

# Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 – Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T073 – Produktové inženýrství  
*Autor práce:* **Bc. David Maruška**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering ■

# Design of experiment as a tool to optimize a plastic bumper cap

## Master thesis

*Study programme:* N3957 – Industrial Engineering  
*Study branch:* 3901T073 – Product Engineering

*Author:* **Bc. David Maruška**  
*Supervisor:* doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Maruška**  
Osobní číslo: **T16000434**  
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**  
Studijní obor: **Produktové inženýrství**  
Název tématu: **Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky**  
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Popište možnosti využití plánovaného experimentu pro potřeby zlepšování jakosti.
- 2) Na základě teoretického rozboru a praktických zkušeností vytypujte klíčové parametry pro návrh plánovaného experimentu.
- 3) Navrhněte vhodný plánovaný experiment a vyhodnoťte jej.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- 1) Dohnal G. Základy navrhování průmyslových experimentů (DOE). Praha:Ústav technické matematiky Fakulty strojní ČVUT v Praze, 2014.
- 2) Michálek J. Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE). Brno:AVČR, 2010
- 3) Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments, 5. vydání, New York: Arizona State University, 2001.


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
Katedra hodnocení textilií

Datum zadání diplomové práce: 29. března 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 4. května 2018

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



  
doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 26. března 2018

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimír Bajzíkovi, Ph.D. za neocenitelné rady v problematice průmyslových experimentů.

David Maruška

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce se zabývá průmyslovým experimentem zaměřeným na design výrobku. Cílem této diplomové práce je využitelnost metody plánovaného experimentu (DOE) na tvorbě či optimalizaci designu výrobku. Práce popisuje přístup k návrhu experimentu, stanovení klíčových a zkoumaných faktorů, jejich okrajových podmínek, s využitím programu Minitab. V teoretické části budou popsány jednotlivé části návrhu experimentu. Samotný experiment bude rozebrán ve druhé části této diplomové práce. Experiment se zabývá optimalizací plastové krytky pro tlumič pérování, jehož designem se autor zabývá v rámci svého profesního zaměření. V praktické části byly jednotlivé faktory měřeny a jejich závislosti hodnoceny. Závěrem byla jednotlivá měření zohledněna ve finální verzi designu pro daný produkt a porovnána s očekáváními.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Průmyslový experiment, Design of experiments, plastová krytka, Minitab, DOE, faktory

## **ANNOTATION**

This diploma thesis deal with the design of experiment (DOE), focusing on plastic bumper cap design. Aim of the diploma thesis is the usage of the Design of experiment method at product design or its optimization. The thesis describes the approach of the method itself, key factors research and its determination, its boundary conditions, by using the Minitab software. The theoretical part consist of individual parts of DOE process. The experiment itself is to be solved in a second part of the thesis. The experiment deals with an optimization of the plastic bumper cap for a shock absorber, whose design definition being part of author's professional focus. In a practical part of the thesis, the each individual factors were measure and its correlations evaluated. At the end, all the measured factors were consider in a final design definition, key characteristic measured and results compared with the expectations.

### **KEY WORDS:**

Design of experiment, plastic bumper cap, Minitab, factors

## Obsah

<b>PROHLÁŠENÍ</b> .....	5
<b>PODĚKOVÁNÍ</b> .....	6
<b>ANOTACE</b> .....	7
1 Úvod .....	11
2 Proč DOE? .....	13
3 Six sigma.....	15
3.1 Cíle Six sigma.....	16
3.2 Six sigma v procesu vývoje (DFSS) .....	16
4 průmyslový (plánovaný) experiment.....	16
4.1 Základní pojmy .....	16
4.2 Obecný model.....	18
4.3 Systematický přístup k plánování experimentu.....	19
Vymezení faktorů .....	19
Popis provedení experimentů .....	19
Vedení experimentů.....	20
Predikce procesu na základě analýzy výsledků.....	20
Verifikace, potvrzení .....	20
5 Hlavní typy experimentů .....	20



5.1	Faktoriální návrhy .....	21
	Experimenty s jedním faktorem .....	21
	Dvouvýběrový T-test .....	24
	Úplný faktoriální experiment na dvou úrovních .....	25
	Faktoriál $2^3$ a efekt faktoru .....	28
	Dílčí faktoriální experimenty .....	33
	Experimenty pro hledání optimální odezvy .....	34
	Efekt faktoru obecně .....	35
6	Grafické zobrazení plánovaného experimentu.....	36
6.1	Graf hlavních efektů.....	36
6.2	Paretova analýza .....	38
7	Praktická část .....	39
7.1	Tlumiče pérování .....	39
7.2	Plastová krytka (plastový doraz) jako součást tlumiče pérování.....	42
7.3	Funkce .....	43
7.4	Design a požadované vlastnosti.....	44
7.5	Naplánování plánovaného experimentu .....	47
7.6	Popis stávající situace .....	47
7.7	Typ experimentu a zvolené faktory .....	50
7.8	Stupeň rozlišení návrhu .....	51

7.9	Použitý Software.....	53
7.10	Realizace plánovaného experimentu.....	53
7.11	Měřicí zařízení.....	54
7.12	Naměřená data .....	55
7.13	Vypočítané efekty (session Windows).....	57
7.14	Paretův diagram (diagram významnosti) .....	57
7.15	Efekty faktorů graficky .....	61
7.16	Efekty interakcí faktorů graficky .....	61
7.17	Optimalizace designu plastové krytky .....	62
7.18	T-test – test střední hodnoty s cílenou.....	66
8	Závěr.....	67
	Citovaná literatura.....	69
	Seznam obrázků .....	71
	Seznam GRAFŮ .....	72
	Seznam TABULEK.....	72
	Seznam ROVNIC.....	73
Přílohy	74	

## 1 ÚVOD

Automobilový průmysl je nejrychleji se rozvíjejícím odvětvím světové ekonomiky. Dostupnost automobilů je v novém tisíciletí stále jednodušší pro širší veřejnost a to i v důsledku snižování nákladů na výrobu. V posledních několika letech je kladen silný důraz na cenu jednotlivých komponentů. Důvodem je konkurenceschopnost automobilových výrobců na globálním trhu. Většina dodavatelů do automobilového průmyslu a samotných automobilek již lokalizovala výrobní závody v lokalitách Asie, hlavně v Číně, Indii a jiných zemích, kde je cena za lidskou práci a surovin stále znatelně nižší v porovnání s ekonomicky vyspělými zeměmi. Cenová politika je tedy řídicím faktorem tohoto průmyslu a jediným a klíčovým faktorem k udržení konkurenceschopnosti na trhu.

Vývoj a výzkum se na konečné ceně automobilů významně projevuje. Důraz na úspory se, kromě procesu a nakupovaných dílů, dotkl i oblasti vývoje a návrhu designu. Cena za testování prototypů je vysoká. Automobiloví výrobci a jejich dodavatelé kalkulují náklady na vývoj v řádech stovek tisíc eur. Návrh designu je proto podporován CAE (Computer added engineering) simulacemi, jako je metoda konečných prvků (FEA) apod. Optimalizací prvních prototypových výrobků, bez vyrobení nákladných prototypů a nákladného testování všech možných proměnných, se zabývá metoda plánovaných experimentů, neboli DOE (Design of experiments). Její využití je velmi přínosné a efektivní nejen pro design, ale i pro proces. Metoda je součástí Six sigma přístupu k zajištění kvality výroby. Metody budou v této diplomové práci jednotlivě rozebrány.

Obsahem první části diplomové práce je popis metody plánovaných experimentů a jeho využití. Dále je objasněn přístup k metodě jako takové, tedy jak definovat okrajové podmínky, abychom dostali robustní a použitelná data. V praktické části je popsán produkt, kterým se tato diplomová práce zabývá, a jeho design s ohledem na zákaznické požadavky a jeho funkci. Budou rovněž popsány důvody, proč bylo ke tvorbě designu využito metody experimentu. Druhá část praktické části se zabývá experimentem jako takovým, s využitím programu Minitab. Samotné měření definovaných parametrů bude probíhat na zkušební stroji MTS pro trhací zkoušky, kde bude výsledná charakteristika, tedy výtlačná síla, měřena a hodnocena.

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

Cílem této diplomové práce je tedy prokázat, zda je forma plánovaného experimentu vhodná metoda k definici či optimalizaci designu výrobku.

