ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Uplatnění metodiky Design for Six Sigma při vývoji elektrotechnických produktů

Bc. Petr Slunčík **2013**

Jméno a příjmení:	**Petr SLUNČÍK**
Osobní číslo:	**E11N0037P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Uplatnění metodiky Design for Six Sigma při vývoji elektrotechnických produktů**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Popište základní zásady a principy metody DFFS.
2. Uveďte a popište techniky a nástroje používané v rámci metody Design for Six Sigma. Nástroje a techniky kriticky zhodnoťte.
3. Zpracujte případovou studii, kde využijete metodu Six Sigma pro návrh elektrotechnického výrobku.
4. Proveďte komparativní analýzu jednotlivých metodik DMAIC, DMADV a DFSS používaných v Six Sigma.

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy:	**30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Yang, K.: Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development. McGraw-Hill, 2003. 624 s. ISBN-13: 978-0071412087.**
2. **Brussee, W.: Statistics for Six Sigma Made Easy, McGraw-Hill; 1 edition, 2004. ISBN-13: 978-0071433853.**
3. **Kenneth, W., D.: The FMEA Pocket Handbook, DW Publishing Co. 2004. ISBN-13:978-0974722122.**

Vedoucí diplomové práce:	**Ing. Radek Soukup, Ph.D.** Katedra technologií a měření
Datum zadání diplomové práce:	**15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce:	**9. května 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá metodami pro řízení a optimalizaci kvality: Six Sigma a Design for Six Sigma. V práci jsou uvedeny rozdíly mezi jednotlivými metodami, dále jsou detailně popsány nejdůležitější nástroje včetně statistických. U statistických nástrojů je uveden postup výpočtů a analýza výsledků s kritickým zhodnocením. Druhá část diplomové práce se zabývá praktickým využitím metody Six Sigma. Z dat naměřených na vyvíjeném elektronickém výrobku jsou demonstrovány například metody ANOVA, DOE a další.

Klíčová slova

Six Sigma, Design for Six Sigma, DFSS, DMAIC, DMADV, ANOVA, FMEA, R&R, Paretův diagram, regulační diagram, hodnocení způsobilosti

Abstract

This diploma thesis is dealing with two similar methods for quality management: Six Sigma and Design for Six Sigma. They are described the main differences between this two methods as well as detailed description of the main statistical and fundamental tools. The process how to perform statistical analysis and tests are also shown in the first part of the thesis. The obtain results are critically evaluated. The second part of the thesis is focused on practical use of Six Sigma method. The data measured on newly developed electrical device are used for demonstration of statistical tools such as ANOVA, DOE.

Key words

Six Sigma, Design for Six Sigma, DFSS, DMAIC, DMADV, ANOVA, FMEA, R&R, Paret diagram, regulation diagram, process capability, process performance.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

Podpis

Plzni dne 9.5.2013 Petr Slunčík

(Nepovinná část)

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce. Ing. Radku Soukupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek 10

Úvod....11

1. Six Sigma....12

2. Techniky a nástroje DFSS 13

2.1. DMAIC 14

2.2. DMADV....16

3. Define – definuj....18

3.1. SIPOC 19

3.2. Mapa procesu 20

3.2.1. Diagram toku materiálu a diagramy pracovního toku 20

3.2.2. Mapa toku hodnoty - Value Stream Map....21

3.3. VOC - hlas zákazníka 21

3.4. KANO 22

3.5. Zhodnocení....23

4. Měření - Measure 24

4.1. Směrodatná odchylka....24

4.2. Hodnocení způsobilosti procesu 26

4.3. Analýza systému měření - MSA 28

4.4. R & R – Repeatability & Reproducibility....30

4.5. Regulační diagramy 33

4.6. Korelační diagramy....35

4.7. Histogram....35

4.8. Zhodnocení....37

5. Analyzuj 38

5.1. 5 proč....38

5.2. Paretova analýza 38

5.3. Diagram příčin a následků 40
5.4. Testování hypotéz 40
5.5. ANOVA 44
5.6. Zhodnocení 46
6. Improve – Zlepši 47
7. Control – Kontroluj 50
7.1. Poka-yoke 50
7.2. FMEA 50
7.8. Zhodnocení 52
8. Případová studie 53
8.1. Úvod do problematiky 53
8.1.1. Definice problému 55
8.1.2. DOE – Návrh experimentů 58
2.1.1. Výsledek experimentu 65
8.2. Analýza – výběr vhodné krycí vrstvy vlhkostního senzoru 66
9. Komparativní analýza DMAIC(Six Sigma) a DMADV (DFSS) 70
10. Závěr 76
Použitá literatura 78

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam	
	Anglicky	Česky
DPMO	Defect per Million Opportunities	Defekty na milion příležitostí
DFSS	Design for Six Sigma	Design pro Six Sigma
σ	standard deviation	Směrodatná odchylka
SIPOC	Supplier-Input-Process-Output-Customer	Dodavatel-vstup-proces-výstup-zákazník
VOC	Voice of Customer	Hlas zákazníka
R&R	Repeatability & Reproducibility	Opakovatelnost a Reprodukovatelnost
ANOVA	Analysis of Variance	Analýza rozptylu
DOE	Design of Experiments	Plánování experimentů
DMADV	Define-Measure-Analyze-Design-Verify	Definuj, změř, analyzuj, navrhni, ověř
DMAIC	Define-Measure-Analyze-Improve-Control	Definuj, změř, analyzuj, vylepši, kontroluj
SPC	Statistical Process Control	Statistické řízení procesu
CTQ	Critical to Quality	Hraniční mez kvality
FMEA	Failure Mode Analysis	Analýza možností vzniku vad
VSM	Value Stream Map	Mapa toku hodnot
CTP	Critical to Process	Kritický pro proces
USL	Upper specification limits	Horní specifický limit
LSL	lower specification limits	Spodní specifický limit
CL	Central Line	Centrální přímka
MSA	Measure System Analysis	Analýza systému měření
IDE	Interdigital Electrode	Interdigitální elektroda
RH	Relative Humidity	Relativní vlhkost
SS	Sum Square	Součet čtverců
PV	Product Variance	Variabilita dílu
TV	Total Variance	Celková variabilita
EV	Equipment Variation	Opakovatelnost měření
C_P,C_{PK}	Indicators of Competence	ukazatele způsobilosti

Úvod

Počátky metody Six Sigma nesahají do nijak hluboké historie. Řada nástrojů, které tato metoda využívá, byly známy a s úspěchem využívány již dlouhá léta před tím, než byla publikována první aplikace Six Sigma. V 70. letech minulého století přišli zástupci oddělení kvality americké firmy Morotola s uceleným konceptem řízení kvality. Již používané statistické postupy a jiné nástroje pro řízení kvality byly vloženy do logického rámce. Tento ucelený balík různých metod pokryl veškeré potřeby pro zlepšování, měření a řízení kvality v podniku. Měl ihned výrazný úspěch, který vedl k tomu, že stejnou techniku začaly využívat i další velké firmy, jako například Ford či Coca-Cola. To celé vyústilo v patentování této metody firmou Motorola, která vlastní autorská práva dodnes. Během více než 40ti let prošla i metoda Six Sigma svým vývojem. Díky rozmachu výpočetní techniky se rozšířilo i využívání statistických softwarů, a tak se metoda, která byla z počátku doménou velkých, často nadnárodních firem, posunula blíže i k menším podnikatelům, a to především díky nižším nákladům na zavedení. Tento fakt souvisí i se značnou popularizací, objevila se řada nových publikací, softwarů a vznikla i specifická certifikace pracovníků, podle jejich zkušeností a schopností.

V dnešní době je metoda Six Sigma již běžným prostředkem pro řízení kvality a podíváme-li se do středních až větších firem z odvětví elektrotechnického či automobilového průmyslu, je celkem jisté, že metodu Six sigma s úspěchem využívají. Pokud ne, pak se alespoň řídí filozofií počtu minimálních defektů na počet příležitostí, která je jedním ze základních stavebních kamenů této metody.

Tato diplomová práce se zabývá metodou Six Sigma a Designem pro Six Sigma, v první části jsou podrobně uvedeny techniky a nástroje využívané těmito metodami a v druhé části jsou demonstrovány vybrané nástroje na případové studii, týkající se výroby a chování vlhkostního senzoru.

1. Six Sigma

Six Sigma je strukturovaná metodologie, pevně založená na přesných datech, sloužící k eliminování defektů, ztrát či problémů v řízení jakosti ve všech směrech výroby, služeb nebo dalších obchodních aktivit. Metodologie Six Sigma je založena na kombinaci ustálených technik statistického řízení jakosti, jednoduchých i pokročilých metod statistické analýzy dat a systematického tréninku všech osob v organizaci, které se zabývají aktivitami a cíli určenými Six Sigma. [2]

Hlavní myšlenkou této metody je snížit hodnotu defektů na naprosté minimum, a to konkrétně pod hranici 4 defekty na jeden milion příležitostí k vadě (DPMO – Defekt Per Milion Opportunities). Při pohledu na křivku normálního (Gaussova) rozdělení to znamená vytěsnění chyb za spodní a horní limit, jenž je vzdálen 3 směrodatné odchylky od aritmetického průměru na každou stranu, celkem tedy šest směrodatných odchylek čili 6σ. Význam a definice směrodatné odchylky bude uveden v kapitole „měření“.

Metoda Six Sigma pohlíží na celou firmu jako na soubor jednotlivých dílčích procesů. Ať už se jedná například o samotnou výrobu, přijímání a vyřizování objednávek, reklamací či komunikaci mezi odděleními. Veškeré operace probíhající v podniku chápe jako procesy, ve kterých dochází k výskytu chyb. Tyto chyby mají poté za následek neefektivnost firmy jako komplexního celku. Neřeší jen nastalé problémy, kde díky implementaci propracovaných postupů pomáhá identifikovat kořenovou příčinu problému a odstranit ji. Důležitým faktorem je i to, že pomáhá předcházet problémům eliminací všech příčin, které by mohly problém způsobit.[7]

Design for Six Sigma - DFSS

Design pro Six Sigma znamená samotnou aplikaci principů metody 6σ do vývoje vlastních produktů, výroby a vedlejších procesů. Zatímco 6σ se podle definice zaměřuje na fázi výroby produktu, DFSS se více přiklání na výzkum, design a fáze vývoje produktu. DFSS kombinuje řadu nástrojů, které se používají ke zlepšení stávajících výrobků či služeb a naslouchá přáním zákazníka.

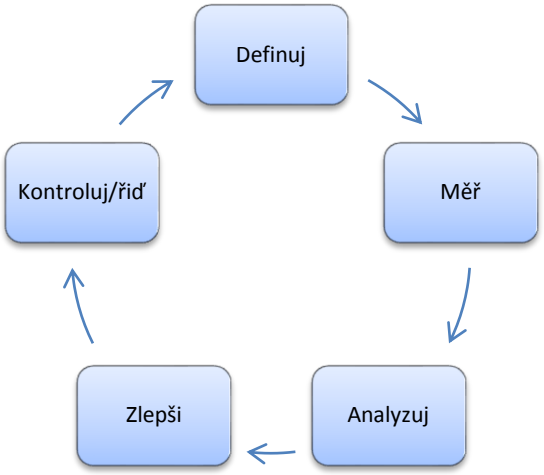
Je to přístup, který rozšiřuje koncept procesu zlepšování Six Sigma tak, že se snaží dát dohromady návrh nových výrobků a služeb, či re-design stávajících produktů spolu s pečlivým řešením podpůrných procesů, které dodávají tyto produkty a služby na trh. [3]

2. Techniky a nástroje DFSS

Chceme-li popsat techniky a nástroje pro metodu Design for Six Sigma, musíme se zcela nezbytně opřít o samotnou metodu Six Sigma, ze které vychází a se kterou má mnoho společného. Proto budou v diplomové práci uvedeny nástroje a techniky jak metody Six Sigma, tak nástroje pro DFSS, zaměřující se na ranou fázi vývoje, tedy design. Jak již bylo zmíněno, obě techniky jsou si v mnoha ohledech podobné, nikoli však stejné. Proto bude na závěr provedena srovnávací analýza, která umožní komplexnější pochopení všech rozdílů.

Metoda Six Sigma se řídí pevně daným logickým rámcem. Je to přísná struktura, ve které na sebe logicky navazuje pět po sobě jdoucích činností, podle nichž se tato struktura i jmenuje. Anglická zkratka **DMAIC** vyjadřuje:

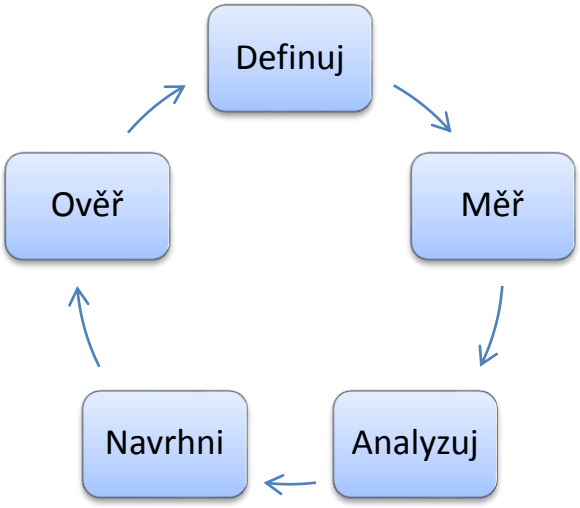
1. **D**efine – definuj
2. **M**easure – měř
3. **A**nalyse – analyzuj
4. **I**mprove – zlepši
5. **C**ontrol – řiď



Obrázek 1: DMAIC [1]

Zatím co Six Sigma využívá logického rámce DMAIC, Design pro Six Sigma (DFSS) má několik odlišností. Využívá několik různých konceptů, které jsou si v principu podobné, mezi nejrozšířenější patří **DMADV:**

6. **D**efine – definuj
7. **M**easure – měř
8. **A**nalyse – analyzuj
9. **D**esign – navrhni
10. **V**erify – ověř

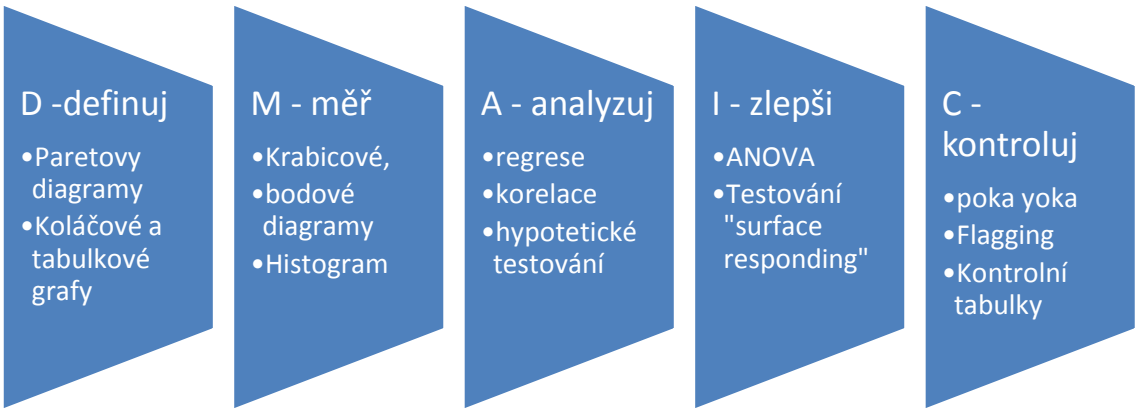


Obrázek 2: DMADV [1]

Metodika DMADV se v podniku zavádí v případě, pokud je zapotřebí formulovat nový proces, výrobek či službu. Lze ji také aplikovat na již zaběhnuté procesy, pokud si vyžadují rozsáhlé změny, při kterých by se proces zlepšování jevil jako neefektivní (re-design). Tyto metodiky se stejně jako proces DMAIC opírá o důkladné pochopení požadavků zákazníka. Rozdíl spočívá v tom, že metodika DMAIC zlepšuje to, co již existuje. Může se opřít o již známá data a s nimi nadále pracovat. Zato metodika DMADV musí vynaložit více úsilí pro získání potřebných relevantních informací, které jsou zapotřebí k pokrytí potřeb zákazníka. [6]

1. DMAIC

Na tomto obrázku je znázorněna posloupnost, jak na sebe navazují jednotlivé segmenty DMAIC a jaké se používají nástroje a techniky v této metodice.



Obrázek 3: DMAIC - nástroje [4]

Definovat

Tato fáze představuje jasné definování problému. Důležité je získat pomocí jednoduchých nástrojů porozumění toho, jak proces funguje. Stanovují se měřitelné cíle a hranice na základě našich znalostí zákaznických potřeb, obchodních cílů a procesu.

Základní nástroje: zakládací listina, SIPOC – anglická zkratka pro dodavatele (Supplier), vstupy (Inputs), proces (Process), výstupy (Outputs) a zákazníka (Customer), VOC – hlas zákazníka (Voice of Customer), procesní mapa, afinitní diagram. [24]

Měřit

Cílem této fáze je zjistit zdroj problému tak přesně, jak jen je to možné. To pomůže zúžit rozsah potenciálních příčin, které pak budou analyzovány v následující fázi. Důležitý je sběr dat. Veškerá data, získaná měřením, je nutné pro lepší přehlednost graficky zobrazovat.

Základní nástroje: R&R -studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, Paretův diagram, analýza způsobilosti procesů (Process Capability Analysis).

Analyzovat

V této fázi se dále rozvíjí a potvrzují teorie možných příčin a konečně se identifikuje pravá kořenová příčina problému.

Základní nástroje: Brainstorming, Ishikawa diagram (rybí kost), regulační grafy, testování hypotéz, T-test, F-test, ANOVA, regresní analýza, DOE – návrh experimentů (Design of Experiment). [24]

Zlepšit

Ve fázi „Improve“, tedy ve fázi „Zlepšení“, dochází k implementaci a zhodnocení řešení. Cílem je demonstrovat, že závěry vyřeší problém a povedou ke zlepšení.

Nástroje, které se v této fázi používájí, jsou v podstatě stejné jako výše uvedené nástroje z fáze „Analyzuj“.

Kontroluj

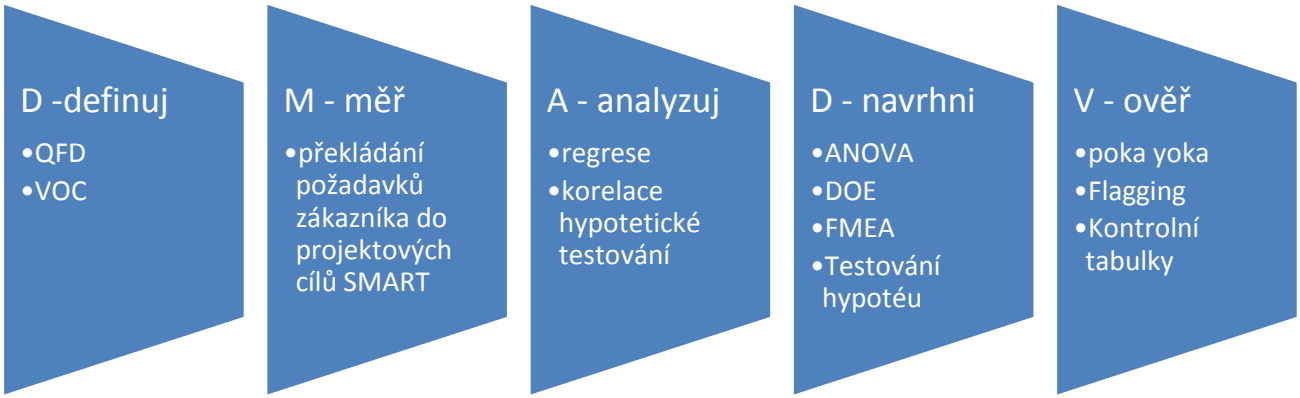
V průběhu předchozí fáze bylo prověřeno řešení a byla provedena příprava na plnou implementaci změn. Problém byl tak zafixován. Fáze „Kontroluj“, která je překládána jako fáze kontroluj, pomáhá ujistit, že problém byl vyřešen a že nová metoda může dále zlepšovat proces v čase. [7]

2. DMADV

DMADV je projektová metodologie, taktéž vystupující pod zkratkou DFSS – Design for Six Sigma. Výše byly popsány rozdíly mezi DMADV a DMAIC. Nyní bude uvedeno jaké postupy a nástroje používá tato metodologie. Jedná se opět o pět fází logicky na sebe navazujících, které používá při návrhu nových procesů a sestává z fází: [6]

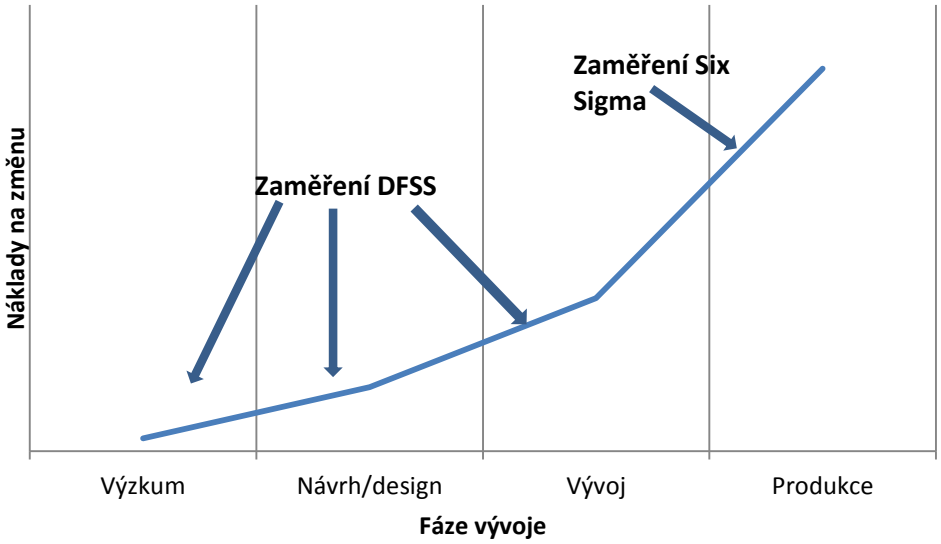
1. ***D**efine* - navržení cílů, které jsou v souladu s přáním zákazníka a firemní strategií.
2. ***M**easure* - měření a identifikování prioritních znaků CTQ (**C**ritical **T**o **Q**uality), dále měření provozních schopností, vloženého risku atd.
3. ***A**nalyze* - návrh a vývoj alternativ, návrh nejlepší koncepce, která nejlépe splňuje požadavky CTQ.
4. ***D**esign* - navrhnutí detailů, optimalizace návrhu a případná simulace
5. ***V**erify*- prověření návrhu, provedení zkušebního provozu, implementace procesu ajeho předání vlastníkovi [7]

DFSS – design for Six Sigma



Obrázek 4: Nástroje DMADV [7]

Hlavním smyslem metody DFSS je navrhnout již od začátku takový design, který bude vykazovat veškeré požadované kvality. Pozornost se stále častěji přesouvá ze zlepšování stávajících procesů a jiných entit v pozdní části životního cyklu na počáteční fázi vývoje. Jedná se tedy hlavně o prevenci oproti řešení již vzniklých problémů. Tento fakt je především motivován z hlediska ekonomického. Rozhodnutí, provedené v rané fázi vývoje, mají největší vliv na celkové výdaje a výslednou kvalitu systému. Vliv nákladů na zavedení metod na počátku či v průběhu fungování podniku zobrazuje Obr. 6.



