššej teploty. Významné odchýlky od štandardu, môžu mať za následok vznik nezhodných kusov

Tabuľka 3.4: Premenné sledované pri spracovaní po odlievaní

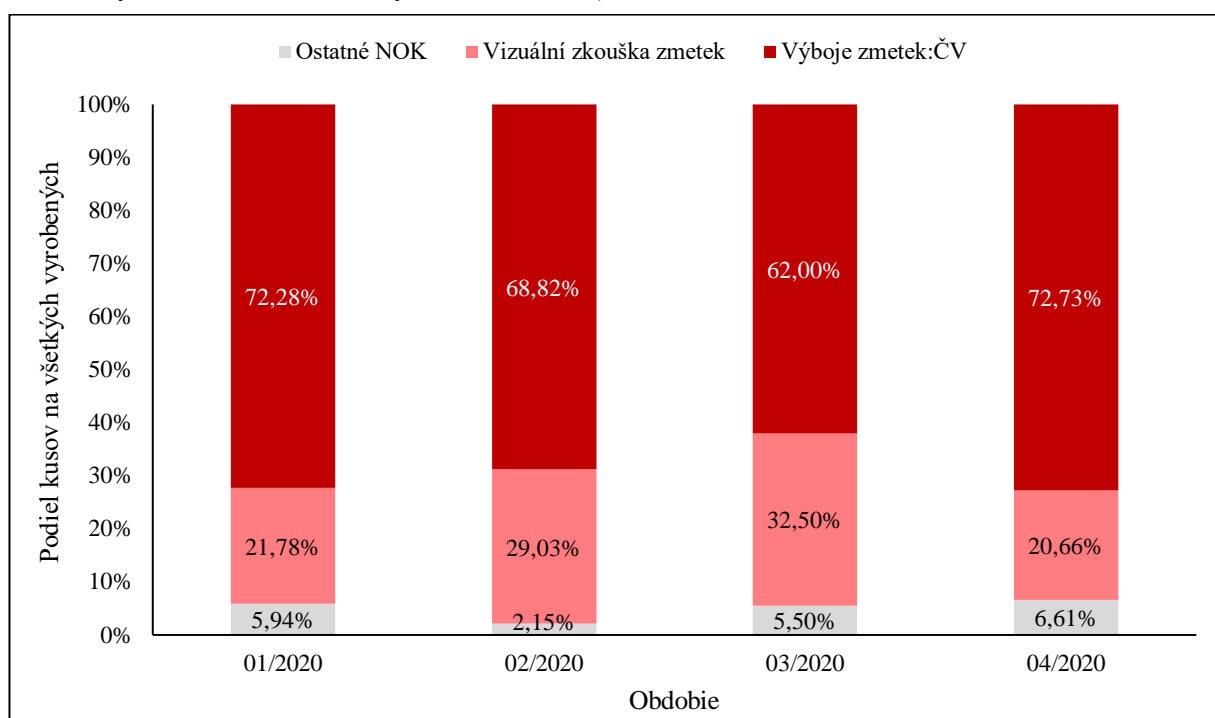
### 3.2 Defekty v procese

Výrobný proces daného produktu, nebol vybraný náhodne. V nasledujúcej kapitole popíšeme dôležitosť presnejšieho riadenia kvality v konkrétnom výrobnom procese, ako aj najvýznamnejšie defekty, ktoré v ňom vznikajú.

Najlepšou definíciou kvality procesu je v danom prípade vyhodnocovanie podielu nezhodných kusov. Všeobecne proces dlhodobo trpí vysokým podielom nekvalitných výrobkov. Nekvalitu ako takú posudzujeme dvomi spôsobmi:

- Vizuálnou skúškou - odhalenie vady na výrobku pri vizuálnej kontrole (označované niekedy ako VV)
- Elektrickým testovaním – testovanie mnohých elektrických parametrov za účelom odhalenia nepresností vo fungovaní výrobku (označované niekedy ako ČV)

V grafe 3.1 môžeme vidieť prehľad podielu jednotlivých defektov na celkovom množstve nezhodných kusov v sledovaných obdobiach (01.2020-04.2020):



Graf 3.1: Podiel defektov na celkovom množstve nezhodných kusov v sledovanom období

Pod vizuálnym defektom si môžeme predstaviť vadu na výrobku, ktorú je možné odhaliť voľným okom. Tieto defekty sa nachádzajú vždy na povrchu zariadenia a väčšinou nemajú vplyv na jeho funkcionality. Miesto vizuálneho poškodenia však môže mať vplyv na fungovanie produktu v budúcnosti, pretože v náročnejších podmienkach by takéto miesto mohlo viesť k iniciácii trhlin, ktoré sa budú šíriť ďalej naprieč odliatkom. Názornú ukážku vizuálneho poškodenia môžeme sledovať na obrázku 3.1. Toto poškodenie je však omnoho väčšieho rozsahu, ako býva pravidlom. Použitý obrázok ma za cieľ názorne zobrazit' ako tento typ vady môže vyzerat'.

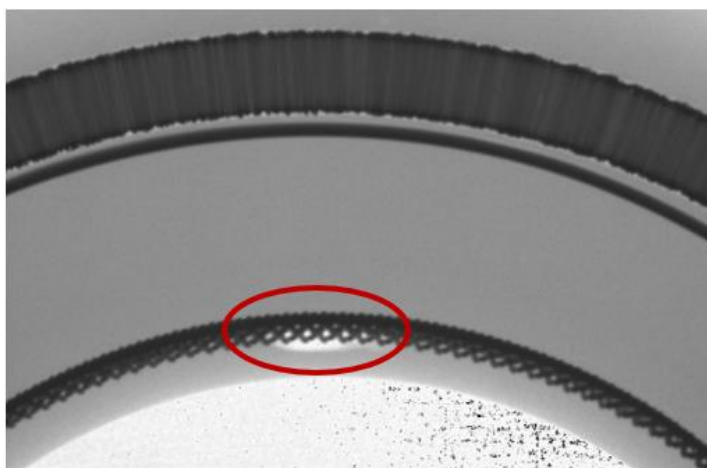
Ďalším, najčastejším sa vyskytujúcim typom nezhody sú čiastočné výboje. Tento problém elektrického charakteru, možno na zariadení odhaliť až testovaním jeho funkčnosti na rôznych napät'ových hladinách. To čo spôsobuje konkrétnu vadu sú nedokonalosti v hmote –

bublíny, ktoré narúšajú elektrickú funkčnosť zariadenia. Tieto bubliny sa začnú pri používaní zariadenia správať ako kondenzátor, hromadia elektrický náboj a narúšajú správnu funkčnosť zariadenia. Na obrázku 3.2 môžeme vidieť röntgenový záber produktu, ktorý odhaľuje defekt, ktorý môžeme pozorovať na vyznačenom mieste.

Vyššie uvedené problémy sú najvýraznejšími defektami, ktorými produkt ako taký trpí. Existuje ešte ďalšie, pomerne veľké množstvo rôznych väd, tie sa však nevyskytujú ani zďaleka v podobnom rozsahu, ako tieto dve. Túto skutočnosť je možné si overiť v uvedenej Paretovej analýze (graf 2.1).



Obrázok 3.1: Vizuálna vada produktu



Obrázok 3.2: Ukážka porušenej celistvosti polymérovej hmoty v blízkosti funkčných častí produktu

Do nedávna nebolo dôsledné štatistické riadenie skúmaného výrobného procesu potrebné, pretože produkt bol dodávaný v pomerne malých objemoch. V súčasnosti však vzniká potreba významne znížiť podiel nezhodných kusov v danom procese z dôvodu, že sa očakáva rast dopytu po tomto portfóliu a spoločnosť nedisponuje dostatočnou kapacitou na to, aby mohla produkt vyrábať pri súčasnom podiele nezhodných kusov a zároveň plniť dodacie termíny. Zároveň, samozrejme, vysoká nekvalita stojí ročne obrovské množstvo peňazí.



## 4 ZBER A ANALÝZA DÁT

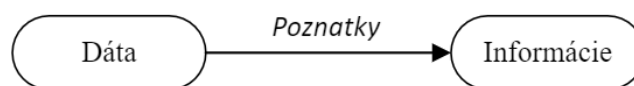
V prvej časti nasledujúcej kapitoly sa budeme podrobne venovať spôsobu, akým sme jednotlivé dáta zbierali, systému ich vyhodnocovania a tomu, ako boli spojené dohromady. Popíšeme si zdroje týchto dát, ich kvalitu a dôveryhodnosť. Druhá časť kapitoly sa bude venovať aplikácií uvedených štatistických nástrojov na konkrétny sledovaný proces.

### 4.1 Zber dát

V dnešnej dobe, kedy je miera informatizácie všetkých organizácií na pomerne vysokej úrovni, je stále často potrebné vysvetlenie rozdielu medzi dátami a informáciami. Tieto pojmy sú využívané vo veľkej miere, ale pre väčšinu poslucháčov sú skôr intuitívnou záležitosťou [10]. Keďže v predkladanej práci sa tieto pojmy často objavujú, je dobré presnejšie popísať, čo sa za týmito pojmami ukrýva:

- **Dáta:** v kontexte počítačových vied pojem „dáta“ reprezentuje označenie pre čísla, text, zvuk, obraz či iné zmyslové vnemy reprezentované v podobe, ktorá je vhodná pre spracovanie počítačom. Dáta sú základom pre reprezentáciu faktov, atribútov, popisu dejov a vecí. Sú surovinou potrebnou pre získavanie informácií. V práci sa budeme zaoberať prevažne štruktúrovanými dátami, ktoré explicitne zachytávajú fakty, atribúty objekty, deje a veci. Štruktúrované dáta nám poskytujú prepojenie týchto faktov, atribútov objektov a dejov dohromady [10].
- **Informácie:** za informáciu môžeme považovať takzvané „dáta v kontexte.“ Bežná databáza, v ktorej zaznamenávame dáta, je v zásade prostým súhrnom hodnôt – teda čísel, reťazcov a podobne – bez akéhokoľvek významu (sémantiky). V momente, kedy je k hodnotám priradený tento význam, sa už jedná o určitý *poznatok*, ktorý zapadá do reality, ktorú sa snaží databáza zachytiť, respektíve modelovať. Samotná informácia je potom určená na pragmatickej úrovni, čo znamená, že z poznatku sme schopní vytvoriť riešenie nejakého problému v konkrétnej situácii. Podstatný rozdiel medzi poznatkom a informáciou je v tom, že informácia je časovo pominuteľná, poznatok je však trvalý [10].

Na obrázku 4.1 je ukázaný vzťah od dát k informáciám:



Obrázok 4.1: Vyobrazenie vzťahu medzi dátami a informáciami [10]

Po vysvetlení významu jednotlivých pojmov sa môžeme pustiť do popisu procesu získavania dát a tvorby vzorky dát, ktorú sme štatisticky spracovali a preskúmali. Diagram 4.1 znázorňuje štruktúru zbieraných údajov. Všeobecne menuje použité zdroje dát, ktorými sa budeme ďalej zaoberať:

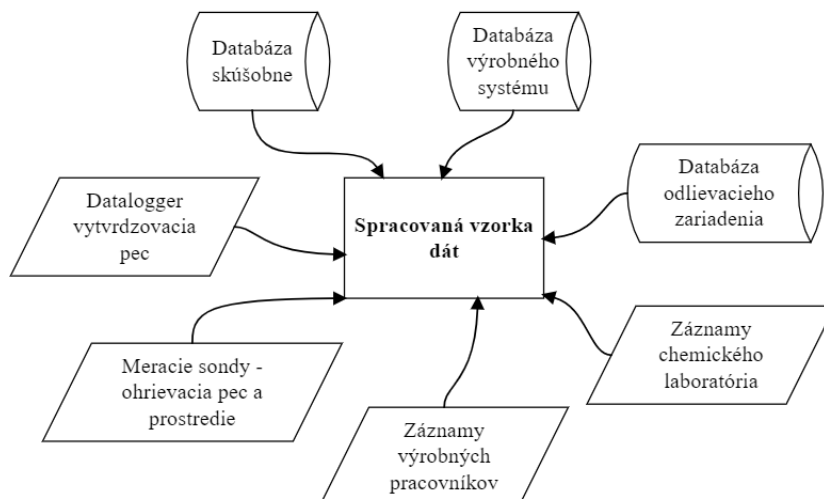


Diagram 4.1: Použité dátové zdroje k tvorbe skúmanej vzorky

Skladbou uvedených zdrojov sme získali tabuľku, ktorá každému sledovanému kusu priradzovala záznamy o sledovaných premenných v procese popísaných v kapitole 3. V nasledujúcej tabuľke 4.1 sú bližšie popísané jednotlivé zdroje dát, spojené s procesnými úsekmi a typom informácií, ktoré o procese podávajú:

Zdroj dát		Procesný úsek	Informácie
Databázové štruktúry	Databáza skúšobne	Odlievanie, informácia o výsledku výstupnej skúšky	Poskytuje informácie o použitej forme pre daný kus, jej pozícii v odlievacom zariadení. Ďalej sú to kompletne informácie o výstupných skúškach, počínajúc časovým údajom, kedy bola vykonaná a končiac výsledkami jednotlivých častí výstupných skúšok, rovnako i čiastkové výsledky pokiaľ sa jedná o elektrické testovanie
	Databáza výrobného systému	Formovanie, vyformovanie, odlievanie	Záznam časových údajov – kedy bolo vykonané formovanie daného kusu, odlievanie, Záznam personálnych údajov – kto kus formoval, kto ho odlieval Páruje sériové čísla jednotlivých kusov s konkrétnou výrobnou zákazkou
	Databáza odlievacieho zariadenia	Odlievanie	Poskytuje kompletne údaje o procese odlievania – teplota, tlak, pozícia pumpy zariadenia, množstvo hmoty vo forme v danom čase, celkový čas odlievania,...
Meracie zariadenia	Datalogger – tvrdiaca pec	Vytvrdenie	Poskytuje údaje o priebehu teploty v tvrdiacej peci
	Meracie sondy	Ohrievanie, proces ako celok	Záznamy teploty a vlhkosti v ohrievacej peci a v prostredí, kde prebiehajú všetky procesné úseky

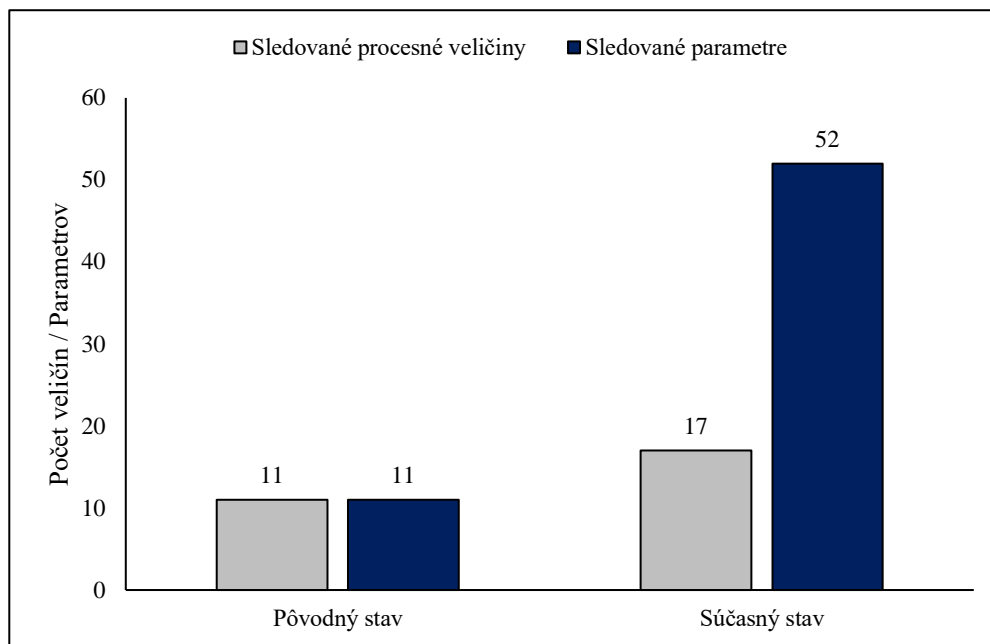
Manuálne zapisovanie	Záznamy výrobných pracovníkov	Ohrievanie, dotvrdzovanie	Podávajú informáciu o dátume a čase, kedy bol daný kus vložený do ohrievacej alebo tvrdiacej pece
	Záznamy chemického laboratória	Odlievanie (hmota)	Testovanie hmoty na dennej báze, zisťujú sa chemické parametre hmoty, ktoré sa potom zaznamenávajú

Tabuľka 4.1: Dátové zdroje

Je potrebné poznamenať, že pri záznamoch, prevažne od výrobných pracovníkov dochádza k určitému skresleniu informácií. Vďaka veľkému množstvu údajov zaznamenaných v databázach, častokrát automaticky niektorým zo zariadení však je možné niektoré dáta od výrobných pracovníkov kontrolovať.

Všetky získané záznamy ďalej spájame v do tabuľky, ktorá je testovacou vzorkou pre odhaľovanie tých najvýznamnejších faktorov, ktoré sa v najväčšej miere podieľajú na vzniku nezhodných kusov vo výrobe daného produktu.