## 2 PROČ DOE?

Navrhování nových technologií, vývoj materiálů a studium jejich vlastností i vývoj nových měřících metod vyžadují vedle teoretických studií řadu pokusů v laboratorním, modelovém nebo provozním měřítku, na jejichž základě lze ověřit určité předpoklady nebo získat experimentální údaje pro další teoretické úvahy. Takových pokusů provádí výzkumný pracovník při řešení svých úkolů celou řadu. Proto je třeba věnovat pozornost metodice jejich navrhování (plánování, uspořádání) a hodnocení. Každý výzkumník má zájem na tom, aby pokusy byly jna jedné straně co nejhospodárnější (až již z hlediska času, rozsahu prací či nákladů), na druhé straně však požaduje, aby závěry, získané na základě rozboru výsledků těchto pokusů, byly dostatečně spolehlivé. [1]

Aby bylo možné ocenit spolehlivost závěrů, je účelné používat k hodnocení výsledků pokusů matematicko-statistických metod. Hodnocení těmito metodami lze však těžko provést, jestliže pokusy byly uspořádány nevhodným způsobem. Je proto třeba navrhnout uspořádání pokusů tak, aby statistická analýza mohla dát odpověď na otázky (pracovní hypotézy), které si výzkumník před provedením pokusu položil. Zásady, které pro navrhování a hodnocení pokusů platí, závisí ovšem na konkrétních okolnostech, za nichž se pokusy provádějí. [1]

Metody pro navrhování a hodnocení pokusů začaly vznikat a rozvíjet se v dvacátých letech tohoto století. Na vzniku a rozvoji těchto metod má především zásluhu R.A. Fisher, který ve svých pracích položil teoretické i praktické základy této metodiky. [1]

Sir Ronald Fisher, vynikající anglický matematik, dostal za úkol zpracovat výsledky šedesáti let experimentální práce v Rothamsteadské královské zemědělské výzkumné stanici. Zde položil teoretické základy analýzy rozptylu (ANOVA) a napsal učebnici statistiky pro výzkumné pracovníky. Společně se svým kolegou Frankem Yatesem zpracovali statistické tabulky pro biology a formulovali základní principy DOE. Z této doby pocházejí některé zvláštní pojmy, používané při statistickém návrhu experimentu: split plot experiment, doslovně „experiment na rozděleném pozemku“. Další vývoj už jenom v bodech. Plackett a Burman v roce 1940 přicházejí s řadou experimentálních návrhů s počtem kroků, které jsou násobky čtyř. Box, Hunter&Hunter vydali v roce 1960 první učebnici DOE. Dodnes poskytuje nejsrozumitelnější úvod do experimentování. V roce 1976 vstupuje na scénu americký statistik Douglas Montgomery. Jeho klasická učebnice „Design of Experiments“ vyšla již v šestém vydání a vytvořila standard, o který se opírají nejen praktici, ale i tvůrci software. První

komerčně dostupný software pro DOE se objevil v roce 1980. Ve stejném roce přichází japonský inženýr Genichi Taguchi se svým návrhem experimentů, ale především s myšlenkou robustnosti, která je dobře srozumitelná konstruktérům a technologům. Okolo roku 1986 přitahuje pozornost k DOE nově vznikající manažerská iniciativa Six Sigma. Statistický návrh experimentů se stává součástí školení na stupeň Black Belt a experimenty se začínají používat v mnoha projektech nejen v průmyslu, ale například i v marketingu. [2]

Původní pole uplatnění těchto zásad bylo především v zemědělském výzkumu. Později se však tyto metody navrhování pokusů začaly přizpůsobovat podmínkám specifickým pro průmyslové obory. Zvláště intenzívně se teoretické propracování metod pro navrhování průmyslových pokusů a jejich hodnocení rozvinulo po druhé světové válce. [1]

U nově vyvíjených výrobků spočívá hlavní problém v tom, zajistit v dostatečném počtu experimentů technologickou koncepci výrobku, společný účinek jednotlivých součástí / konstrukčních celků a především splnit zákaznickou požadavky a podnikové výsledky na vysoce bezchybné úrovni. Přesně o toto jde u Design of Experiments (DOE) jako statistického zkušebního plánování. [3]

Pojmem statistický experiment označujeme strategii řešení úloh pomocí vhodně navržených a vyhodnocených experimentů. V literatuře bývá takový experiment nejčastěji označován zkratkou DOE - Design of Experiments. DOE je účinným nástrojem optimalizace procesů a významnou měrou jej lze využít i při návrhu nových výrobků. Hlavními oblastmi využití DOE byl tradičně průmysl chemický, farmaceutický a zpracovatelský, v posledních letech se však metod DOE využívá stále častěji i ve strojním inženýrství a v elektronice. Velký potenciál poskytuje DOE v oblastech marketingu, prodeje nebo řízení služeb. Sem proniká DOE hlavně v souvislosti s iniciativou Six Sigma. [2]

Velké použití DOE vidíme v Japonsku a ostatních nově industrializovaných asijských zemích. To souvisí do značné míry s vysokou úrovní vzdělanosti a zároveň se sociální prestiží pracovníků v technických oborech. Mnoho aplikací DOE je ročně zaznamenáno ve Spojených Státech. Evropské země jsou v tomto směru tradičně poněkud pozadu, i když některé automobilky dokonce předepisují svým dodavatelům, aby metodiky DOE využívali. První (a hned velice úspěšná) aplikace DOE u nás byla ve výrobě polovodičů. Tak, jak do praxe přichází nová generace pracovníků, nezátížených skepsí a „negativními zkušenostmi“, prosazuje se DOE čím dále více. Největší překážkou využití DOE je nedůvěra a skepse. Další překážkou je

nedostatek systematického přístupu ke zlepšování procesů. Tuto překážku do značné míry překonává Six Sigma. Teprve potom nastupuje nedostatek školení, informací či software. [2]

### 3 SIX SIGMA

Informace v této kapitole byly čerpány ze zdroje [3]. Jak již bylo v úvodu zmíněno, DOE je součástí Six sigma přístupu. Z využívání Six Sigma je jasné jedno: Six Sigma je nejen statistickou metodou, ale spíše jakousi Breakthrough strategií, která má docílit zlepšení vícestupňového procesu – počínaje u prospěchu pro zákazníka, přes vnitřní procesy a tržní výkony, až po výsledky podniku. Krédo Six Sigma strategie proto zní: Work smarter, not harder“ (pracovat chytřeji, ne více)

V podstatě jde o:

- přesvědčivé využívání systematické metody projektového managementu
- soustavné využívání dat a statistických analýz
- soustavné měření operativního výkonu podniku a následné zlepšování
- a tudíž dosažení praktikované kvality nulových defektů

Pro správné pochopení Six Sigma je důležité včas odstranit jak přesvědčená očekávání nových uživatelů, tak s tím spojené obavy. Six Sigma proto

- není seřizovacím šroubem pro zvyšování zisku,
- není zázračný program snižování nákladů
- není spouštěcím prvkem rušení pracovních míst

ale je metodikou pro zvyšování spokojenosti zákazníků, zvýšení zisku a zajištění pracovních míst. Účinky, co se týče spokojenosti zákazníků a zvýšení zisku, jsou bezprostředně jasné. K zajištění pracovních míst dochází nepřímo tím, že podnik pomocí Six Sigma projektů zvyšuje svoji hospodárnost a výkon a tím zvyšuje svou konkurenceschopnost. Krátkodobě realizovatelné zlepšení se Six Sigma vede proto k dlouhodobě účinnému navýšení hodnoty.

### 3.1 Cíle Six sigma

Cílem je splnit ve všech důležitých procesech veškeré požadavky zákazníků, tudíž tzv. Critical to Quality Characteristics (CTQ) neboli kritické parametry kvality, i hospodářsky z pohledu podniku, aby se tak stal podnikem ziskovým. Centrální využití filozofie Six Sigma tedy spočívá v CTQ. Ty představují pro podnik faktory úspěšnosti, na trhu. Předpokladem je rozpoznání a stanovení důležitých hnacích sil pro hodnoty, místo relativně neplánovaného a necíleného zlepšení a optimalizace předpokládaných faktorů úspěšnosti. [3]

### 3.2 Six sigma v procesu vývoje (DFSS)

V podnikové praxi se prosadila myšlenka, že neshody a zanedbání ve vývoji výrobků mohou přijít podnik v následných fázích vytváření hodnoty a v uvedení výrobku na trh včetně činností v technických službách a v záruce / solidnosti pěkně draho. Výsledek může být navíc ovlivněn i tím, že nižší podíl standardizovaných výchozích produktů a shodných dílů zvýší náklady na neshody a celkové výrobní náklady.

Ve výrobě lze díky inteligentnímu vývoji výrobku ušetřit náklady tím, že jsou součástí ve smyslu Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) vyrobeny s úsporami, zjednodušeně a je snadné je smontovat. Ve fázi poskytování servisu se pak mohou nedostatky z vývoje projevit ve zvýšených servisních nákladech, pokud lze poskytovat servis jen s obtížemi a je tedy kvůli špatné konfiguraci výrobku potřebná údržba a další opravy. Přesně toto říká známé pravidlo desíti řízení kvality, že se nedostatky a zanedbání navržených fází tvorby hodnoty projeví v každé další fázi faktorem 10 v nákladech na neshody. [3]

## 4 PRŮMYSLOVÝ (PLÁNOVANÝ) EXPERIMENT

### 4.1 Základní pojmy

Experiment je test nebo série testů (pokusů), provedená za účelem zvýšení kvality produktu nebo procesu, případně zvýšení jejich efektivity.