Obrázek 5: Náklady na změnu v čase [25]

Stejně jako Six Sigma použitím metodologie DMAIC dosahuje požadované kvality, tak i DFSS má svoji ustanovenou metodologii. Zatímco logický rámec DMAIC je již zaběhnutý standardní rámec pro metodu Six Sigma, DFSS takové jednoznačné univerzální řešení nevlastní. Během posledních let se nejvíce osvědčily dvě metody a to IDOV – Identifikuj/**I**dentify, Navrhni/**D**esign, Optimalizuj/**O**ptimise, Ověř/**V**erify a nejpoužívanější

DMADV – **D**efinuj/Define, Měř/**M**easure, Analyzuj/**A**nalyze, Navrhni/Design, Ověř/**V**erify. První zmiňovaná se ovšem zaměřuje převážně na konečnou fázi optimalizace a může opominout důležité důsledky, plynoucí z řádného výběru správného produktu, který splňuje všechny zákazníkovy potřeby.[8]

Další rozdíly mezi Six Sigma a DFSS můžeme nalézt v jejich komplexnosti a celkové velikosti. Zavedení a úspěšné zvládnutí DFSS je obvykle mnohem časově i finančně náročnější. Jedná se o návrh nového produktu nebo služby, proto musí sledovat veškeré aspekty kritické pro kvalitu (CTQ), tudíž důležité pro zákazníka, zatímco Six Sigma sleduje jeden nebo dva aspekty, které jsou v daný moment kritické pro kvalitu.

DFSS může být nasazena všude tam, kde se připravuje vývoj nového produktu nebo služby. U velkých firem bývá vývoj nového produktu téměř každodenní prací, proto může implementace DFSS přinést značné zlepšení do procesu vývoje a implementace.

Metoda DFSS vychází z metody Six Sigma což znamená, že sdílí velkou část nástrojů s výjimkou takových, které využívají nasbíraná data z terénu. Hlavními nástroji, používanými výhradně DFSS, je QFD – Quality Function Deployment, FMEA – Failure Mode Effect Analysis, DOE – Design of Experiments a další simulační techniky. [8, 25]

V následující části budou uvedeny nástroje a techniky jak metody 6σ, tak DFSS. Ty jsou rozděleny do jednotlivých etap dle rámců DAIMC a DMDAV. Mnoho nástrojů je pro obě metody, až na drobné odlišnosti, stejných. Jiné se naopak více používají v jenom jedné ze dvou zmiňovaných metod. Na konci detailního popisu daného nástroje je vždy uvedeno, pro jakou metodu je nástroj určený, spolu se stručným zhodnocením.

Podrobnější rozdíly mezi metodami Six Sigma a DFSS jsou popsány v kapitole 8.

6. Define – definuj

Cílem prvního kroku je definovat rozsah a účel projektu. K tomu je nezbytné získat základní informace o procesu a jeho zákaznících. V tomto kroku se provádí mimo jiné i ekonomická analýza přínosů a nákladů a vytváří se tým Six Sigma. Absolvování první etapy dává jasné odpovědi na základní otázky, čím je tento projekt důležitý pro celý podnik a čeho se týká nebo jaké jsou očekávané přínosy. Stejně tak poskytuje ucelenou představu o časovém plánu, rozpočtu a naších zákaznících (externí, interní). [9]

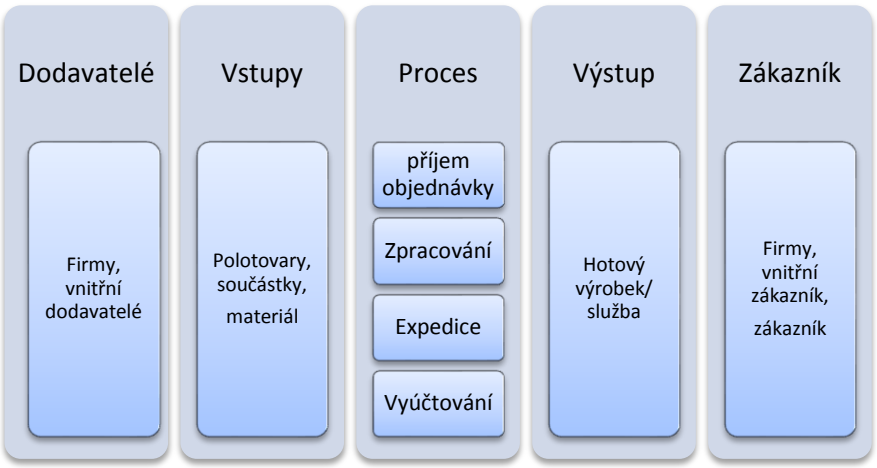
Na výstupu prvního kroku očekáváme následující výstupy:

1. Jasně daný cíl projektu včetně ekonomického zhodnocení a zdůvodnění.
2. Sestavený tým s jasně danými funkcemi.
3. Schéma zlepšovaného procesu (SIPOC, vývojový diagram).
4. Identifikace a označení vstupů a výstupů procesu.
5. Určení požadavků a očekávání od zákazníka.
6. Rozpočet. [9]

1. SIPOC

Na začátku každého počátku implementace Six Sigma je třeba si ujasnit hranice a samotný rozsah zlepšovaného procesu. SIPOC je druh diagramu, který pomáhá ověřit, zda vstupy do procesu odpovídají jeho výstupům, či zda služby splňují svá očekávání.

SIPOC je anglická zkratka *Suppliers Inputs Process Outputs Customer* popisující logický řetězec v podniku: Dodavatel, Vstup, Proces, Výstup, Zákazník. [9]



Obrázek 6: SIPOC [9]

Na obrázku č. 6 můžeme sledovat klíčové části diagramu SIPOC. K jeho tvorbě je možné přistupovat různě, ale jako nejefektivnější se postupným vývojem ukázal postup od konce procesu na jeho začátek. V diagramu SIPOC obsahuje tyto základní skupiny:

1. Pojmenování procesu
2. Identifikace hranic procesu a klíčových procesů

3. Identifikace vstupů a dodavatelů
4. Identifikace nejdůležitějších požadavků na kvalitu výstupů
5. Určení dodavatele

SIPOC diagram přináší velmi jednoduchý pohled na proces a je užitečný pro vizuální představu o základních částech předmětného procesu. [9]

1. Mapa procesu

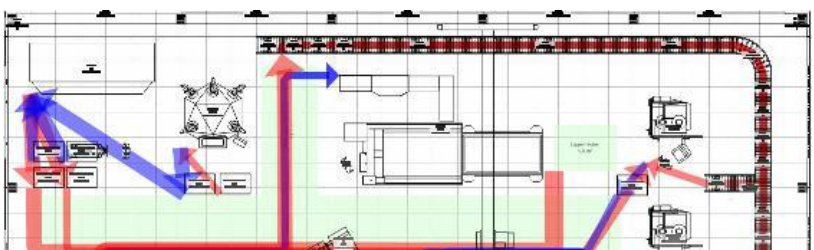
Mapa procesu může mít mnoho různých podob, přičemž funkce zůstává stejná, slouží k jasnějšímu a ucelenějšímu pohledu na zkoumaný proces. Měla by taktéž posloužit k jeho hlubšímu pochopení a vytvoření společného pohledu na zlepšovaný proces. Tento jednoduchý nástroj také zlepšuje orientaci a zobrazuje nejen provázanost procesů, ale také odpovědnost manažerů ve společnosti.

1. jaké procesy jsou ve firmě
2. jak jsou procesy členěny
3. kdo za procesy odpovídá
4. které procesy jsou vzájemně propojeny
5. jaké odborné oblasti firma pokrývá

Mapa procesů je nástroj usnadňující řízení a rozhodování managementu.[10] Podle druhu procesu použijeme jeden z několika formátů, které existují pro mapování procesů. Mezi nejpoužívanější druhy patří diagram toku materiálu a pracovního toku a mapa toku hodnoty.

1. Diagram toku materiálu a diagramy pracovního toku

Tyto diagramy znázorňují fyzický tok materiálu v průběhu procesu a jsou využívány zejména ke zlepšení rozložení pracoviště.



Obrázek 7: Diagram toku materiálu [11]

Na obrázku č. 8 je zřejmý přesun materiálu po jednotlivých pracovištích. Šipky ukazují směr od prvního kroku procesu k dalšímu a tak dále. Varováním může být velký počet křížících se čar nebo pokud se čáry opakovaně vracejí do stejného místa, na takových místech je třeba zamyslet se nad tím, zda není možné práci spojit a provádět zároveň, což by zamezilo vracení se práce na stejné místo. [12]

2. Mapa toku hodnoty - Value Stream Map

Jedná se o analytický nástroj, který zachycuje klíčové toky v podniku, a to jak ve výrobě, tak i v administrativních procesech. Jedná se o toky materiálu, informací a práce v daném čase. Průběžná doba je rozdělena na výrobní časy a čekání. VSM má sice složitější strukturu, ale ta pomáhá lépe pochopit proces jako celek a identifikovat veškeré nedostatky a prodlevy vznikající při realizaci produktu. Při tvorbě mapy toku hodnoty tedy dostáváme reálný obraz z výroby, díky kterému je možné identifikovat úzká místa či důvody neefektivnosti toku v procesech nebo přímo na pracovišti. [12,13]

2. VOC - hlas zákazníka

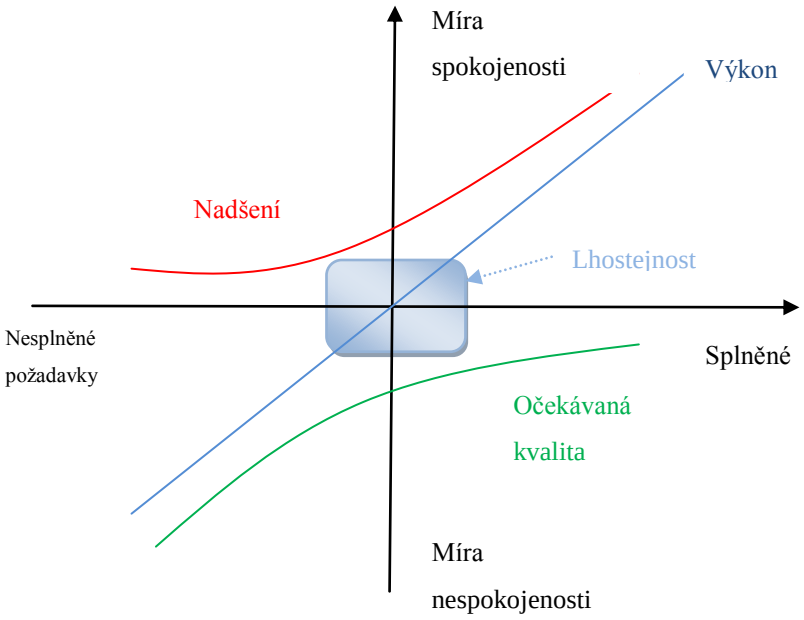
Voice of Customer, neboli hlas zákazníka je jedním z nejdůležitějších faktorů při rozhodování o budoucích změnách. Z podnětů od zákazníků lze vytvořit jeden nebo více měřitelných faktorů jež umožňují lepší pochopení skutečného cíle projektu. Těmto ukazatelům se říká CQM – Critical to Quality, na druhou stranu potřeby podniku vyjadřuje zkratka CTP Critical to proces. CTP vyjadřuje ekonomiku procesu, jeho požadavky na infrastrukturu a zdroje. Ideálně by se měl soubor CQM překrývat s CTP. V tomto místě, podle obrázku, vzniká prostor pro řešení přípustné jak pro podnik, tak pro zákazníka. [11,13]

K přesnému zachycení hlasu zákazníka lze využít mnoha nástrojů a to nejen údaje z reklamací, stížností nebo údajů o pozáručních opravách. Dá se využít aktivního přístupu v komunikaci se zákazníkem například ve formě strukturovaných rozhovorů, dotazníků či průzkumů. Lze využit i informací od obchodních zástupců či z dostupných marketingových zdrojů. Všechny tyto metody mají své sofistikované postupy, které ovšem přesahují rámec této práce.

3. KANO

Kano analýza se jmenuje po svém tvůrci N. Kanovi z Tokijské univerzity. Ten odvodil vztah mezi kvalitou produktu, očekáváním a spokojeností zákazníka. Kvalita výrobku se přímo neodráží na spokojenosti zákazníka. Zvyšováním očekávané kvality se snižuje nespokojenost zákazníka, ale nezvyšuje jeho spokojenost a naopak aktivní přitažlivá kvalita zvyšuje zákazníkovu spokojenost. Její nedostatek nesnižuje nespokojenost, ale vede k lhostejnosti. Tato teorie je zakreslena na Obr.č.9.

Je tedy podstatné identifikovat, jakou hodnotu přikládají zákazníci rysům daného výrobku či službě. KANO teorie je proto důležitá při vyhodnocování hlasu zákazníka, lze ji využít pro potvrzení, že některé požadavky, vyřčené zákazníkem, jsou opravu důležité a zásadně ovlivňují spokojenost zákazníka. [13]



Obrázek 8: Model KANO [14]

Zhodnocení

Diagramy toků materiálu a informací stejně jako digramy SIPOC a mnoho dalších slouží ke grafickému vyjádření vlastněných informací. Tím nám pomáhají hlouběji pochopit vztahy mezi jednotlivými subjekty uvnitř podniku. V mnohých případech může grafické vyjádření dat přinést okamžitý efekt, když je na první pohled zřejmé slabé místo. V případech, kdy není zřejmé slabé místo z grafického zpracování dat, slouží tyto nástroje k definování podnikových procesů a ucelení představy o jejich fungování. Jejich místo je na samotném začátku zavádění metody 6σ nebo DFSS. [24]

Nástroje VOC a KANO slouží k pochopení a identifikování přání zákazníka, a to jak interního (vnitropodnikového), tak externího. Hlas zákazníka je nejkritičtějším faktorem při rozhodování o změnách, proto by se měla VOC – hlas zákazníka věnovat patřičná pozornost. Velkým rizikem je právě ignorování či špatná interpretace shromážděných dat. Naopak kvalitní data shromážděná např. z více reklamních oddělení, jsou důležitým faktorem a dávají velký prostor k dalšímu zlepšování.

Tabulka 1: Zhodnocení a porovnání č.1

Metoda ⇨ / **Nástroj** ⇩	Six Sigma					Design for Six Sigma				
	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	I Zlepši	C Kontroluj	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	D Navrhni	V Ověř
SIPOC	●		●			●		●		
Mapa procesu	●		●		●	●		●	●	
Diagram toku materiálu /pracovního toku	●		●			●			●	
Mapa toku hodnoty - Value Stream Map	●					●				
Integrované vývojové diagramy	●					●				
VOC - hlas zákazníka	●				●	●			●	
KANO	●					●				

6. Měření - Measure

Jedna ze zásadních etap metody Six Sigma se pomocí měřících a statistických metod snaží identifikovat příčiny problémů a zajistit taková data, se kterými se bude pracovat v další etapě Analyzuj. V první řadě je třeba věnovat pozornost typu dat, se kterými se přichází do styku, ty totiž mají zásadní význam na zvolení nástrojů, kterými se bude později zpracovávat.

Nejlépe zpracovatelná jsou data spojitého typu, tedy taková data, která mají v každém okamžiku svoji hodnotu. Pro interpretaci těchto dat se dá použít většina kvalitních statistických nástrojů, jsou to tedy data, která se snažíme v první řadě získat kvůli jejich nejvyšší vypovídací hodnotě.

Kromě spojitých dat se v praxi můžeme setkat i s daty atributivními, popisujícími subjektivní vlastnosti věcí či procesů. Tato data vyjadřují pouze jednotlivé, většinou subjektivní stupně, bez determinovaných rozdílů mezi sebou, jako například hodnocení špatné, dobré, výborné.

Z hlediska hodnoty informace jsou tedy logicky mnohem přínosnější data spojitá v čase, a právě proto je snaha tato data pro další práci získat, zejména kvůli jejich statistické interpretaci.

1. Směrodatná odchylka

Sigma (σ) je latinské písmeno, kterým je značena směrodatná odchylka. Ta je měřítkem variability neboli "rozptýlenosti" procesu nebo rozdělení. Jednu směrodatnou odchylku lze graficky znázornit na grafu normálního rozdělení jako vzdálenost mezi střední hodnotou rozdělení a prvním inflexním bodem na křivce. (obr. 10). Na koncepci směrodatných odchylek jsou postaveny základy efektivnosti metodologie Six Sigma. Směrodatná odchylka umožňuje řídit celý proces. Sledování odchylek umožňuje určit opravdovou výkonnost procesu (podniku). Jejím korigováním a neustávajícím snižováním lze minimalizovat variabilitu a disperzi procesu a dovést ho ke kvalitě Six Sigma. Směrodatná odchylka je jedním z nejvyužívanějších nástrojů pro měření variability či výkonnosti daného procesu. Směrodatná odchylka vyjadřuje disperzi hodnot kolem střední hodnoty (průměru). Vypovídá o tom, jak se hodnoty od této střední hodnoty liší, resp. jak hustě jsou kolem tohoto průměru seskupeny. Je-li směrodatná odchylka malá, jsou si prvky (naměřená data) z větší míry navzájem podobné. Pokud je směrodatná odchylka velká, naměřená data si podobná nejsou a dochází mezi nimi k velkým vzájemným odlišnostem. Směrodatnou odchylku lze definovat

jako odmocninu z rozptylu náhodné veličiny X, kde $D(X)$ označuje rozptyl náhodné veličiny X. [5]

$$\sigma = \sqrt{D(X)} \tag{1}$$

Rozptyl náhodné veličiny určuje rozložení hodnot okolo střední hodnoty. [16]

Směrodatná odchylka se nejčastěji počítá jako kvadratický průměr odchylek od jejich aritmetického průměru.

Pro aritmetický průměr platí:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2}$$

Potom platí pro směrodatnou odchylku:

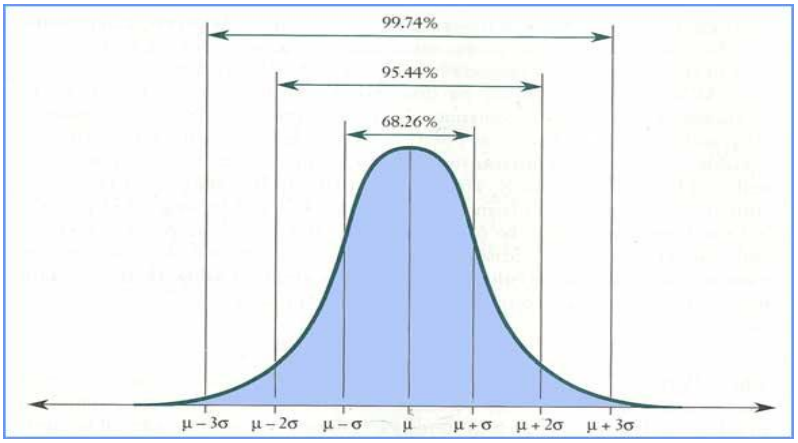
$$\sigma(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}} \tag{3}$$

A výběrovou směrodatnou odchylku:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{4}$$

Čím menší je směrodatná odchylka σ, tím blíže aritmetickému průměru jsou hodnoty normálního rozdělení. [16, 23]

Výstup ideálního procesu je možné přirovnat k normálnímu rozdělení, které zobrazuje Gaussova křivka. Normální rozdělení je jedno ze základních rozdělení pravděpodobnosti. Velký význam normálního rozdělení je v možnosti určit jaké procento hodnot bude ležet uvnitř rozmezí jako násobek směrodatné odchylky. Lze říci, že se meze přirozené proměnlivosti procesu nacházejí ve vzdálenosti ±3 směrodatné odchylky od průměru procesu.