Z vyššie uvedených údajov sa dnes v organizácii zbierajú naďalej všetky. Pred počiatkom prác na tomto projekte sa zaznamenávalo ďaleko menšie množstvo údajov, ktorými bolo možné popísať proces. Aj to môže byť jeden z dôvodov, prečo sa dlhodobo nedarí udržať podiel nezhodných kusov v procese v prípustnej oblasti. V nasledujúcom grafe 4.1 uvedieme rozdiel medzi východným a súčasným stavom zaznamenávania údajov o procese:



Graf 4.1: Porovnanie stavov z hľadiska množstva sledovaných veličín

Ako môžeme vidieť, pôvodne sa sledovalo jedenásť rôznych veličín, dnes sledujeme sedemnášť, čo je nárast približne o 55%. Podstatnejšie je však to, že východzí stav nesledoval žiadne parametre odvodené od procesných veličín, ktoré môžu mať kľúčový význam pri hľadaní odpovedí na otázku čo spôsobuje tak veľký podiel nezhodných kusov v procese. Nárast je z jedenástich rôznych parametrov na 52, čo je viac než 370% rast. To vytvára značne lepšie možnosti pre štatistický popis daného procesu, a teda aj pre odhalenie faktorov, ktoré sú kľúčové pre vznik nezhodných kusov. Pre úplnosť uvedieme čo v našom ponímaní znamená veličina a parameter:

1. **Veličina:** priamo sledovaný údaj, ktorého hodnota je zaznamenávaná v určitom časovom bode meracím zariadením. Veličina je pevne previazaná z konkrétnym časovým údajom
2. **Parameter:** údaj, ktorý nie je pevne spojený s konkrétnym časovým okamihom ale je vzťahnutý ku konkrétnemu kusu. Takýto údaj môže a nemusí byť odvodený od procesnej veličiny. Parametrom môžu byť rôzne spracované hodnoty veličín v priebehu času pri danom kuse (priemerná teplota okolia počas odlievania, smerodajná odchýlka vlhkosti v peci počas ohrievania a podobne), ale môže to byť aj diskretný údaj viazaný k sledovanému kusu, respektíve procesnému úseku výroby sledovaného kusu (pozícia pri odlievaní, forma a podobne)

#### 4.1.1 Vytvorenie vzorky pre analýzu dát

Krokom nasledujúcim po zavedení zberu záznamov o jednotlivých procesných veličinách a parametroch je ich usporiadanie, priradenie jednotlivým sériovým číslam, ich prepojenie so záznamom o výsledku výstupnej skúšky daného kusu a následné očistenie týchto dát o tie, kde nie sú všetky informácie o procese kompletne. Všetky tieto úkony sú vykonávané v prostredí Microsoft Excel (ďalej MS Excel) z niekoľkých dôvodov:

1. MS Excel umožňuje priame napojenie na servery, na ktorých sú uložené výrobné databázy
2. Umožňuje jednoduchú prácu so získanými dátami ako napríklad spájanie jednotlivých hodnôt medzi sebou na základe časových údajov, informácií o sériovom čísle či iných spoločných znakov
3. Formát MS Excel je kompatibilný s dátovými formátmi, do ktorých sú ukladané dáta z meracích zariadení či z odlievacieho zariadenia
4. Je možné relatívne jednoduchým spôsobom pridávať dáta, ktorých zber nie je automatizovaný

Vďaka vyššie uvedeným bodom je MS Excel jednoznačne najvhodnejší program pre vytvorenie vzorky údajov, ktoré je možné bližšie analyzovať.

Vzhľadom na fakt, že výsledná analyzovaná vzorka dát je poskladaná z pomerne veľkého množstva dátových zdrojov, ktoré nie sú vždy automatizované – teda ich záznam neprebíha automaticky na určitú lokáciu na serveri alebo na webovú lokáciu, ale je potrebné ich manuálne zbierať a premiestňovať do konkrétneho súboru použitého na vytvorenie vzorky dát – je samotné vytvorenie vzorky zdĺhavým netriviálnym procesom, ktorý sa skladá z uvedených krokov:

1. Tvorba prepojení medzi súborom vo formáte MS Excel a výrobnými databázovými zdrojmi na serveroch
2. Manuálny export dát o odlievaní jednotlivých kusov z databázy odlievacieho zariadenia. Odlievacie zariadenie vytvára záznam o priebehu procesných veličín sledovaných samotným odlievacím zariadením pre každú sériu vyrobených kusov samostatne, po krátkych časových úsekoch (v rozmedzí od 1 sekundy po 5 sekúnd, v závislosti od fázy procesu). Tieto záznamy sú uložené v súbore formátu .csv, ktoré boli následne exportované do predpripravenej tabuľky v programe MS Excel. Údaje z odlievacieho zariadenia sú spárované so sériovými číslami jednotlivých kusov na základe údajov o čase začiatku odlievania.



3. V nasledujúcom kroku sú priradené k záznamom z odlievacieho zariadenia dáta z databázy skúšobne a z databázy výrobného systému. Tie zahŕňajú dáta o pozícii pri odlievaní, použitej forme pri danom kuse, výrobnom pracovníkovi, ktorý funkčné časti konkrétnych kusov montoval a formoval, respektíve pracovníkovi, ktorý jednotlivé kusy odlieval, ďalej o vykonaných skúškach hotového výrobku podľa jednotlivých kategórií, takisto časovú os výroby kusu od počiatku montáže funkčných častí až po koniec odlievacieho procesu.
4. Spojenie údajov zapísaných od výrobnými pracovníkmi (štart a koniec ohrievania a vytvrdzovania) s údajmi o teplote a vlhkosti v peciach a v prostredí.
5. Priradenie dát o vlastnostiach hmoty v danom období jednotlivým kusom
6. Spojenie všetkých dát do tabuľky slúžiacej ako základ pre analyzovanú vzorku

Vyššie uvedené kroky môžeme vidieť graficky vyobrazené v nasledujúcom vývojom diagrame 4.2, ktorý bližšie zobrazuje popis agregácie samostatne zbieraných dát do celku:

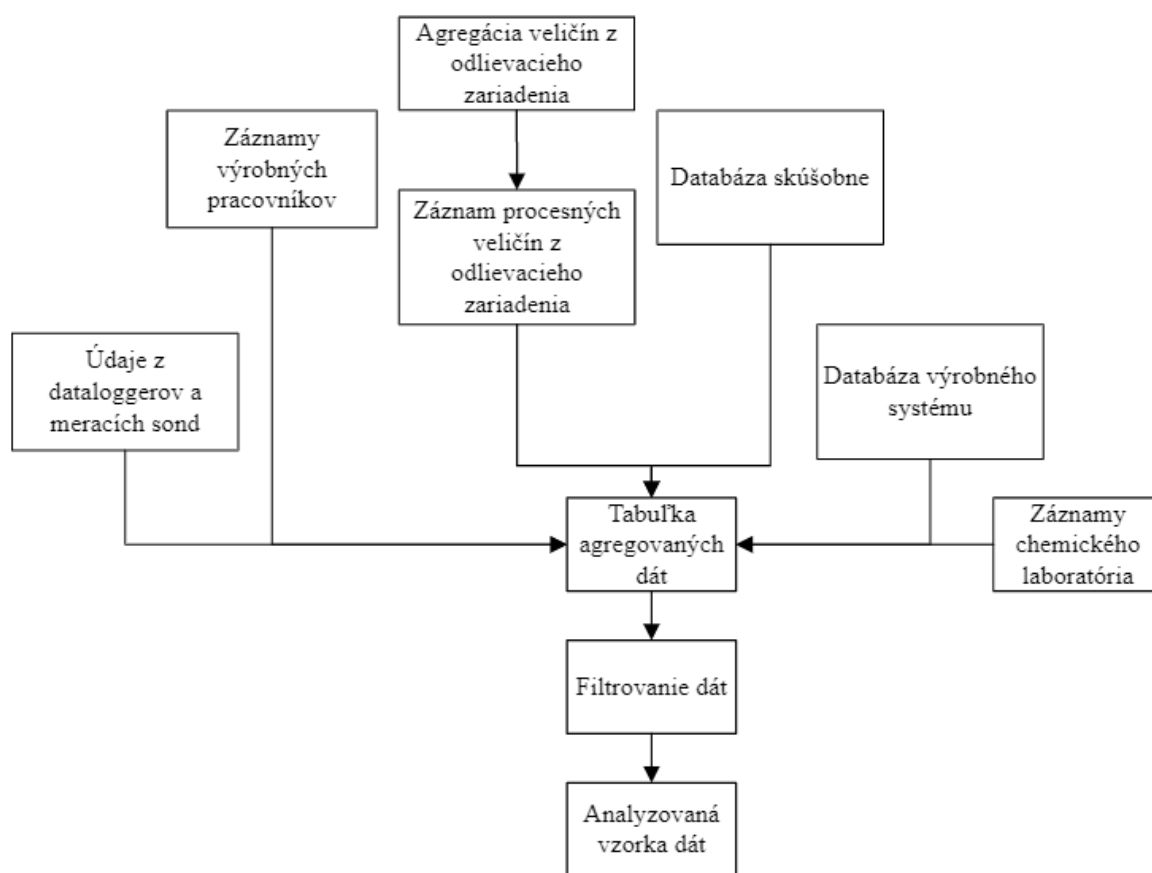


Diagram 4.2: Vývojový diagram procesu zlučovania procesných dát

Výstupom po vykonaní úkonov opísaných touto kapitolou je pripravená tabuľka dát, v ktorej sú k dispozícii hodnoty procesných veličín a parametrov, osobitne pre každý kus, vhodné pre štatistické spracovanie s cieľom odhaliť veličiny s najvýznamnejším vplyvom na výrobu nezhodných kusov.

## 4.2 Analýza dát

V nasledujúcej kapitole práce sa zaoberáme samotnou analýzou dát. Podrobne budú popísané a zdôvodnené jednotlivé úkony, hľadanie súvislostí v dátach, a výstupy analýzy, ktoré vedú k poznaniu veličín či parametrov ovplyvňujúcich kvalitu finálneho výrobku.

Analýza dát bola vykonaná v prostredí programu Minitab, ktorý je osvedčeným nástrojom pri aplikáciách štatistického riadenia procesov v praxi. V našom konkrétnom prípade sa síce nejedná o štatistické riadenie procesu v pravom slova zmysle, ale skôr tvorbu matematického modelu, z ktorého sme schopní určiť kľúčové faktory ovplyvňujúce vznik nezhodných kusov. Ďalej má tento model za úlohu popísať pravdepodobnosť vzniku určitej vady na základe konkrétnych hodnôt uvedených významných faktorov. Tieto faktory sme vytipovali v priebehu času pri agregovaní dátových zdrojov, zväčša dvojakým spôsobom:

1. Na základe logických spojitostí – napríklad tuhnutie hmoty pri určitej teplote, vytvrdzovanie hmoty pri určitej teplote čo znamená, že teplota v priebehu procesu je všeobecne významným faktorom
2. Na základe informácií od technologov, pracovníkov oddelenia kvality či výrobných pracovníkov, ktorí majú skúsenosti s procesom a vedia lepšie odhadnúť, čo by mohlo mať na výsledok ako taký vplyv

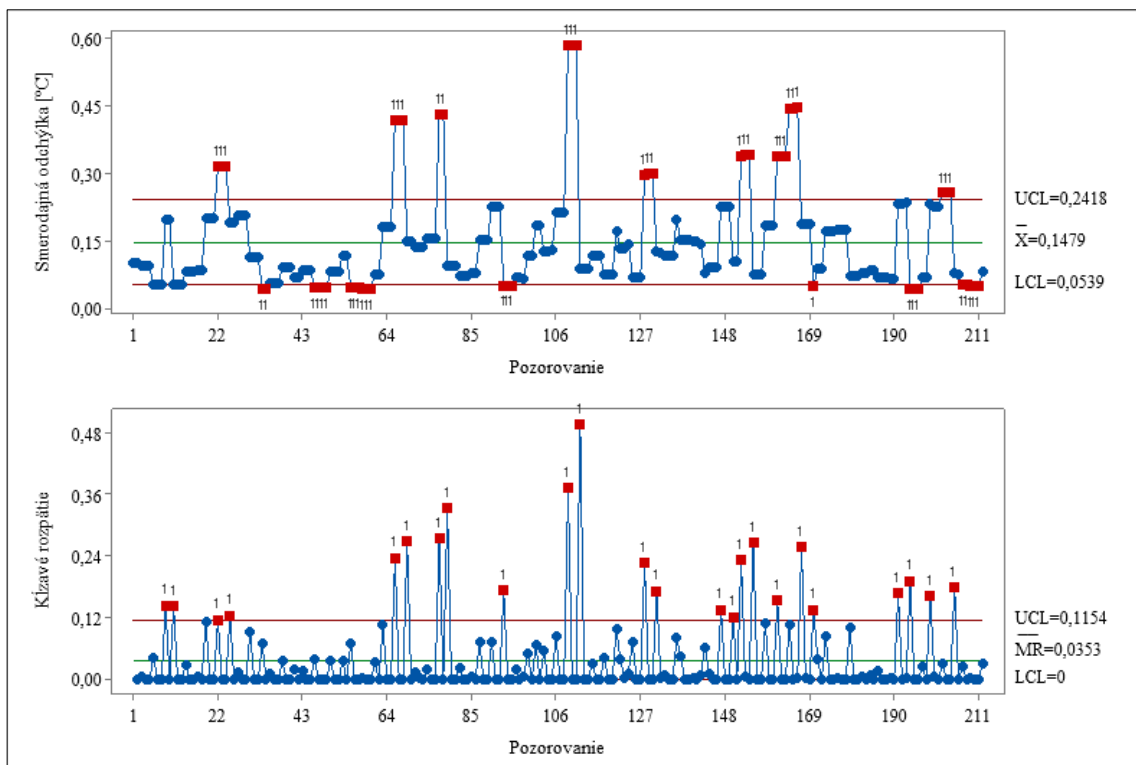
Takýmto spôsobom sme získali súbor všetkých možných faktorov, ktorých hodnoty meriame, zaznamenávame a následne analyzujeme.

### 4.2.1 Stabilita vstupných premenných a výstupných atribútov

Jedným z krokov analýzy procesu je aj zisťovanie stability vstupných premenných, ktoré sú bližšie štatisticky preskúmané v nasledujúcich kapitolách. Táto kapitola je nadstavbou kapitoly 2.5, v ktorej je uvedená problematika stability spolu s jedným praktickým príkladom vstupnej premennej zo skúmaného procesu, a má za cieľ pozrieť sa na stabilitu vstupných veličín v danom procese z komplexnejšieho hľadiska.

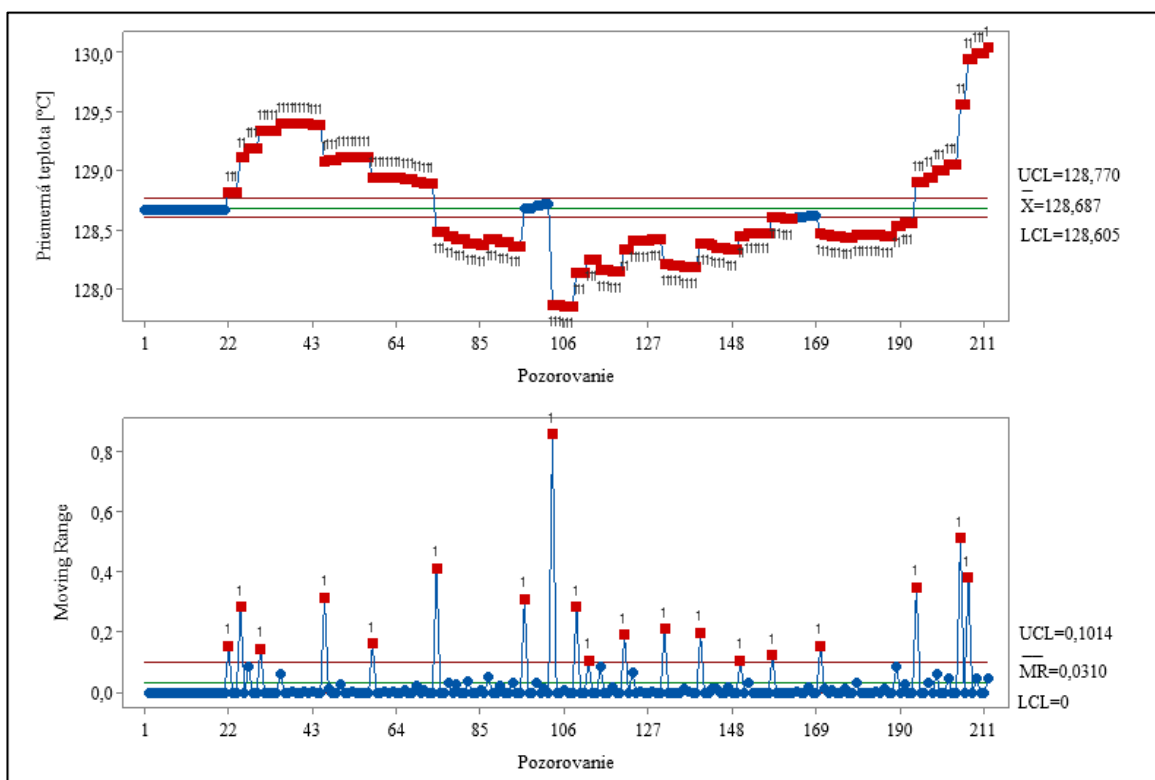
Uvedieme opäť niekoľko I-MR regulačných diagramov pre premenné, pri ktorých môže mať význam sledovať ich stabilitu. Z dôvodu, že sa jedná o pomerne nepresný dielenský proces, v ktorom by pri vykonaní všetkých testov identifikovateľných príčin vždy došlo k neprejudeniu vzorky niektorými z testov, je ponechaný zapnutý v programe Minitab len test číslo 1, teda že bod leží viac ako 3 smerodajné odchýlky od centrálnej čiary regulačného diagramu.