- stanovení charakteristik procesu a jeho optimalizace
- vyhodnocení vlastností materiálů
- návrh a vývoj produktů

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky



- stanovení tolerance komponent a vstupních veličin

#### Návrh experimentu

- zkracuje dobu pro návrh a vývoj nových produktů
- zlepšuje fungování stávajících procesů
- zvyšuje spolehlivost a zlepšuje kvalitu výrobků
- zvyšuje robustnost výrobků a procesů
- umožňuje vyhodnocení různých variant, výběr komponent, nastavení parametrů a systémových tolerancí

#### Odezva - výstupní veličina

- měřitelná, zpravidla spojitá

#### Faktory - vstupní veličiny

- kvalitativní (kategoriální), kvantitativní (diskrétní, spojité)
- hlavní, vedlejší, blokové

#### Náhodný vliv - neznáme jeho příčiny, nelze jej odstranit

- způsobuje variabilitu, kterou lze měřit (experimentální chyba)
- lze jej předvídat, snaha je co nejvíce jej snížit

#### Náhodná chyba

Opakujeme-li určitý pokus za stejných experimentálních podmínek, zjistíme, že výsledky pokusů kolísají v určitých mezích. Čím je toto kolísání větší, tím je pokus méně reprodukovatelný. Kolísání bude záviset na podmínkách, za nichž se pokusy provádějí, např. v provozních podmínkách bude jistě větší než kolísání výsledků týchž pokusů prováděných v laboratoři. [1]

V této práci zásadně uvažujeme ty příklady, v nichž sledovaným výsledkem pokusu je určitý kvantitativní znak  $\eta$  (výťažnost, určitá mechanická vlastnost materiálu, určitá fyzikální charakteristika apod.). Vzhledem k tomu, že výsledky pokusu ovlivňuje řada okolností (měnící se suroviny, malé odchylky od technologického předpisu, drobné chyby měřících přístrojů apod.), které nejsme schopni ani při sebepečlivějším dodržení experimentálních podmínek

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

vyloučit, není výsledkem pokusu hodnota znaku  $\eta$ , ale hodnota veličiny  $Y$ , kterou lze vyjádřit ve tvaru  $Y = \eta + E$ , kde  $E = Y - \eta$  je odchylka, která vzniká působením náhodných příčin, a předpokládáme o ní, že je náhodnou veličinou, jež může nabývat kladných i záporných hodnot. Nazýváme ji náhodnou chybou. Veličina  $Y$  je pak též náhodnou veličinou. Opakujeme-li pokus  $r$ -krát, dostáváme výsledky  $y_1 = \eta + e_1$ ,  $y_2 = \eta + e_2$ , ...,  $y_r = \eta + e_r$ , které představují  $r$  hodnot, jichž nabyla veličina  $Y$ ;  $e_1, e_2, \dots, e_r$  jsou hodnoty náhodné chyby  $E$ . [1]

$\eta$  můžeme nazvat teoretickým výsledkem (tj. výsledkem nezatíženým náhodnou chybou) daného pokusu. [1]

Systematický vliv - je způsoben známými vlivy (vymežitelnými příčinami)

- projevuje se například trendem, periodicitou, posunutím
- snažíme se jej popsat a kvantifikovat jej

Interakce - současné působení několika (alespoň dvou) faktorů

Replikace - opakování zkoušek za (přibližně) stejných podmínek (úrovní faktorů)

- umožňuje měřit náhodnou variabilitu a oddělit ji od variability celkové

1. Znáhodnění - stanovení pořadí zkoušek podle náhodného "zamíchání" - do jisté míry může eliminovat vedlejší vlivy - zajišťuje vyšší míru "nezávislosti" jednotlivých pokusů
2. Blokování - uspořádání do bloků slouží ke snižování náhodné variability (variability náhodné složky) - v rámci bloku probíhají zkoušky za přibližně stejných experimentálních podmínek (ale při různých kombinacích úrovní faktorů) - často představuje jednu repliku experimentu [4]

## 4.2 Obecný model

Plánovaný experiment byl poprvé realizován na začátku dvacátých let minulého století panem Ronaldem Fisherem na Rothamstedské zemědělské výzkumné stanici v Londýně. Cílem experimentu bylo zjistit, které z hnojiv použitých na rozdílných parcelách má největší účinnost při pěstování obilí. Na výsledek mělo vliv mnoho dalších faktorů, patřila k nim například vlhkost, typ zeminy a mnoho dalších faktorů. Fisher

použil plánovaný experiment k tomu, aby rozlišil vliv hnojiva od vlivu ostatních faktorů [5]

### 4.3 Systematický přístup k plánování experimentu

1. Vymezení faktorů, analýza vlivů a závislostí => Analýza procesu
2. Popis provedení experimentů => Návrh experimentu
3. Vedení experimentů => Provedení zkoušek
4. Predikce procesu na základě analýzy výsledků => Analýza výsledků
5. Verifikace, potvrzení (ověřovací experimenty) => Závěry [4]

#### Vymezení faktorů

První věcí, kterou je v první fázi experimentu zapotřebí provést; je volba odezvy; která je buď přímo charakteristikou jakosti procesu či s ní úzce souvisí. Odezva je buď spojitá náhodná veličina či diskrétní, udávající počet neshod či neshodných jednotek. Dále je nutno rozhodnout, které faktory budou zahrnuty do experimentu a jaké verze faktoru zvolíme. [6]

V prvním cyklu experimentu zařadíme všechny faktory, jestliže se omezíme pouze na faktory statisticky významné. Jednotlivé úrovně faktorů volíme tak, aby skutečně bylo měřitelné rozlišení vlivů úrovní na odezvu. Není-li možno udržet faktor konstantní s pouze nepatrnými změnami během experimentu, je nutné jej považovat za blokový faktor, resp. za náhodný. [6]

#### Popis provedení experimentů

Pak přichází vlastní návrh experimentu. Existuje celá řada návrhů experimentů a nutno se řídit jednak časovou náročností a finanční náročností tak, aby navrhovaný experiment byl vhodným kompromisem všech omezujících veličin. Nejdůležitější typy navrhování experimentů jsou udány v normě CSN ISO 35343: Navrhování experimentů (1993). [6]

Pokud jsou jednotlivé pokusy rozděleny do bloků, je předpokládáno, že uvnitř bloků pokusy vykazují větší homogenitu a nižší úroveň variability, nežli panuje mezi bloky. Cílem randomizace čili znáhodnění je zabránit směšování nějakého rušivého vlivu (např. teploty v místnosti, vlhkosti vzduchu, únavy obsluhy apod.) s působením zkoumaných faktorů či bloků. Příkladem znáhodnění je náhodný výběr pořadí pokusů, náhodný výběr materiálu pro pokusy z

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

jedné dávky. Když experiment probíhá v blocích, provádí se znáhodnění v rámci každého bloku. [6]

### **Vedení experimentů**

Zkoušky či měření se provedou ve stanoveném pořadí a výsledky se zaznamenávají dle předem připravených formulářů či s pomocí softwaru. [6]

### **Predikce procesu na základě analýzy výsledků**

Analýza výsledku úzce souvisí s formou navrženého experimentu. Provádí se vyhodnocování vlivu jednotlivých faktorů a jejich společného působení (interakcí). Cílem analýzy je vybrat ty faktory, které mají statisticky významný vliv na úroveň kvality. K tomu se používají metody testování hypotéz (t-test; F-test), metody analýzy, rozptylu či kovariance, regresní analýzy; optimalizační metody apod. [6]

### **Verifikace, potvrzení**

Verifikace zahrnuje provedení experimentu v předpokládaných nejlepších procesních podmínkách, abychom potvrdili optimalizované výsledky. Například můžeme provést několik potvrzovacích výrobních testů na optimalizované nastavení, poté zajistit interval spolehlivost pro střední hodnotu. [7]

## **5 HLAVNÍ TYPY EXPERIMENTŮ**

Obecně existuje celá řada návrhů experimentů, každý z nich je určen pro různý typ statistického zpracování a řešení problému. Lze ale obecně rozdělit návrhy experimentů do těchto čtyř skupin:

A. Faktoriální návrhy. Tyto slouží k identifikaci důležitých faktorů v experimentech.

B. Návrhy pro hledání optimální odezvy. Tyto návrhy jsou vhodné, když hledáme optimální kombinaci hodnot faktorů k dosažení optimální hodnoty odezvy.

C. Směšové návrhy. Tyto návrhy slouží k nalezení optimální směsi ingrediencí, které se podílejí na tvorbě odezvy. Zde se jedná obvykle o optimální procentuální zastoupení jednotlivých složek směsi, z nichž se vytváří výsledná veličina.

D. Optimální návrhy. Tyto návrhy jsou užitečné, když je k dispozici hodně informací, že lze udat detailní specifikaci statistického modelu; který chceme testovat. Protože optimální testy jsou velice flexibilní, lze je použít v té situaci; kdy standardní návrhy jsou nevyhovující. Optimální testy jsou vhodné v těch situacích; když si přejete mít explicitní kontrolu přes efektivitu návrhu, která by samozřejmě měla být co největší. [6]

## 5.1 Faktoriální návrhy

### Experimenty s jedním faktorem

Následující tři odstavce byly čerpány ze zdroje [8]. V praxi je častá nutnost porovnat dvě metody, stroje, operátory atd. Cílem je zjistit, zda se liší. Pokud ano, odhaduje se rozdíl mezi nimi a vyjádří se přesnost tohoto odhadu. Testuje se zde rozdíl dvou středních hodnot pomocí t-testu. Hlavní pozornost je věnována navrhnutí experimentu, tedy znáhodnění, replikacím a uspořádáním do bloků.