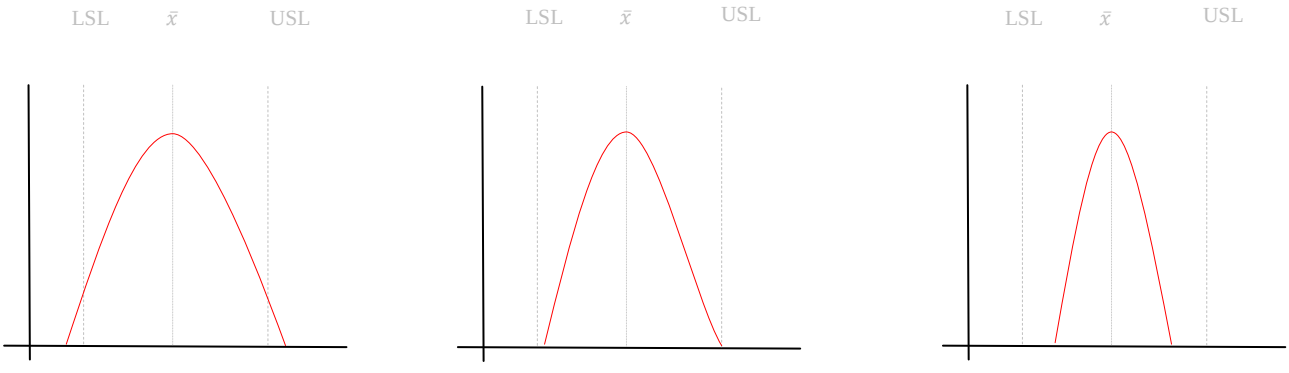


Obrázek 9: Gausovo rozdělení [32]

2. Hodnocení způsobilosti procesu

Pro hodnocení způsobilosti procesu se využívá indexu C_p. Jako podíl dvou hodnot tedy porovnává šířku zvoleného tolerančního intervalu (zadané konkrétními technickými předpisy) se šířkou rozdělení procesu. Šířku tolerančního intervalu vymezují dvě hranice, a to USL – horní toleranční mez a LSL – dolní toleranční mez. Potom se index způsobilosti vypočítá ze vztahu:

$$C_p = \frac{předepsaný\ toleranční\ interval}{výrobní\ rozmezí} = \frac{USL-LSL}{6s} \quad (5)$$



$Cp < 1$ $Cp = 1$ $Cp > 2$

Na obrázku je vidět vliv velikosti indexu C_p na tvar a rozložení normálního rozdělení. [23]

Proces se považuje za způsobilý, když je hodnota indexu C_p vyšší než hodnota 1,33. Tato hodnota vychází z výrobní tolerance odpovídající hodnotě ±4σ. Tato hodnota odpovídá kvalitě na úrovní 4 Sigma a přestavuje dlouhodobou výtěžnost procesu ve výši 99,38%.

Index C_{pk} zohledňuje jak variabilitu procesu, tak i jeho polohu v předepsaném tolerančním poli, a tím charakterizuje skutečnou způsobilost procesu udržet se v mezích tolerance. [15]

$$C_{pk} = \frac{USL - \bar{x}}{3s}, C_{pk} = \frac{\bar{x} - LSL}{3s} \tag{6}$$

Z uvedených vztahů se vybere ten, pro který je předepsaná toleranční mez, pokud jsou zadány obě toleranční meze, vybere se ta hodnota, která je nižší.

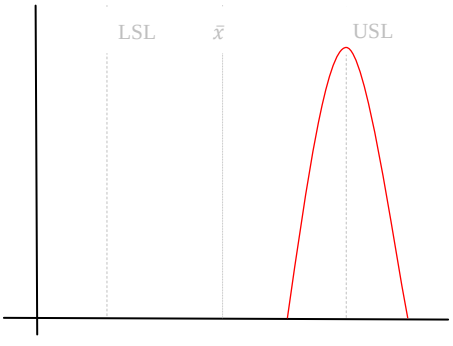
$$C_{pk} = min\left\{\frac{USL - \bar{x}}{3s}, \frac{\bar{x} - LSL}{3s}\right\} \tag{7}$$

Výrobní proces se považuje za způsobilý, pokud hodnota C_{pk} a zároveň C_p dosahuje alespoň hodnoty 1.33. C_{pk} ^C_p > 1,33. Čím větších hodnot nabývají tyto indexy, tím se proces zlepšuje.[23]

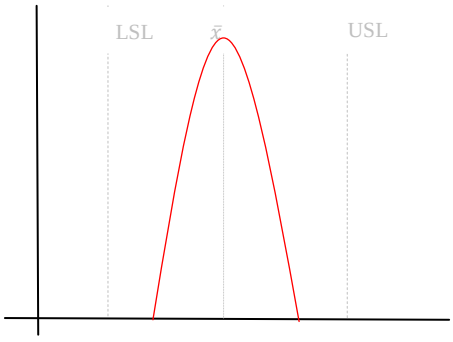
Tabulka 2: Způsobilost procesu [15]

	Hodnota indexu	**Způsobilost procesu**
Cp & Cpk	<1,33	nezpůsobilý
	≥1,33	způsobilý

Na obrázku lze pozorovat vliv hodnoty indexu Cpk na polohu rozdělení.



$C_{pk} = 0$



$C_{pk} = 2$

3. Analýza systému měření - MSA

Aby byla naměřená data spolehlivě použitelná, musí být měřící systém relevantní a jeho přesnost adekvátní k dosažení našich cílů. Proto se pozoruje proměnlivost měření, která se skládá z proměnlivosti samotného procesu a z proměnlivosti měření. Matematicky zapsáno, celková variabilita zaznamenaných dat je součtem variability procesu a variability systému měření [16]

$$\sigma_T = \sigma_p + \sigma_m \tag{8}$$

Měření musí tedy vykazovat řadu kvalitativních vlastností, bez kterých by nebylo jinak využitelné. Tyto vlastnosti lze rozdělit do dvou hlavních skupin variability procesu měření:

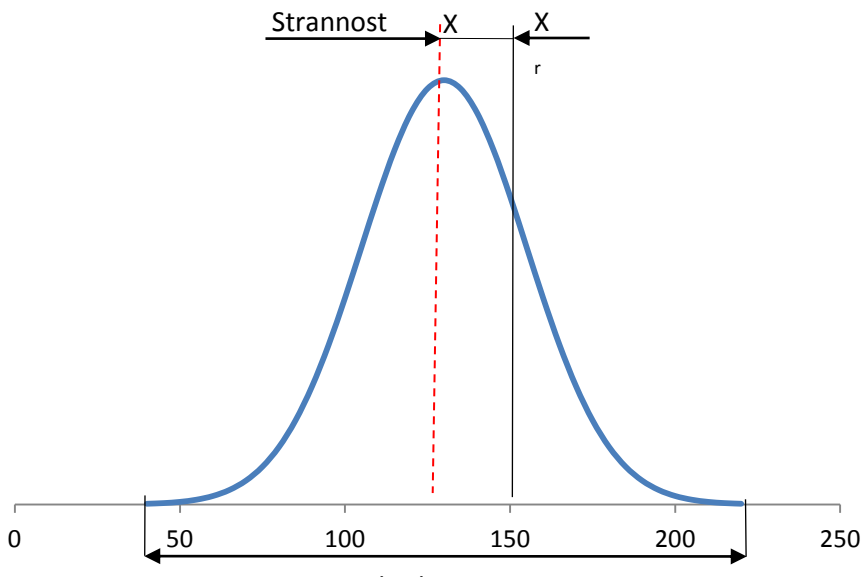
1. Variabilita polohy měření
    1. strannost
    2. stabilita

2. Variabilita šíře
    1. shodnost
    2. opakovatelnost
    3. reprodukovatelnost [18]

Strannost

Strannost měření je mírou jeho správnosti a vyjadřuje se jako rozdíl mezi aritmetickým průměrem výsledků opakovaného měření stejného znaku jakosti a přijatou referenční hodnotou. Strannost měření tedy vyjadřuje míru systematické chyby v systému měření. [17]

Mezi nejčastější příčiny strannosti patří například nesprávně kalibrovaný přístroj, chyba etalonu (chyba v referenční hodnotě), vliv prostředí (teplota, tlak, vlhkost).



Obrázek 10: Strannost [18]

Stabilita

Stabilita procesu je funkcí času. Stabilní proces je tedy takový, který se nemění v dostatečně dlouhém časovém úseku. Stabilita nebo také drift tedy znamená, že stabilita je změnou strannosti v čase (17)

Mezi nejčastější příčiny patří například dlouhá doba mezi kalibracemi přístroje, odlišná metoda měření nebo špatná údržba (nečistoty, koroze, atd.).

Shodnost

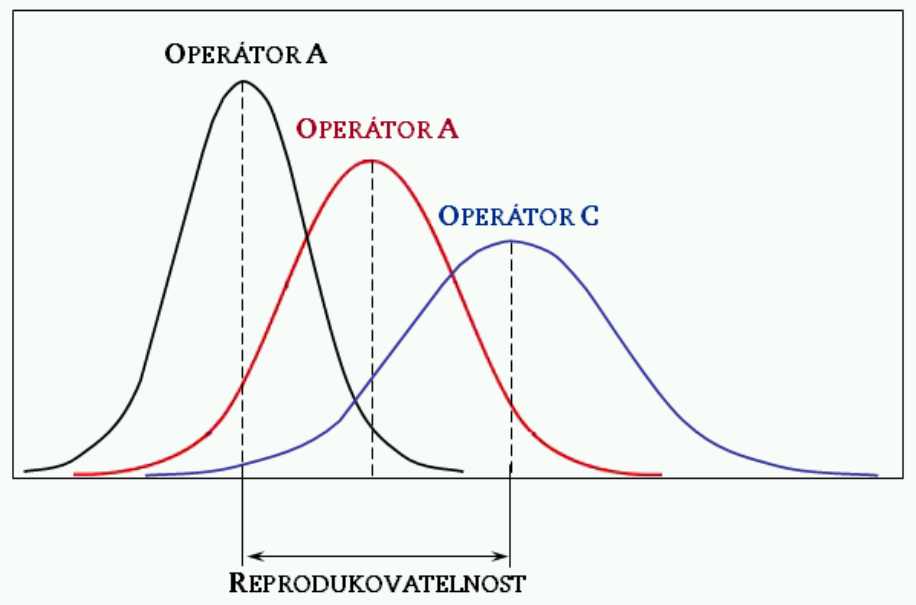
Shodnost měření vyjadřuje variabilitu výsledků opakovaného měření stejného znaku jakosti. Mírou shodnosti je obvykle jeho neshodnost, která se vyjadřuje pomocí směrodatné odchylky výsledků měření resp. oblasti skutečné variability výsledků měření. [18] Shodnost měření charakterizuje působení náhodných chyb měření.

Opakovatelnost

Proměnlivost měření bez započtení proměnlivosti, vnesené do měření lidským faktorem, se také jinak nazývá variabilitou zařízení. Jedná se tedy o samotnou variabilitu měřících přístrojů. Příčina chybné opakovatelnosti se může nacházet uvnitř dílu, přístroje, etalonu atd. Příčinou, kromě samotného měřidla, může být i postup měření, pomocné materiály, software a jiné pomůcky.

Reprodukovatelnost

Definice reprodukovatelnosti je variabilita průměru měření, získaných různými operátory za použití stejného měřicího přístroje, měřením stejného znaku na stejném vzorku. Jedná se tedy o variabilitu vnesenou do měření operátorem. To platí při měření menšími měřicími přístroji, jelikož se ovšem měření často provádí pomocí automatizovaných systémů, nazývá se reprodukovatelnost průměrnou variabilitou mezi systémy. [17]



Obrázek 11: Reprodukovatelnost [18]

Schopností získat stejný výsledek při provedení mnohanásobného měření či při provedení měření různou obsluhou se zabývá R&R studie. (Repeateability and Reproductability). Na obrázku č.18, lze pozorovat, jak se mohou lišit údaje od jednotlivých operátorů a vlastní význam reprodukovatelnosti.

4. R & R – Repeatability & Reproducibility

Jelikož v praxi nelze zajistit stoprocentně neměnné podmínky měření, způsobené použitím různých měřících přístrojů, různých operátorů atd., je vhodné provést hodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření (R & R – Repeatability & Reproducibility).

Možností a technik sestavení analýzy R&R je více, mezi nejpoužívanější patří ANOVA (více kap. Analyzuj) a metoda průměru a rozpětí. Metoda průměru a rozpětí má několik etap a hojně využívá grafické pomůcky, jako např. histogramy a regulační diagramy.

Sestavením regulačního diagramu pro hodnoty variačního rozpětí opakovaných měření se zjišťuje statistická zvládnutelnost procesu. Aby byl proces statisticky zvládnutelný, musí všechny hodnoty ležet uvnitř regulačních mezí. Pokud se prokáže statistická nezvládnutelnost procesu, tedy hodnoty leží mimo regulační meze pouze u jednoho z operátorů, obvykle to znamená, že jím používané metody jsou rozdílné. Potom je nutné používané metody sjednotit a uvést proces měření do statisticky zvládnutelného stavu.[16,17]

Numerické výpočty

Stanovení hodnoty opakovatelnosti měření.

Pro teoretické popsání procesu výpočtu R&R lze předpokládat: deset různých náhodných vzorků, tři operátory – A,B,C – provádějící měření na každém ze vzorků celkem třikrát.

Vztah pro opakovatelnost měření je vyjádřen:

$$EV = \frac{\bar{\bar{R}}}{d_2^*} \tag{9}$$

$$\bar{\bar{R}} = \frac{\overline{R_a}+\overline{R_b}+\overline{R_c}}{3} \tag{10}$$

EV- opakovatelnost měření (EV – Equipment Variation)

d_2^*- tabulkový koeficient závislý na počtu opakování měření a součinu počtu měřených součástí a počtu operátorů

$\bar{\bar{R}}$- průměr průměrů rozpětí v jednotlivém měření

Stanovení hodnoty reprodukovatelnosti měření

$$AV = \sqrt{\left(\frac{\overline{X_{df}}}{d_2^*}\right)^2 - \left(\frac{EV^2}{n*r}\right)} \tag{11}$$

$\overline{X_{df}}$- variační rozpětí průměrů opakovaných měření jednotlivých kusů jednotlivými operátory

$$\overline{X_{df}} = Max\,\bar{X} - Min\,\bar{X} \tag{12}$$

n- počet dílů

r-počet měření

Vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření (R & R)

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \qquad [17]\ (13)$$

Tabulka 3: Hodnocení R&R [18]

R&R ≤ 10 %	Systém měření je přijatelný.
10 % ≤ R&R ≤ 30 %	Systém měření může být přijatelný (podle důležitosti aplikace, nákladů na měřidlo, nákladů na opravy atd.).
R&R > 30 %	Systém měření je nutno zlepšit.

Variabilita dílu (PV) a celková variabilita (TV)

$$PV = \frac{R_p}{d_3}\ , \qquad TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} \qquad (14)$$

Rp – rozpětí průměrů dílů: rozdíl největšího a nejmenšího průměrů dílů

d_3 – konstanta závisející na počtu dílů

Pomocí hodnoty celkové variability lze dopočítat procentuální zastoupení jednotlivých variabilit: AV = 100*(AV/TV) [%], R&R = 100*(R&R/TV) [%] a PV = 100*(PV/TV) [%]

Touto analýzou lze zjistit odhad a podíl variability procesu celkového systému měření a jeho součástí: opakovatelnosti, variability a reprodukovatelnosti. Statisticky obdržená data je vhodné doplnit grafickou analýzou.[16,17]

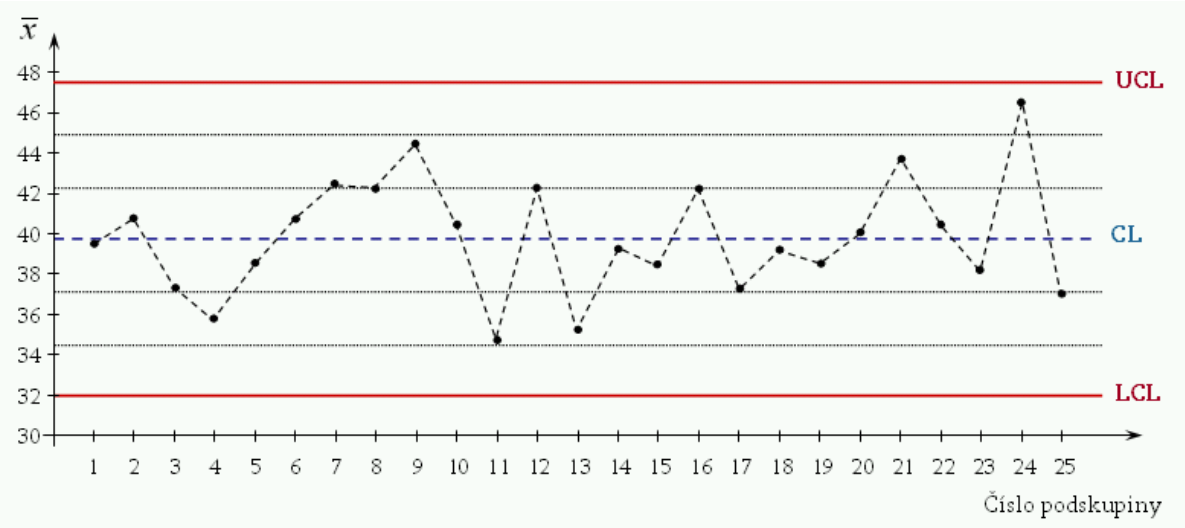
5. Regulační diagramy

Regulační, také nazývané Shewhartovy diagramy, se využívají ke kontinuálnímu grafickému znázorňování dat procesu v čase. Regulační diagramy pracují s daty, která jsou sbírána v přibližně pravidelných intervalech, a to buď časových nebo kvantitativních. Obvyklý postup je rozdělit měřený soubor dat do více podskupin, pro přehlednější interpretaci. V každé takové skupině se určuje aritmetický průměr $\bar{x}$ a rozpětí R.

Každý regulační diagram se skládá z centrální přímky CP (CL). CP bývá obvykle průměrná hodnota měřené veličiny. Dále se skládá z horní a dolní regulační meze – LCL(dolní) a UCL (horní) viz obrázek č. 17. Regulační meze se nacházejí ve vzdálenosti ±3σ od centrální přímky CP. σ stanovuje směrodatnou odchylku měřené souboru.

Smysl regulačních diagramů je v ustavení základní úrovně měření, odhalení variability systému a zajištění stability systému. Využití se najde tam, kde je třeba sledovat proces v průběhu času nebo k podání zpětné vazby při zavedení zlepšení v procesu.

Při kontrole měřením se nejvíce využívá grafu typu $\bar{x} - R$, tento graf zobrazuje průměr podskupiny a jeho rozpětí.[9, 17,28]



Obrázek 12: Regulační diagram [17]

Při interpretaci regulačních diagramů je důležité nevěnovat pozornost pouze hodnotám, které překračují některou z regulačních mezí, ale i na zvláštní nebo neobvyklé uskupení hodnot v grafu, protože ty by mohly poukazovat na vliv vymezitelných příčin v daném výrobním

procesu. Takové seskupení může mít tvar například devíti po sobě jdoucích bodů na jedné straně od centrální přímky.[28]

Pokud potřebujeme zaznamenat regulačním diagramem atributivní data, využijeme Shewhartovy srovnávací diagramy. Ty zaznamenávají přítomnost určitého znaku nebo vlastnosti na každém prvku v podskupině a vyčíslují, kolik prvků daný znak vykazuje. [15]

Existují tyto typy grafů:

1. Pro binomické rozdělení
   p - diagram pro *podíl* neshodných jednotek
   np – diagram pro *počet* neshodných jednotek

2. Pro Poissonovo rozdělení
   c – diagram pro počet neshod
   u – diagram pro počet neshod na jednotku

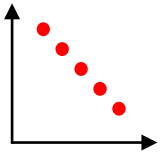
Regulační meze těchto diagramů se následně vypočítají dle vztahů z následující tabulky:

Tabulka 4: Regulační meze [18]

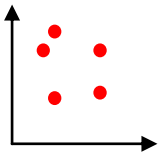
	Typ diagramu	**Centrální přímka**	**Regulační meze**	
			LSL	**USL**
Bionomické rozdělení	**p**	$\bar{p}$	$\bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$\bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$
	np	$\overline{np}$	$\overline{np} + 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$\overline{np} - 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$
	c	$\bar{c}$	$\bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$	$\bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$
Poissonovo rozdělení	**u**	$\bar{u}$	$\bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$	$\bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$

1. Korelační diagramy

Korelace je nástroj používaný k naznačení existence lineárního vztahu mezi hodnotami různých měření. Tak hodnotí vzájemný vztah mezi dvěma proměnnými znaky. Pomocí regulačního diagramu je možné určit, co se stane s jedním proměnným znakem, pokud dojde ke změně druhého a zda jsou vůbec na sobě závislé.



Silná záporná závislost, s rostoucí hodnotou Y, klesá hodnota X



Žádná korelace, hodnoty X a Y jsou na sobě nezávislé

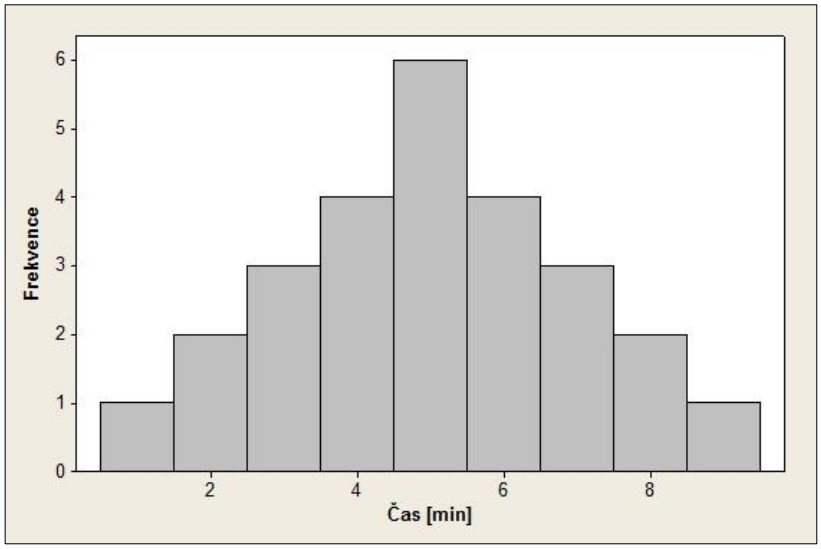
Silná kladná korelace, hodnoty X a Y klesají nebo rostou současně.