Z hľadiska vstupných premenných začneme smerodajnou odchýlkou teploty prostredia pri odlievaní. V grafe 4.2 môžeme sledovať mnoho miest, kde nie je splnený základný predpoklad stability, teda body sú vzdialené viac ako 3 smerodajné odchýlky od stredovej čiary. Tieto nestability sú spôsobené tým, že výrobný úsek nie je oddelenou a uzavretou časťou výroby, ale len súčasťou väčšej výrobnej haly, kde je značné prúdenie vzduchu. Smerodajná odchýlka teploty prostredia bola vybraná preto, že výkyvy teploty môžu mať, z hľadiska premenných definujúcich prostredie, najväčší dopad na zmeny teploty formy počas odlievania a tým pádom na samotnú reakciu polymérovej hmoty. Za súčasných podmienok, nie je systematicky možné vyriešiť stability tejto procesnej premennej.



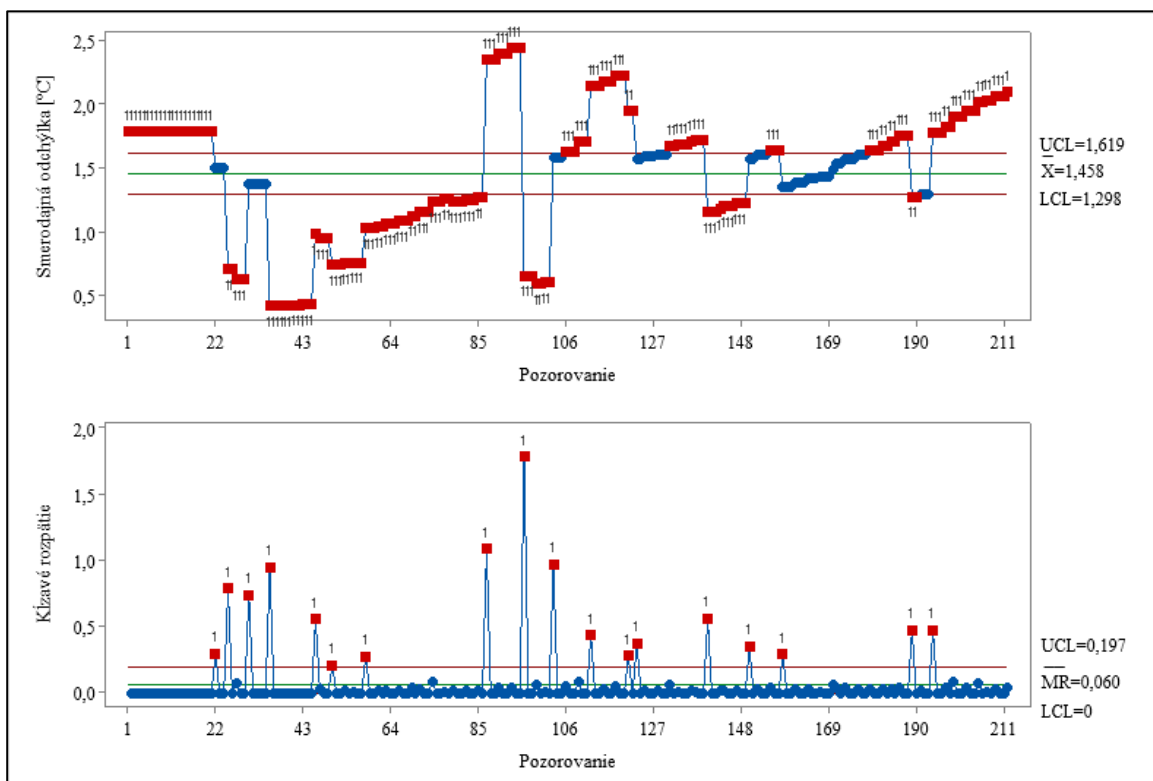
Graf 4.2: Smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievaní

Ďalším procesným úsekom, kde bola bližšie skúmaná stabilita niektorých premenných parametrov je vytvrdzovanie. Regulačné diagramy sú označené ako graf 4.3 pre priemernú teplotu v peci pri dotvrdzovaní a ako graf 4.4 pre smerodajnú odchýlku tejto teploty pri dotvrdzovaní.



Graf 4.3: Priemerná teploty v peci pri dotvrdení

V regulačnom diagrame pre priemernú teplotu je možné vidieť, že väčšina bodov je viac ako 3 smerodajné odchýlky od centrálnej čiary. I keď vzory v regulačnom diagrame nevyzerajú náhodne, ich príčinu vysvetliť presne nevieme. V grafe pre smerodajnú odchýlku teploty v peci pri potvrdení tiež môžeme sledovať vzory, ktoré nevyzerajú náhodne, vysvetlenie je však neznáme. Smerodajná odchýlka teploty v peci ako taká je zapríčinená tým, že pracovník otvára a vkladá do nej nové odliate kusy počas toho, ako prebieha proces vytvrdzovania kusov, to však prebieha pri všetkých kusoch približne rovnako. Ďalej je to ohrievanie pece v cykloch, kedy sa proces zvyšovania teploty v peci začne pri určitej spodnej hranici a vypne pri nastavenej úrovni teploty v peci.

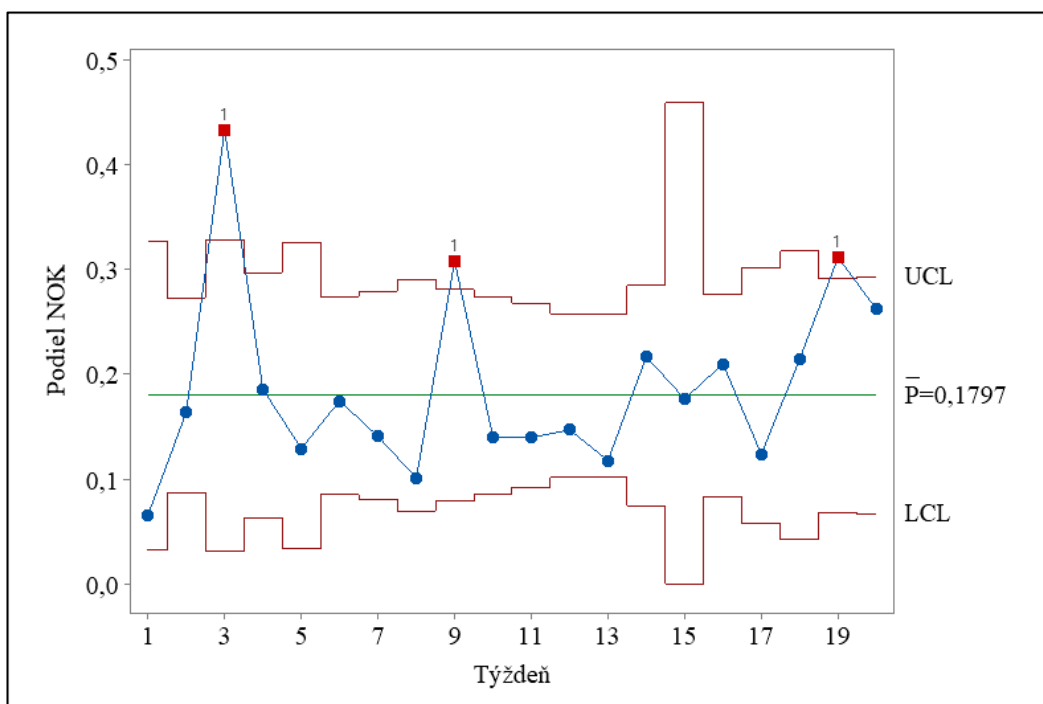


Graf 4.4: Smerodajná odchýlka teploty v peci pri potvrdení

Doposiaľ bolo ukázané, že významné vstupné parametre procesu ako celku sú nestabilné. To nasvedčuje, že podnik by mal začať vnášať do procesu vyššiu mieru štandardizácie určitých častí týchto procesov, čo by vo finále tiež mohlo viesť k nižšiemu podielu nezhodných kusov. Zo skúseností však vieme, že nestabilita nie je jediným faktorom, ktorý vnáša do procesu vysokú mieru podielu nezhodných kusov, pretože obdobne ako v našom prípade, ak by sme sledovali stabilitu vstupných premenných veličín a parametrov u iných produktov z portfólia, dospeli by sme k rovnakým výsledkom stability, avšak k značne nižšiemu podielu nezhodných kusov.

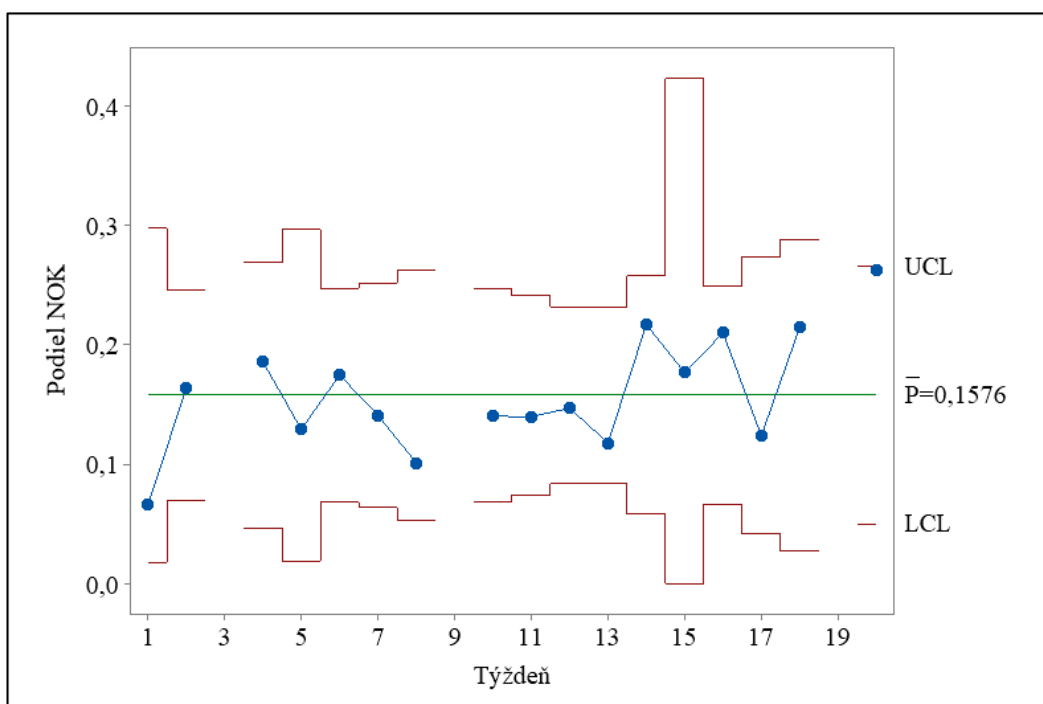
Poslednou časťou analýzy stability procesu v tejto práci je sledovanie stability výstupného atribútu v podobe podielu nezhodných kusov vo vzorke v jednotlivých sledovaných týždňoch. V kapitole číslo 2.5.2 bol ako príklad použitý p-diagram podielu nezhodných podľa dňa v týždni v skúmanej vzorke údajov. Nasledujúce regulačné diagrame vyhodnocujú stabilitu podielu nezhodných kusov vo vzorke podľa týždňa sledovania daného procesu.

V grafe 4.5 je ukázaný vývoj stability pre vadu čiastočné výroby:



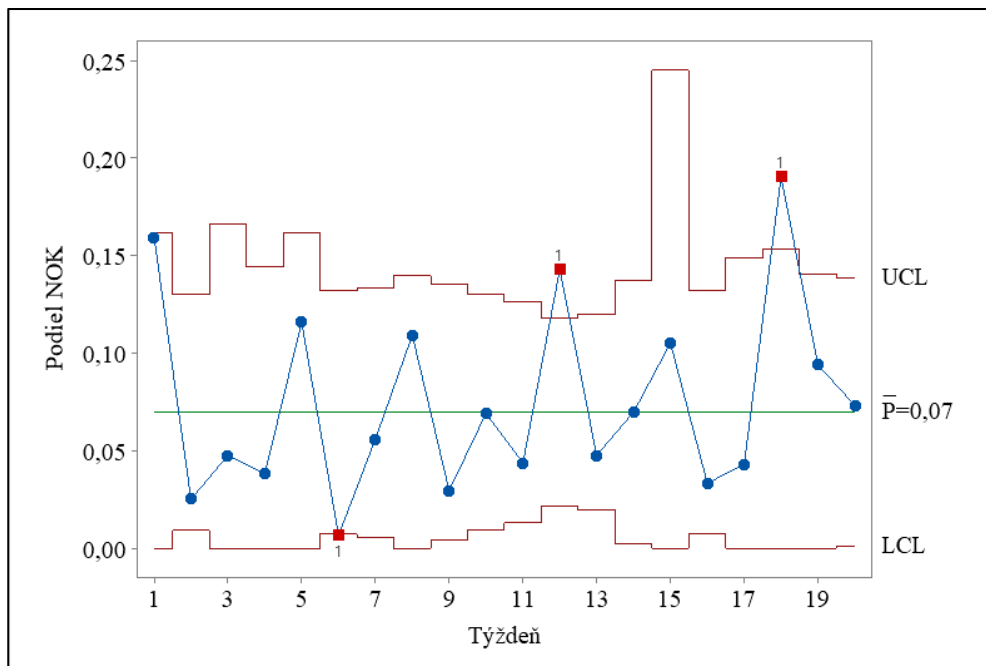
Graf 4.5: P-diagram podielu nezhodných kusov v dôsledku čiastočných výbojov

V grafe môžeme vidieť, že okrem troch týždňov je podiel nezhodných kusov v dôsledku čiastočných výbojov stabilný. Nestabilita v daných týždňoch bola v dvoch prípadoch spôsobená testovaním určitých nastavení procesu, v treťom drobnými stavebnými úpravami pracoviska. Pokiaľ poznáme príčinu nestability podielu nezhodných kusov, môžeme dané body z p-diagramu odstrániť. Tak dostaneme graf 4.6, ktorý potvrdzuje dlhodobú stabilitu podielu kusov nezhodných na čiastočné výroby:



Graf 4.6: P-diagram podielu nezhodných kusov v dôsledku čiastočných výbojov II.

Pri druhom závažnom dôvode vysokého podielu nezhodných kusov v procese – vizuálnych vadách, je situácia mierne odlišná. Graf 4.7 je regulačný p-diagram, ktorý popisuje stabilitu podielu nezhodných kusov v procese vzhľadom k vizuálnym nedostatkom:



Graf 4.7: P-diagram podielu nezhodných kusov pri vizuálnych nedostatkoch

Vidíme nestabilný podiel nezhodných kusov v týždňoch 6, 12 a 18. Tieto nestability však nedokážeme vysvetliť. Podiel nezhodných kusov v prípade vizuálnych väd nie je stabilný naprieč celým sledovaným obdobím.

#### 4.2.2 Nedostatky v procese a ich príčiny všeobecne

V úvodnej fáze analýzy získaných dát sme sa zaoberáme vznikom nezhodných kusov všeobecne. Naším cieľom je sústrediť sa na odpoveď v podobe výsledku finálnej skúšky všeobecne, teda bez priradenia konkrétneho dôvodu nezhodnosti danému produktu.