Cílem experimentu je ověřit vliv jediného (hlavního) faktoru na sledovaný znak jakosti. Faktor může být kvalitativní anebo kvantitativní. Výsledky experimentu, tj. hodnoty odezvy, mohou být ovlivněny nejen hlavním, zkoumaným faktorem, jehož verze aktivně měníme, ale i dalšími příčinami. Kromě náhodných vlivů, které jsou vlastní každému procesu, působí i vymezitelné příčiny, které nejsou přímo předmětem našeho zájmu, ale které je výhodné zahrnout do experimentu jako blokové faktory. Verze blokového faktoru jsou často určeny dosažitelnými experimentálními podmínkami. Avšak i v případech, kdy by bylo možné provést experiment při jediné verzi blokového faktoru, je výhodné volit verzi několik a rozšířit tak platnost závěrů experimentu. Podle způsobu zahrnutí blokových faktorů do experimentu rozlišujeme několik návrhů.

Při řízeném experimentu jsou všechny blokové faktory udržovány konstantní, to znamená, že experimentální podmínky jsou při všech verzích hlavního faktoru stejné. Nemůžeme-li zaručit neměnnost experimentálních podmínek, je třeba zabránit směšování vlivu

sledovaného faktoru s vlivem jiných faktorů. Jednou z možností je úplně znáhodněný návrh, při němž se jednotlivé verze hlavního faktoru střídají v náhodném pořadí.

Vývojový pracovník se zajímá a zkoumání pevnosti v tahu nového syntetického vlákna, které bude použito pro výrobu triček. Inženýr, na základě předchozí zkušenosti, ví, že pevnost je ovlivněna procentem bavlny v použité směsi pro vlákno. Dále tuší, že zvýšené procento obsahu bavlny zvýší pevnost, přinejmenším zpočátku. Také ví, že procento obsahu bavlny by se mělo pohybovat mezi 10 a 40%, pokud by finální produkt měl mít další kvalitativní požadavky. Inženýr se rozhodl testovat vzorky v pěti úrovních procenta bavlny: 15, 20, 25, 30 a 35%. Také se rozhodl testovat pět vzorků z každé procentuální úrovně. [9]

Toto je příklad jednofaktorového experimentu s  $a = 5$  úrovní faktoru a  $n = 5$  replikací. Tedy 25 měření by mělo probíhat v nahodilém pořadí. K ilustraci, jak by pořadí měření mohlo být náhodné, předpokládáme následující pořadí, viz tabulka číslo 1. [9]

Tabulka 1 - Pořadí experimentu [9]

Cotton Weight Percentage	Experimental Run Number				
15	1	2	3	4	5
20	6	7	8	9	10
25	11	12	13	14	15
30	16	17	18	19	20
35	21	22	23	24	25

Nyní vybereme náhodné číslo mezi 1 a 25. Předpokládejme číslo 8. Tedy číslo 8 je první testovací možnost (20 procent bavlny). Tento proces by mohl být opakován až do dokončení všech 25 pozorování. Mnoho počítačových softwarů pro určení experimentů tvoří náhodné pořadí. Předpokládejme následující pořadí, viz tabulka číslo 2.

Tabulka 2 - znáhodněné pořadí jednofaktorového experimentu [9]

Test Sequence	Run Number	Cotton Weight Percentage
1	8	20
2	18	30
3	10	20
4	23	35
5	17	30
6	5	15
7	14	25
8	6	20
9	15	25
10	20	30
11	9	20
12	4	15
13	12	25
14	7	20
15	1	15
16	24	35
17	21	35
18	11	25
19	2	15
20	13	25
21	22	35
22	16	30
23	25	35
24	19	30
25	3	15

Takto náhodné pořadí je nutné k zamezení neznámých a obtížně definovaných proměnných, třeba měnících se během experimentu a ovlivňujících výsledky. Ke znázornění, předpokládejme, že bychom testovali 25 testovacích pokusů v originálním nenáhodném pořadí (tedy, všechny 15% bavlněné vzorky jsou testovány první, dalších pět 20% vzorků jsou testovány další, atp). Kdyby testovací stroj pro testování pevnosti v tahu by vykazoval warm-up efekt, tedy že poslední vzorky by měřili nižší pevnost, budou potenciálně výsledky pevnosti v tahu ovlivněny a zničena validita naměřených dat. [9]

Předpokládejme, že inženýr měří data v náhodném pořadí, které jsme stanovili. Pozorování, která by byla naměřena pro pevnosti v tahu, by vypadala jako na v tabulce číslo 3.

Tabulka 3 - data z měření pevnosti v tahu (lb/in<sup>2</sup>) [9]

Cotton Weight Percentage	Observations					Total	Average
	1	2	3	4	5		
15	7	7	15	11	9	49	9.8
20	12	17	12	18	18	77	15.4
25	14	18	18	19	19	88	17.6
30	19	25	22	19	23	108	21.6
35	7	10	11	15	11	54	10.8
						376	15.04

Chceme-li oddělit vliv dvou blokových faktorů, může vést uspořádání do bloků, kdy každý blok odpovídá určité kombinaci verzi dvou blokových faktorů, k příliš velkému počtu pokusů. V takovém případě je vhodné uspořádat pokusy do tzv. latinského čtverce. Podmínkou je stejný počet hlavního i obou blokových faktorů. Blokové faktory se označují jako řádky a sloupce. Každá úroveň hlavního faktoru se vyskytuje v každém řádku i v každém sloupci právě jedenkrát. Uspořádání experimentu do latinského čtverce lze použít za předpokladu, že blokové faktory nevytvářejí interakce ani s hlavním faktorem, ani mezi sebou.

## Dvouvýběrový T-test

Pokud by byly zkoumány pouze dvě úrovně jednoho faktor, používá se pro vyhodnocení odezvy jednotlivých úrovní dvouvýběrový T-test. Jedná se o test středních hodnot a jejich rozdílu.

Studentův t-test je nejčastěji používaným parametrickým testem - používá se pro testování rozdílu 2 středních hodnot  $m$ . Podle statistické významnosti testovaného rozdílu středních hodnot (nejčastěji mezi pokusnou a kontrolní skupinou) usuzujeme na účinnost aplikovaného pokusného zásahu ve sledovaném experimentu. Používá se pro hodnocení experimentů, kde neznáme střední hodnotu základního souboru, a porovnáváme pouze 2 soubory výběrových dat. Tato data mohou být představována buď dvěma měřeními provedenými opakovaně u jedné skupiny jedinců (typicky měření před aplikací pokusného zásahu a po aplikaci – tzv. „párový pokus“ neboli „závislé výběry“) nebo dvěma nezávislými skupinami měření („nepárový pokus“ neboli „nezávislé výběry“). [10]

V případě dvouvýběrového t-testu testujeme nulovou hypotézu:  $H_0 : m_1 = m_2$

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky



V testu vycházíme z rozdílů naměřených párových hodnot u srovnávaných variačních řad. Testujeme hypotézu, že střední hodnota měření před pokusem a po pokuse se rovnají (neboli: rozdíl středních hodnot párových měření je nulový). Nejprve vypočteme rozdíly párových hodnot u výběrového souboru ( $n$  - počet párů) a ze zjištěných rozdílů vypočítáme aritmetický průměr a směrodatnou odchylku „ $s$ “ (resp. rozptyl  $s^2$ ). [10]

Poté vypočteme testovací kritérium (statistiku)  $t = \frac{|\bar{x}|}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}}$  [10]

Pro vyhledání tabulkové kritické hodnoty je nutno stanovit počet stupňů volnosti výběrového souboru:  $n = n-1$  a zvolit hladinu významnosti  $\alpha$ . Vypočtenou statistiku  $t$  porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou  $t_{1-\alpha/2}(v)$ , kde  $n = n-1$  a  $\alpha$  volíme 0,05 nebo 0,01 (viz Tabulky: Kvantily  $t_{1-\alpha/2}(v)$  Studentova  $t$ -rozdělení):

Je-li  $t \leq t_{1-\alpha/2}(v) \Rightarrow$  statisticky nevýznamný rozdíl  $\mu_1$  a  $\mu_2$  při zvolené  $\alpha$  (nezamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ , tzn. že střední hodnota měření před pokusem se neliší od střední hodnoty měření po pokusu). Závěr: pokusný zásah byl neúčinný, protože nebyla ovlivněna střední hodnota měření provedeného po aplikaci zásahu ( $p > 0,05$ ).