Podle obrázku grafické znázornění uvedeném výše rozeznáváme kladnou a zápornou korelaci, přičemž kladná vyjadřuje vztah přímé úměry, je-li hodnota jednoho měření vyšší hodnoty, je i hodnota druhého měření vyšší. Záporná korelace je ve formě nepřímé úměry; je-li hodnota prvního měření vyšší, hodnota druhého je nižší. Nulová hodnota korelace poukazuje na neexistence jakéhokoli vztahu. [21]

2. Histogram

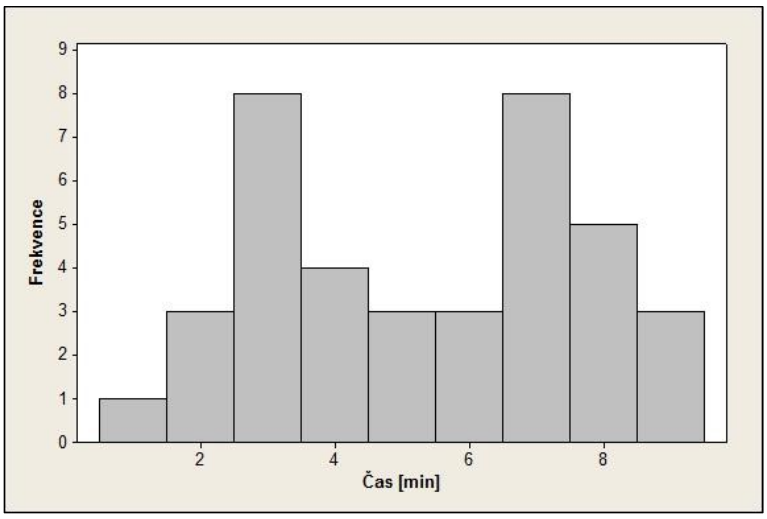
Histogram je typ grafu, který pomáhá lépe pochopit distribuci a proměnlivost dat, při jejich větším množství. Ideální množství testovaných vzorků pro sestavení histogramu je větší než padesát. Na ose x je uváděna měřená veličina, zatímco na ose y se nachází četnost výskytu hodnoty v daném intervalu. Intervalů v histogramu by mělo být určitý počet, aby nedošlo ke zkreslení dat. (Při velkém počtu intervalů by mohlo dojít k dojmu velké variability a naopak). Důležité prvky histogramu, jsou poloha středu, tvar a šířka.

Nejčastější tvar histogramu odpovídá normálnímu rozdělení, to znamená, že data jsou rozdělena symetricky kolem střední hodnoty.



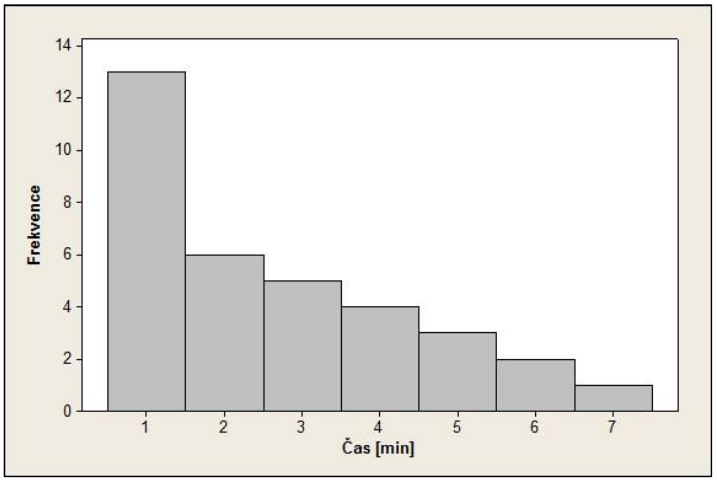
Obrázek 13: Histogram s jedním vrcholem

Další častou variantou je tvar histogramu takzvaný bimodální, jedná se o graf s dvojitým vrcholem. To muže způsobovat řada různých příčin. Proces probíhá dvěma různými způsoby a je nutné proces analyzovat a vysvětlit rozdíly fungování.



Obrázek 14: Histogram s dvojitým vrcholem

Asymetrické rozdělení se projevuje velkým výskytem hodnot na jedné straně grafu a postupným úbytkem na straně druhé. Tento tvar rozdělení často pochází ze samotného principu procesu, například měření času procesů, kdy menší část úkolů je více časově náročná. (př. doba čekání zákazníka na obsluhu). [24,25]



Obrázek 15: Stranný histogram

Zhodnocení

Etapa měření je v rámci 6σ jednou z úplně nejdůležitějších. Jistota, že vycházíme z kvalitních dat naměřených správným způsobem, je pro další analýzu nezbytná stejně jako pro celkový úspěch. Jsou tedy jasně stanovená pravidla, např. pro rozsah výběru vzorků a maximální dovolenou odchylku. Vybraný vzorek dat musí tedy splňovat určité kvality jako reprodukovatelnost, opakovatelnost a stabilitu. Hodnocení těchto kvalitativních znaků probíhá například pomocí statistického nástroje R&R. Samotné použití je časově náročnější, ovšem za použití statistických softwarů (Minitab, Statistica) lze dobu výpočtů značně zkrátit a dosáhnout tak na spolehlivá data, popisující parametry našeho výběru.

Další nástroje jako histogram a korelační diagram jsou opět pomůcky pro grafické znázornění rozložení dat. Histogram lépe znázorňuje rozložení dat při velkých objemech dat, naopak při menších sériích nemusí být jeho vypovídací hodnota zcela přesná. Korelační diagramy naopak využívají vzájemné interakce faktorů, a tak pomáhají identifikovat významné korelace v procesu. Oba zmiňované nacházejí uplatnění v nejedné z etap Six Sigma a DFSS.

Tabulka 5: Zhodnocení a porovnání č.2

Metoda ⇨ / Nástroj ⇩	Six Sigma					Design for Six Sigma				
	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	I Zlepši	C Kontroluj	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	D Navrhni	V Ověř
Výběr vzorků		●					●			●
R & R – Repeatability & Reproducibility		●	●		●		●	●		●
Histogram			●				●	●	●	
Korelační diagramy			●					●	●	

3. Analyzuj

V této etapě je snaha o analýzu a ověření příčin problémů. Lze využít nástrojů dvojího typu a to buď k identifikaci potencionálních příčin anebo nástroje k ověřování příčin. V prvním případě je možné použít techniky podporující kreativní a týmové tvůrčí myšlení, lze využit nástrojů, jako je 5S, diagram příčin a následků (známý též jako rybí kost) či Paretovy analýzy. Ve druhém případě, ověřování příčin, je nutné zaměřit se na statistické vyjádření dat a interpretaci vztahu příčin a následků. Používané nástroje jsou ANOVA – Analyse of Variation, DOE – Design of Experiments, testování hypotéz nebo regrese.

1. 5 proč

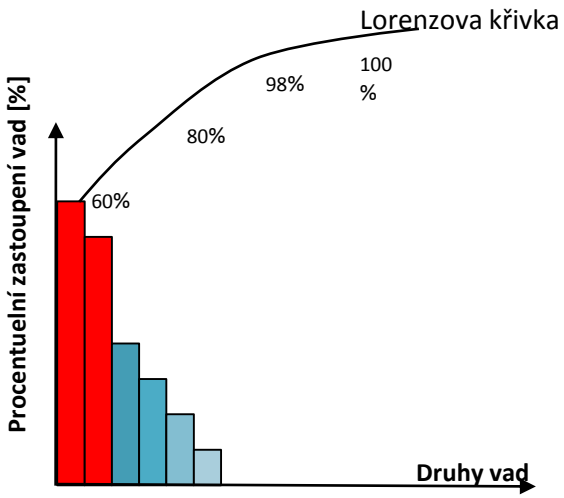
Je jednoduchý nástroj pro identifikaci příčin používaný zejména v automobilovém průmyslu. Tato metoda by měla zaměstnance ideálně přivést ke kořenovým příčinám tím, že se do hloubky opakovaně ptá na podstatu problému. V praxi jde o jednoduchou sérii otázek „proč“? Přičemž není nutně dojít až k páté otázce, pokud je odhalena kořenová příčina již pod dvou nebo třech otázkách. Naopak otázek může být i více. [24]

2. Paretova analýza

Paretovo pravidlo původně popisovalo rozdělení majetku ve společnosti a to tak, že 80% majetku náleželo 20ti% populace. Podobné statistické rozložení můžeme najít i na mnoha jiných místech, procesní řízení nevyjímaje.

Díky Paretově analýze lze najít onu menšinovou část, jež způsobuje 80 procent všech problémů. Jinými slovy, je možné určit pořadí důležitosti příčin problémů, a tak se nezabývat příčinami nevýznamnými.

Paretův diagram



Obrázek 16: Paretovo rozdělení [15]

Z diagramu č.16 je patrná konstrukce grafu, na vodorovné ose x jsou seřazené jednotlivé kategorie (poruchy, vady nebo zdroje chyb) podle četnosti výskytu od nejvíce frekventovaných až po nejméně. Na ose y je četnost výskytu vady. Osa y by měla mít maximální hodnotu rovnající se celkovému počtu problémů.

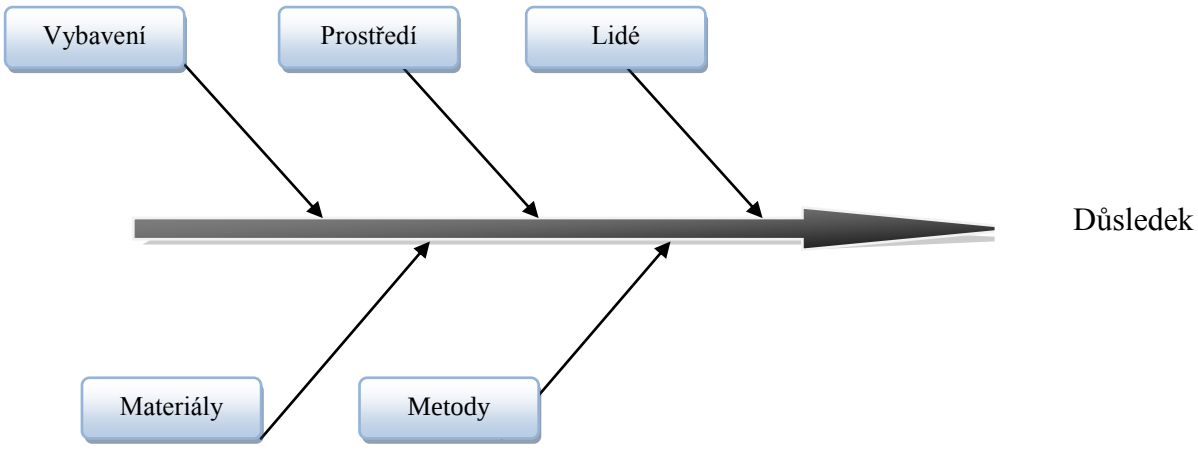
Ještě lze přidat čáru kumulativních procent neboli Lorenzovu křivku. Ta se vypočítá jako kumulativní součet hodnot u jednotlivých dat. První bod čáry položíme na úroveň prvního sloupce grafu, další bod se nachází nad druhým sloupcem na úrovni rovnající se součtu procent prvního a druhého sloupce. Tak se pokračuje dále, až do 100 procent. [25]

Interpretace

Pokud je několik prvních sloupců v grafu výrazně vyšších než ostatní, jedná se o jasný Paretův efekt: pouze několik kategorií příčin problému je zodpovědných za většinu následků. Právě na tyto kategorie by se měla zaměřit pozornost. Může nastat i případ, kdy Paretův diagram je „ plochý“ - to znamená, že žádná příčina není více důležitá než ostatní.

3. Diagram příčin a následků

Diagram příčin a následků, jinak zvaný podle svého tvaru též rybí kost nebo podle svého objevitele Ishikawův diagram, se používá všude tam, kde je možno očekávat více příčin problémů a je třeba odhalit jejich kořenové příčiny. Je to velice užitečný nástroj, vhodný především pro týmovou práci, ideálně pomocí brainstormingu. Konstrukce diagramu je vždy podobná, nikoli stejná. Počet „větví“ se může lišit stejně jako druhy kategorií. Centrální linie popisuje definovaný problém, se kterým se lze setkat, k němu postupně vedou jednotlivé větve reprezentující jednotlivé kategorie. Jednotlivé kategorie mohou například být: lidské zdroje, technologické vybavení, materiály, používané metody. Možných variant je více a další možnost zobrazuje obrázek č. 17. Mezi jednotlivé kategorie píšeme potenciální příčiny, které se mohou ještě dále větvit na pod-příčiny. Důležitá je vysoká míra konkrétnosti, mlhavé termíny mohou být zavádějící a neefektivní. [1]



Obrázek 17: Diagram příčin a následků [1]

4. Testování hypotéz

Testování hypotéz se zabývá určením platnosti hypotézy (obecného tvrzení) na úrovni celého souboru dat za pomocí dat získaných sledováním měřené náhodné veličiny. Nejčastější zdroje hypotéz jsou požadavky na kvalitu a často bývají založeny na předchozí zkušenosti.

Statistické hypotézy lze rozdělit do dvou skupin podle znalosti parametrů daného souboru, a to na hypotézy parametrické a na hypotézy neparametrické.

Parametrické hypotézy vycházejí se známého rozdělení sledované náhodné veličiny v základním souboru a týkají se neznámých parametrů. Zapisují se jako rovnosti (</=/>) mezi testovaným parametrem a jeho předpokládanou hodnotou.

Neparametrické hypotézy na rozdíl od parametrických nevyžadují znalost rozdělení v základním souboru a týkají se základních vlastností v tomto souboru.

Testování hypotéz začíná formulováním nulové H_0 a alternativní hypotézy H_1. Nulová hypotéza je nejčastěji definována jako rovnost a tedy poukazuje na neexistenci rozdílu. Může se jednat o vztahy typu: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2,\ \mu_1 = \mu_2$.

Alternativní hypotéza udává opak nulové. Přijetí alternativní hypotézy tedy popírá nulovou. Pokud nulová hypotéza poukazovala na neexistenci rozdílu, alternativní hypotéza vypovídá o existenci rozdílu nebo závislosti mezi proměnými. Rozlišuje se mezi jednostrannou (>nebo<) a oboustrannou (≠). [22]

Chyby prvního a druhého druhu

Při testování je možné dopustit dvou druhů chyb. Pokud je nesprávně přijata nulová hypotéza, když měla být přijata alternativní hypotéza, nastane chyba prvního druhu. Pravděpodobnost, že dojde k nesprávnému přijetí nulové hypotézy, se nazývá hladina významnosti a značí se α. Pravděpodobnost, že není zamítnuta H_0 v případě, kdy platí - tedy bylo přijato správné rozhodnutí - je spolehlivost $1-\alpha$. Stejně tak správným rozhodnutím je zamítnutí nulové hypotézy v případě, kdy platí alternativní hypotéza, taková pravděpodobnost se nazývá síla testu a značí se $1-\beta$.

Chybou II. druhu je nesprávné přijetí H_0 v případě platnosti alternativní hypotézy. Pro přehlednost jsou uvedené vztahy zapsány do tabulky:

- **chyba I. druhu** - je zamítnuta hypotéza H_0, když platí

- **chyba II. druhu** - nesprávně přijata hypotézu H_0, když neplatí

Tabulka 6: Druhy chyb [23]

	Rozhodnutí	**Nezamítáme H_0**	**Zamítáme H_0**
Skutečnost	**Platí H_0**	Správné rozhodnutí Spolehlivost Ppt = 1-α	*Chyba I. Druhu* Hladina významnosti Ppt = α
	Platí H_a	*Chyba II. Druhu* Ppt= β	Správné rozhodnutí Síla testu Ppt = 1-β

Logicky je cílem co nejmenší počet chybných rozhodnutí, tudíž je požadována velká hodnota síly testu a co nejmenší hladina významnosti. Obě hodnoty jsou vzájemně propojené, pokud snížíme prvek β, zvýší se hladina významnosti. Pro lze zvolit určitý kompromis a předem definovat velikost chyby, jakou je možné akceptovat. Nejčastěji se volí pravděpodobnost chyby I. druhu α na hodnotu 5% (0,05)nebo 1% (0,01) což odpovídá 95% (99%) jistotě správného rozhodnutí.[22]

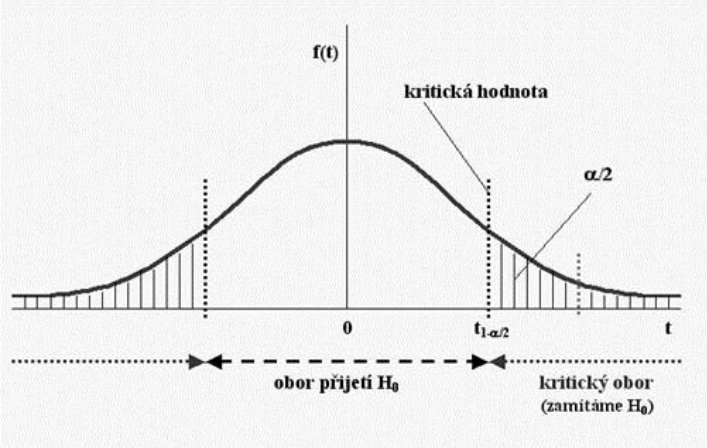
Rozhodnutí o přijetí nebo odmítnutí nulové hypotézy se provádí pomocí výpočtu testovacího kritéria. Pro výpočet testovacího kritéria existuje mnoho různých metod, jejich výběr závisí na typu rozdělení a typu testované hypotézy. Mezi nejpoužívanější patří F-test (v kap. ANOVA) a takzvaný studentův t-test. [21]

Testovací kritérium pro t-test se řídí vztahem:

$$t = \frac{|\bar{x} - \mu|}{\sqrt{\frac{n}{s^2}}} \tag{15}$$

μ- střední hodnota výběrového souboru

Při rozhodování o platnosti nulové hypotézy se využívá rozdělení oboru hodnot testovacího kritéria do dvou intervalů: do oboru přijetí a do oboru kritického, kdy je testovaná hypotéza H_0 zamítnuta. Kritické hodnoty v intervalu jsou specifické hodnoty pro dané rozdělení a jejich hodnoty jsou uvedeny ve statistických tabulkách, kromě typu rozdělení závisí na zvolené hladině významnosti α.



Obrázek 18: Obor kritický a obor přijetí [21]

Závěr testování

Porovnáním testovaného kriteria a kritických intervalů je dosaženo hledané odpovědi, zda přijmout či zamítnout nulovou hypotézu. Spadne-li hodnota testovaného kritéria do kritického oboru, existuje důkaz pro nepřijetí hypotézy H_0 a obdobně, pokud se hodnota nachází v oboru přijetí, nulovou hypotézu nezamítáme, tedy lze tvrdit, že platí.

Hodnocení lze provádět i pomocí parametru p-value, jedná se o převedení testované statistiky do pravděpodobnostního měřítka. Hodnota p uvádí jaká je minimální hladina významnosti α na níž by mohla být zamítnuta daná nulová hypotéza v rámci výběrového souboru. Čím vyšší je hodnota p tím větší je výpověď náhodného výběru proti přijetí H_0. Dle nejběžněji požívaných hladin významnosti 0,01 a 0,05 rozhoduje se o zamítnutí nulové hypotézy dle následující tabulky:

Tabulka 7: Hodnoty "p" [15]

p < 0,01	Statisticky významný rozdíl – zamítnuto H_0
0,01 < p < 0,05	Nerozhodná oblast, doporučuje se test zopakovat s větším rozsahem výběru
p > 0,05	Statisticky nevýznamný rozdíl – není zamítnuto H_0
a> p	Zamítá se H_0
a< p	Nezamítá se H_0

Hodnota p tedy také vypovídá o tom, jak jsou si dané dva výběry podobné a jaký mezi nimi existuje rozdíl. Pokud je hodnota p menší než 0,01 (v některých případech volíme 0,05), lze tvrdit, že dané výběry jsou rozdílné a existuje mezi nimi minimální shoda.[22]

5. ANOVA

Metodu ANOVA (Analysis of Variance) lze využít zejména v etapě Analyzuj a Zlepši, pro výběr nejlepšího možného řešení z nabízených. Analýza variability slouží tehdy, pokud je třeba srovnávat tři a více různých souborů obsahující více prvků. Tedy testuje se na nulovou hypotézu H_0, zda je shodná se středními hodnotami ostatních výběrů: $\mu_0 = \mu_1 = \mu_2 \ldots \mu_k$.

Nejčastěji se zjišťuje statistická významnost určitého faktoru, který ovlivňuje nebo právě nemá žádný vliv na testovaný vzorek. Pokud je zamítnuta nulová hypotéza, přejímá se tím alternativní hypotéza H_1, tj. nachází se statisticky významný rozdíl středních hodnot minimálně mezi dvěma skupinami [26]

Jednofázová (One-way) ANOVA

Jednofázová ANOVA pracuje s vlivem pouze jednoho faktoru. Testuje, zda je střední výsledek odlišný od ostatních. Provedení analýzy rozptylu má několik následujících podmínek: rozdělení všech souborů musí být normální (Gaussovo), měření musí být vůči sobě nezávislá a přibližně shodné hodnoty rozptylů.