V tejto fáze je posudzovaný vplyv najmä takzvaných kategorických premenných. Kategorická premenná je taká premenná, podľa ktorej možno zaradiť výrobok – či už zhodný alebo nezhodný, do určitej skupiny [11], podľa určitého nastavenia pri konkrétnom kuse vo výrobnom procese. V našom prípade za kategorické premenné môžeme označiť napríklad pozíciu pri odlievaní, formu a človeka, ktorý s kusom v daných fázach procesu pracoval. Chí-kvadrát testom, ktorý je bližšie popísaný v kapitole 2.2 skúmame či existuje štatisticky významný vplyv určitej kategórie na zvýšený podiel vyrobených defektných kusov. Chí-kvadrát test bol vykonaný pre posúdenie vplyvu nasledujúcich kategorických premenných:

- *Pozícia pri odlievaní* – vyplýva zo sériovej podoby výroby, teda odlievania troch kusov súčasne. Poloha, v ktorej sa kus nachádza môže mať vplyv na kvalitu výsledku
- *Forma pri odlievaní* – v obehu je 9 rôznych foriem. Na formách je vykonávaná údržba v rôznom čase, majú rozličný vek a podobne, môže teda dochádzať k vzniku vplyvu samotnej formy na kvalitu odlievania
- *Pracovník montáže funkčných častí a formovania* – odlišná úroveň skúseností jednotlivých pracovníkov sa môže odraziť na kvalite výsledku. Každý pracovník ma iné predispozície na zadanú prácu, a preto je predpoklad, že kvalita ich práce je odlišná

- *Pracovník odlievania* – podobne ako v predchádzajúcom bode, odlišná úroveň skúseností výrobných pracovníkov môže viesť k odlišnej reakcii na vzniknutú problematickú situáciu počas odlievania, a tým k rozdielnej kvalite výsledku.

Použitím programu Minitab sme vykonali Chí-kvadrát test dobrej zhody pre všetky vyššie uvedené kategorické premenné. Výsledky v jednotlivých kategóriách sú popísané v ďalšej časti kapitoly.

#### Pozícia pri odlievaní

Pri pozícii v odlievacom zariadení sme zisťovali počet defektných kusov v každej pozícii vzhľadom ku všetkým vyrobeným v nej v danej vzorke. Výsledky sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 4.2:

Výsledok	Pozícia Informácia	1	2	3	Suma
NOK	Počet skutočný	89	56	109	254
	Počet teoretický	67,30	67,10	119,60	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	7,01	1,83	0,95	
OK	Počet skutočný	245	277	485	1007
	Počet teoretický	266,70	265,90	474,40	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	1,77	0,46	0,24	
Suma		334	333	594	1261

Tabuľka 4.2: Chí-kvadrát test vzniku defektného výrobku vzhľadom k pozícii

V tabuľke 4.2 môžeme vidieť viacero údajov:

- **Počet skutočný:** počet pozorovaných kusov rozdelený podľa danej kategórie (pozícia pri odlievaní) a podľa výsledku výstupnej skúšky (NOK/OK)
- **Počet teoretický:** Hodnota, ktorá by podľa Chí-kvadrát testu mala byť pozorovaná – výpočet uvedený v rovnici (2.8)
- **Príspevok k Chí-kvadrátu:** Rozdiel štvorca medzi skutočným a teoretickým počtom podelený teoretickým počtom v danej kategórii [4]. Čím väčší je rozdiel medzi skutočne pozorovaným výskytom udalosti v danej kategórii a teoretickým počtom, tým väčší je príspevok danej kategórii k Chí-kvadrátu

Podobná tabuľka sa bude vyskytovať pri skúmaní všetkých kategorických premenných a bude obsahovať rovnaké údaje.

V tomto prípade nulová hypotéza  $H_0$  tvrdí, že kvalita finálneho produktu nezávisí na pozícii pri odlievaní. P-hodnota pri danom teste podľa Pearsona je rovná 0,002; čo znamená, že hypotézu na danej hladine významnosti zamietame. Uvedeným testom sme ukázali, že pozícia 1 vykazuje oproti ostatným dvom pozíciám horšie výsledky. Vidíme, že teoretický počet výskytu NOK kusu je 67,3; pričom v skutočnosti je pozorovaný vznik až 89 nezhodných kusov z vybranej vzorky dát. Tento predpoklad je podložený aj príspevkom k Chí-kvadrátu v danom prípade, ktorý činí 7,01 a značne prevyšuje príspevky ostatných kategórií. Celková hodnota  $\chi^2 = 12,260$ .

Výsledky sú dodatočne podložené ešte grafickým zobrazením, ktoré vyjadruje pomer defektných a správnych kusov v grafe číslo 4.8:



Graf 4.8: Podiel nezhodných kusov vzhľadom k zhodným podľa pozície pri odlievaní

#### Forma pri odlievaní

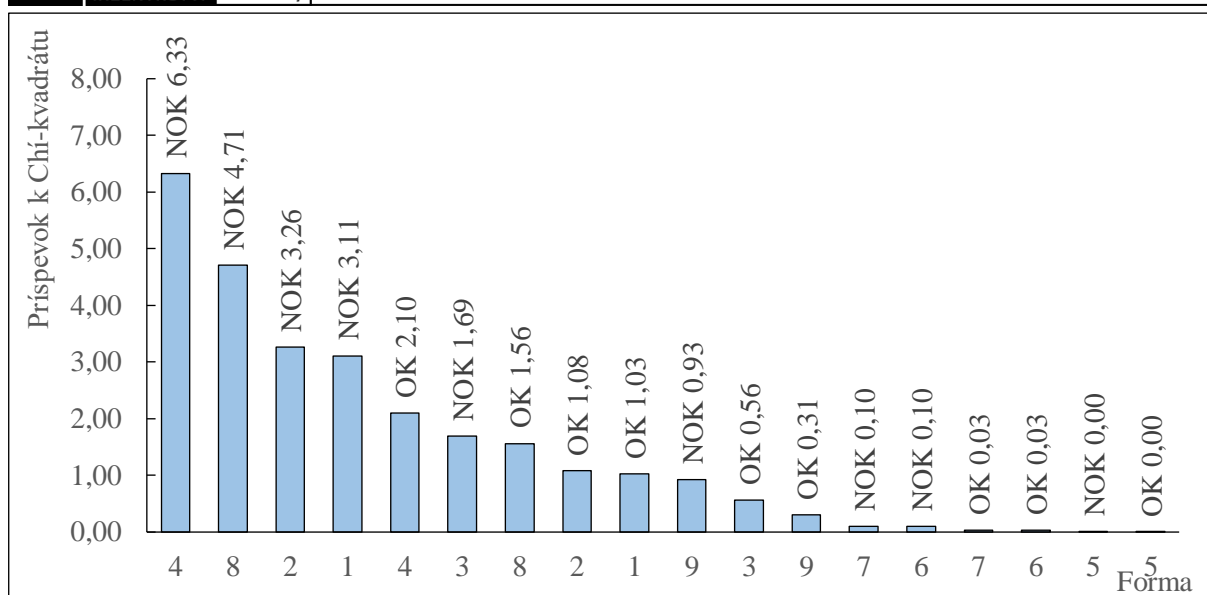
Nasledujúcou kategorickou premennou označíme formu použitú pri odlievaní daného kusu. Zistíme pomer zhodných a nezhodných kusov, v rozličných formách. Výsledky sú uvedené v tabuľke 4.3:

Výsledok	Pozícia Informácia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Suma
NOK	Počet skutočný	77	50	52	85	65	68	66	46	15	524
	Počet teoretický	63,01	64,50	62,26	64,75	65,50	65,50	63,51	63,26	11,71	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	3,11	3,26	1,69	6,33	0,00	0,10	0,10	4,71	0,93	
OK	Počet skutočný	176	209	198	175	198	195	189	208	32	1580
	Počet teoretický	189,99	194,50	187,74	195,25	197,50	197,50	191,49	190,74	35,29	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	1,03	1,08	0,56	2,10	0,00	0,03	0,03	1,56	0,31	
Suma		253	259	250	260	263	263	255	254	47	2104

Tabuľka 4.3: Chí-kvadrát test vzniku nezhodného kusu vzhľadom k forme

V predchádzajúcom prípade, kedy sme skúmali vplyv pozície odlievania na výsledok bolo hodnôt viditeľne menšie množstvo. V prípade, že existuje väčšie množstvo skúmaných hodnôt môžeme si pomôcť grafom, ktorý skúma veľkosť príspevku k Chí-kvadrátu a je označený ako graf 4.9:

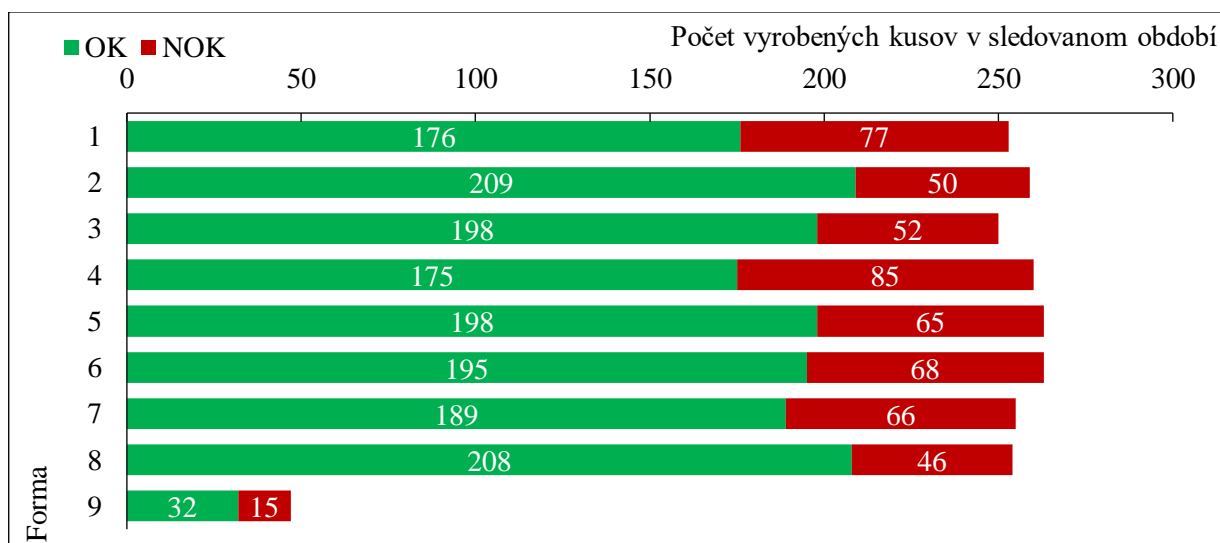




Graf 4.9: Príspevok k Chí-kvadrátu od jednotlivých foriem s výsledkom výstupnej skúšky

Analýzou grafu 4.9 zistíme, že najväčší príspevok k chí-kvadrát testu majú formy 4, 8 a 2, v konkrétnom prípade sa jedná o kusy, ktoré sú nezhodné. To značí, že formy 4, 8 a 2 majú v prípade nezhodných kusov najväčší rozdiel medzi pozorovaným počtom nezhodných kusov a teoretickým – očakávaným počtom nezhodných kusov. Uvedený graf je potrebné ešte prepojiť bližšie s informáciou z tabuľky 4.3, kde vidíme, že pri formách 2 a 8 sa jedná o nižší počet pozorovaných NOK kusov ako bolo očakávané a pri forme 4 sa jedná o vyšší počet pozorovaných nezhodných kusov ako bolo očakávané. Po uvážení veľkosti jednotlivých príspevkov a zahrnutí informácie o pozitívnom alebo negatívnom rozdiel medzi počtom pozorovaných a očakávaných nezhodných kusov v jednotlivých formách zistíme, že najhoršie vychádzajú formy 4 a 1. V oboch týchto formách je teda vyrobených viac nezhodných kusov ako by malo byť. Naopak, vo formách 2 a 8, je vyrobené značne menšie množstvo defektných kusov, a teda z testu foriem vychádzajú štatisticky najlepšie.

Pre úplnosť uvádzame graf 4.10, ktorý znázorňuje počet kusov vyrobených v jednotlivých formách, rozdelených podľa kvality finálneho výsledku:



Graf 4.10: Vyrobené kusy podľa formy a kvality

Graf 4.10 podkladá tvrdenie o tom, že formy 1 a 4 majú vyšší podiel vyrobených kusov, ktoré sa nezhodujú so špecifikáciou.

Celková hodnota Chí-kvadrátu -  $\chi^2 = 26,93$  a dosiahnutá p-hodnota je 0,001. Hypotézu  $H_0$ , ktorá tvrdí, že odlievacia forma nemá vplyv na kvalitu výsledku môžeme na danej hladine významnosti zamietnuť. Preukázalo sa, že forma má vplyv na kvalitu výsledku.

#### Pracovník montáže funkčných častí a formovania

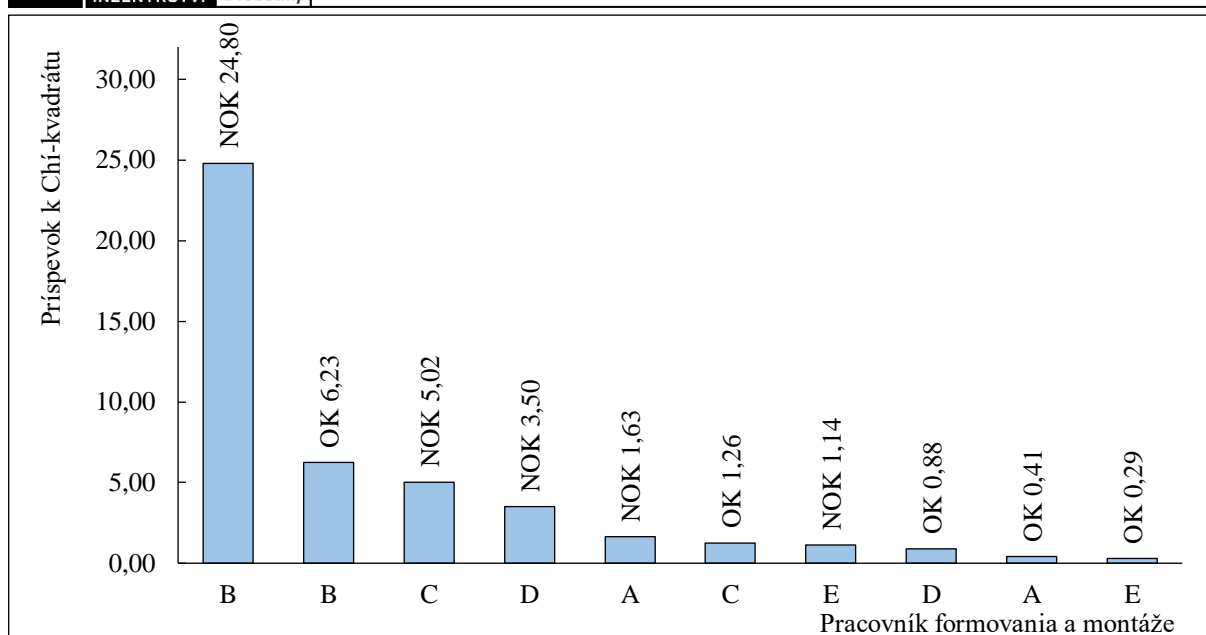
V ďalších častiach sa práca venuje vplyvu ľudského faktora na kvalitu výstupu. Vplyv výrobného pracovníka je nezanedbateľný, vzhľadom k tomu, že sa jedná o náročný výrobný proces. Tento problém úzko súvisí aj so štandardizáciou procesu, kedy rozličný výrobný pracovníci majú osvojené mierne odlišné postupy a vnášajú do procesu istú mieru variability, ktorá môže viesť k vzniku kusov nezhodných so špecifikáciou. Keďže cieľom tejto práce nie je skúmať mieru štandardizácie z hľadiska dodržiavania zavedených postupov jednotlivými výrobnými pracovníkmi, budeme sa opäť zaoberať len porovnávaním množstva zhodných a nezhodných vyrobených kusov v závislosti na človeku, ktorý montoval funkčné časti produktu a produkt formoval.