Je-li  $t > t_{1-\alpha/2}(v) \Rightarrow$  statisticky významný rozdíl  $\mu_1$  a  $\mu_2$  ( $\alpha = 0,05$ ) nebo statisticky vysoce významný rozdíl (při  $\alpha = 0,01$ ), (zamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ , tzn. střední hodnota měření před pokusem se liší od střední hodnoty měření po pokusu). Závěr: pokusný zásah byl účinný, protože způsobil změnu střední hodnoty u měření provedeného po aplikaci pokusného zásahu ve srovnání se střední hodnotou zjištěnou před aplikací zásahu ( $p < 0,05$  resp.  $p < 0,01$ ). [10]

## Úplný faktoriální experiment na dvou úrovních

V úplném faktoriálním experimentu na dvou úrovních, každý experimentální faktor má pouze dvě úrovně. Experimentální náměry zahrnují všechny kombinace těchto úrovní faktorů. Ačkoli  $2^k$  faktoriální experimenty nejsou schopny pojmut úplný rozsah v rámci faktoru, poskytují užitečné informace při relativně malém počtu pokusů pro jednotlivý faktor. Jelikož  $2^k$  faktoriály mohou ukázat hlavní trendy, mohou být použity k určení směru pro další experimenty. Například, pokud je potřeba dále definovat oblast, kde může existovat optimální nastavení, je možné  $2^k$  faktoriální experiment rozšířit o centrální body. [7]

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

Plánované experimenty se řídí plánem experimentu. Plán experimentu stanovuje 3 charakteristiky („3P“)

- a) počet pokusů, ze kterých se experiment skládá,
- b) podmínky, za kterých se jednotlivé pokusy uskuteční,
- c) pořadí pokusů. [11]

Z uvedeného je zřejmé, že se zde rozlišuje význam pojmů:

pokus = zjištění hodnoty ukazatele kvality za určitých, předem plánovaných, podmínek výroby

experiment = systém všech pokusů. [11]

Formulaci „nejlepší pracovní postupy“ z úvodního odstavce lze precizovat takto: Označíme-li sledovaný ukazatel kvality  $Y$  (resp. ukazatele kvality  $Y_1, \dots, Y_k$ ) a faktory, které jej ovlivňují  $A, B, C, D, \dots$  se mohou pohybovat na různých úrovních, řekněme  $A_1, A_2, A_3, \dots$  pro faktor  $A$ ,  $B_1, B_2, B_3, \dots$  pro faktor  $B$  atd., pak cílem plánování experimentu je:

- 1) kvantifikovat míru významnosti každého z faktorů, což znamená rozhodnout, které z faktorů  $A, B, C, D, \dots$  rozhodujícím způsobem ovlivňují ukazatel kvality  $Y$ ,
- 2) určit úrovně významných faktorů tak, aby  $Y$  bylo optimální a stabilní. [11]

Příklad 1:

Sleduje se, kolik zmáčknutí ( $Y$ ) vydrží pružina až do zničení v závislosti na těchto faktorech:  $L$  = délka pružiny,  $G$  = tloušťka drátu,  $T$  = typ materiálu. Má se zjistit, které faktory jsou rozhodující pro životnost pružiny

Řešení:

Sestavíme tabulku faktorů a jejich uvažovaných úrovní, viz tabulka číslo 4:

- a) délka pružiny  $L$  10cm 15cm
- b) tloušťka drátu  $G$  5mm 7mm
- c) materiál  $T$  A B [11]

Tabulka 4 – Seznam faktorů a úrovní [11]

faktor	označení	dolní úroveň	horní úroveň
		-	+
délka pružiny	L	10cm	15cm
tloušťka drátu	G	5mm	7mm
materiál	T	A	B

Nyní sestavíme plán experimentu, viz tabulka číslo 5.

Existuje více způsobů jak sestavit plán, podle kterého se budou provádět jednotlivé pokusy.

Mezi nejpoužívanější plány patří úplný faktoriální plán, který v daném případě vypadá takto:

Tabulka 5 - Plán experimentu [11]

Pokus	L	G	T	$Y_i$
1	10	5	A	
2	15	5	A	
3	10	7	A	
4	15	7	A	
5	10	5	B	
6	15	5	B	
7	10	7	B	
8	15	7	B	

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon(ij)k$$

Rovnice 1 - model pro dva faktory experimentu [8]

Kde:

$y_{ijk}$  – k-tá hodnota odezvy při i-té úrovni faktoru A a j-té úrovni faktoru B,

$\mu$  – obecná střední hodnota,

$\alpha_i$  – efekt i-té úrovně faktoru A,

$\beta_j$  – efekt j-té úrovně faktoru B,

$(\alpha\beta)_{ij}$  – efekt interakce pro i-tou úroveň faktoru A a j-tou úroveň faktoru B,

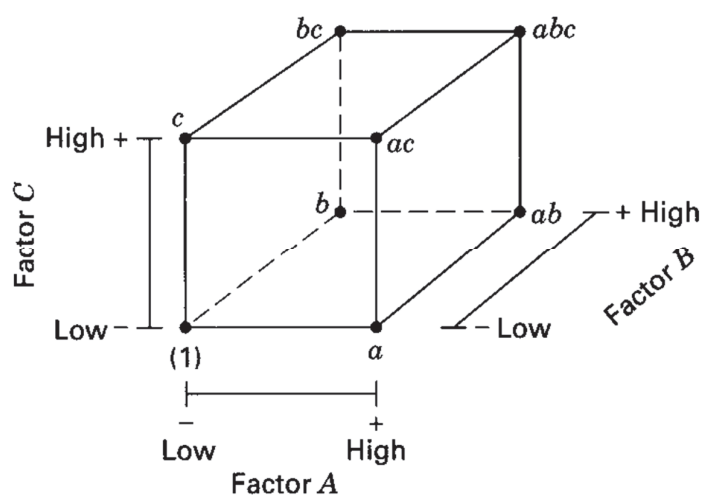
$\varepsilon(ij)k$  – náhodná chyba [8]

## Faktoriál $2^3$ a efekt faktorů

Tabulkově a graficky lze znázornit tento typ faktoriálního experimentu takto, viz tabulka číslo 10 a obrázek číslo 1.

Tabulka 6 - matice designu faktoriálu  $2^3$  [9]

Run	A	B	C	Labels	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	<i>a</i>	1	0	0
3	-	+	-	<i>b</i>	0	1	0
4	+	+	-	<i>ab</i>	1	1	0
5	-	-	+	<i>c</i>	0	0	1
6	+	-	+	<i>ac</i>	1	0	1
7	-	+	+	<i>bc</i>	0	1	1
8	+	+	+	<i>abc</i>	1	1	1



Obrázek 1 - geometrický pohled na  $2^3$  faktoriál [9]

U faktoriálního experimentu  $2^3$  existuje sedm stupňů volnosti mezi osmi sledovanými kombinacemi. Tři stupně volnosti jsou spojeny s hlavními efekty A, B a C. čtyři stupně volnosti jsou spojeny s interakcemi hlavních efektů, každý s AB, AC a BC, a jeden s ABC. Prvně zvážíme odhadnutí hlavních efektů. První zvážíme odhadnout význam efektu A. Význam efektu A, když B a C jsou na spodní úrovni, je  $[(a - (1))/n]$ . Stejně tak, efekt A když B je na

horní úrovni a C je na spodní, je  $[ab-b]/n$ . Efekt faktoru A, když C je na horní a B na spodní úrovni, je  $[ac-c]/n$ . Nakonec, efekt faktoru A, když oba faktory B a C jsou na horní úrovni, je  $[abc-bc]/n$ . Čili, průměr efektu A je jenom průměr těchto čtyř, neboli:

Rovnice 2 - efekt faktoru A [9]

$$A = \frac{1}{4n} [a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc]$$

Tento vzorec může být také vyjádřen jako porovnání mezi čtyřmi možnými kombinacemi na pravé straně krychle, viz obrázek 2a (kde A je na horní úrovni) a čtyři na levé straně (kde A je na spodní úrovni). To znamená, že efekt A je jenom průměr čtyř měření, kde A je na pravé straně ( $\bar{y}_{a+}$ ) minus průměr čtyř měření kde A je na spodní úrovni ( $\bar{y}_{a-}$ ), neboli

Rovnice 3- efekt faktoru A [9]

$$A = (\bar{y}_{a+}) - (\bar{y}_{a-}) = \frac{a + ab + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n}$$

Tato formulace může být vyjádřena takto:

Rovnice 4 - efekt faktoru A [9]

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]$$

Což je identické jako předchozí vzorec.

Legenda k jednotlivým znakům, jak je již zřejmé z tabulky číslo 10, je popsána v tabulce číslo 7.