Variabilitu v testovaném výběru lze rozdělit na dvě základní skupiny:

1. Variabilitu mezi testovanými skupinami – předpokládá se, že případná variabilita bude způsobena vnějším faktorem.

2. Variabilitu uvnitř testovaných skupin - může se jednat o šum nebo přirozenou variabilitu způsobenou náhodnými jevy.

Analýza rozptylu ANOVA je vlastně srovnání míry odchylek uvnitř skupiny a mezi skupinami, což je prováděno pomocí výpočtu součtu čtverců:

$$\sum_{j=1}^{g}\sum_{i=1}^{n_j}\left(y_{ij} - \bar{\bar{y}}\right)^2 = \sum_{j=1}^{g} n_j\left(\bar{y}_j - \bar{\bar{y}}\right)^2 + \sum_{j=1}^{g}\sum_{i=1}^{n_j}\left(y_{ij} - \bar{y}_j\right)^2 \quad (16)$$

Celkový součet čtverců = SČ mezi skupinami + SČ uvnitř skupiny [9]

F - test

Porovnávání obou rozptylů, upravených o podíl stupně volnosti, se nazývá F – test, tím lze otestovat nulovou hypotézu o shodě těchto rozptylů. Vypočítaný koeficient se porovná s tabulkovými hodnotami a vynese se tvrzení o platnosti či zamítnutí nulové hypotézy.

Testování probíhá pomocí průměrných čtverců MS a stupně volnosti df dle následujícího vztahu:

$$MS = SS/df \tag{17}$$

SS … součet čtverců mezi skupinami/ uvnitř skupin

df….(degrees of freedom) - stupeň volnosti

Poté dostáváme vztah koeficientu F:

$$F = \frac{MS{-}mezi\ skupinami}{MS{-}uvnitř\ skupin} \tag{18}$$

Stupně volnosti [df] - je parametr testovaného kritéria s odpovídajícím rozdělením, hodnota je rovna počtu pozorovaných veličin, snížena o stupeň volnosti pro každý odhadovaný parametr. V jednofázovém ANOVA testu to tedy znamená o jeden stupeň.

Tabulka 8: ANOVA [27]

Zdroj variability	Součet čtverců SS	Stupeň volnosti df	Průměrný čtverec MS	Koeficient F
Mezi skupinami	$S_1 = \sum_{j=1}^{g} n_j(\bar{y}_j - \bar{\bar{y}})^2$	g -1	$M_1 = S_1/(g-1)$	$F = M_1/M_2$
Uvnitř skupiny	$S_2 = \sum_{j=1}^{g}\sum_{i=1}^{n_j}(y_{ij} - \bar{y}_j)^2$	N-g	$M_2 = S_2/(N-g)$	
Celkem	$\sum_{j=1}^{g}\sum_{i=1}^{n_j}(y_{ij} - \bar{\bar{y}})^2$	N-1		

p …počet skupin

N….celkový počet naměřených hodnot N= n . p

Přestože tyto hodnoty lze vypočítat ručně, nejčastěji se využívá k vypočítání ANOVA statistických softwarů. Stejně jako metoda R&R poskytuje informace o příčinách variability systému měření nebo měřidla.

Numerickou analýzu ANOVA je vhodné doplnit i grafickou analýzou. Mezi nejvhodnější grafické nástroje patří metoda zvaná znázornění interakcí. Na tomto grafu lze pozorovat, zda je interakce je významná či ne a tak potvrdit data získaná ve F-testu. Realizuje se spojením bodů pro každý průměr každého operátora pro každý prvek, tím vznikne takový počet lomených přímek, kolik máme operátorů. Interpretace je taková, že pokud jsou přímky vzájemně rovnoběžné, pak neexistuje žádná interakce. Nejsou-li přímky rovnoběžné, jedná se o významnou interakci, ta je tím významnější, čím je úhel mezi nimi větší.

Zhodnocení

Statistické nástroje T-test a ANOVA vykazují mnoho podobných prvků. Tyto nástroje mají za účel pomoci přiklonit se k jedné z testovaných hypotéz pomocí statistického testu. Analýzy ANOVA jdou již velmi lehce provádět pomocí statistických softwarů, kde působí ANOVA jako jedna ze základních technik. Nezastupitelné využití má tam, kde se vyskytují velké soubory dat, ve kterých je třeba ověřit či zamítnout vliv nějakého faktoru. Nebezpečí může nastat v případě, že soubor dat není dostatečně obsáhlý nebo stabilní, proto je vhodné ho dříve otestovat nástroji zmíněnými v předchozí kapitole.

Jak metoda 6σ, tak metoda DFSS jsou techniky, které vyžadují týmovou spolupráci. Právě pro práci v týmu jsou navrhnuty nástroje, jako je pětkrát proč či využívání diagramů typu rybí kost. Správně vedený brainstorming ve správně složeném týmu může vykázat velmi kvalitní výsledky, které by jedinec jen těžko zopakoval.

Tabulka 9: Porovnání a zhodnocení

Metoda ⇨ / Nástroj ⇩	Six Sigma					Design for Six Sigma				
	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	I Zlepši	C Kontroluj	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	D Navrhni	V Ověř
5 x Proč	●		●			●		●		
Paretova analýza			●	●				●		
Diagram příčin a následků	●					●				
Testování hypotéz			●					●		
Korelace a regrese			●		●			●		●
ANOVA			●							●

4. Improve – Zlepši

Fáze „Zlepši“ logicky navazuje na fáze měř a analyzuj. Poté, co byla data naměřena a analyzována, dochází k fázi skutečné změny. V této fázi lze aplikovat již popsanou metodu ANOVA pro výběr nejlepšího řešení. Jako jeden z nejvíce využívaných nástrojů patří Design of Experiments.[29]

DOE - Design of Experiments

DOE – Design of Experiments je silný nástroj používaný v etapě Improve – zlepši tak i v etapě Analyzuj. Tato metoda je požívána k odhalení vlivu jednotlivých faktorů a jejich vzájemných interakcí působících na výstup. Hlavím cílem metody DOE je tedy najít faktory, které nejvýznamněji ovlivňují výstup nebo výstupy a naopak faktory, které jsou zanedbatelné. V závěru DOE by měla být výstupem daná funkce Y=f(X), která matematicky popisuje zkoumaný proces nebo produkt s takovými parametry, které jsou nejvýhodnější.[20]

Samotný experiment ovlivňuje velký počet vlivů, jako například ekonomické či časové hledisko. Je pravděpodobné, že při provádění experimentování dojde k částečnému nebo

úplnému přerušení výroby, proto je snaha experiment provádět co nejrychleji a nejpřesněji i z důvodu, že během delší časové prodlevy může dojít ke změnám v procesu.

Návrh experimentů se dělí podle toho, zda se provádí takzvané plné faktoriální experimenty nebo zkrácené faktoriální experimenty. Plné faktoriální experimenty mají tu výhodu, že dávají přesné matematické modely o fungování procesu a poskytují informace o vlivu všech faktorů a jejich interakcí. Nevýhodou může být velká časová náročnost a s tím i větší zatížení lidských a výrobních zdrojů, což se jistě promítne i do ekonomické výhodnosti.

Postupů při aplikaci DOE je mnoho, nejefektivnější je provádět návrh experimentů pomocí statistického softwaru. Zejména plný faktoriální experiment je náročný na přípravu a výpočet, jelikož se zkoumají všechny kombinace vlivů na výsledek. Tento počet běhů udává vzorec: $2^k = \#$, kde k je počet faktorů a číslo 2 počet úrovní.

Zjednodušený výpočet DOE bez použití statistického softwaru vypadá následovně: Jsou–li 3 faktory A,B,C je nutno provést $2^3 = 8$ experimentů pro dvouúrovňovou analýzu. Následně se ke každému z faktorů přiřadí hodnoty spodní a horní úrovně. V teoretickém příkladě lze použít hodnoty +1 nebo -1, když nominální hodnota je rovna „0“. +1 znamená například odchylku +5% od nominální hodnoty, -1 znamená odchylku -5% od nominální hodnoty „0“ (hodnoty a význam horních a spodních úrovní se volí individuálně pro každý experiment zvlášť) [20, 21]

Do tabulky se uvádí všechny možné kombinace, které mohou nastat a je jich vliv na výstup Y.

Tabulka 10: DOE [20]

A	B	C	Výstup Y
-1	-1	-1	Y_1
1	-1	-1	Y_2
-1	1	-1	Y_3
1	1	-1	Y_4
-1	-1	1	Y_5
1	-1	1	Y_6
-1	1	1	Y_7
1	1	1	Y_8

Obvykle již v této fázi je možné rozpoznat, jaká kombinace faktorů vykazuje nejlepší výsledek. Pro lepší přehlednost a porozumění, jaké faktory jsou klíčové a jaké interakce nejdůležitější, se vypočítají jednotlivé efekty faktorů na výsledek. Pro faktor C se tedy spočítá průměrné hodnota výstupu nejprve při hodnotě -1 a posléze + 1:

$$Y_{av}^{-1} = (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)/4$$

$$Y_{av}^{+1} = (Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8)/4$$

$$S_c = Y_{av}^{-1} - Y_{av}^{+1} / 2 \quad [20] \quad (19)$$

Parametr S_c určuje nominální hodnotu efektu faktoru. Stejný výpočet je proveden i pro elementy A a B a pro jejich interakce. Tedy počítáme s těmi hodnotami v tabulce, které mají stejnou hodnotu: AB, AC, BC a ABC. Faktory s nejvyššími hodnotami efektů jsou zároveň ty, které mají největší vliv na výsledek. Výsledky se vypíšou do tabulky:

Tabulka 11: Hodnoty elementů [20]

Faktory a interakce	Hodnoty efektů
A	S_a
B	S_b
C	S_c
AB	S_{ab}
AC	S_{ac}
BC	S_{bc}
ABC	S_{abc}

Z těchto hodnot sestavíme rovnici matematick0ho modelu :

$$Y = Y_0 + A * S_a + B * S_b + \cdots + A * B * C * S_{abc} \quad (20)$$

V metodě DOE jsou velmi dobře použitelné grafické nástroje pro zobrazování dat, jako například Paretův diagram, který jasně zobrazuje, které elementy a faktory jsou zásadní. Dalšími jsou klasické přímkové grafy, odhalující interakci mezi jednotlivými faktory .[20]

5. Control – Kontroluj

Etapa Kontroluj má za cíl ověřit, že provedené změny opravdu přinesly řešení a to ne jen náhodné, ale trvalé a kvalitní. V rámci této etapy je nutné ověřit všechny provedené změny a ověřit jejich dodržování. Zpětná vazba je důležitou součástí metod řídících se principem Six Sigma.

1. Poka-yoke

Jednou z nejosvědčenějších technik pro prevenci se postupem času stala původem japonská metoda zvaná Poka – Yoke, spadající mezi takzvané RDM – Robust Design Methods, čili do metod, které se vyznačují svojí pevností a robustností vůči vzniku chyb. Princip je založen na prevenci. Již v samotné výrobě by nemělo být možné udělat chybu, která by se jinak posouvala dále až do finálního výrobku. Realizace může být provedena pomocí signálních zařízení nebo čistě mechanických, zabraňujících nežádoucím úkonům ze strany obsluhy. Jedním příkladem za všechny může být například klasický tvar USB konektoru, který není možné zapojit do protilehlého dílu opačným směrem. Mechanický tvar obou dílů je nastaven tak, že ke špatnému zapojení nemůže dojít. [29]

2. FMEA

Počátky nástroje pro řízení kvality FMEA se datují již do druhé poloviny minulého století, kdy jej v neformální podobě používal v USA národní úřad pro letectví a kosmonautiku NASA. Později začaly metodu FMEA používat americké automobilky a v automobilovém průmyslu našla i svoje první začlenění do tamních norem. [19]

FMEA - Failure Mode Efekt Analysis neboli Analýza možností vzniku vad a jejich následků je systematická metoda pro identifikování a předcházení problémů procesu nebo produktu ještě před tím než nastane, což je i z ekonomického hlediska nejpříznivější varianta. FMEA je tedy především zaměřená na prevenci a na zvětšení bezpečnosti a zákaznické spokojenosti.

FMEA nachází využití ve velké většině etap DFSS jelikož sama o sobě svoji strukturou a svým principem odpovídá principu DFSS. FMEA se tedy nejvíce využívá v raných fázích vývoje produktu či procesu, přesto je v určitých případech využitelná na již existujícím produktu.[19,29]

Myšlenka metody FMEA je poměrně jednoduchá a nevyžaduje žádné statistické výpočty. Princip je založen na kompletním popsání všech možných případů, kdy může dojít k selhání nebo chybě, ať již se jedná o lidský faktor nebo mechanickou závadu přímo na produktu či výrobním zařízení.

Analýzy typu FMEA lze rozdělit do dvou základních skupin:

Procesní FMEA - analyzuje procesy, ve kterých výrobky vznikají

Konstrukční FMEA - analýza samotných výrobků jejich prvků a součástí

FMEA má čtyři fáze:

1. Analýza současného stavu
2. Prozkoumání všech možných vad a jejich následků při užívání výrobku
3. Hodnocení kritických faktorů současného stavu

   Hodnocení faktorů: pravděpodobnost výskytu vady

   Závažnost vady

   Pravděpodobnost odhalení vady

4. Návrh preventivních opatření

Cíl je snížit riziko výskytu a zvýšit pravděpodobnost odhalení dalšího nedostatku. Poslední fázi by měl vykonat stejný tým jako všechny předešlé a pomocí opětovného hodnocení získat informace, zda se daný proces/produkt zlepšil či nikoli.

Hodnocení současné stavu probíhá z celkově tří hledisek: Pravděpodobnost výskytu vady, Závažnost vady, Pravděpodobnost odhalení vady. Každý z těchto faktorů je hodnocen podle míry rizika od jedné do deseti podle následující tabulky: [19]

Tabulka 12: Hodnocení rizik [19]

Hodnocení	Výskyt	Závažnost	Pravděpodobnost odhalení
1	≤0,01 na tisíc prvků = nepravděpodobný výskyt	Nepravděpodobný vliv	Téměř jistota
2-3	0,1-0,5 na tis. = malý výskyt	Malá	Vysoká pravděpodobnost
4-6	1-5 na tis. = občasný výskyt	Středně významná	Střední
7-8	10-20 na tis. = vysoký výskyt	významná	Velmi malá
9-10	≥50 na tis. = jistý výskyt	Nebezpečná	Absolutní nejistota

Součin jednotlivých faktorů udává koeficient zvaný RPN – risk priority number: RPN = Výskyt * Závažnost* Pravděpodobnost

Toto číslo se tedy pohybuje v intervalu 1 až 1000, ale měla by se věnovat pozornost každému individuálnímu případu, kdy je hodnota daného rizika větší než 4.

Díky tomuto hodnocení by měla být stanovena priorita, jak se k daným rizikům bude dále přistupovat. Po provedení změn by se mělo hodnocení znovu zopakovat. Z daných výsledků bude jasné, zda došlo nebo nedošlo k požadovanému zlepšení. [19,25]

Zhodnocení

Jednou z hlavních silných stránek metody DOE je přesný matematický popis vlivů ovlivňujících proces nebo produkt. Ve spojení s výpočetní technikou je tak metoda schopná zpracovat velké množství dat, např. automaticky pořízených a podat velmi přesný výstup vypovídající o chování procesu a vlivech na něj působících. Slabou stránkou může být velká časová náročnost při provádění experimentů, která často vyžaduje i velké zapojení lidských zdrojů. DOE na výstupu využívá mnoho grafických nástrojů, jedním z hlavních je Paretův diagram, na kterém je dobře patrné, které vlivy jsou prioritní a žádají si pozornost.

Metoda FMEA se neopírá o jakoukoli statistiku, jde o čistě fundamentální nástroj pro prevenci defektů. Tento princip se využívá jak při návrhu nových výrobků/ procesů, tak v již zaběhnuté výrobě. Největší hrozbou může být pouze z povinnosti vyplněná FMEA tabulka (v automobilovém průmyslu je FMEA nařízena dle ISO14969)[19], která nejenže neplní svůj účel, ale je kontraproduktivní a v extrémních případech i zdraví nebezpečná.

Poka–Yoke je využitelná v celé řadě případů výroby, dělá design robustnější a tak minimalizuje počet eventuálně vyskytnuvších se chyb na úplné minimum. Hrozba může nastat v případě neuvážené aplikace, respektive využití tohoto principu za únosné limity. V tom případě zaměstnancům pouze stěžuje práci a efektivita původně dobré myšlenky rychle klesá.

Tabulka 13: Porovnání a zhodnocení

Metoda ⇨ / Nástroj ⇩	Six Sigma					Design for Six Sigma				
	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	I Zlepši	C Kontroluj	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	D Navrhni	V Ověř
DOE – Design of Experimets			●	●				●	●	
FMEA					●					●
Poka -yoke					●				●	●

7. Případová studie

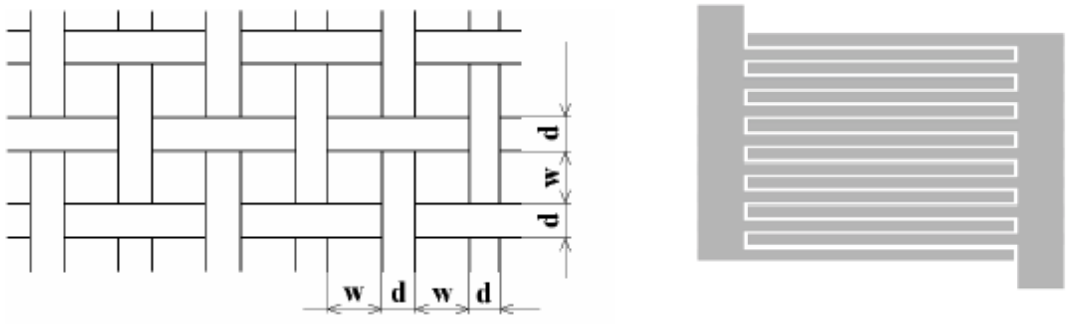
1. Úvod do problematiky

Případová studie této diplomové práce navazuje na projekt probíhající na Západočeské Univerzitě v Plzni, který je řešen na Katedře technologií a měření. Tato studie si klade za cíl demonstrovat vybrané nástroje z metod DMAIC/DMADV v praxi. Vybraný projekt řeší vývoj nízkonákladové technologie výroby tištěných vlhkostních senzorů, které by měli být v budoucnosti implementovány do obleků členů hasičských sborů a dalších aplikací. Díky práci v extrémních podmínkách, ve velkém žáru, dochází k přehrávání lidského organizmu a nadměrnému vypařování tekutin a změně tepelné kapacity obleku. Takový stav by měl vlhkostní senzor zachytit a upozornit uživatele na blížící se nebezpečný stav, stejně jako podat varovný signál centrále. [30,31]

Vlhkostní senzor

Princip vlhkostního senzoru spočívá ve využití změny elektrolytické vodivosti v případě přítomnosti molekul vodní páry. Senzor je vytvořen na keramickém substrátu Al_2O_3 a je opatřen interdigitálními elektrodami ze zlata. Šířka vodivých cest je 50 μm stejně jako izolační mezera mezi nimi. Tloušťka elektrod je z ekonomických důvodů omezena na 400

nanometrů. Důvody pro volbu zlatých elektrod spočíval ve skutečnosti, že zlato je velmi chemicky stabilní prvek, je zde tedy předpoklad, že nebude reagovat s organickou látkou. Na substrát s natištěnými interdigitálními elektrodami je nanesena organická senzitivní vrstva ftalocyaninu, která vykazuje výbornou citlivost na vlhkost. Tuto vrstvu chrání další tenká vrstva ochranného filmu. Ta má za účel chránit první vrstvu ftalocyaninu před vnějšími vlivy. Ke stabilizaci vrstvy ftalocyaninu byla použita polymerní vrstva, která je odolná proti působení vody a přitom má minimální vliv na senzorické vlastnosti senzoru.



Obrázek 19: w,d = 50µm interdigitální a hřebínkové uspořádání IDE [30]

První část případové studie se zabývá výrobou elektrodového systému, tedy substrátu s natištěnými vodivými cestami v interdigitálním uspořádání. Pro hromadnou výrobu a výslednou cenu výrobku je výhodné, pokud nejsou použity složité vakuové procesy a fotolitografie, a aplikují se nízkonákladové depoziční technologie. Z tohoto důvodu byla pro výrobu interdigitálních elektrod využita technologie pokročilého sítotisku. Požadovaný výstup jsou elektrodový systém s hřebenovým (interdigitálním) uspořádáním s maximální šířkou vodivých cest do 50µm a tloušťkou 400 nm. Důležitá je též reprodukovatelnost v hromadné výrobě.

Vliv na kvalitu elektrodového systému má celá řada faktorů. Úkolem této práce je najít ideální kombinaci těchto vlivů s nejpříznivějším vlivem na výslednou kvalitu.