Nasledujúca tabuľka 4.4 zobrazuje výsledku testu dobrej zhody, v ktorom bol použitou kategorickou premennou pracovník a odpoveďou zhoda, respektíve nezhoda kusu so špecifikáciou:

Výsledok	Pozícia	A	B	C	D	E	Suma
	Informácia						
NOK	Počet skutočný	24	72	68	17	70	251
	Počet teoretický	31,12	40,36	89,16	10,84	79,52	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	1,63	24,80	5,02	3,50	1,14	
OK	Počet skutočný	131	129	376	37	326	999
	Počet teoretický	123,88	160,64	354,84	43,16	316,48	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	0,41	6,23	1,26	0,88	0,29	
Suma		131	129	376	37	326	1250

Tabuľka 4.4: Chí-kvadrát test vzniku nezhodného kusu vzhľadom k pracovníkovi formovania

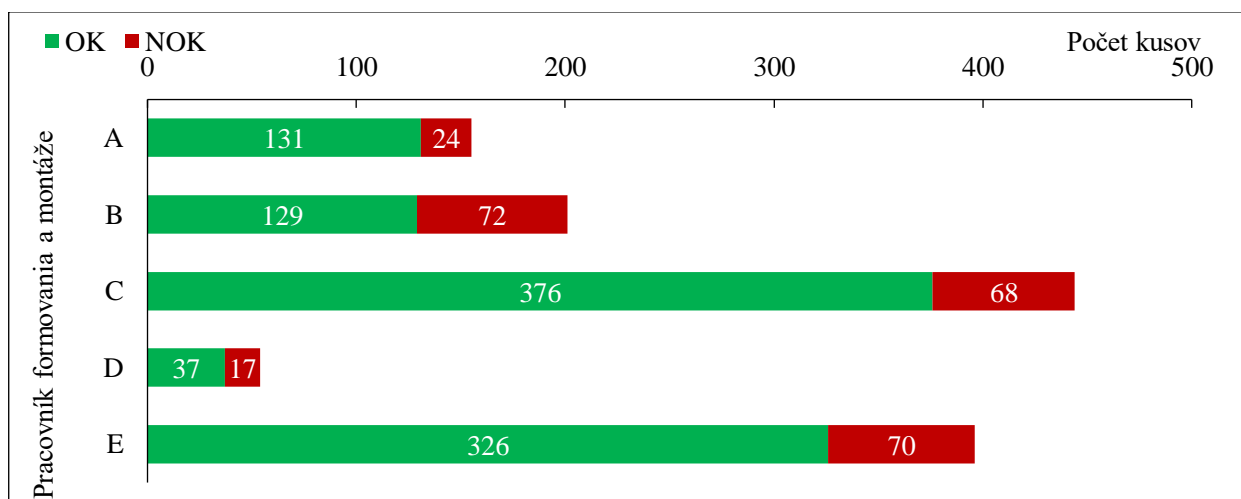
Ďalším krokom je preskúmanie príspevku jednotlivých pracovníkov k hodnote  $\chi^2$ , respektíve ako ktorý z nich prispieva k vzniku nezhodných kusov. Opäť máme k dispozícii stĺpcový graf 4.11 znázorňujúci veľkosť príspevku od pracovníka, ako aj to či bol kus zhodný alebo nezhodný so špecifikáciou:



Graf 4.11. Príspevok k hodnote Chí-kvadrátu od jednotlivých pracovníkov formovania

Z uvedeného grafu 4.11 a dát z tabuľky 4.4 vieme zhodnotiť, že najproblematickejším je pracovník označený B. Tabuľka ukazuje, že ním vyrobený počet nezhodných kusov je približne o 32 kusov vyšší, ako je očakávaný počet kusov na základe modelu. Naopak, počet kusov zhodných so špecifikáciou je približne o 32 kusov nižší, ako predpokladal model. Je teda vysoko pravdepodobné, že daný pracovník nevykonáva pridelenú činnosť správne, v súlade so štandardizovaným postupom. Pri ostatných pracovníkoch je príspevok k hodnote  $\chi^2$  nižší, a navyše, viacerí z nich kompenzujú veľké množstvo defektných kusov od pracovníka B, čo sa prejavuje tým, že očakávaný počet nezhodných kusov, ktoré vyrobili je vyšší oproti skutočnému počtu nezhodných kusov, ktoré vyrobili.

Uvedené tvrdenia si opäť podložíme grafom 4.12, ktorý znázorňuje počet vyrobených kusov daným pracovníkom, rozdelený podľa toho, či boli kusy zhodné alebo nie:



Graf 4.12: Vyrobené kusy podľa pracovníka formovania a kvality výstupu

Parametre testu boli nasledovné: celková hodnota  $\chi^2$  podľa Pearsona bola 45,155 a p-hodnota 0,000; čo znamená, že hypotézu  $H_0$ , ktorá tvrdí, že pracovník formovania nemá vplyv na množstvo vyrobených nezhodných kusov môžeme na danej hladine významnosti zamietnuť.

### Pracovník odlievania

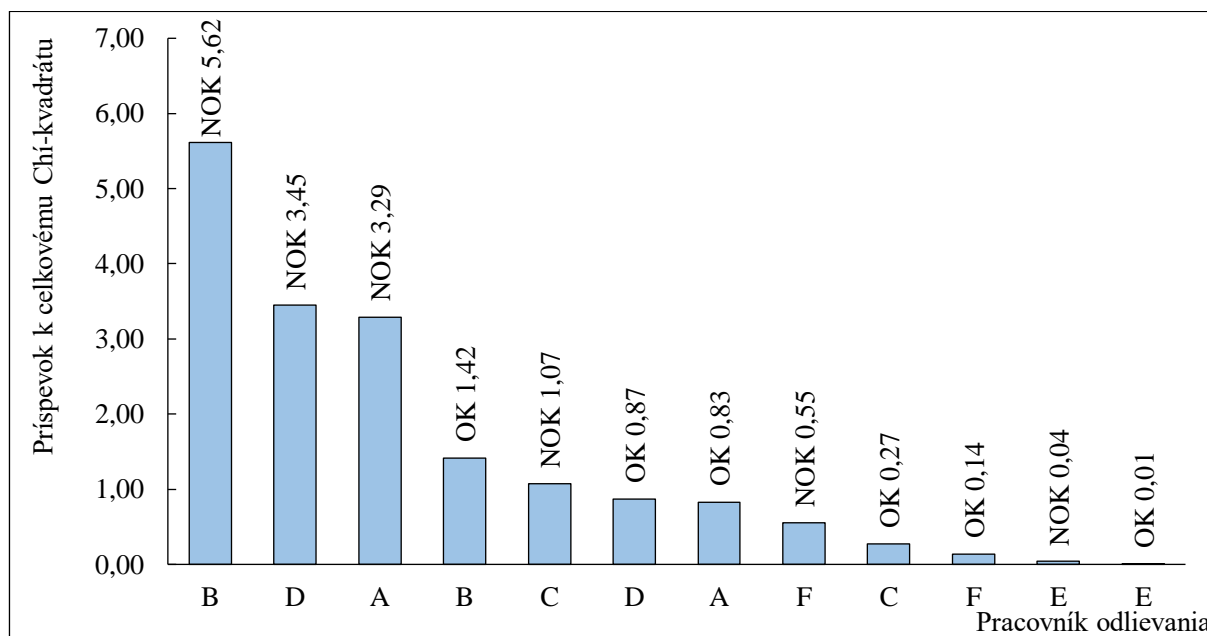
V tejto kapitole štatisticky preskúmame vplyv ľudského faktora na proces odlievania. Samotný proces odlievania je automatizovaný, avšak závisí na skúsenostiach a schopnostiach daného jedinca, ako zareaguje pri výskyte problému počas procesu, a vo finále či v danej sérii kusov vyrobíme nezhodný kus alebo nie.

Tabuľka 4.5 uvádza výsledky Chí-kvadrát testu posudzujúceho závislosť vzniku nezhodných kusov na človeku, ktorý kus odlieval:

Výsledok	Pozícia Informácia	A	B	C	D	E	F	Suma
NOK	Počet skutočný	12	57	126	17	35	7	254
	Počet teoretický	20,14	41,70	138,18	10,88	33,84	9,27	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	3,29	5,62	1,07	3,45	0,04	0,55	
OK	Počet skutočný	88	150	560	37	133	39	1007
	Počet teoretický	79,86	165,30	547,82	43,12	134,16	36,73	
	Príspevok k Chí-kvadrátu	0,83	1,42	0,27	0,87	0,01	0,14	
Suma		100	207	686	54	168	46	1261

Tabuľka 4.5: Chí-kvadrát test vzniku nezhodného kusu vzhľadom k pracovníkovi odlievania

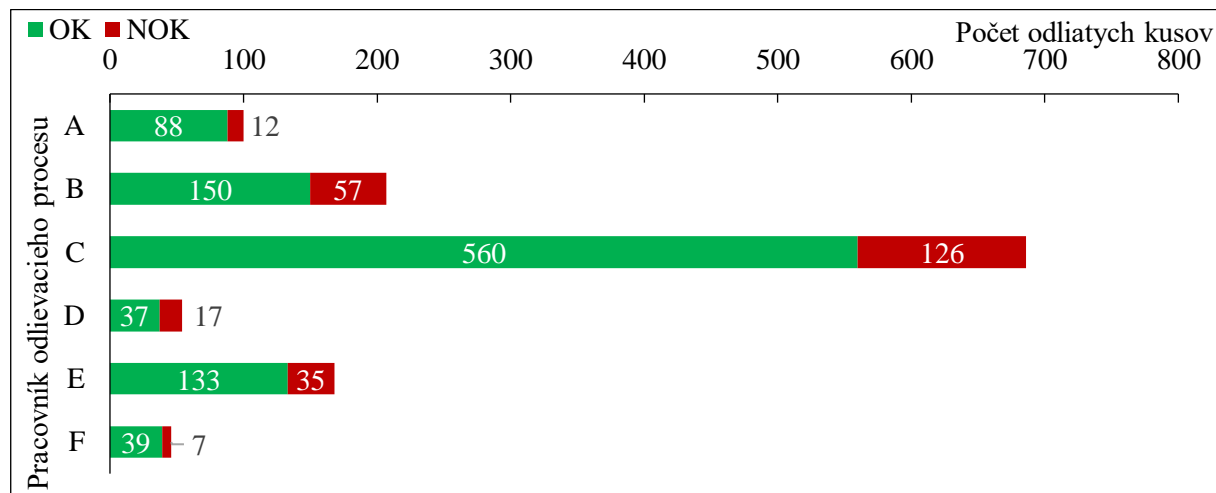
Obdobne, ako v predchádzajúcich dvoch testoch dobre zhody, sa pozrieme na graf 4.13, ktorý reprezentuje príspevok k celkovej hodnote  $\chi^2$  od jednotlivých pracovníkov odlievania:



Graf 4.13: Príspevok od jednotlivých pracovníkov odlievania k hodnote Chí-kvadrátu

Prepojením dát z tabuľky 4.5 a grafu 4.13 zistíme, že najhoršie sa darí i v procese odlievania pracovníkovi B. Dosiahol teda najväčší rozdiel medzi počtom nezhodných kusov, ktoré Chí-kvadrát test očakával a počtom, ktorý skutočne vyrobil, pričom táto bilancia bola v jeho neprospech, čo znamená, že vyrobil viac nezhodných kusov, než sa očakávalo. Ďalej sú

zhoršené výsledky pracovníka označeného D, ktorý vyrobil relatívne vysoký podiel kusov nezhodných so špecifikáciou. Vysoký príspevok k hodnote  $\chi^2$  má aj pracovník A, ktorý však v skutočnosti vyrobil menej nezhodných kusov, než bolo očakávané. Pre doplnenie údajov pridávame ešte graf 4.14, ktorý bilancuje všetky vyrobené kusy vo vzorke podľa pracovníkov odlievania s rozlíšením zhody a nezhody kusu:



Graf 4.14: Celkový počet vyrobených kusov podľa pracovníka a zhody

Na záver uvedieme hodnotenie samotného testu: celková hodnota podľa Pearsona je  $\chi^2 = 17,56$ ; s vypočítanou p-hodnotou 0,004. Nulovú hypotézu  $H_0$ , tvrdiacu, že pracovník, ktorý kus odlieva nemá vplyv na výslednú kvalitu finálneho produktu zamietame na danej hladine významnosti. Preukázali sme, že celkový výsledok, teda to či produkt spĺňa požiadavky alebo nie, závisí aj od konkrétneho pracovníka, ktorý do procesu prirodzene vnáša určitú mieru variability.

Na záver kapitoly je v tabuľke 4.6 uvedený sumár kategorických premenných, spoločne s nulovou hypotézou, ktorá bola testovaná a výsledkom podľa testu dobrej zhody:

Kategorická premenná	Nulová hypotéza $H_0$	Výsledok
Pozícia pri odlievaní	Pozícia pri odlievaní nemá vplyv na kvalitu výsledku	Zamietnuté
Forma pri odlievaní	Použitá forma pri odlievaní nemá vplyv na kvalitu výsledku	Zamietnuté
Pracovník montáže a formovania	Pracovník montáže aktívnych častí a ich formovania nemá vplyv na kvalitu výsledku	Zamietnuté
Pracovník odlievania	Pracovník odlievania nemá vplyv na kvalitu výsledku	Zamietnuté

Tabuľka 4.6: Sumarizácia výsledkov testu dobrej zhody u kategorických premenných

### 4.2.3 Vada 1 – čiastočné výboje

Nasledujúce dve kapitoly sa venujú konkrétnemu vplyvu veličín a parametrov na vznik dvoch najčastejšie sa vyskytujúcich väd, podľa Paretovej analýzy (kap. 2.4).

Vyhotovenie analýzy je uskutočnené pomocou programu Minitab. Základným nástrojom pre vykonanie analýzy a odhalenie kľúčových faktorov, ktoré majú za následok vznik nezhodných kusov je model procesu vytvorený pomocou binárnej logistickej regresnej analýzy (kap. 2.3.3). Binárna logistická regresia je najvhodnejšou voľbou z dôvodu, že

odpoveď v podobe výsledku výstupnej skúšky nie je kvantifikovaná číslom, ktoré by odpovedalo ako veľmi sme cieľ splnili respektíve nesplnili, ale je definovaná binárnou logikou, kde 0 znamená nezhodný kus a 1 zhodný kus.

#### Model č. 1 – Čiastočné výboje neočistený

Cieľom prvého modelu bolo pokryť a zahrnúť do výpočtu čo najväčšie množstvo veličín a parametrov. Prvý model bol realizovaný na hladine významnosti  $\alpha = 0,15$ . Tento model vysvetľuje väčšie množstvo variability výstupnej premennej, teda kvality daného produktu (v modeli označená Deviance R-sq). Takisto plocha pod takzvanou ROC (Receiver Operating Characteristic) krivkou je väčšia. Voľne povedané, ROC krivka reprezentuje presnosť daného modelu, respektíve popisuje, ako je model schopný predpovedať správny výsledok. ROC krivka je graf, ktorý znázorňuje na osi y charakteristiku „True positive rate“ a na osi x „False positive rate,“ pričom ten je ekvivalentom chyby I. druhu. Tieto dve charakteristiky reprezentujú pravdepodobnosti, s akými model správne určí zhodu alebo nezhodu konkrétneho kusu so špecifikáciou. Všeobecne môžeme povedať, že miera chybného zaradenia kusu medzi zhodné je vzdialenosť medzi krivkou a ľavým horným okrajom grafu (súradnice [0,1]) [12].

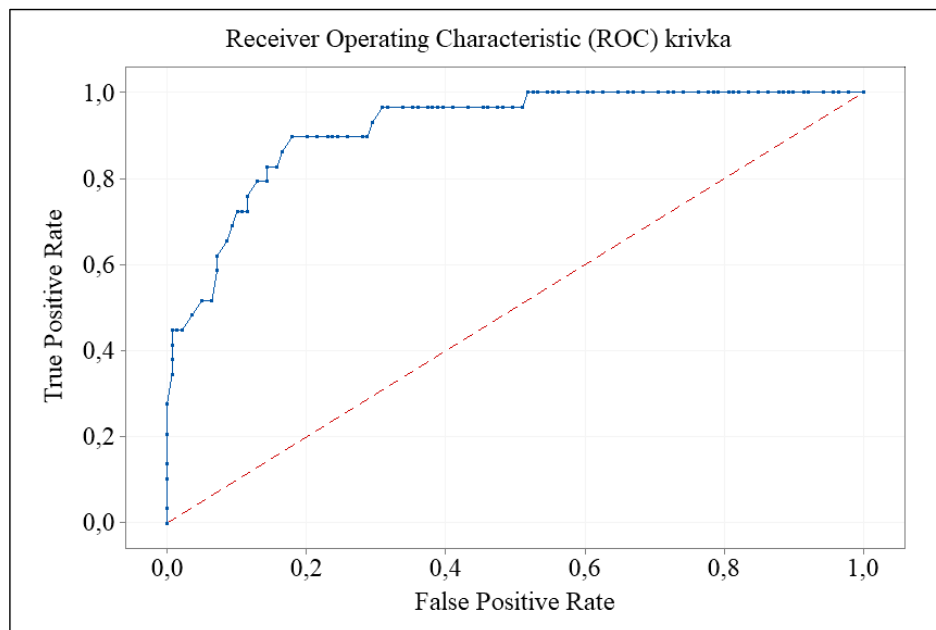
Neočistený model má však jednu zásadnú nevýhodu – vstupné premenné majú nízku štatistickú významnosť a tým pádom je model náchyľnejší k prikladaniu váhy vstupným premenným, ktoré v skutočnom výrobnom procese vplyv na kvalitu výsledku nemajú.

V úvode sa budeme zaoberať neočisteným modelom vypracovaným na najzávažnejšiu vadu – čiastočné výboje. Základné charakteristiky neočisteného modelu čiastočných výbojov môžeme vidieť v tabuľke 4.7:

Charakteristika Minitab	Charakteristika význam	Hodnota
$\alpha$	Hladina významnosti	0,15
Deviance R-Sq	Odchýlka $R^2$	44,44%
Area Under ROC curve	Plocha pod ROC krivkou	0,92

Tabuľka 4.7: Základné charakteristiky neočisteného modelu

Hladina významnosti  $\alpha$  odpovedá popisu v kapitole 2.1, pričom v modeli je nastaviteľná. Na danej hladine významnosti  $\alpha = 0,15$  sa v modeli prejaví síce veľké množstvo parametrov, mnoho z nich je však štatisticky nevýznamných. Premenné, spolu s ich p-hodnotou, koeficientom šance a 95% intervalom spoľahlivosti môžeme vidieť nižšie v tabuľke 4.8. Ďalej je uvedená odchýlka  $R^2$ , ktorá v danom prípade činí 44,44%, čo znamená, že model dokáže vysvetliť takmer polovicu vzniknutých nezhodných kusov. Opäť je dôležité podotknúť, že iba s redukovanou mierou štatistickej významnosti. Plocha pod ROC krivkou je 0,92; čo všeobecne naznačuje, že model je pomerne schopný správne vypočítať či kus bude zhodný alebo nezhodný so špecifikáciou. To je testované na vstupných dátach a porovnané so skutočným výsledkom výstupnej skúšky. Ako vyplýva z grafu 4.15, na ktorom môžeme vidieť ROC krivku daného modelu, maximálna hodnota plochy pod krivkou je rovná 1. Tú by sme dosiahli v prípade, ak by sme v modeli použili všetky premenné, ktoré majú vplyv na výsledok.