Tabulka 7 - popis veličin

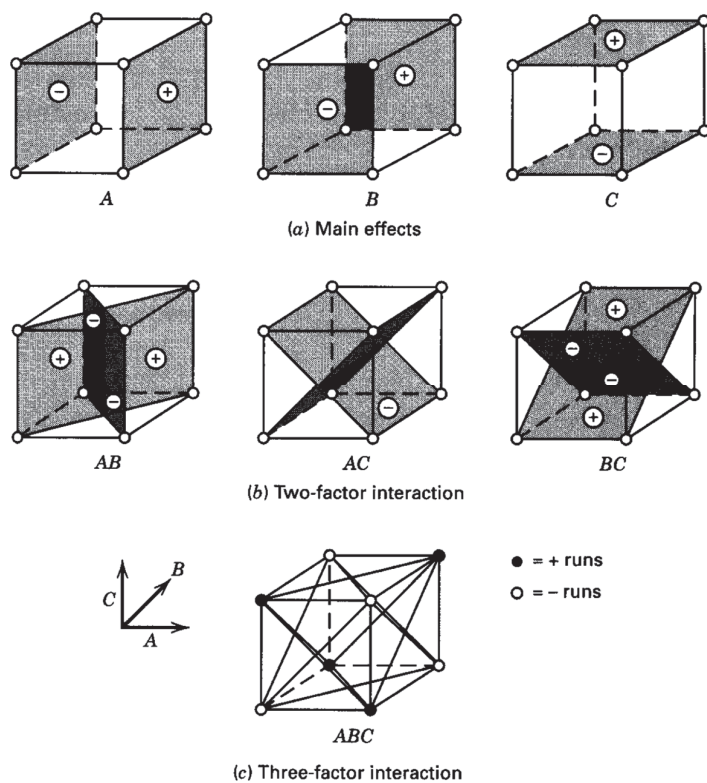
(1)	faktory A, B i C na spodní úrovni
b	faktor B na horní úrovni, A i C na spodní úrovni
a	faktor A na horní úrovni, B i C na spodní úrovni
ab	faktory A i B na horní úrovni, faktor C na spodní úrovni
c	faktor C na horní úrovni, faktory A i B na spodní úrovni
bc	faktory B i C na horní úrovni, faktor A na spodní úrovni
ac	faktory A i C na horní úrovni, faktor B na spodní úrovni

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

abc	faktry A,B i C na horní úrovni
n	počet replikací

Interakce tří faktorů lze graficky znázornit takto, viz obrázek číslo 2:



Obrázek 2 - interakce tří faktorů [9]

Ve stejném způsobu, efekt faktoru B je rozdíl průměru mezi čtyřmi kombinacemi v přední části krychle a čtyřmi zadními. To znamená:

Rovnice 5 - efekt faktoru B [9]

$$B = (\bar{y}_{b+}) - (\bar{y}_{b-}) = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]$$

Efekt faktoru C je rozdíl průměrů mezi čtyřmi kombinacemi v horní části krychle a čtyřmi ve spodní části, tedy:

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

Rovnice 6 - efekt faktoru C [9]

$$C = (\bar{y}_c +) - (\bar{y}_c -) = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]$$

Efekt interakce dvou faktorů může být snadno spočítán. Míra interakce AB je rozdíl mezi průměrem faktoru A vůči faktoru B ve dvou úrovních. Podle konvence, polovina tohoto rozdílu je známa jako AB interakce. Symbolicky:

Rovnice 7 - interakce dvou faktorů [9]

<b>B</b>	<b>Average A Effect</b>
High (+)	$\frac{[(abc - bc) + (ab - b)]}{2n}$
Low (-)	$\frac{\{(ac - c) + [a - (1)]\}}{2n}$
Difference	$\frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{2n}$

Protože AB interakce je polovina tohoto rozdílu,

Rovnice 8 - interakce faktoru AB [9]

$$AB = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{4n}$$

Mohli bychom napsat předchozí vzorec následovně:

Rovnice 9 - interakce faktoru AB [9]

$$AB = \frac{abc + ab + c + (1)}{4n} - \frac{bc + b + ac + a}{4n}$$

V tomto tvaru, interakce AB je jednoduše viditelná jako rozdíl průměru mezi měřeními na dvou diagonálních rovinách krychle, viditelná na obrázku 10b. Při použití stejné logiky a s odkazem na obrázek 10b, interakce AC a BC jsou:

Rovnice 10 - interakce faktoru AC [9]

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc]$$

a

Rovnice 11 - interakce faktoru BC [9]

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]$$

Interakce ABC je definována jako rozdíl průměrů mezi AB interakcí pro čtyři rozdílné úrovně faktoru C. Čili:

Rovnice 12 - interakce faktorů ABC [9]

$$\begin{aligned} ABC &= \frac{1}{4n} \{[abc - bc] - [ac - c] - [ab - b] + [a - (1)]\} \\ &= \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \end{aligned}$$

Jako předtím, můžeme přemýšlet nad interakcí ABC jako rozdílu dvou průměrů. Jsou-li měření dvou průměrů izolovány, definují vrcholy dvou čtyřhranů, které zahrnuje kvádr, viz obrázek 10c. Ve výše uvedených vzorcích, počty v závorkách jsou protiklady v jednotlivých kombinacích. Tabulka plusových a minusových znamének může být získána z protikladů a je vyobrazena v tabulce 8. Znaménka pro hlavní efekty jsou definovány z plusů z horních úrovní a mínusů z dolních úrovní. Jakmile jsou znaménka hlavních efektů stanoveny, znaménka pro zbývající sloupce mohou být získány násobením příslušnými předcházejícími buňkami, řádek po řádku. Například, znaménko ve sloupci AB je výsledek sloupce A a B znamének v každém řádku. Protiklad pro každý efekt může být jednoduše získán z této tabulky. Tabulka 8 má několik zajímavých vlastností:

1. S výjimkou řádku 1, každý sloupec má stejný počet plusů a mínusů.
2. Suma výsledků jednotlivých znamének v každém ze dvou sloupců je nula.
3. Sloupec I násobený jakýmkoli sloupcem zanechává tento sloupec nezměněný. To je, I je identifikační prvek.
4. Výsledek jakýchkoli dvou sloupců produkuje sloupec v tabulce. Například,  $A \times B = AB$ , a  $AB \times B = AB^2 = A$

Pokud je výsledek výpočtu pro jednotlivé efekty kladné číslo, znamená to, že výtěžek z tohoto efektu bude také pozitivní, a naopak. [9]



Tabulka 8 - algebraické znaky pro kalkulace efektů v designu  $2^3$  [9]

Treatment Combination	Factorial Effect							
	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
<i>a</i>	+	+	-	-	-	-	+	+
<i>b</i>	+	-	+	-	-	+	-	+
<i>ab</i>	+	+	+	+	-	-	-	-
<i>c</i>	+	-	-	+	+	-	-	+
<i>ac</i>	+	+	-	-	+	+	-	-
<i>bc</i>	+	-	+	-	+	-	+	-
<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+	+

### Dílčí faktoriální experimenty

Informace v následujících dvou odstavcích byly čerpány ze zdroje [8]. Zkoumáme-li vztahy mezi více než čtyřmi faktory, stává se počet pokusů v úplném faktoriálním experimentu ekonomicky nebo časově náročný a je proto vhodné použít dílčí faktoriální experiment. Experiment typu  $2^k$  lze zkrátit na polovinu, čtvrtinu atd. původního rozsahu. Do experimentu se zahrnou pouze některé kombinace verzí faktorů. Výběr kombinací nelze provést libovolně. Vyváženost experimentu (tj. stejný počet pokusů pro každou verzi faktorů) zajistíme postupem, který je pro jednoduchost vyložen na příkladu s pouze třemi faktory.

Například, nejjednodušší způsob, jak zjistit vliv řezné rychlosti (*A*), geometrie nástroje (*B*) a řezného úhlu (*C*) i jejich interakce na životnost obráběcího nástroje, je vybrat dvě verze každého faktoru, tj. provést experiment  $2^3$ . Tento experiment vyžaduje provedení nejméně osmi pokusů. Předpokládejme nyní, že máme k dispozici jen čtyři experimentální vzorky a proto počet pokusů musíme zkrátit na polovinu. Kombinace verzí faktorů *A*, *B*, *C* při každém z osmi pokusů (bez znáhodnění) ukazuje tabulka číslo 9.

Tabulka 9 – Kombinace faktorů dílčího faktoriálu [8]

pokus	faktory			interakce			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Tab. 3.7

Přístup dílčího faktoriálu je předmětem této diplomové práce. Z pohledu efektivity se jedná o silný nástroj k nalezení významných faktorů, případně jejich interakcí.

### Experimenty pro hledání optimální odezvy

Cílem této diplomové práce je nejenom definovat klíčové parametry a zjistit jejich vzájemné interakce, nýbrž, jak název práce uvádí, optimalizovat design s ohledem na parametr, tedy výtlačnou sílu. To znamená, bude zapotřebí hledat optimální odezvu. Parametry tedy budou následně nastaveny tak, aby výsledná výtlačná síla dosahovala kýžené úrovně.