.**Druhá část** případové studie se týká výběru vhodného způsobu stabilizace organické senzitivní vrstvy senzoru. Jak bylo zmíněno výše ftalocyanin vykazuje výborné výsledky v citlivosti na molekuly vodní páry, jeho nevýhoda ovšem je, že molekuly vody jej rozpouštějí a materiál tedy velmi rychle degraduje. Z tohoto důvodu se využívá svrchní organické vrstvy, která má za úkol chránit spodní vrstvu ftalocyaninu proti vnějším vlivům a zejména nepropouštět molekuly vody. Volba toho materiálu má ovšem významný vliv na

změnu impedance senzoru. Z tohoto důvodu, bylo testováno více různých organických látek.[30]

1. Definice problému

Tabulka 14: SIPOC

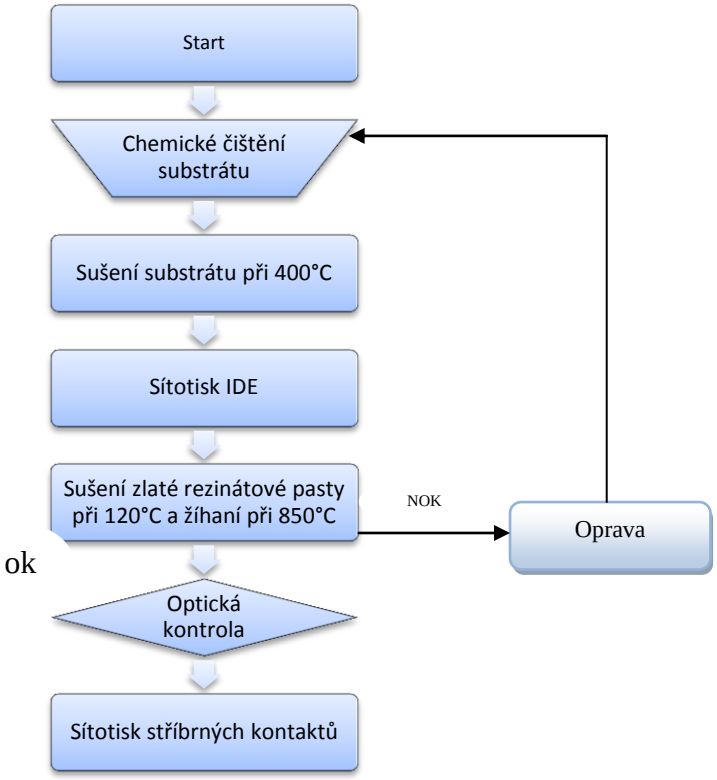
Dodavatelé	Vstupy	Požadavky procesu	Proces	Výstup	Požadavky zákazníka	Zákazník
Vývojové oddělení (návrh IDE topologie)	Návrh - CAD	Vhodná topologie L/G=1:1	Uveden v samostatném obrázku č.21	Natištěné interdigitální elektrody (IDE) s šířkou dráhy 50µm a tloušťkou vrstvy pod 400nm	Přesná šířka drah 50 µm	Výroba
Příprava filmových předloh	Filmové předlohy	Přesné předlohy		Vhodné parametry těrky (rychlost, tlak, sklon)	Tloušťka vrstvy do 400nm	Tisk
Výroba sít pro ultra jemný tisk	Síto pro ultra-jemný tisk	Přesnost motivu síta ±50µm		Zpráva dokumentující dodržení předespaného		
Dodavatel Au pasty, rezináty - HERAUS	Vhodná pasta	Vhodné reologické vlastnosti pasty (např. viskozita)		Parametry toku a vstupních materiálů		
Dodavatel substrátů	Korundový Substrát 96%	Kvalitní přesné substráty				

Jak již bylo zmíněno výše, cílem jsou požadované parametry na rozměry interdigitálních elektrod a z toho plynoucí know-how použitelné v hromadné výrobě při zajištění reprodukovatelnosti. Pro definici požadavků je využito digramu SIPOC (kap.3.1):

Z digramu SIPOC je zřejmé, kdo jsou interní dodavatelé, zákazníci a jaké jsou jejich požadavky na proces. Na první pohled je zřejmé, jaké parametry jsou kritické pro spokojenost zákazníka. Mezi dodavateli je uvedeno vývojové oddělení, které má za úkol vytvořit vhodnou topologii IDE – interdigtálních elektrod, dle požadavků procesu L/G = 1:1 – tedy poměr vodivých a izolačních cest ve stejném rozměrovém poměru. Mezi dalšími požadavky na dodavatele patří ultra-jemné síto pro sítotisk nebo korundový substrát. Do položky zákazníci

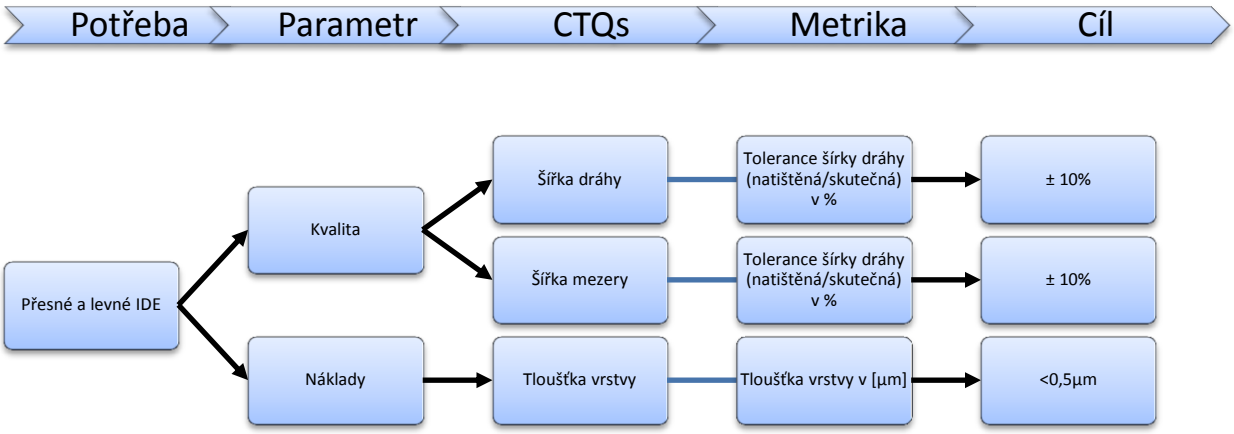
je zařazena „výroba“ ve smyslu hromadné produkce a „tisk“ , kde se očekává popis výrobního postupu.

V samém středu diagramu se nachází vývojový diagram pro výrobu elektrodového systému, z důvodu nedostatku místa v grafu SIPOC je uveden zvlášť na obrázku 21.



Obrázek 20: Diagram výroby

Pro určení prioritních znaků a definování klíčových nároků byl využít strom CTQ – Critical to Quality, tedy kritický pro kvalitu. Ten podává jasnější pohled na problematiku jednoduchým rozfázováním problému na jednotlivé úseky. Na obrázku č.22 lze pozorovat, jaké parametry jsou kritické pro požadovanou potřebu. V tomto případě jsou to kvalita a náklady, které dále blíže určuje skupina CTQs, která uvádí klíčové požadavky na výstup. Skupiny cíle uvádí požadované hodnoty na výstupu procesu, v případě tohoto experimentu toleranci šířky vodivých drah, mezer a tloušťky vrstvy v mikrometrech.



Obrázek 21:CTQ [33]

Po definování požadavků na výstupu je třeba upřesnit, jaké faktory mají vliv na výsledek. Faktory ovlivňující kvalitu sítotisku lze rozdělit do pěti hlavnívh skupin:

Fakotry působící na těrku: tvrdost, tvar a velikost hrany, materiál, její délka

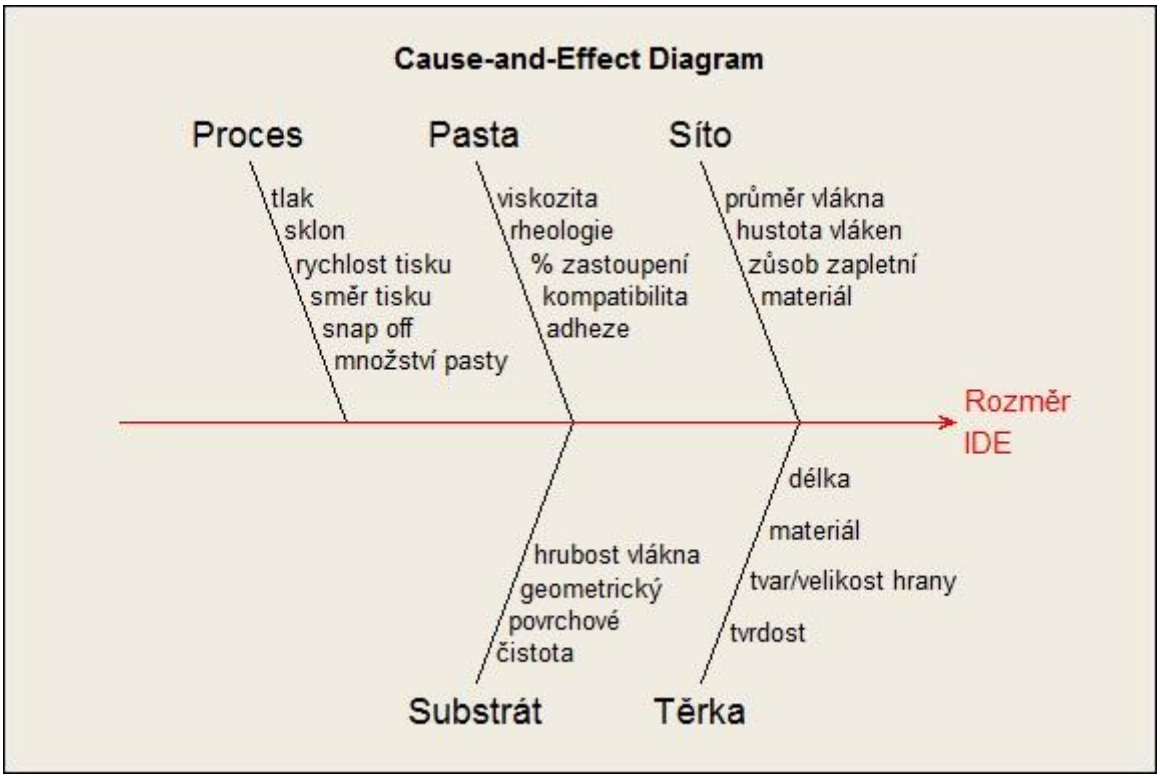
Faktory působící na pastu: viskozita, reologické vlastnosti, procentuální zastoupení pevných částic, homogenita, hustota, adheze, kompatibilita s materiálem povrchu substrátu.

Faktory působící na síto: průměr vlákna, hustota, způsob zapletení, materiál vlákna, velikost vzoru ku velikosti rámu.

Faktory působící na substrát: čistota, povrchové napětí, geometrický tvar, hrubost povrchu

Proces tisku: tlak a sklon těrky, rychlost tisku, směr tisku, odtrh (anglicky Snap-off) vzdálenost, množství pasty před těrkou. [31]

Pro přehledné zapsání vlivů jednotlivých faktorů podle jejich vlivu na daný prostředek je využito grafu příčin a následků. Obr. 23.



Obrázek 22: Diagram příčin a následků[30]

2. DOE – Návrh experimentů

Pro testování vlivů a interakcí bylo zvoleno metody DOE – Design of Experiments a čtyř nejdůležitejších faktorů ovlivňující výslednou kvalitu, dle následující tabulky:

Tabulka 15.1: DOE - horní a spodní úrovně

Faktor	Jednotky	Spodní úroveň	Horní úroveň
Tlak těrky	kg	4	7
Rychlost těrky	mm/s	25	120
Odtrh - Snap off	mm	0,75	2
Vrstva emulze	µm	3	9,6
Zaplavení	ANO/NE	NE	ANO

Pro plnou faktoriální analýzu při dispozici 5 faktorů o dvou úrovních je třeba provést 2^5 pokusů, tedy celkem 32. Takovéto množství pokusů je rovno kombinaci všech možných kombinací inertakcí faktorů mezi sebou a díky tomu si lze udělat spolehlivou představu o jejich chování.

Teoretická část metody DOE byla již popsána v kapitole 6.1., proto zde bude uvedena pouze praktická část zpracovaná pomocí statistického softwaru Minitab 14, za použití dat naměřených z projektu vývoje tištěného vlhkostního senzoru.

Prvním krokem při interpetaci dat by měl být vzorec popisující interakci chování faktorů na výslednou kvalitu, díky kterému je možno spočítat efekt faktorů při různých nastavení. Obecný vzorec pro popis modelu je následující: [20]

$$y = k + ax_1 + bx_2 + cx_3 + \cdots . ux_1x_2 \tag{8.1}$$

y – hodnota odezvy

a,b,c – regresivní koeficienty

x_1,x_2,x_3 – hodnoty faktorů

V případě studie bylo dosáženo těchto hodnot:

Tabulka 15.2: DOE - Minitab

Factorial Fit: Šířka elektrody versus Tlak na těrku; Rychlost těrky; ...

Estimated Effects and Coefficients for Šířka elektrody (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		61,294	1,011	60,62	0,000
a Tlak na těrku	1,875	0,937	1,011	0,93	0,368
b Rychlost těrky	0,300	0,150	1,011	0,15	0,884
c Vrstva emulze	-1,088	-0,544	1,011	-0,54	0,598
d Snap - off	-5,375	-2,687	1,011	-2,66	0,017
e Zaplavení	-4,613	-2,306	1,011	-2,28	0,037
ab Tlak na těrku*Rychlost těrky	0,763	0,381	1,011	0,38	0,711
ac Tlak na těrku*Vrstva emulze	3,500	1,750	1,011	1,73	0,103
ad Tlak na těrku*Snap - off	-0,087	-0,044	1,011	-0,04	0,966
ae Tlak na těrku*Zaplavení	0,950	0,475	1,011	0,47	0,645
bc Rychlost těrky*Vrstva emulze	1,375	0,687	1,011	0,68	0,506
bd Rychlost těrky*Snap - off	2,163	1,081	1,011	1,07	0,301
be Rychlost těrky*Zaplavení	2,050	1,025	1,011	1,01	0,326
cd Vrstva emulze*Snap - off	-4,700	-2,350	1,011	-2,32	0,034
ce Vrstva emulze*Zaplavení	-2,463	-1,231	1,011	-1,22	0,241
de Snap - off*Zaplavení	-4,400	-2,200	1,011	-2,18	0,045

S = 5,71985 R-Sq = 65,99% R-Sq(adj) = 34,11%

Takto je sestavená tabulka pomocí softwaru Minitab 14.

První sloupec popisuje vypočítaný efekt faktoru. Tedy jeho odezva na změnu z -1 na +1. Druhý sloupec „Coef“ zahrnuje regresní hodnoty faktorů a jejich interakcí.

Poslední soupec obsahuje hodnoty statistické významnosti, již popisované p-value.

Pro sestavení matematicého modelu procesu použijeme sloupec s regresními koeficienty:

$$šířka\ IDE = 61{,}294 + a * 0{,}937 + b * 0{,}150 + c * (-0{,}544) + d * (-2{,}687) + e * (-2{,}306) + ab * 0{,}381 + ac * 1{,}75 + ad * (-0{,}044) + ae * 0{,}475 + bc * 0{,}687 + bd * 1{,}081 + be * 1{,}025 + cd * (-2{,}35) + ce * (-1{,}231) + de * (-2{,}2) \quad (8.2)$$

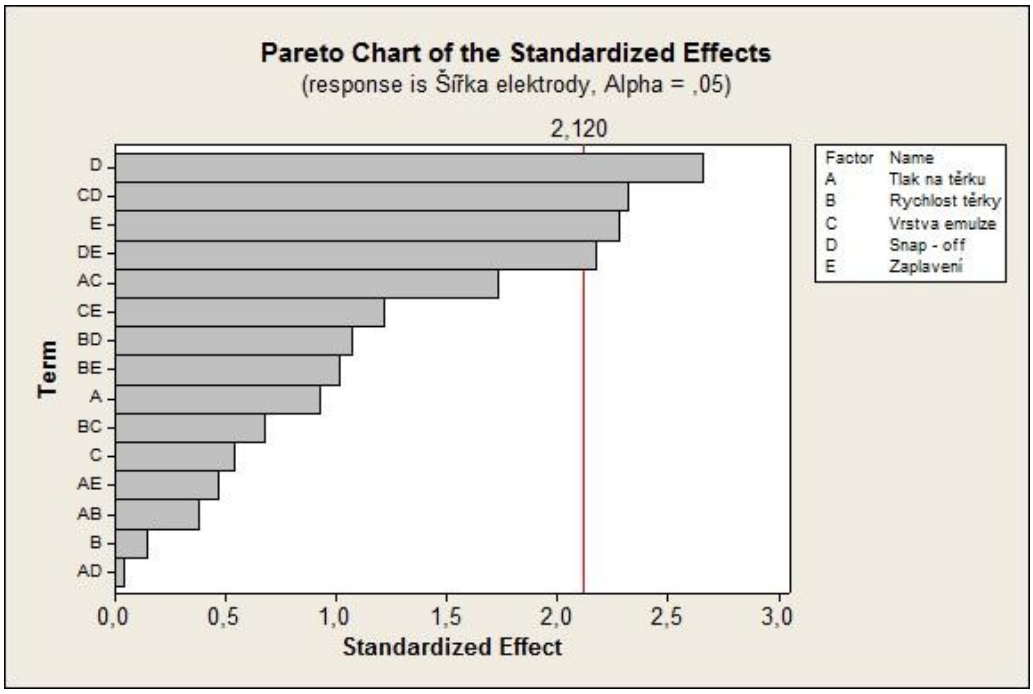
Takto sestavená rovnice popisuje model procesu, dosadí-li se hodnoty faktorů, vyjde přibližná výsledná šířka interdigitální elektrody.

Dalším významným ukazatelem je hodnota parametru p v posledním sloupci tabulky 15.2. Jak bylo uvedeno v teoretické části (str.37), kritická hodnota potvrzující statisticky významný rozdíl je hodnota $p < 0{,}01$. Podle toho měřítka se této kritické hodnotě nejvíce blíží hodnota v řádku faktoru d – Snap off, čili velikost vzdálenosti mezi sítem a substrátem při tisku. Hodnoty větší než $p<0{,}05$ spadají do části statisticky méně významných faktorů. Celkovou vypovídající hodnotu udává koeficient R-Sq(adj), jedná se o koeficient mnohonásobné determinace, který říká, na kolik jsou naměřené hodnoty vysvětlitelné pomocí manipulace s jednotlivými faktory a na kolik je vypočítaný matematický model směrodatný.

Hodnota 34,11% je poměrně nízká, lze ji vysvětlit vysokým šumem v měření.

Z této analýzy lze vypozorovat, že některé faktory nebo interakce jsou nepodstatné. Proto můžeme běh výpočtu zopakovat s nižším počtem z nižšího počtu faktorů.

Jedním z významných nástrojů pro určení a oddělení důležitých procesů a méně podstatných procesů je Paretův diagram. Je patrné jaké faktory a interakce mají zásadní vliv na výstup. Podle obrázku má skutečný vliv na výstup zejména vzdálenost odtrhu (snap-off) a jeho interakce s tloušťkou vrstvy nanesené emulze.



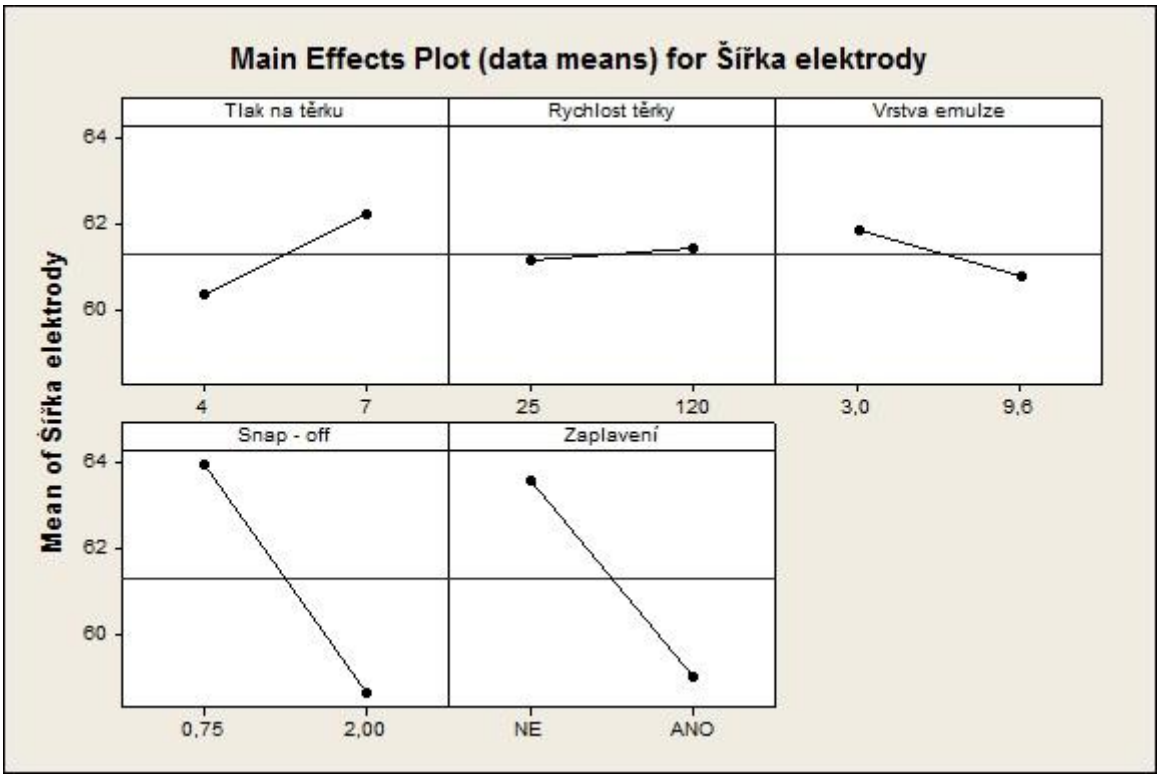
Obrázek 23: Paeretův diagram

V tabulce č.15.2, ve druhém sloupci jsou uvedeny efekty faktorů. Jedná se o efekty faktorů působící na výstup procesu. Vypočítají se jako průměr odezev pro faktory nacházející se na horní úrovni pro faktor nastavený na dolní úroveň. Algoritmus programu Minitab, tedy počítá podle následujícího vzorce:

$$efekt\ faktoru\ A = \overline{A2} - \overline{A1} \tag{8.3}$$

Bere se tedy vždy průměr výsledků pokusu při nastavení faktoru na spodní úroveň a od něj se odečítá průměr výsledků pokusu při nastavení stejného faktoru na jeho horní úroveň. Velikost a směr této změny nám popisuje chování odezvy daného faktoru na výsledek.