Graf 4.15: ROC krivka neočisteného modelu - Čiastočné výboje

Jedným z kľúčových výstupov konkrétneho modelu sú premenné, na základe ktorých dokážeme štatistickým modelom predpovedať, či bude daný kus nezhodný:

Premenná	Značka	Regresný koeficient	P-hodnota	Koeficient šance	95% CI Koeficientu šance
Priemerná vlhkosť formovanie	$\bar{H}_f$	-811	0,000	0,00	(0,00; 0,00)
Minimálna vlhkosť formovanie	$H_{f\ min}$	781	0,001	*	(1,38E+145; *)
Priemerná teplota ohrev	$\bar{t}_O$	-0,1376	0,000	0,87	(0,81; 0,93)
Smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievání	$\sigma t_{SC}$	8,29	0,011	3975,86	(6,67; 2,37E+06)
Priemerná teplota hmoty pri odlievání	$\bar{t}_{EC}$	-7,53	0,029	0,00	(0,00; 0,46)
Pozícia pumpy end/start	$P_Z$	0,0277	0,018	1,03	(1,01; 1,05)
Čas dotvrdenia	$T_P$	0,3393	0,001	1,40	(1,16; 1,70)
Priemerná teplota dotvrdenia	$\bar{t}_P$	3,587	0,000	36,14	(6,28; 208,00)
Smerodajná odchýlka teploty dotvrdenia	$\sigma t_P$	7,48	0,000	1764,82	(27,74; 112289,60)
Minimálna teplota dotvrdenia	$t_{P\ min}$	0,310	0,004	1,36	(1,11; 1,68)
Minimálna teplota okolia dotvrdenie	$t_{SP\ min}$	1,248	0,116	3,48	(0,73; 16,53)

Tabuľka 4.8: Premenné, ktoré majú podľa neočisteného modelu vplyv na vznik vady ČV

Regresný koeficient je číslo, ktoré násobí hodnotu danej veličiny v regresnej rovnici, p-hodnota je štatistická významnosť premennej v modeli (posudzujeme ju porovnaním s hladinou významnosti  $\alpha$ , model však nevýznamné premenné odfiltruje), koeficient šance porovnáva o akú hodnotu sa zvýši šanca toho, že skúmaný jav nastane pri zvýšení hodnoty sledovanej premennej o jednotku a 95% interval spoľahlivosti ukazuje, aký je minimálny nárast šance pri zvýšení hodnoty premennej o jednotku a aký je maximálny nárast šance pri zvýšení hodnoty premennej o jednotku v modeli s 95% pravdepodobnosťou. Tu môžu nastať tri situácie:

1. Pokiaľ sú obe okrajové hodnoty intervalu menšie ako 1 znamená to, že šanca na výrobu nezhodného kusu klesne pri náraste hodnoty danej premennej
2. Pokiaľ sú obe okrajové hodnoty intervalu väčšie ako 1 znamená to, že šanca na výrobu nezhodného kusu rastie pri náraste hodnoty danej premennej
3. Pokiaľ je jedna okrajová hodnota intervalu menšia ako 1 a druhá hodnota väčšia ako 1, šanca na vznik nezhodného kusu s nárastom veličiny môže klesnúť aj rásť, čo pre nás znamená, že na danej úrovni detailu štatistického modelu nie je postačujúca informácia pre vyhodnotenie, či je premenná kľúčovým faktorom pri vzniku nezhodného kusu alebo nie

Program Minitab ako súčasť modelu vytvorí rovnicu, pomocou ktorej možné je možné po dosadení hodnôt všetkých premenných vypočítať pravdepodobnosť vzniku nezhodného kusu. Regresná rovnica 4.22 získaná z neočisteného modelu pre vadu čiastočné výboje vyzerá nasledovne:

$$Y' = -100 - 811 * \bar{H}_f + 781 * H_{f \min} - 0,1376 * \bar{t}_O + 8,29 * \sigma t_{SC} - 7,53 \\ * \bar{t}_{EC} + 0,0277 * P_Z + 0,3393 * T_P + 3,587 * \bar{t}_P + 7,48 * \sigma t_P \\ + 0,310 * t_{P \min} + 1,248 * t_{SP \min} \quad (4.22)$$

Po jej výpočte hodnotu  $Y'$  dosadzujeme do rovnice pre výpočet pravdepodobnosti, podľa rovnice v kapitole 2.3.3 číslo 2.14. Rovnica je uvedená pod číslom 4.23:

$$P(0) = \frac{\exp Y'}{1 + \exp Y'} \quad (4.23)$$

Poslednou úrovňou hodnotenia výsledkov modelu je logické vyvodenie, vyplývajúce z určitej úrovne poznania procesu, či je možné aby konkrétna premenná mala vplyv na vznik nezhodného kusu v danom prípade. Z tohto dôvodu môžeme dospieť k záveru, že sa v modeli nachádzajú premenné, ktoré nemajú žiadny dopad na kvalitu daného produktu a ich štatistická významnosť je na vysokej úrovni vďaka určitým náhodným vplyvom. Po ich odfiltrovaní dostaneme premenné, ktoré môžu byť podľa modelu na danej hladine významnosti kľúčovými faktormi ovplyvňujúcimi vznik nezhodných produktov v procese. Ako tieto premenné boli určené nasledujúce:

- Priemerná teplota ohrevu  $\bar{t}_O$
- Smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievaní  $\sigma t_{SC}$
- Čas dotvrdenia  $T_P$
- Priemerná teplota dotvrdenia  $\bar{t}_P$
- Smerodajná odchýlka teploty dotvrdenia  $\sigma t_P$
- Minimálna teplota dotvrdenia  $t_{P \min}$



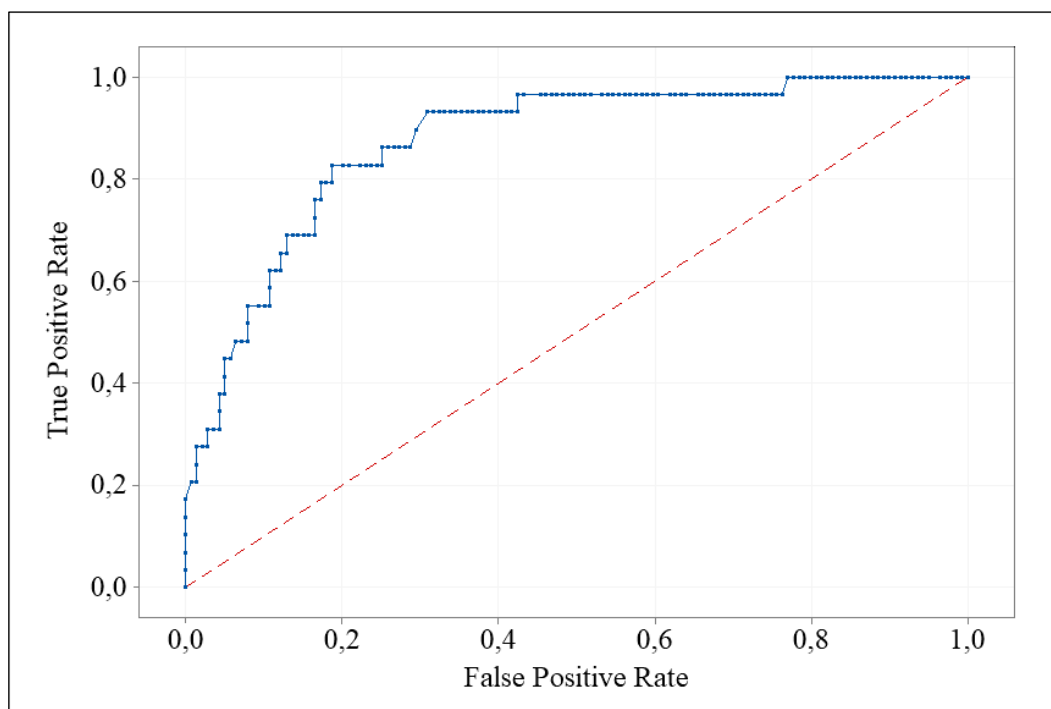
### Model č. 2 – Čiastočné výboje očistený

Ďalším vytvoreným štatistickým modelom pre vadu čiastočné výboje bol očistený model, čo znamená, že bola zmenená hladina významnosti modelu. Cieľom modelu je odfiltrovať premenné, ktoré sa objavili v štatisticky menej významnom modeli z dôvodu náhodných vplyvov, vďaka ktorým model nemusel vždy odhaliť správne vzorce pri vzniku nezhodných kusov. V tabuľke 4.9 už môžeme vidieť konkrétne parametre daného modelu:

Charakteristika Minitab	Charakteristika význam	Hodnota
$\alpha$	Hladina významnosti	0,05
Deviance R-Sq	Odchýlka $R^2$	31,00%
Area Under ROC curve	Plocha pod ROC krivkou	0,87

Tabuľka 4.9: Základné charakteristiky očisteného modelu – ČV

Nastavená hladina významnosti modelu sa zmenila z  $\alpha = 0,15$  na  $\alpha = 0,05$ . To malo za následok pokles veličiny „Deviance R-sq,“ čo v praxi znamená, že variabilita výstupnej veličiny vysvetlená modelom je 31%. Plocha pod ROC krivkou je pri tomto modeli 0,87; teda model dokáže správne predpovedať výsledok výstupnej skúšky na základe dát sledovanej vzorky pomerne presne. ROC krivku očisteného modelu čiastočných výbojov môžeme vidieť v grafe 4.16:



Graf 4.16: ROC krivka očisteného modelu - Čiastočné výboje

Podobne, ako u predchádzajúceho neočisteného modelu, uvedieme veličiny, ktoré figurujú v očistenej verzii ako štatisticky významné v tabuľke 4.10, spolu s ich označením, koeficientmi v príslušnej regresnej funkcii, p-hodnotou, koeficientom šance a 95% intervalom spoľahlivosti:

Premenná	Značka	Regresný koeficient	P-hodnota	Koeficient šance	95% CI Koeficientu šance
Čas formovania	$T_f$	-0,0292	0,005	0,97	(0,95; 0,99)
Priemerná vlhkosť formovanie	$\bar{H}_f$	-22,27	0,004	0,00	(0,00; 0,00)
Priemerná teplota ohrev	$\bar{t}_O$	-0,0961	0,000	0,91	(0,86; 0,96)
Čas dotvrdenia	$T_P$	0,1324	0,000	1,14	(1,07; 1,22)
Smerodajná odchýlka teploty dotvrdenia	$\sigma t_P$	5,27	0,001	194,47	(8,32; 4545,76)
Maximálna teplota dotvrdenia	$t_{P \max}$	1,035	0,002	2,81	(1,44; 5,50)
Minimálna teplota dotvrdenia	$t_{P \min}$	0,1436	0,024	1,15	(1,02; 1,31)

Tabuľka 4.10: Premenné, ktoré majú podľa očisteného modelu vplyv na vznik vady ČV

V prípade očisteného modelu sa regresná rovnica 4.24, ktorá je potrebná pre výpočet pravdepodobnosti vzniku nezhodného kusu pri daných hodnotách jednotlivých premenných skrátala:

$$Y' = -147,9 - 0,0292 * T_f - 22,27 * \bar{H}_f - 0,0961 * \bar{t}_O + 0,1324 * T_P + 5,27 * \sigma t_P + 1,035 * t_{P \max} + 0,1436 * t_{P \min} \quad (4.24)$$

Po výpočte hodnoty  $Y'$  nasleduje dosadenie do rovnice 4.25 pre výpočet pravdepodobnosti vzniku nezhodného kusu pri skúmanej kombinácii vstupných premenných faktorov:

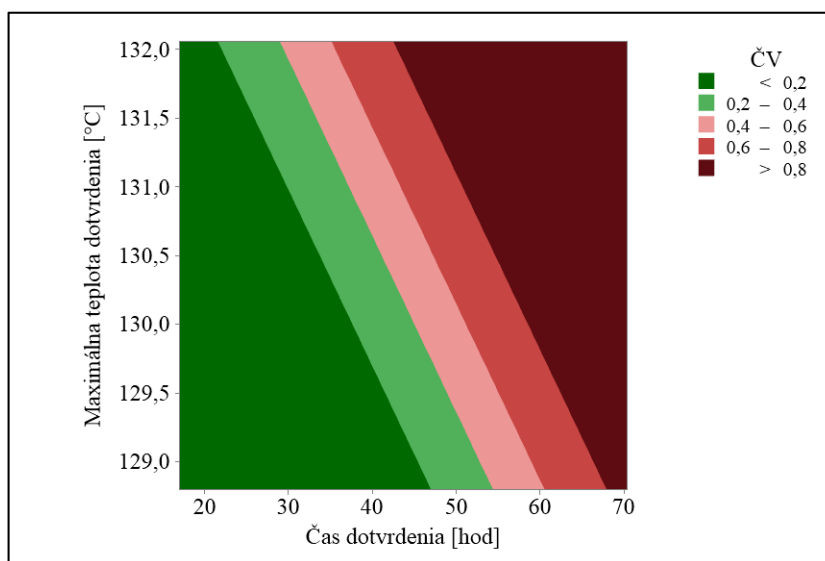
$$P(0) = \frac{\exp Y'}{1 + \exp Y'} \quad (4.25)$$

I napriek tomu, že tento štatistický model popisuje proces s danou vzorkou dát na intervale spoľahlivosti 95%, dostali sa do neho premenné, ktoré sme po prehodnotení odfiltrovali. Kľúčové faktory vzniku nezhodných kusov v prípade vady čiastočné výboje sú nasledujúce:

- Priemerná teplota ohrev  $\bar{t}_O$
- Čas dotvrdenia  $T_P$
- Smerodajná odchýlka teploty dotvrdenia  $\sigma t_P$
- Maximálna teplota dotvrdenia  $t_{P \max}$
- Minimálna teplota dotvrdenia  $t_{P \min}$

Z modelu vyplýva, že pre výslednú kvalitu produktu v oblasti testovania prítomnosti čiastočných výbojov, je kľúčovým procesný úsek vytvrdzovania produktu, kde použitý štatistický model našiel najsilnejšiu súvislosť medzi defektnými kusmi a sledovanými premennými. V nasledujúcej časti si uvedieme niekoľko grafov, ktoré popisujú vývoj pravdepodobnosti vzniku nezhodného kusu v súvislosti s hodnotami jednotlivých premenných majúcich vplyv na kvalitu výsledku.

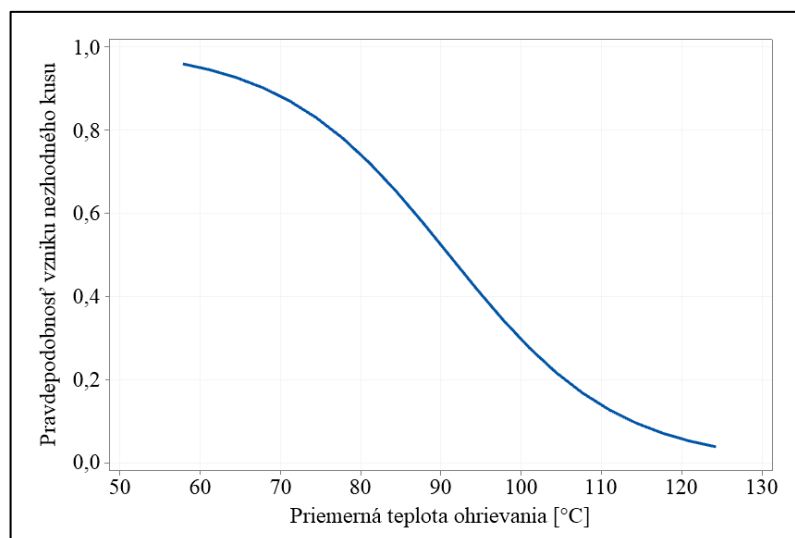
Akým smerom posúvať súčasné nastavenie procesného úseku dotvrdenia najlepšie odráža graf 4.17, na ktorom môžeme vidieť pravdepodobnosť vzniku nezhodného kusu pri rozličných kombináciách maximálnej teploty v dotvrdení a času trvania uvedeného procesného úseku:



Graf 4.17: Pravdepodobnosť vzniku NOK kusu na čiastočné výboje

Ostatné premenné, ktoré boli očisteným modelom vyhodnotené ako významné majú v celom priebehu grafu 4.17, konštantné hodnoty. Z grafu vyplýva, že kombinácia príliš vysokej teploty a dlhého času dotvrdenia vedie k rastu pravdepodobnosti vzniku kusu nezhodného so špecifikáciou. To odpovedá vypočítaným hodnotám v tabuľke 4.10, kde môžeme vidieť, že šanca na vznik nezhodného kusu rastie so zvyšujúcou sa maximálnou a minimálnou teplotou dotvrdenia, rovnako so smerodajnou odchýlkou teploty v dotvrdení a v neposlednom rade s dlhším trvaním procesného úseku dotvrdenia.