Volbou vhodných úrovní kvantitativních faktorů můžeme dosáhnout optimální hodnoty odezvy, to znamená maxima, minima nebo jmenovité hodnoty. Podstata hledání této optimální hodnoty spočívá v modelování závislosti odezvy na zkoumaných faktorech nejdříve polynomicou funkcí 1. stupně (lineární vzhledem ke zkoumaným faktorům), pomocí níž zjistíme směr nejrychlejšího růstu (poklesu) hodnot odezvy, později v okolí extrému pomocí polynomicke funkce 2. stupně, která obsahuje kvadratické členy [8]

Rovnice 13 - hledání optimální odezvy

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_{12}X_1X_2 + \dots + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + \dots$$

Parametry této funkce se určí pomocí metody nejmenších čtverců, jedná se o běžnou metodu regresní analýzy. Abychom mohli odhadnout parametry této funkce, musíme provést buď experimenty typu  $3^k$  nebo složené experimenty. Experimenty typu  $3^k$  vyžadují velký počet pokusů, i v případě zkrácení. Složené experimenty, které vzniknou přidáním  $2k+1$  experimentálních bodů (kombinací verzí) k původnímu experimentu  $2^k$  jsou méně rozsáhlé,

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

navíc mají tu výhodu, že je není třeba plánovat předem, ale experimentátor se může rozhodnout doplnit původní experiment  $2^k$  domnívá-li se, že se hodnota odezvy přiblížila extrému, a chce jeho okolí blíže prozkoumat. [8]

### **Efekt faktoru obecně**

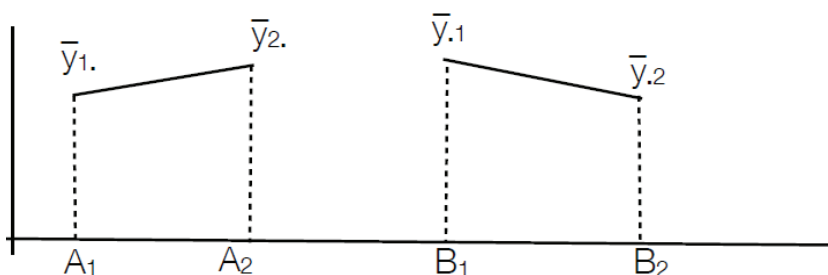
Efekt faktoru = průměrná změna odezvy při změně úrovně faktoru

	B1	B2
A1	y11	y12
A2	y21	y22

$$\hat{A} = \frac{y_{21} + y_{22}}{2} - \frac{y_{11} + y_{12}}{2}$$

$$\hat{B} = \frac{y_{12} + y_{22}}{2} - \frac{y_{11} + y_{21}}{2}$$

Rovnice 14 - odezva po změně faktoru [4]



Obrázek 3 – Odezva změny úrovně faktoru

Statistický model pro dva faktory A, B:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ij}$$

$y_{ij}$ ... odezva

$\mu$ ... společná úroveň

$\alpha_i$ ... vliv i-té úrovně faktoru A

$\beta_j$ ... vliv j-té úrovně faktoru B

$(\alpha\beta)_{ij}$ ... vliv interakce i-té a j-té úrovně faktorů A a B

$\epsilon_{ij}$ ... náhodná chyba při i-té a j-té úrovni faktorů A a B [4]

## 6 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU

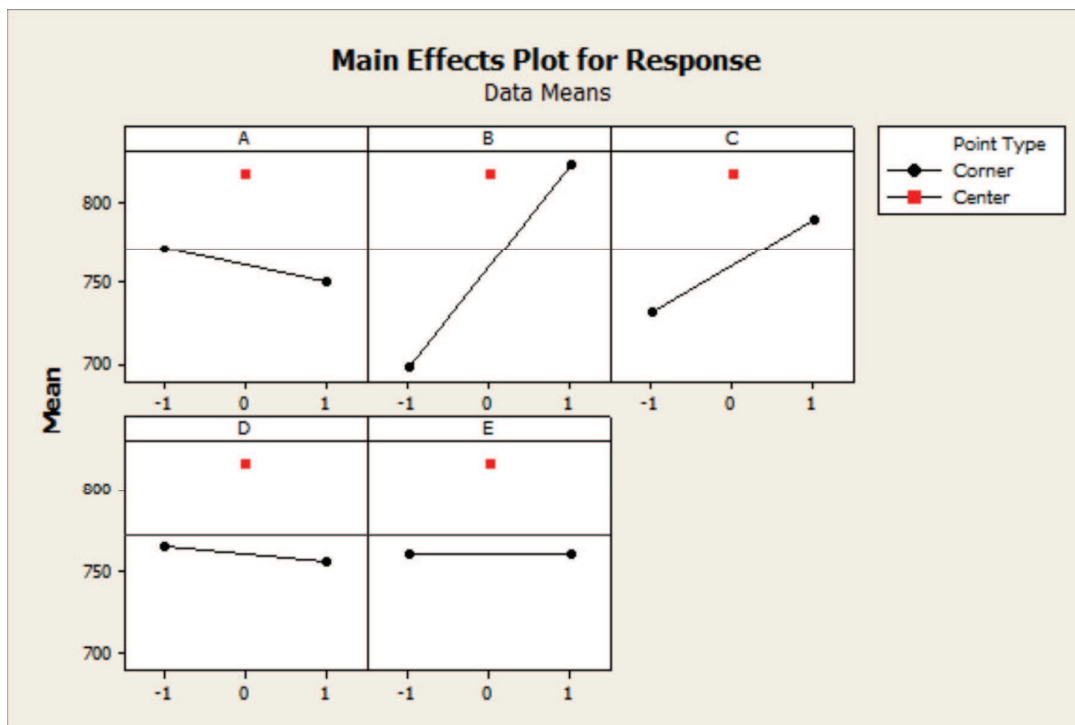
### 6.1 Graf hlavních efektů

Graf hlavních efektů slouží pro přehledné zobrazení změny odezvy střední hodnoty při změně faktoru. Když je faktor A na spodní úrovni (-1) je odezva vyšší nežli v případě faktoru A na horní úrovni (+1). Na obrázku číslo 4 je vidět nejsilnější faktor B, ostatní faktory nemají tak vysoký vliv na změnu odezvy. Na obrázku číslo 5 je znázorněn efekt interakce dvou faktorů prvního řádu. Zde se tedy faktory vzájemně ovlivňují. Je zřejmé, že zanedbáním interakce

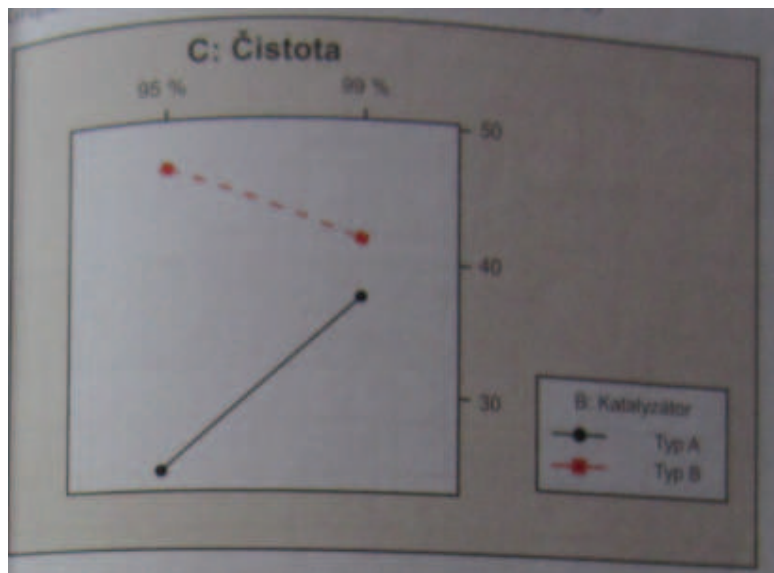
---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

faktorů bychom nezískali ucelenou informaci. Samotné faktory v tomto případě nemají takový význam, jako jejich interakce. V praxi se takové případy vyskytují, například v chemicko tepelném zpracování kovů, kde důležitou roli hraje chemické složení zpracovávaných materiálů a teplota zušlechťovacího procesu. Kalící proces včetně následného popouštění nebude efektní, přestože teploty budou dostatečné, bez dostatečného obsahu uhlíku ve složení materiálu. Zde je interakce obou faktorů, tedy teploty a procenta uhlíku, zřejmá.



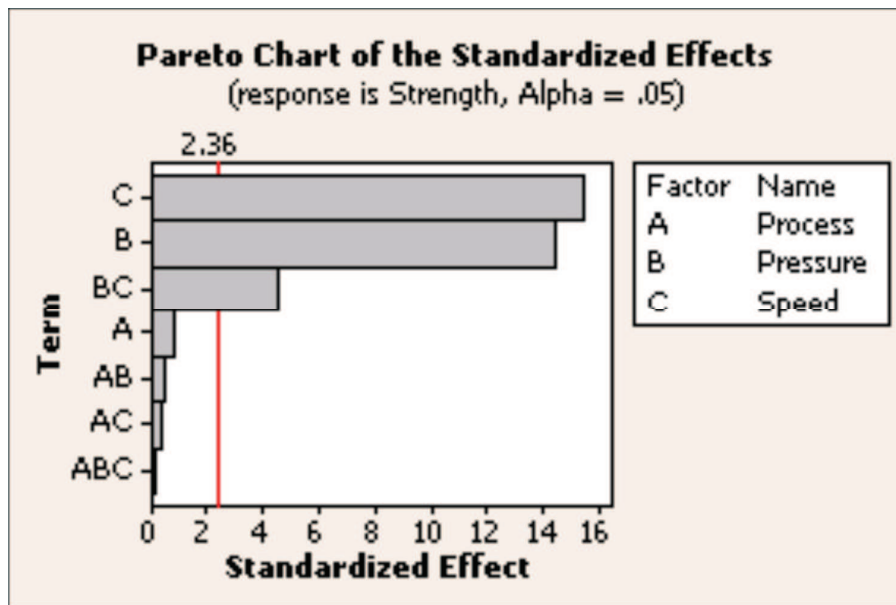
Obrázek 4 - graf hlavních efektů [7]