Pro znázornění jednotlivých efektů jsou použity grafy, znázorňující chování jednotlivých faktorů na výstup (zatím bez vlivu interakcí). Přímky, stoupající zleva doprava (vzestupně), představují kladné efekty a naopak, přímky opačného sklonu představují záporné efekty. Počáteční a koncové body přímek předabují dané průměry pro horní (dolní) úroveň.

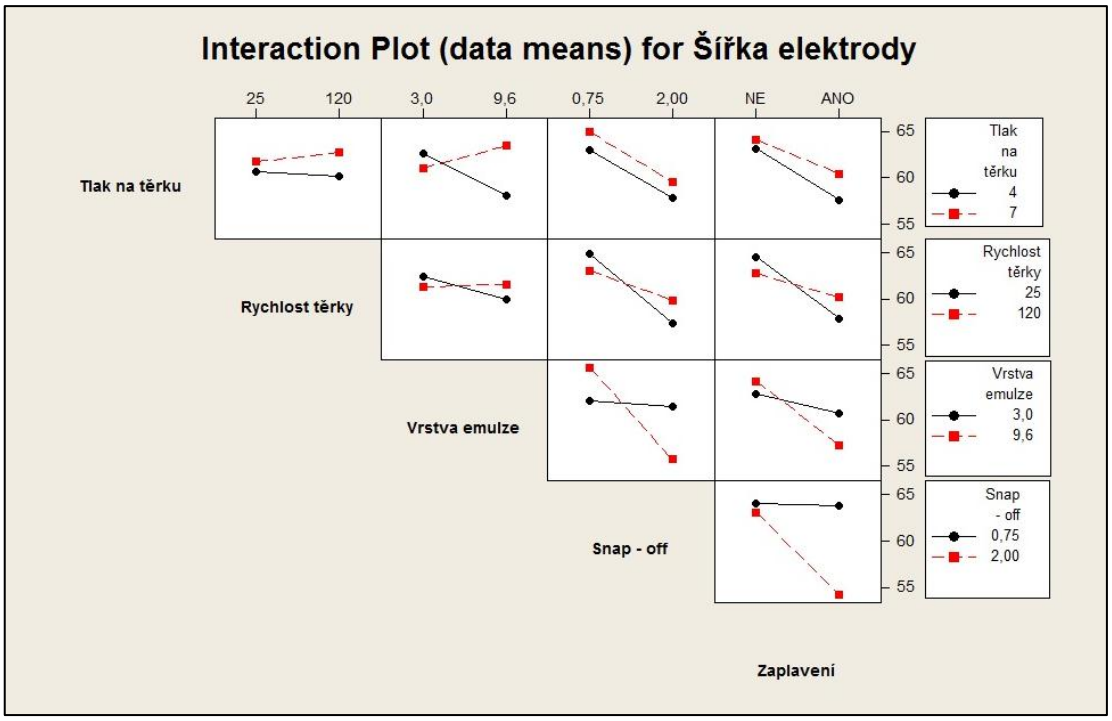


Obrázek 24: Graf efektů faktorů

Podle grafu č.25 je možné potvrdit data z Paretova diagramu, největší vliv na výstup mají faktory „Snap-off“ a míra zaplavení. Pokud bychom zanedbali interakce mezi jednotlivými faktory, pak by byla nejideálnější kombinace faktorů následující: A,B, - spodní úroveň, C,D,E – horní úroveň. Hodnota tohoto uspořádání byla naměřena 59,6 μm a jelikož bylo během měření dosaženo i menších hodnot, je pravděpodobné, že na výslednou šířku IDE, budou mít významný vliv také interakce těchto faktorů mezi sebou.

Pro znázornění interakce faktorů se využívá diagramu interakcí. Na diagramu č.26 lze pozorovat interakce faktorů druhého řádu pro všechny možné kombinace. Jsou-li přímky alespoň přibližně rovnoběžné, je to znak zanedbatelné interakce. Rozbíhají-li se přímky nebo se dokonce křižují, značí to existenci významného vlivu. Efekty interakcí se spočítají podobně jako efekty faktorů, tedy rozdílem průměrů dvojic faktorů pro dolní a spodní úroveň. Vztah popisuje následující vzorec:

$$efekt\ interakce\ AB = \overline{AB2} - \overline{AB1} = (průměr\ odezev\ AB\ v\ horní\ úrovni) - (průměr\ odezev\ AB\ ve\ spodní\ úrovni). \quad (8.4)$$



Obrázek 25: Graf interakcí faktorů

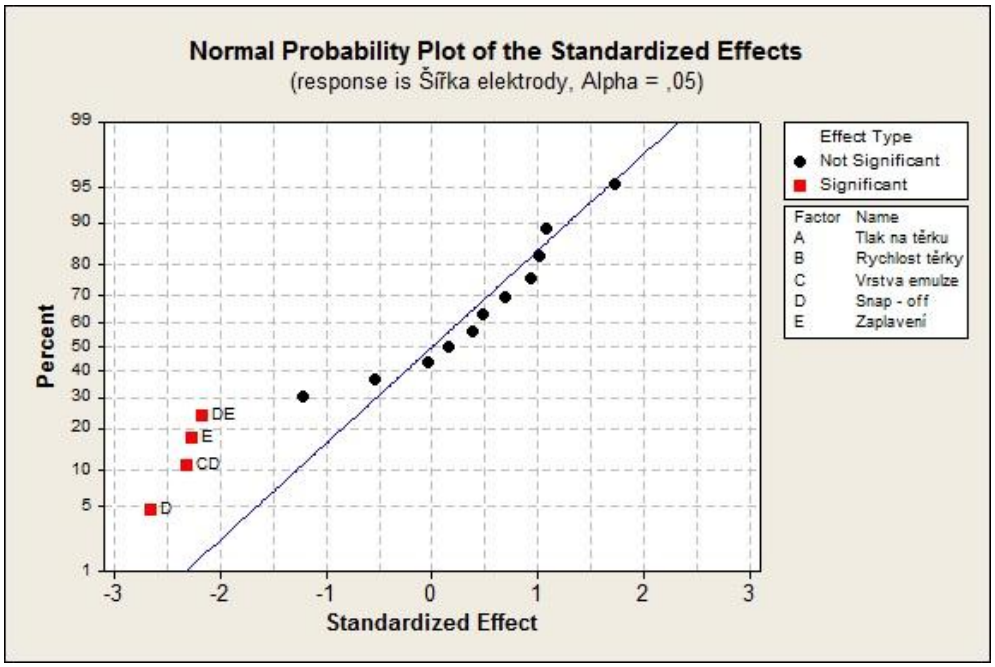
Poté tedy lze pozorovat jednotlivé interakce druhého druhu na diagramu č.26. Jako nejvýznamnější interakce lze vyhodnotit tlak na těrku s vrstvou emulze, vrstvu emulze na faktor snap-off a faktor snap-off na vliv zaplavení. Minimálně navzájem se ovlivňující faktory jsou ty, kde jsou úsečky téměř rovnoběžné, tedy tlak na těrku s faktorem snap-off nebo tlak na těrku s vlivem zaplavení. Cílem projektu bylo dosáhnout šíře interdigitální elektrody 50 µm. Z tohoto hlediska s využitím stejného diagramu lze navrhnout následující kombinaci faktorů

Tabulka 16: Hodnoty úrovní

horní úroveň	Zaplavení (ano), Snap-off, Vrstva emulze,
spodní úroveň	Rychlost těrky, tlak na těrku

Po srovnání s výsledky je při této kombinaci hodnota šířky IDE 52,2 µm a z naměřených dat se nejvíce blíží požadované hodnotě.

Další z důležitých grafů v analýze DOE je normální pravděpodobnostní diagram. Jeho princip spočívá v normálnosti rozdělení experimentálního šumu. Poukazuje na to, že i vnesený šum do měření má vlastnosti normálního rozdělení. To znamená, že v ideálním případě, při zakreslení do grafu, při patřičném množství dat, se bude podobat Gausově křivce. Poté bude vliv nejvýznamnějších faktorů ležet mimo tuto křivku.



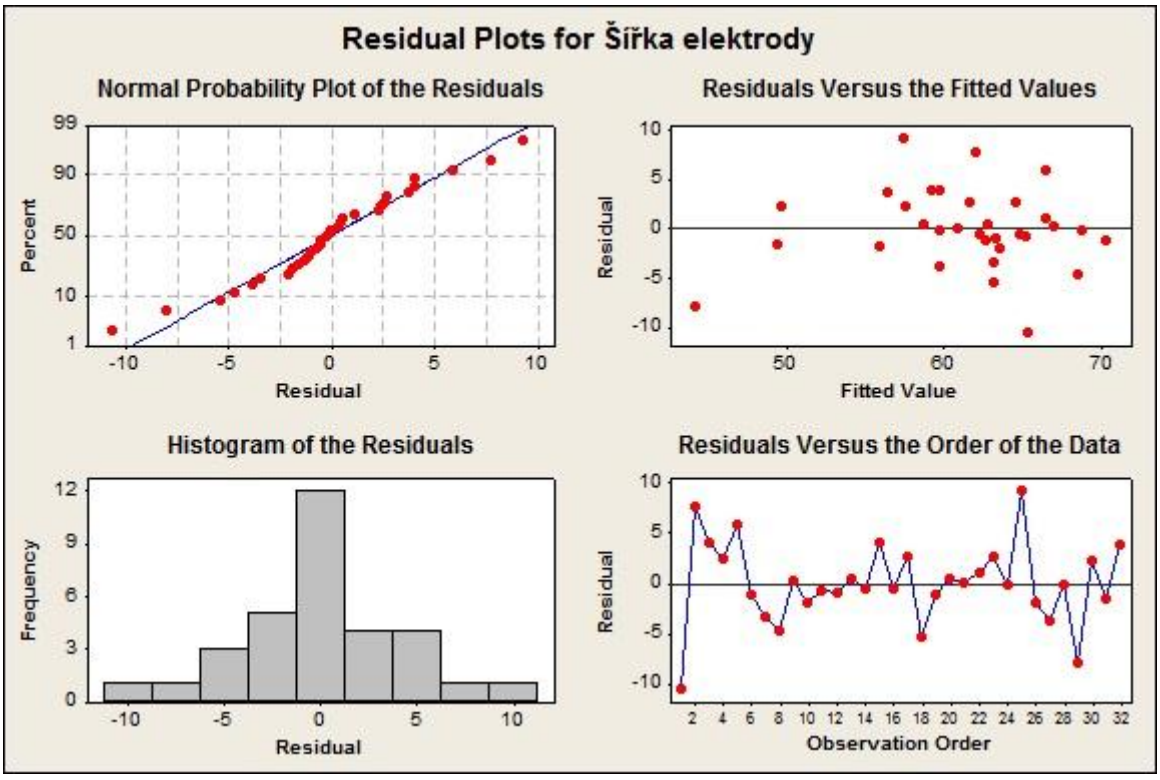
Obrázek 26: Diagram normálního rozložení

Na obrázku č.27 je patrné, že hodnoty ležící nejblíže přímce jsou zanedbatelné efekty a z velké pravděpodobnosti se jedná o šum. Naopak body červené barvy ve větší vzdálenosti od regresní přímky patří signifikantním faktorům. Zde vyšly jako nejvýznamnější faktory C a D a následně jejich interakce, což potvrzuje data získaná z Paretova diagramu a z hodnot vypočtených z tabulky č.15.2.

Pro grafické znázornění toho, že matematický model je opravdu vhodný pro daný případ, slouží kombinace 4 grafů, které zobrazují chování reziduí. Rezidua jsou rozdíly mezi chováním modelu a skutečným chováním, rezidua by měla vykazovat vlastnosti normálního rozdělení. To můžeme pozorovat na grafech v prvním sloupci. Graf normálního rozdělení (pozice č. 1) má data rozložena kolem diagonální přímky, což značí, že jsou data normálně rozdělená. Stejnou jistou nám dává vizuální kontrola histogramu (pozice č.3)

Na pozici č.2.lze pozorovat graf „residuals vs.fits“ .Velikost reziduí by měla být alespoň přibližně podobná, to značí přibližně stejný rozptyl, tuto podmínku daný graf také splňuje.

Poslední ze čtveřice grafů je, residuals vs. order“, který zobrazuje chování residuí v průběhu času. Hodnoty na začátku měření a na konci by se neměly nijak významně odlišovat, což daný graf splňuje.



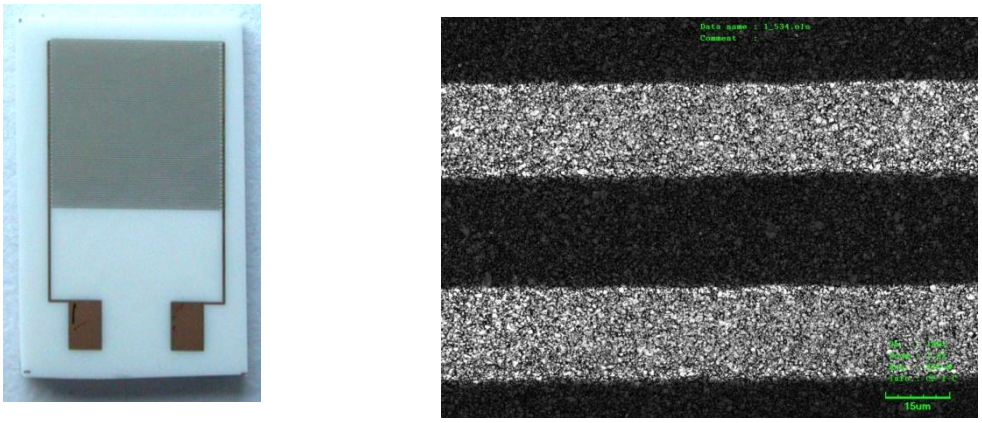
Obrázek 27: Graf pro residua

3. Výsledek experimentu

V pokusu bylo vybráno 5 klíčových faktorů, které mají zásadní vliv na výslednou kvalitu a u kterých bylo možné měnit jejich parametry. Statistická část byla prováděna pomocí softwaru Minitab 14, pomocí nástroje DOE – Design of Expriments. Byla zvolena možnost plného faktoriálního designu se dvěma úrovněmi. Pro dané faktory byly zvoleny spodní a horní úrovně, podle dostupných dat. Z těchto dat byly vypočítány efekty jednotlivých faktorů a jejich regresní koeficienty. Z regresních koeficientů byl sestaven matematický model procesu, který je velice užitečný při „dolaďování“ závěrečných hodnot. Z vypočítaných efektů faktorů a efektů interakcí byly identifikovány ty nejvýznamněji ovlivňující výstup. Mezi nekritičtější faktor byl zařazen vliv zaplavení a vzdálenosti odtrhu, ještě vlivnější byla jejich vzájemná interakce. Jako nejvhodnější kombinace faktorů byly zvoleny hodnoty podle tabulky 17. Pro potvrzení této hypotézy by bylo ovšem potřeba provést další dodatečná měření při těchto konstantních parametrech, aby bylo možno vyloučit možnost šumu, nahodilé chyby a potvrdit stabilitu tohoto procesu. V tomto experimentu bylo možné využít pouze interakce II. úrovně a to díky charakteru naměřených dat.

2. Analýza – výběr vhodné krycí vrstvy vlhkostního senzoru

Druhá fáze případové studie se týká výběru vhodné krycí vrstvy vlhkostního senzoru a jejího vlivu na elektrické vlastnosti senzitivní vrstvy senzoru. Pro pokus byly vybrány tři různé organické látky: polystyren, styren-akrylo-nitril a polykarbonát. Krycí vrstva byla nanášena spin coatingem při otáčkách 6000 ot. /s (použití odstředivky). Jako substrát byl opět použit korundový základ s nanesenými interdigitálními elektrodami o šířce vodivostních cest 50µm stejné jako mezer. Jako adhezní mezivrstva byl použit NiCr a Ni. [31]



Obrázek 28: Vlhkostní senzor a detail vodivých cest [31]

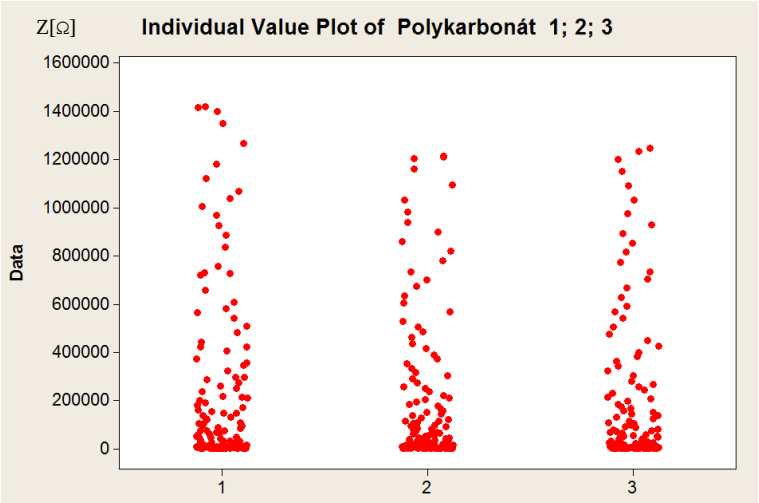
Na obrázku č. 29 je nalevo vidět keramický substrát s nanesenou dvojící zlatých elektrod a na pravém obrázku je vidět detail, interdigitálních elektrod o specifické šířce line/gap= 1:1.

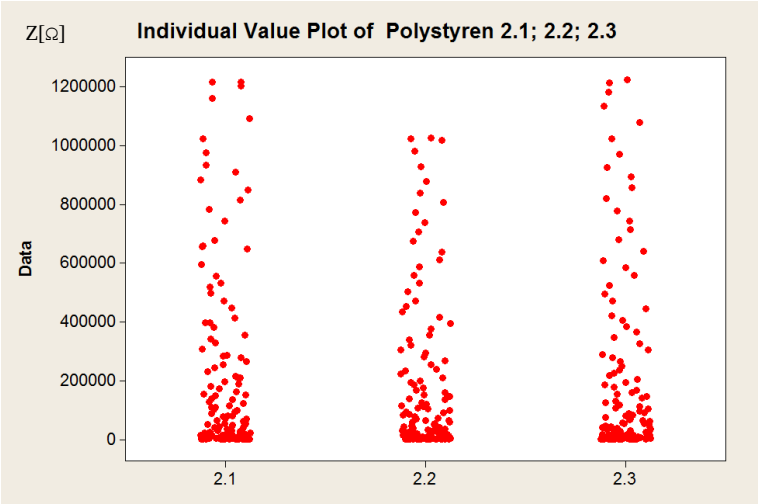
Postup měření

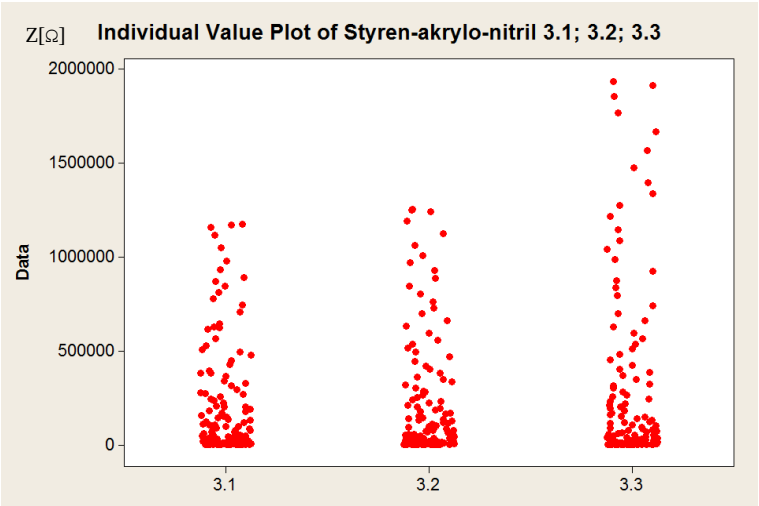
Na připravených vzorcích s různými krycími materiály byla měřena změna impedance v závislosti na změně okolních podmínek. Měření probíhalo za změny relativní vlhkosti v rozmezí 20-90% RH (Relative Humidity) a změny teploty v intervalu 20°C až 50°C. Pokusy probíhaly v klimatické komoře.

Prvním krokem bylo ověřit, zda jsou dané vzorky stabilní v měřeném rozsahu. Každý ze vzorků byl měřen třikrát za konstantní teploty a proměnné vlhkosti. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v grafu na obrázku č. 30.

Na prvních dvou grafech, pro vzorky z polykarbonátu a polystyrenu, lze pozorovat velmi podobné chování u všech třech měřených vzorků a to v plném rozsahu, to znamená, že vykazují velmi dobrou stabilitu. Vzorek z materiálu styren-akrylo-nitril se v posledním vzorku mírně odchyluje, stabilita takého vzorku nebude ideální.