Ďalším procesným úsekom, ktorý má podľa modelu vytvoreného zo skúmanej vzorky dát vplyv na vznik nezhodných kusov je ohrievanie formy a funkčných častí. Ak chceme minimalizovať pravdepodobnosť vzniku nezhodného kusu v dôsledku daného procesného úseku, mali by sme držať priemernú teplotu ohrevu nad úrovňou 120°C, ako ukazuje graf 4.18:



Graf 4.18: Pravdepodobnosť vzniku NOK kusu v závislosti na teplote ohrievania

Vyššie uvedené informácie slúžia pre lepšie pochopenie toho, ako môžu jednotlivé veličiny a parametre ovplyvňovať pravdepodobnosť vzniku nezhodných kusov v oblasti čiastočných výbojov.

#### 4.2.4 Vada 2 – vizuálne vady

Vizuálne vady výrobku boli nasledujúcim defektom podrobeným dôslednejšej analýze, nakoľko podľa Paretovej analýzy (kapitola 2.4, graf 2.1) vyšli ako druhý najzávažnejší nedostatok výrobného procesu. Spracovanie analýzy odpovedalo postupu popísanému v kapitole 4.2.3. Opätovne ukázané budú špecifiká neočisteného i očisteného modelu a určené v oboch prípadoch faktory, ktoré sa na vzniku nezhodných kusov, podľa modelu a následne podľa logickej úvahy, podieľajú najviac v prípade konkrétnej vady výrobku.

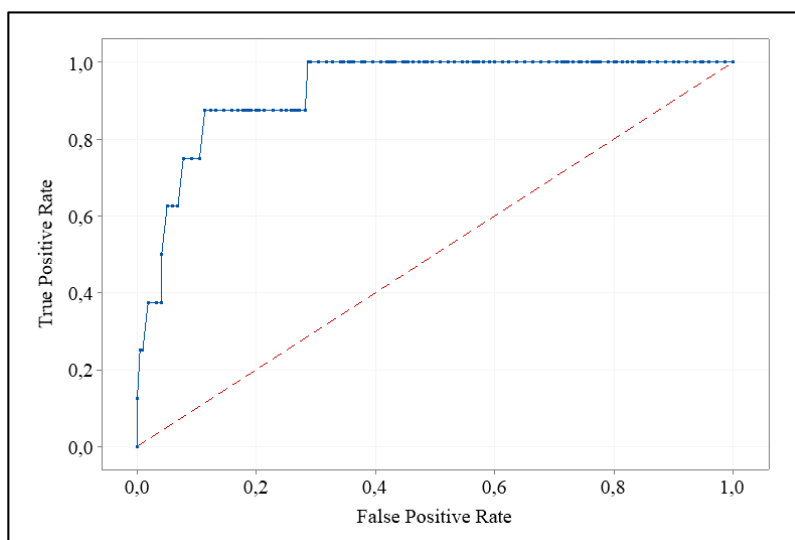
##### Model č. 3 – Vizuálne vady neočistený

Model číslo 3 je obdobou modelu číslo 1 spracovanou pre vizuálne vady. Jeho cieľom nie je presný popis pravdepodobnosti vzniku nezhodného kusu v tejto oblasti, ale vytipovanie faktorov, ktoré by sa mohli podieľať na nezhodách so špecifikáciou v procese. Tabuľka 4.11 uvádza základné parametre modelu:

Charakteristika Minitab	Charakteristika význam	Hodnota
$\alpha$	Hladina významnosti	0,15
Deviance R-Sq	Odchýlka $R^2$	38,71%
Area Under ROC curve	Plocha pod ROC krivkou	0,929

Tabuľka 4.11. Základné charakteristiky neočisteného modelu - vizuálne vady

Z charakteristík modelu opätovne vyplýva nižšia štatistická významnosť. Odchýlka  $R^2$  vyjadrujúca mieru vysvetlenia variability výstupného atribútu, v podobe informácie o zhode alebo nezhode so špecifikáciou, je 38,71 %, čo je menej než v prípade neočisteného modelu čiastočných výbojov. Tento fakt môže nastávať z dôvodu, že vzorka použitá pre odhalenie kľúčových faktorov spôsobujúcich vizuálne vady je mierne väčšia oproti vzorke pre čiastočné výboje. Plocha pod ROC krivkou popisujúca schopnosť modelu odhadnúť správne výsledok na tréningových dátach zo vzorky je však vysoká. Samotnú ROC krivku pre neočistený model vizuálnych vád môžeme vidieť v grafe 4.19:



Graf 4.19: ROC krivka neočisteného modelu - Vizuálne vady

Ďalej uvedieme tabuľku 4.12, ktorá zobrazuje premenné, ktoré boli modelom vyhodnotenú ako významné, s rovnakými charakteristikami ako v predchádzajúcich prípadoch:

Premenná	Značka	Regresný koeficient	P-hodnota	Koeficient šance	95% CI Koeficientu šance
Minimálna teplota formovanie	$t_{f \min}$	1,415	0,016	4,12	(1,30; 13,02)
Čas ohrevu	$T_o$	0,0952	0,001	1,10	(1,04; 1,16)
Smerodajná odchýlka teploty okolia pri odlievání	$\sigma t_{SC}$	9,76	0,008	17320,62	(13,39; 2,24E+07)
Tlak/Rýchlosť	P:V	-3,09	0,016	0,05	(0,00; 0,57)
Maximálna teplota dotvrdenia	$t_{P \max}$	1,088	0,176	2,97	(0,61; 14,36)

Tabuľka 4.12: Premenné, ktoré majú podľa neočisteného modelu vplyv na vznik VV

Regresná rovnica neočisteného modelu pre vizuálne vady 4.26 má nasledovný tvar:

$$Y' = -181 + 1,415 * t_{f \min} + 0,0952 * T_o + 9,76 * \sigma t_{SC} - 3,09 * P:V + 1,088 * t_{P \max} \quad (4.26)$$

Rovnicu pre výpočet pravdepodobnosti vzniku nezhodného v prípade vizuálnej vady dostaneme dosadením rovnice 4.26 do rovnice 4.27:

$$P(0) = \frac{\exp Y'}{1 + \exp Y'} \quad (4.27)$$

Ak porovnáme rovnicu neočisteného modelu pre vizuálne vady 4.26 s rovnicou neočisteného modelu pre čiastočné výboje 4.22 všimneme si, že je značne kratšia. V kombinácii s porovnaním odchýlok  $R^2$ , kde je  $R^2$  menšie v prípade neočisteného modelu vizuálnych vád, môžeme dospieť k niekoľkým záverom:

1. Je to spôsobené väčším rozsahom vzorky pre vizuálne vady
2. V modeli je menej premenných štatisticky významne popisujúcich vznik vizuálnych vád

Po vyhodnotení dát z tabuľky 4.12 dostávame faktory podieľajúce sa na vzniku vizuálne nezhodných kusov podľa neočisteného modelu:

- Čas ohrevu  $T_o$
- Smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievání  $\sigma t_{SC}$

Ostatné faktory v tomto prípade nemajú dôvod zohrávať úlohu podľa vytvoreného modelu.

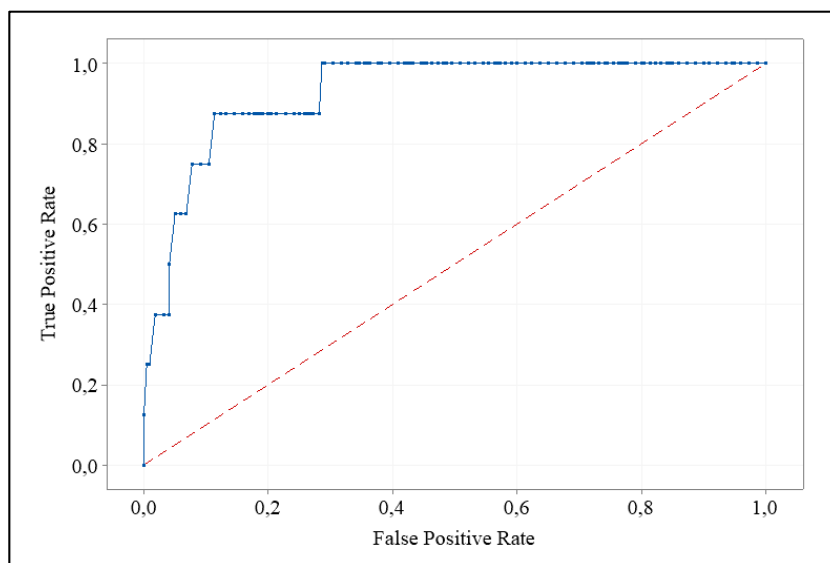
#### Model č 4 – Vizualne vady očistený

Posledným zo štvorice modelov je očistený model skúmajúci faktory ovplyvňujúce vznik vizuálnych vád. Oproti predchádzajúcemu modelu sa jedná o zmenu hladiny významnosti. Základné charakteristiky modelu číslo 4 nájdeme v tabuľke 4.13:

Charakteristika Minitab	Charakteristika význam	Hodnota
$\alpha$	Hladina významnosti	0,05
Deviance R-Sq	Odchýlka $R^2$	36,06 %
Area Under ROC curve	Plocha pod ROC krivkou	0,927

Tabuľka 4.13: Základné charakteristiky očisteného modelu - VV

Medzi neočisteným a očisteným modelom došlo k relatívne malej zmene odchýlky  $R^2$  a takmer nebadateľnej zmene plochy pod ROC krivkou. To nasvedčuje tomu, že hoci sa zmenila hladina významnosti, k výraznejším zmenám v modeli neprišlo. Model je podľa veľkosti plochy pod ROC krivkou schopný správne na vzorke dát určiť či dôjde u kusu k vzniku defektu alebo nie. ROC krivku môžeme vidieť vyobrazenú v grafe 4.20:



Graf 4.20: ROC krivka očisteného modelu - VV

V tabuľke 4.14 sú uvedené premenné, ktoré sú podľa očisteného modelu štatisticky významné, pričom rozdiel oproti predchádzajúcemu modelu spočíva len v odstránení jednej premennej, ktorá v konečnom dôsledku nebola považovaná za významnú ani pri neočistenom modeli z dôvodu okrajových bodov 95% intervalu spoľahlivosti pri koeficiente šance.

Premenná	Značka	Regressný koeficient	P-hodnota	Koeficient šance	95% CI Koeficientu šance
Minimálna teplota formovanie	$t_{f min}$	1,193	0,012	3,30	(1,17; 9,28)
Čas ohrevu	$T_o$	0,0795	0,024	1,08	(1,04; 1,13)
Smerodajná odchýlka teploty okolia pri odlievaní	$\sigma t_{sc}$	7,81	0,000	2471,66	(6,18; 988306,91)
Tlak/Rýchlosť	P:V	-3,06	0,011	0,05	(0,01; 0,48)

Tabuľka 4.14: Premenné, ktoré majú podľa očisteného modelu vplyv na vznik VV

Pre poskytnutie kompletných informácií o modeli ostáva ukázať regresnú rovnicu modelu  $Y'$  uvedenú pod číslom 4.28:

$$Y' = -33,1 + 1,193 * t_{f \min} + 0,0795 * T_o + 7,81 * \sigma t_{SC} - 3,06 * P:V \quad (4.28)$$

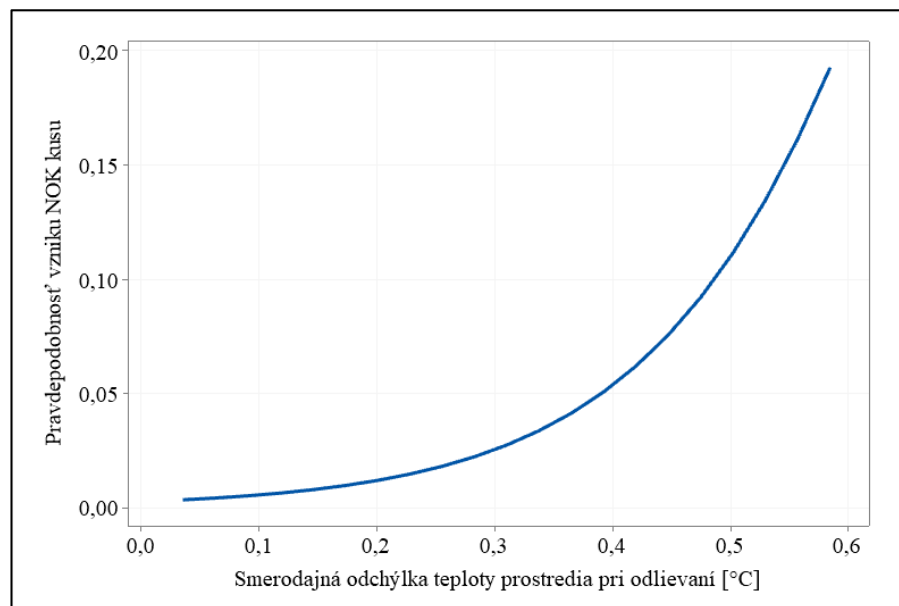
Pravdepodobnosť určíme obdobne ako vo všetkých predchádzajúcich prípadoch dosadením  $Y'$  do rovnice 4.29:

$$P(0) = \frac{\exp Y'}{1 + \exp Y'} \quad (4.29)$$

Premenné faktory s najvýznamnejším vplyvom na vznik nezhodných kusov v prípade vizuálnych väd ostávajú pri štatisticky významnom modeli číslo 4 rovnaké ako v modeli s nižšou hladinou štatistickej významnosti číslo 3:

- Čas ohrevu  $T_o$
- Smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievaní  $\sigma t_{SC}$

Za najdôležitejšiu procesnú premennú v prípade vizuálnych väd môže byť považovaná smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievaní, ktorú je v grafe 4.21 daná do súvislosti s pravdepodobnosťou vzniku nezhodného kusu:



Graf 4.21: Pravdepodobnosť vzniku NOK kusu v dôsledku vizuálnej vady v závislosti na  $\sigma t_{SC}$

### 4.3 Odporúčenia pre zvýšenie kvality výstupu procesu

Výstupom z diplomovej práce by mali byť odporúčenia pre organizáciu, ktoré by jej do budúcnosti mali umožniť znížiť podiel nezhodných kusov vo výrobe daného produktu. Možnosti zlepšenia môžeme rozdeliť do dvoch rovín:

1. Všeobecné zlepšenia a štandardizácia
2. Úpravy hodnôt procesných veličín a parametrov

Vyriešením nedostatkov procesu v dvoch uvedených rovinách, by organizácia mala dospieť k určitému zvýšeniu kvality výstupu výrobného procesu sledovaného produktu.

### 4.3.1 Všeobecné zlepšenia a štandardizácia

Táto časť práce sa zaoberá zlepšeniami, ktoré by mohli mať dopad na celkovú kvalitu výstupu, bez bližšieho rozdelenia pre konkrétne vady. Tento typ problémov vzniká v dôsledku variability kategorických premenných v procese popísaných v kapitole 4.2.2.

Za kategorické premenné v procese, ktorých vplyv na výsledok sa potvrdil sú považované nasledujúce:

1. Pozícia pri odlievaní
2. Forma použitá pri odlievaní
3. Pracovník montáže funkčných častí a formovania
4. Pracovník odlievania

Vplyv vymenovaných premenných bol potvrdený pri vo všetkých prípadoch testom dobrej zhody, kde tento test u uvažovanej vzorky údajov potvrdil súvislosť medzi danou premennou a variabilitou výsledku. V krátkosti sa pozrieme ako by bolo možné znížiť variabilitu výstupu vznikajúcu od jednotlivých kategorických premenných.

#### Pozícia pri odlievaní

Logické vysvetlenie, prečo môže mať pozícia pri odlievaní vplyv na kvalitu výstupu je nasledovné: keďže sústava odlievacie zariadenie a forma nie je odizolovaná od klimatických vplyvov prostredia, drobnou zmenou klímy (stačí otvorenie okna) môže prísť k situácii, kedy sa forma na určitej pozícii ochladí viac než ostatné, čím sa zmení priebeh procesu tuhnutia hmoty, čo môže ďalej viesť k výsledku nezhody so špecifikáciou.

Tento faktor je reprezentovaný aj premennou smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievaní, ktorú sme mohli vidieť ako štatisticky významnú pri vizuálnej vade, kde s rastom tohto parametru vzrastie pravdepodobnosť vzniku defektného kusu.

Vplyv pozície kusu pri odlievaní by bolo možné eliminovať lepším izolovaním sústavy odlievacie zariadenie – forma od okolitého prostredia. Tým by sa zabezpečilo odlievanie vo viac konštantných klimatických podmienkach.