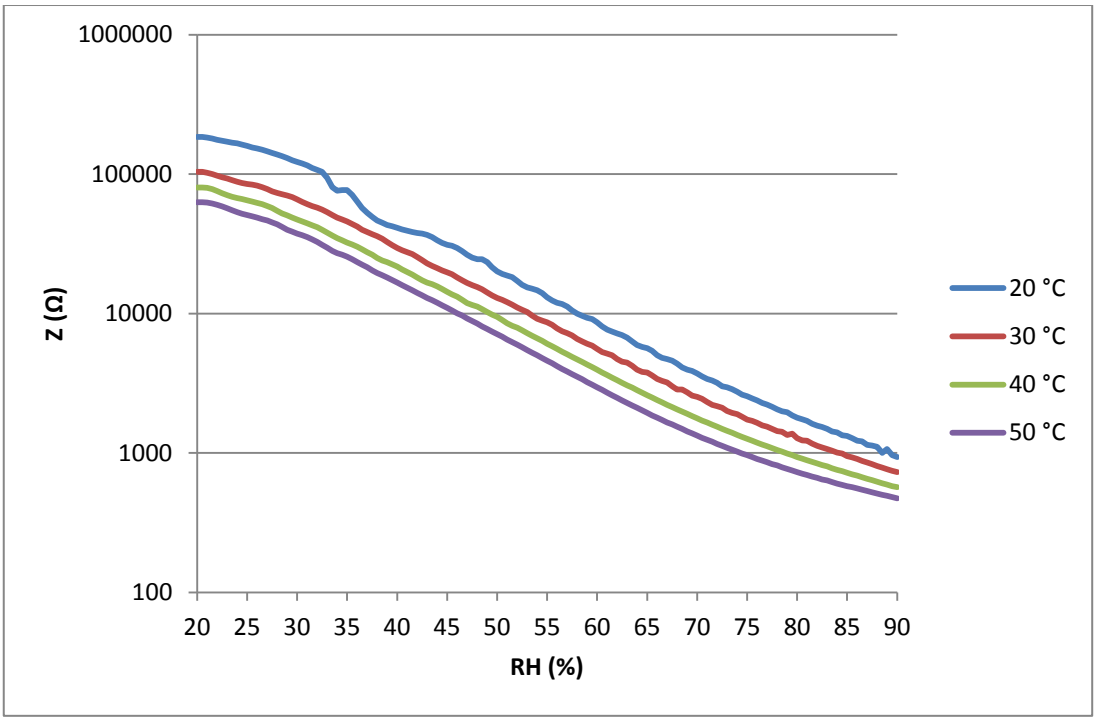




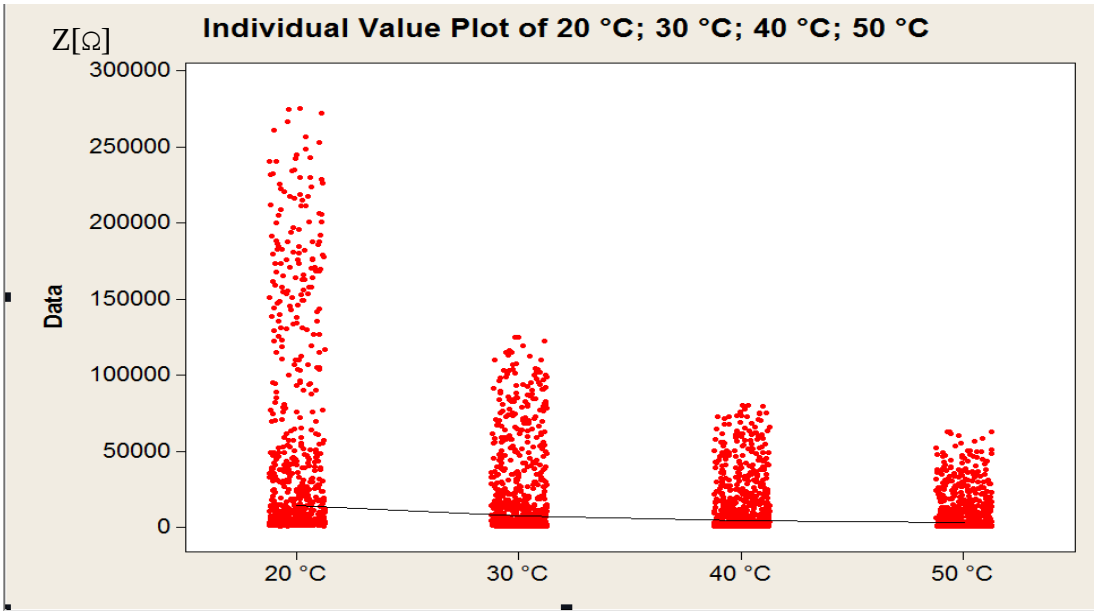
Obrázek 29: Grafy individuálních hodnot

Pro další experimenty bylo třeba vzít v úvahu jen první dva vzorky z polystyrenu a polykarbonátu. Organický materiál polykarbonát, neprošel vedlejšími testy, kde neprokázal dostatečnou přilnavost k citlivostní vrstvě senzoru. Proto byla pozornost věnována právě ochranné vrstvě z polystyrenu, pro kterou byly provedeny následující experimenty.

Vzorek byl testován při teplotách v intervalu od 20°C do 50°C při změně realitní vlhkosti v intervalu od 20 do 90%. Podle grafu č. 31 zobrazující závislost impedance na relativní vlhkosti, vykazují všechny vzorky velmi podobnou lineární závislost.



Obrázek 30: Graf závislosti impedance na relativní vlhkosti



Obrázek 31: Rozložení rozptylu impedance pro jednotlivé teploty

Na grafu Individual Plot Value, lze pozorovat vliv teploty na horní hranici dosažené impedance. Ta nabývá nejvyšších hodnot při teplotě 20°C, důležitá je ovšem linearita změny zobrazená v grafu obr. č.31, kterou mají všechny vzorky velmi podobnou.

Výsledek analýzy

Výsledkem pokusu bylo nejvhodnější zvolení jedné ze tří organických krycích vrstev pro vlhkostní senzor. Vyřazen byl vzorek z materiálu styren-akrylo-nitril, který nevykazoval patřičnou stabilitu. Jako nejvhodnější materiál byl zvolen polystyren, který prokázal u všech vzorků téměř totožné chování a stejné lineární závislosti.

8. Komparativní analýza DMAIC(Six Sigma) a DMADV (DFSS)

Kritérium hodnocení	6σ - DMAIC	DFSS - DMADV
Časová náročnost	1 až 6 měsíců	Obvykle 6 až 24 měsíce
Finanční náročnost rozpočet	Střední zátěž	Vysoká zátěž
Velikost týmu	3-5 + Black Belt *[]	4-10 + Master Black Belt* [9]
Udržitelné zlepšování	Systematické zlepšování	Ověřování a optimalizace
Návratnost	Nižší náklady + vzniklé škody = dobrá návratnost	Nevznikají chyby, vyšší počáteční náklady = výborná návratnost
Zavedení ve fázi	V době výskytu problému	Ve fázi vývoje a návrhu produktu
Cíle implementace metody	Identifikovat a eliminovat vzniklé problémy	Identifikovat a předejít problémů před tím než vzniknou
Trénink pracovníků	Nezbytný, minimálně jeden Black Belt	Vhodný pracovník s kvalifikací Master Black Belt
Zbrzdění výroby	Negativní efekt ve fázi měření- možnost zbrzdění výroby	Nenastává
Zaměření na prevenci	Dochází až po zavedení 6σ	Dochází již v prvních počátcích vývoje
Komplexnost VOC	Obvykle jeden nebo dva kritické faktory	Komplexní analýza zákazníkových potřeb
Způsob odstranění problému	Statistické nástroje	Systém prevence

* Metoda Six Sigma od svého vývoje urazila již dlouhou cestu a ani jí se nevyhnula všeobecná komercializace. Jelikož je zapsána na patentovém úřadě firmou Motorola, vyžaduje i po uživatelích danou certifikaci. Hierarchie hodnocení a získávání certifikátů převzalo názvosloví z bojových sportů a tak první, základní certifikát se nazývá zelený pás – Green Belt až po poslední Black Belt a Master Black Belt, tedy černý (nejvýše hodnocený) pás. Barva pásku vypovídá o schopnostech a zkušenostech pracovníka.

DMAIC	DMADV
Define: **Jednoznačné vymezení projektu** **Definování potřeb zákazníka a sběr potřebných dat o stávajícím procesu**	**Define:** **Vypracování plánů** **Vypracování organizačních změn**
Measure: **Sběr konkrétních dat z kritického procesu**	**Measure:** **Měření a identifikace současné situace** **Sběr přání a požadavků zákazníka** **Identifikování prioritních znaků CTQ** **Postup řešení v jednotlivých etapách.**
Analyze: **Zjišťování vzniku příčin, které způsobují nepřesnosti a vady** **Verifikace těchto příčin na základě získaných dat**	**Analyze:** **Zvolení nejlépe vyhovující koncepce, která splňuje všechny potřebné znaky CTQ, respektující požadavky rozpočtu.**
Improve: **Využívání získaných dat v předešlém kroku pro hodnocení výsledků** **Vypracování a testování aplikace řešení.**	**Design:** **Vypracování rámcového a podrobného návrhu** **testování položek návrhu**
Control: **Systematické zlepšování** **Vývoj plánů pro další řízení na základě provedeného zlepšení.**	**Verify:** **Ověřování nového zlepšení a jeho průběžná optimalizace** **Předání pravomocí a odpovědnosti na pracovníky organizace**

Závěr komparativní analýzy:

Porovnávané metody nejsou zcela substituční, nelze se zcela tedy svobodně rozhodnout zda použiji metodu Six Sigma nebo raději Design for Six Sigma. Pro každou z metod existuje určité pole působnosti. Co je ovšem možné je, učinit rozhodnutí na začátku vývoje nového procesu, služby nebo výrobku, tedy zda využiji techniky nabízející DFSS a zamezím tím problémům, které by se hypoteticky mohly v budoucnu objevit. V praxi to znamená zvýšenou investici v počátku vývoje, prodloužení času finalizace a zřejmě i vyšší počet pracovníků zapojených do vývoje. Na výstupu ovšem stojí robustní design, který bezpochyby splňuje všechna přání zákazníka.

Metodu Six Sigma nyní využívají i firmy, které k metodě DFSS na počátku neměly přístup, finance nebo jiné zdroje. Řešení problému „až poté, co nastane“ může být mnohem nákladnější než investice do prevence. Může dojít k velkým finančním ztrátám díky velkému podílu zmetků a v nejhorším případě i k odlivu nespokojených zákazníků.

Metoda 6σ je z časového hlediska méně náročná, její doba maximálního trvání by neměla překročit půl roku a lze provádět za kompletního provozu, až na některé výjimky, jako např. při sběr dat ve fázi Měř. Dalším pozitivem je i zaškolení zaměstnanců, coby vynikající investice do budoucnosti - zaměstnanec, který prošel školením, např. pro Black Belt je pro firmu velmi cenný a pro udržení kvality takřka nezbytný.

Snaha obou metod je tedy ve výsledku stejná: robustní design a výskyt problémů za hranicí šesti směrodatných odchylek, tedy méně než čtyři kusy z milionu. V konečném důsledku tedy absolutní spokojenost zákazníka a s tím spojenou i spokojenost podniku.

Tabulka 17: Závěrečná srovnávací tabulka

Metoda ⇨ / **Nástroj** ⇩	Six Sigma					Design for Six Sigma				
	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	I Zlepši	C Kontroluj	D Definuj	M Měř	A Analy-zuj	D Navrhni	V Ověř
SIPOC	●		●			●		●		
Mapa procesu	●		●		●	●		●	●	
Diagram toku materiálu /pracovního toku	●		●			●			●	
Mapa toku hodnoty - Value stream map	●					●				
Integrované vývojové diagramy	●					●				
VOC - hlas zákazníka	●				●	●			●	
KANO	●					●				
Výběr vzorků		●					●			●
R & R – Repeatability & Reproducibility		●	●		●		●	●		●
Histogram		●	●				●	●	●	
5 x Proč	●		●			●		●		
Paretova analýza			●	●				●		
Diagram příčin a následků	●					●				
Testování hypotéz			●					●		
Korelace a regrese			●		●			●		●
ANOVA			●							●

DOE – Design of Experimets			●	●				●	●	
FMEA					●					●
Poka -yoke					●				●	●

9. Závěr

Odvětví řízení kvality je jedním z nejrychleji rostoucích oborů, související zejména se zvyšující složitostí výrobků a vyššími nároky na jejich kvalitu. Existence oddělení kvality ve středních až větších podnicích je tak již nezbytnou součástí udržení si konkurenceschopnosti a hlavně tempa trhu. Proto lze i nadále očekávat významný růst a zejména pokrok, který se u této, realitně mladé disciplíny, stále rychleji ubírá vpřed. A tak, jak je to u mnoha moderních věd, je třeba stálého a kontinuálního vzdělávání v reálném čase.

Stejně jako celý obor řízení kvality, prošla i metoda Six Sigma svým vlastním přirozeným vývojem. Logický rámec pěti po sobě jdoucích kroků (DMAIC) zůstal zachován, ale metoda Six Sigma, co by zastřešující název pro velký soubor různých nástrojů, dostála různých obměn. A to zejména s rozvojem informační techniky. Díky tomuto faktu se metoda Six Sigma stala dostupnou i menším firmám s nižším rozpočtem. Statistické analýzy, již nepatří do rukou pouze matematických expertů, ale mohou je zdárně využívat i s problematikou seznámení uživatelé. Tato diplomová práce má proto za úkol ukázat význam této metody jak v části teoretické tak v praktické.

Cílem teoretické části bylo popsat hlavní aktuální nástroje, které Six Sigma využívá a metodu samotnou. Tyto nástroje lze pomyslně rozdělit do dvou skupin a to na nástroje statistické analýzy a nástroje k zobrazení a interpretaci informací. Oběma skupinám byl poskytnut dostatečný prostor, jak pro teoretický popis, tak po kritické zhodnocení zahrnující průběžnou komparativní analýzu využitelnosti v jedné ze dvou popisovaných metodika to DMAIC a DMADV. Těmto dvěma metodám je věnována i závěrečná kapitola, která srovnává veškeré aspekty, ve kterých se od sebe liší, ať již se jedná o volbu využívaných nástrojů, přes požadavky času až po ekonomické zhodnocení.

V praktické části se věnuji interpretaci dat, naměřených při výrobě vlhkostního senzoru. Cílem bylo demonstrovat vybrané nástroje metody Six Sigma na reálném elektrotechnickém výrobku. V první fázi se věnuji optimalizací parametrů sítotisku. Jsou zde využity nástroje pro definování problému jako SIPOC,CTQ či diagram příčin a následků, tak i statistické nástrojejako je histogram, korelační digram, DOE a další. Výstupem této analýzy je navrhnutý postup výroby elektrodového systému s interdigitálním uspořádáním, při nejpříznivější kombinaci faktorů. Druhá fáze se věnuje výběru vhodné krycí vrstvy organického vlhkostního senzoru. Výstup této analýzy spočívá ve výběru statisticky stabilní

látky s nejpříznivějšími elektrickými parametry, což bylo provedeno pomocí grafů individuálních rozložení a porovnáním vlivu relativní vlhkosti na impedanci obvodu.

Praktická část této diplomové práce měla za úkol demonstrovat metodu Six Sigma na praktickém příkladě. Pro úplné provedení metody Six Sigma by však bylo zapotřebí provést ještě řadu doplňujících testů, které se díky své celkové obsáhlosti jsou již za rozsahem této diplomové práce.

Tato práce mi pomohla uvědomit si, jak komplexní a důležité je odvětví řízení kvality v podniku a že následky rozhodnutí provedené v řízení kvality se, byť nepřímo, dotýkají každé jeho části, už jen například tím, že pomáhají ušetřit náklady a velké množství finančních prostředků získávají, především díky svému hlavnímu, primárnímu cíli, kterým je stoprocentní spokojenost zákazníka.

Použitá literatura

[1] PANDE, Peter S.; NEUMAN, Robert P.; CAVANAGH, Ronald R. The Six Sigma Way: : How GE, Motorola, and other companies are honing their preformance. 1. edition. New York : The McGraw-Hill Companies, 2000. 416 s.

[2] Yang, K.: Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development. McGraw-Hill, 2003. 624 s. ISBN-13: 978-0071412087.

[3] Http://www.sixsigma-iq.cz/ [online]. 2000 [cit. 2011-04-05]. Http://www.sixsigmaiq.cz/. Dostupné z: <http://www.sixsigma-iq.cz/>.

[4] Brussee, W.: Statistics for Six Sigma Made Easy, McGraw-Hill; 1 edition, 2004. ISBN-13: 978-0071433853.

[5] NOVOTNÝ, Radovan. Šest pilířů koncepce Six Sigma a jejich praktická úskalí. Hospodářské Noviny iHNed: Moderní řízení [online]. 2007, nezname, [cit. 2011-05-9]

[6] Kenneth, W., D.: The FMEA Pocket Handbook, DW Publishing Co. 2004. ISBN-13:978-0974722122.

[7] CRAYG GIGI a Neil declarlo BRUCE WILLIAMS. *Six Sigma for Dummies*. 1. vyd. While publishing, 2005. ISBN 0-764-5678-5.

[8] TENNANT, Geoff. Design For Six Sigma. *Www.designsixsigma.com* [online]. 2013 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.designsixsigma.com/whatis_dfss.htm

[9] GEORGE, Michael, Rowlands DAVID, Price MARK a Maxey JOHN. *Lean Six Sigma*. Brno: SCaC Partner a spol., 2009. ISBN 978 80 90409 2 7.

[10] STŘELEC, Jiří. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z http://www.vlastnicesta.cz/metody/metody-kvalita-system-kvality-iso/mapa-procesu/

[11] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta strojní, Katedra průmyslového inženýrství a managementu. *Value stream Map*. 2011. vyd. Plzeň. Dostupné z: http://digipod.zcu.cz/

[12] OHNO, Taiichi. Value Steam Mapping. [online]. 2012, s. 2 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.valuebasedmanagement.net

[13] GREGOROVIČOVÁ, Ing.Lucie. Nástroj pro identifikaci plýtvání: Mapování toku hodnot (Value Stream Mapping. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://e-api.cz/page/69576.nastroj-pro-identifikaci-plytvani-mapovani-toku-hodnot-value-stream-mapping-1-cast/

[14] KEITH GOFFIN a RICK MITCHELL. Time for a 'Product Health Check'?: Cranfield School of Management. *KANO* [online]. roč. 2006 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.mbaworld.com/blr-archive/opinion/28/

[15] ING. DUŠAN PIRICH, Doc.Ing. Olga Tůmová, CSc. ZCU. *Nástroje řízení jakosti a základy technické diagnostiky*. 2003. vyd. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2003. ISBN 80 7043 247 0.

[16] BEDNÁŘ PH.D., Ing. Josef. MSA-Analýza systému měření. [online]. s. 6 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.statspol.cz/request/request2006/prezentace/bednar.pdf

[17] PETRAŠOVÁ, Ivana. *Analýza systémů měření (MSA): příručka*. 3. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2003, 233 s. ISBN 80-020-1562-2.

[18] Hodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření: MSA. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: www.elearn.vsb.cz

[19] MCDERMOTT, Robin, Raymond MIKULAK a Michael BEAUREGARD. *The Basis of FMEA*. 2nd. 6000 Broken Sound Parkway,NW: CRC Press, 2009. ISBN 978-156-3273-773.

[20] BLECHARZ, Pavel. *Základy metody DOE: (Taguchiho přístup)*. Vyd. 1. Ostrava: Repronis, 2005, 112, [11] s. ISBN 80-732-9106-1.

[21] DOC.RNDR.IVETA BEDÁŇOVÁ, PH.D. Testování hypotéz ve statistice. *Statistika a VÝPOČETNÍ TECHNIKA: Veterinární a farmaceutická univerzita Brno* [online]. [cit. 2013-05-07] Dostupné z: http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm#krithod

[22] ING. MARTA JAROŠOVÁ, PH.D. TESTOVÁNÍ HYPOTÉZ. Technická univerzita Ostrava [online]. cit. 2013-05-07]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dom033/predmety/statistika/ucebni_text/13Testovani.pdf

[23] ING. RENATA PRZECZKOVÁ. Závislost indexů C_p ,C_{pk} na způsobu výpočtu směrodatné odchylky. *VŠB-TU Ostrava,* [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/639/qmag/st09-cz.pdf

[24] MILLER, Ivan. *Kapesní příručka Six Sigma*. 1. vyd. Praha: Interquality, 2008, 141 s. ISBN 978-80-902770-4-5.

[25] DR. MARK J. KIEMELE. Using the Design for Six Sigma (DFSS). *NDIA Test and Evaluation Summit Victoria, British Columbia* [online]. 2003 [cit. 2013-05-07].

[26] LUDEK DOHNAL. Analýza rozptylu – ANOVA. [online]. [cit. 2013-05-07].

[27] PANDE, Peter, Rober NEUMAN a Roland CAVANAGH. VAEBOOKS.COM. *The Six Sigma way* [online]. [cit. 2013-05-07].

[28] NEUGEBAUER, Tomáš. *STATISTICKÉ ŘÍZENÍ A REGULACE VÝROBNÍHO PROCESU* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-05-07]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[29] ING. KRISTÝNA GREPLOVÁ. *Design for Six Sigma* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-07]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. PETR KOŠKA, Ph.D.

[30] ŘEBOUN, Jan a HAMÁČEK, A.; DŽUGAN, T.; KROUPA, M. Organic humidity sensors - improvement of climatic resistance. [online]. [cit. 2013-05-07]. DOI: 978-1-4244-8554-3. Dostupné z: http://80.ieeexplore.ieee.org.dialog.cvut.cz/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5642804&contentType=Conference+Publications&searchField%3DSearch_All%26queryText%3DOrganic+humidity+sensors+-+Improvement+of+climatic+resistence

[31] SOUKUP, Radek, Aleš HAMÁČEK a Jan a spol. ŘEBOUN. *Organic Based Sensors: Novel Screen Printing Technique for Sensing Layers Deposition*. Plzeň, 2011. CZ.1.05/2.1.00/03.0094: RICE. Západočeská univerzita v Plzni.

[32] *The Gaussian Distribution*. Dostupné z: http://curvebank.calstatela.edu/gaussdist/normal.jpg

[33] Critical to Quality (CTQ) Trees: Translating Broad Needs to Requirements. [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.mindtools.com/pages/article/ctq-trees.htm