#### Forma použitá pri odlievaní

Nasledujúca kategorická premenná – forma pri odlievaní – môže mať vplyv na kvalitu výsledku z dôvodu, že každá forma má v konkrétnom časovom úseku rozličný počet odlievacích cyklov od údržby ako aj vek.

Zníženie alebo eliminovanie vplyvu formy na výsledok, by mohlo byť dosiahnuté, ak by organizácia formy opravovala po určitých definovaných skupinách (skupina by bola opravená v rovnakom období), ktoré by boli následne používané spoločne v čo najväčšom možnom počte odlievacích cyklov. Hoci stále by mohol určitú mieru variability spôsobovať rozličný vek foriem, predpokladáme, že by mohlo prísť k zlepšeniu kvality výstupu.

Pri kategorickej premennej forma sa jedná skôr o štandardizáciu procesu údržby a nákupu nových foriem v budúcnosti.

#### Pracovník montáže funkčných častí a formovania/ odlievania

Posledné dve kategórie sú zlúčené do jedného odporúčenia. Pracovník je človek, ktorý môže mať na kvalitu výsledku rozhodujúci dopad, pretože pokiaľ vykonáva určité úkony chybné, alebo v nesúlade s aktuálnym technologickým postupom, môže to mať za následok vnášanie variability do procesu v oblasti kvality výstupu. Pri procese odlievania môže mať pracovník vplyv na výsledok v podobe jeho reakcie na určité vzniknuté problémy a situácie pri odlievaní.



Ako je ukázané v kapitole 4.2.2, kvalita práce jedného konkrétneho pracovníka je na nižšej úrovni oproti ostatným.

Výstupom by malo byť dôkladné zosúladienie technologického potupu u všetkých pracovníkov s dôslednou kontrolou dodržiavania týchto postupov, čím by bolo možné zmenšiť dopad ľudského faktoru na kvalitu. Pri odlievaní by sa malo dbať na štandardizáciu reakcií pracovníkov na určité typové situácie, ktoré vzniknú v samotnom procese odlievania.

### 4.3.2 Úpravy hodnôt procesných veličín a parametrov

Druhá časť odporučené sa venuje konkrétnym úpravám samotných procesných veličín a parametrov. V predchádzajúcich kapitolách bolo ukázaných niekoľko procesných premenných, ktoré majú väčší či menší, no štatisticky významný vplyv na kvalitu výsledku v sledovanej vzorke. Tieto procesné premenné môžu byť rozdelené podľa väd, na ktoré majú vplyv, i keď je možné skonštatovať, že sa v niektorých miestach procesné parametre u oboch väd pravdepodobne v skutočnosti prekrývajú.

#### Čiastočné výboje:

V prípade čiastočných výbojov vyšiel ako kľúčový úsek proces dotvrdenia produktu. Na základe zistených skutočností môžeme konštatovať, že v prípade výroby konkrétneho produktu je potrebné zabezpečiť, aby sa výrobok nachádzal v tvrdiacej peci určitý limitovaný čas. V súčasnosti sa kusy odliate ako posledné vo štvrtok a kusy odliate v piatok nechávajú v peci celý víkend, čo pravdepodobne v určitej miere vedie k následne k vzniku čiastočných výbojov. Tento argument je podporený aj vývojom podielu nezhodných kusov v priebehu dní v týždni, ktorý môžeme vidieť v grafe číslo 2.4, naprieč skúmanou vzorkou dát.

Ďalšími významnými procesnými premennými sú teplota obidvoch pecí, teda ohrevu a dotvrdenia. Pri ohrievacej peci je potrebné udržiavať priemernú teplotu počas procesu ohrevu nad 120 °C, inak pravdepodobne nedochádza k požadovanému prehriatiu funkčných častí. U teploty dotvrdenia skôr vybraná vzorka nasvedčuje tomu, že teplota môže byť pri dlhých pobytoch v dotvrdení problematická pretože je vysoká. Pokiaľ ale bude zastabilizovaný čas pobytu jednotlivých kusov v peci, bez toho aby dochádzalo k výskytu extrémov v prípade víkendov, môže sa teplota ukázať ako správne nastavená.

Vadu čiastočné výboje by však bolo vhodné podrobiť ďalšiemu štatistickému spracovaniu s viacerými a rozsiahlejšími vzorkami údajov.

#### Vizuálne vady:

V prípade vizuálnych väd sa ako štatisticky významné ukázalo menšie množstvo veličín ako pri čiastočných výbojoch. Podľa očisteného modelu na hladine významnosti  $\alpha = 0,05$  a po logickom odfiltrovaní niektorých premenných sa ukázala ako najvýznamnejšia smerodajná odchýlka teploty okolia pri odlievaní, čo v podstate smeruje k podobnému záveru ako posudzovanie pozície pri odlievaní.

Ďalším je potom čas ohrevu, ktorý však nemá prečo v danom kontexte mať prečo vplyv na rast podielu nezhodných kusov, pretože pri danej teplote sa forma s funkčnými časťami neprehreje viac než je nastavená teplota za dlhší čas. Čas ohrevu však ukazuje, akoby dlhší pobyt formy v ohrievacej peci mal negatívny dopad na kvalitu procesu.



## 5 ZÁVER

Hlavnou témou a cieľom predloženej diplomovej práce je odhalenie faktorov, ktoré majú vplyv na zvýšený podiel kusov nezhodných so špecifikáciou produktu za použitia vybraných štatistických nástrojov.

Celkovo mala práca viacero rozmerov. Prvý spočíval v teoretickom opise určitých štatistických metód a vytvorení povedomia o nich pre nezainteresovaného čitateľa. Po opise štatistických metód nasledoval popis samotného procesu a defektov, ktoré v ňom vznikajú. Dôležitou, a čo sa času týka, najnáročnejšou časťou záverečnej práce bolo meranie, zber a príprava samotných dát. Potrebné údaje sú rozmiestnené v mnohých zdrojoch, pričom pre vytvorenie vzorky dát je potrebná agregácia všetkých týchto dátových zdrojov do jednej tabuľky. Po vytvorení vzorky dát nasledovala štatistická analýza jednotlivých dát, ktorá mala niekoľko častí. V úvode sme sa venovali faktorom nezhody kusov podľa určitých premenných, ktoré považujeme v práci za kategorické, ďalej to bola bližšia analýza údajov z nameranej vzorky pre dva najvýznamnejšie defekty produktu.

Opis štatistických nástrojov mal za cieľ teoreticky podložiť metódy použiteľné pre riadenie kvality procesu. V práci sa vyskytuje kombinácia viacerých nástrojov, pričom sme používali testovanie hypotéz, Paretovu analýzu, regulačné diagramy či regresnú analýzu. Popisom štatistických metód bol zároveň splnený prvý cieľ predkladanej záverečnej práce.

Druhá časť práce popisuje samotný výrobný proces rozdelený do menších procesných úsekov, a zároveň bližšie popisuje čitateľovi defekty, ktoré v procese vznikajú. V tejto časti sú rovnako prvýkrát vytipované premenné procesné veličiny a parametre, spolu s odôvodnením, prečo môžeme predpokladať ich vplyv na kvalitu výstupu z daného produkčného procesu. Popisujeme v nej jadro problému a pomenovávame faktory, ktoré by za vysokým podielom defektných kusov mohli stáť.

Nasleduje kľúčová časť práce, v ktorej je vysvetlený samotný postup pri zbere a agregovaní dát, na ktorom je potom vystavaná samotná analýza vzoriek dát. Tá je rozdelená na oblasť kategorických premenných faktorov, ktoré sa nezaoberajú priamo konkrétnou výrobnou vadou ale vplyvom určitého nastavenia procesu výroby na vznik zhody alebo nezhody so špecifikáciou. Druhou oblasťou je odhaľovanie pôsobenia jednotlivých faktorov na vznik dvoch väd – čiastočných výbojov a vizuálnych väd. Vymenované dve vady sú najčastejšími. Na základe binárnej logistickej regresnej analýzy sa nám podarilo odhaliť faktory, ktoré vysvetľujú určitú časť variability výstupnej kvality procesu. Táto časť napĺňa cieľ analyzovať problém do detailov a potvrdiť respektíve vyvrátiť vplyv vytipovaných veličín na kvalitu procesu.

Bolo ukázané, že najvýznamnejšími faktormi ovplyvňujúcimi samotný proces sú prevažne teplotné faktory. Rozličné výkyvy teploty alebo pôsobenie príliš vysokej / nízkej teploty v niektorých častiach procesu vedie takmer s určitosťou k vzniku nezhodného kusu. Celkovo, pre odstránenie určitej variability bude dobré izolovať klimaticky proces odlievania a bližšie sa zaoberať následným procesom dotvrdenia kusov po odlievaní. Súčasne by malo byť vykonané školenie zamestnancov výrobného úseku z dôvodu zvýšenia miery štandardizácie technologického postupu, ako aj reakcií na vzniknuté neštandardné situácie pri odlievaní produktu.

Posledná časť na základe výsledkov vykonanej analýzy navrhuje opatrenia, ktoré by mohli znížiť vysoký podiel nezhodných kusov v procese a vyhodnocuje výsledky analýzy ako takej.

Pre dotvorenie celkového obrazu je potrebné získané výsledky verifikovať samotnou organizáciou, čo znamená, že tá zapracuje návrhy, ktoré uzná za vhodné, do svojho výrobného procesu a následne odsleduje a vyhodnotí, či skutočne mali odhalené faktory na podiel nezhodných kusov vplyv. Naplnenie tohto cieľa práce nebolo možné z časových dôvodov, čo bolo spôsobené najmä vzniknutou epidemiologickou situáciou.

Záverom práce je nutné poznamenať, že špecifické čísla popisujúce podiel nezhodných kusov, či skalárne veľkosti procesných veličín i ďalšie neodpovedajú danému skutočnému výrobnému procesu, ale sú zámerne zmenené náhodným spôsobom. Rovnako, z dôvodu ochrany dôverných údajov organizácie, neuvádzam k textu práce prílohy v podobe vzorovej vzorky údajov a podobne.

## 6 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 4., přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 171 s.: tabulky, grafy. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [2] ARKES, Jeremy. *Regression Analysis: A Practical Introduction*. 1. Routledge, 2019. DOI: 10.4324/9781351011099. ISBN 9781138541405.
- [3] Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing. *Technometrics* [online]. Taylor & Francis, 2005, **47**(4), 525-526 [cit. 2020-03-21]. DOI: 10.1198/tech.2005.s334. ISSN 0040-1706. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1198/tech.2005.s334>
- [4] MCHUGH, Mary L. The chi-square test of independence. *Biochemia medica: Biochemia medica*, 2013, 23.2: 143-149.
- [5] MONTGOMERY, Douglas C. *Introduction to statistical quality control*. 6th ed. Hoboken: John Wiley, 2009, xvi, 759 s. : il. ISBN 0-4701-6992-3.
- [6] OAKLAND, John S. *Statistical Process Control*. 6th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-0-7506-6962-7.
- [7] MONTGOMERY, Douglas C. a George C. RUNGER. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3rd Edition. Hoboken: John Wiley, 2003. ISBN 0-471-20454-4.
- [8] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [9] AGRESTI, Alan. *Categorical Data Analysis*. 2nd edition. Hoboken: John Wiley, 2002. ISBN 0-471-36093-7.
- [10] SKLENÁK, Vilém. *Data, informace, znalosti a Internet*. V Praze: C.H. Beck, 2001, xvii, 507 s. : il. ; 24 cm. ISBN 80-7179-409-0.
- [11] STARNES, David S. a Josh. *The practice of statistics*. 6th edition. New York: W. H. Freeman and Company. ISBN ISBN 978-1-3191-2157-0
- [12] KRZANOWSKI, W. J a D. J HAND. *ROC curves for continuous data*. Boca Raton: CRC Press, 2009, xiv, 241 s. : il. ; 25 cm. ISBN 978-1-4398-0021-8.



## 7 ZOZNAM TABULIEK, GRAFOV A OBRÁZKOV

### 7.1 Zoznam tabuliek

Tabuľka 2.1: Správnosť výsledku pri testovaní hypotéz [1] .....	18
Tabuľka 2.2 Sumár dát o defektoch slúžiaci pre Paretovu analýzu .....	23
Tabuľka 3.1: Sledované premenné procesu vo Vetve I.....	30
Tabuľka 3.2 Sledované premenné vo Vetve II. ....	31
Tabuľka 3.3: Sledované premenné pri odlievaní produktu .....	33
Tabuľka 3.4: Premenné sledované pri spracovaní po odlievaní .....	33
Tabuľka 4.1: Dátové zdroje .....	39
Tabuľka 4.2: Chí-kvadrát test vzniku defektného výrobku vzhľadom k pozícii.....	47
Tabuľka 4.3: Chí-kvadrát test vzniku nezhodného kusu vzhľadom k forme .....	48
Tabuľka 4.4: Chí-kvadrát test vzniku nezhodného kusu vzhľadom k pracovníkovi formovania .....	50
Tabuľka 4.5: Chí-kvadrát test vzniku nezhodného kusu vzhľadom k pracovníkovi odlievania .....	52
Tabuľka 4.6: Základné charakteristiky neočisteného modelu .....	54
Tabuľka 4.7: Premenné, ktoré majú podľa neočisteného modelu vplyv na vznik vady ČV....	55
Tabuľka 4.8: Základné charakteristiky očisteného modelu – ČV.....	57
Tabuľka 4.9: Premenné, ktoré majú podľa očisteného modelu vplyv na vznik vady ČV.....	58
Tabuľka 4.10. Základné charakteristiky neočisteného modelu - vizuálne vady.....	60
Tabuľka 4.11: Premenné, ktoré majú podľa neočisteného modelu vplyv na vznik VV .....	61
Tabuľka 4.12: Základné charakteristiky očisteného modelu - VV .....	62
Tabuľka 4.13: Premenné, ktoré majú podľa očisteného modelu vplyv na vznik VV .....	62

### 7.2 Zoznam grafov

Graf 2.1 Pareto diagram pre frekvenciu jednotlivých defektov v procese .....	24
Graf 2.2: I-MR diagram priemernej teploty ohrievania pri kusoch v sledovanej vzorke.....	26
Graf 2.3: I-MR diagram priemernej teploty ohrievacej pece pri kusoch sledovanej vzorky očistený o body preukázanou príčinou .....	27
Graf 2.4 Vývoj podielu nezhodných kusov na čiastočné výboje podľa dňa v týždni .....	28
Graf 3.1: Podiel defektov na celkovom množstve nezhodných kusov v sledovanom období..	34
Graf 4.1: Porovnanie stavov z hľadiska množstva sledovaných veličín .....	39
Graf 4.2: Smerodajná odchýlka teploty prostredia pri odlievaní.....	43
Graf 4.3: Priemerná teploty v peci pri dotvrdení .....	43
Graf 4.4: Smerodajná odchýlka teploty v peci pri dotvrdení.....	44
Graf 4.5: P-diagram podielu nezhodných kusov v dôsledku čiastočných výbojov .....	45
Graf 4.6: P-diagram podielu nezhodných kusov v dôsledku čiastočných výbojov II.....	45
Graf 4.7: P-diagram podielu nezhodných kusov pri vizuálnych nedostatkoch .....	46
Graf 4.8: Podiel nezhodných kusov vzhľadom k zhodným podľa pozície pri odlievaní .....	48
Graf 4.9: Príspevok k Chí-kvadrátu od jednotlivých foriem s výsledkom výstupnej skúšky ..	49
Graf 4.10: Vyrobené kusy podľa formy a kvality .....	49
Graf 4.11. Príspevok k hodnote Chí-kvadrátu od jednotlivých pracovníkov formovania .....	51
Graf 4.12: Vyrobené kusy podľa pracovníka formovania a kvality výstupu .....	51

Graf 4.13: Príspevok od jednotlivých pracovníkov odlievania k hodnote Chí-kvadrátu .....	52
Graf 4.14: Celkový počet vyrobených kusov podľa pracovníka a zhody .....	53
Graf 4.15: ROC krivka neočisteného modelu - Čiastočné výboje .....	55
Graf 4.16: ROC krivka očisteného modelu - Čiastočné výboje.....	57
Graf 4.17: Pravdepodobnosť vzniku NOK kusu na čiastočné výboje.....	59
Graf 4.18: Pravdepodobnosť vzniku NOK kusu v závislosti na teplote ohrievania .....	59
Graf 4.19: ROC krivka neočisteného modelu - Vizualne vady .....	60
Graf 4.20: ROC krivka očisteného modelu - VV.....	62
Graf 4.21: Pravdepodobnosť vzniku NOK kusu v dôsledku vizualnej vady v závislosti na $\sigma tSC$ .....	63

### 7.3 Zoznam obrázkov

Obrázok 2.1: Vzájomný vzťah medzi $\alpha$ a $\beta$ [1] .....	19
Obrázok 3.1: Vizualna vada produktu.....	35
Obrázok 3.2: Ukážka porušenej celistvosti polymérovej hmoty v blízkosti funkčných častí produktu.....	35
Obrázok 4.1: Vyobrazenie vzťahu medzi dátami a informáciami [10].....	37