Obrázek 5 - pozitivní interakce [12]

## 6.2 Paretova analýza

Použití pareto analýzy se užívá k zobrazení významu efektu. Graf zobrazuje absolutní hodnotu efektu a vykresluje referenční čáru. Každý efekt, který tuto linii překračuje je potenciálně významný, viz obrázek číslo 5. [7]



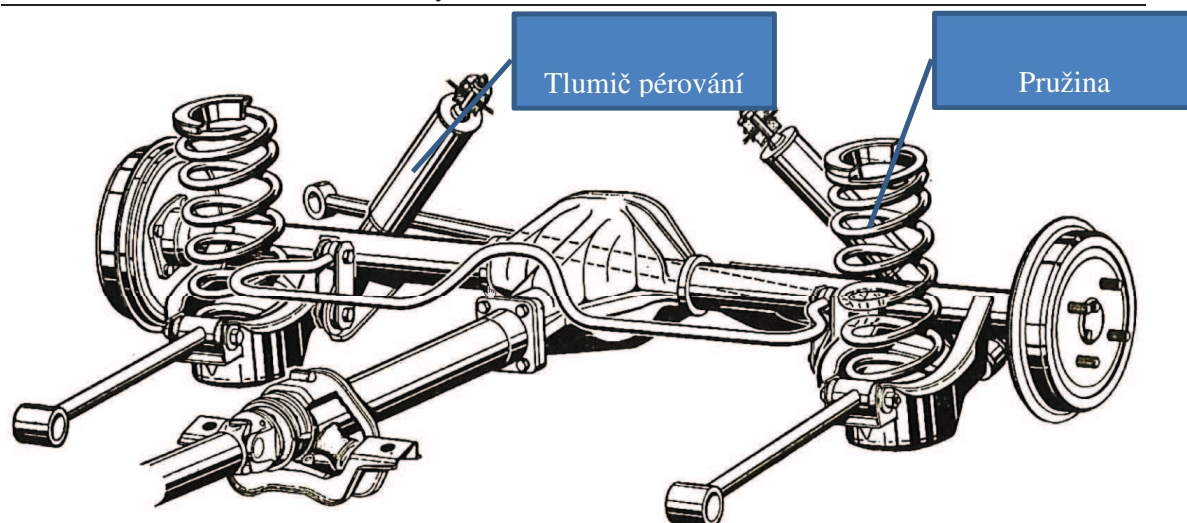
Obrázek 6 - Pareto analýza [7]

## 7 PRAKTICKÁ ČÁST

### 7.1 Tlumiče pérování

Tlumiče pérování jsou součástí nápravy vozidel. Jejich hlavními funkcemi jsou:

- Zajistit bezpečné jízdní vlastnosti
- Zajistit jízdní komfort



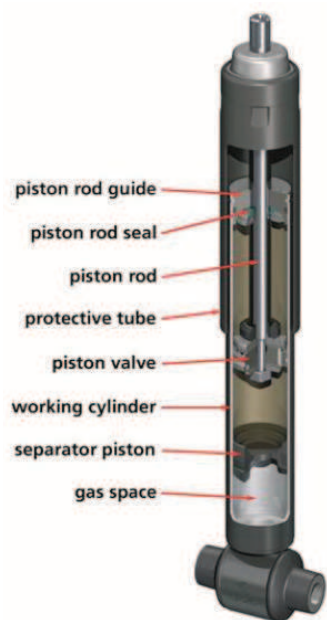
Obrázek 7 - zadní náprava osobního vozidla [12]

V rámci kinematiky celé nápravy vozidla, viz obrázek číslo 6, zajišťuje tlumič také pevné dorazy celé nápravy při plném roztahení a stlačení nápravy. Stejně tak další významné síly přicházejí při přenosech sil odpružení a při brzdných a bočních silových událostech. To zpravidla vyžaduje dobré mechanické a tepelné vlastnosti.

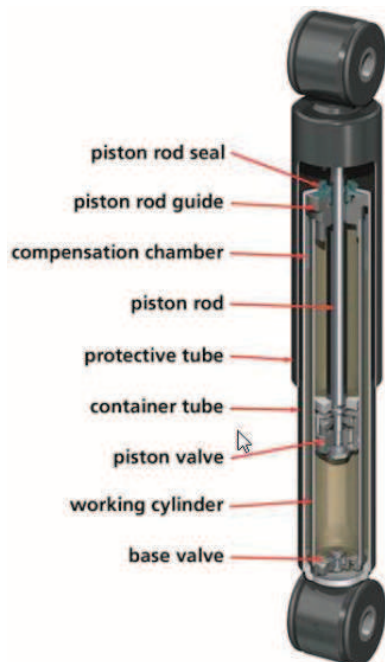
K zajištění výše uvedených základních funkcí, kdy je tlumič pérování vystaven kmitavému pohybu od nárazů a pružení, musí tyto kmity kontrolovaně a optimálně tlumit. Ve firmě Monroe Czechia, kde bude samotný plánovaný experiment vyhotoven, vyrábějí tlumiče pérování ve dvou variantách:

- a) Jednoplášťové tlumiče olejopneumatické (obrázek číslo 7)
- b) Dvouplášťové tlumiče kapalinové (obrázek číslo 8)





Obrázek 8 - jednovlášťový tlumič [13]



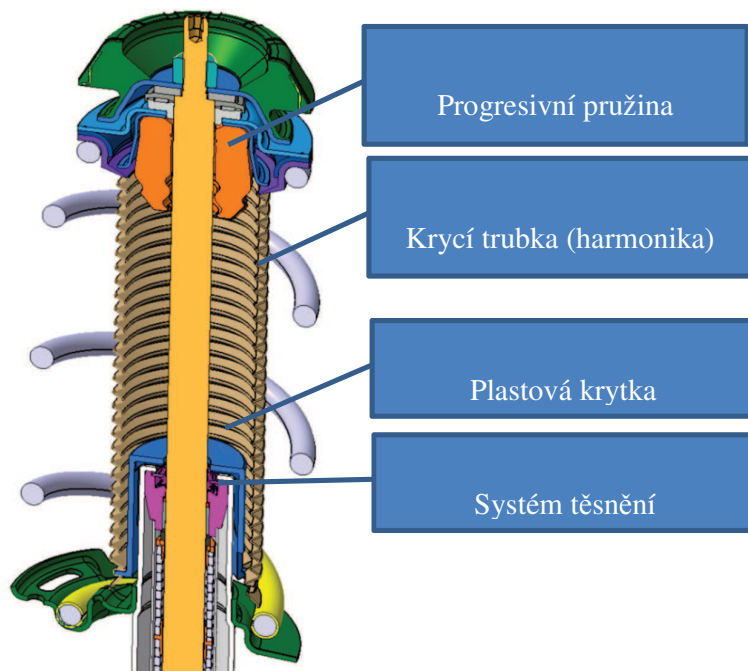
Obrázek 9 - dvouvlášťový tlumič [13]

---

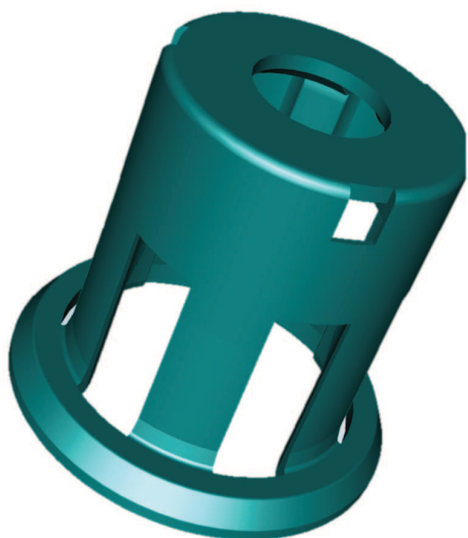
Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

Tlumiče pérování, na rozdíl od samotné pružiny, mění kinematickou energii na tepelnou, vytvářením odporu, čímž zabraňují rozkmitání vozidla a zajišťují tak bezpečné chování ovládání

## 7.2 Plastová krytka (plastový doraz) jako součást tlumiče pérování



Obrázek 10 - tlumič pérování v řezu



Obrázek 11 - plastová krytka tlumiče pérování

Plastová krytka, viz obrázek číslo 9 a 10, je součástí sestavy tlumiče pérování. Jak je vidět na obrázku číslo 9, krytka je nasunuta na kovové části tlumiče, na tzv. těle tlumiče. Její tvar je navržen tak, aby splňoval požadavky, které jsou na ni kladeny. Samotné požadavky a funkce budou popsány dále v této diplomové práci.

### 7.3 Funkce

Dorazová krytka plní následující základní funkce:

1. Dynamický doraz pro progresivní pružinu: Krytka je vystavena namáhání ve formě kompresních dorazů, které u předních tlumičů dosahují sil až 50kN, u zadních tlumičů až 30kN. Síly jsou odvislé od typu vozidla, typu nápravy, typu tlumení atp.
2. Ochrana těsnícího systému: Jelikož prostředí v těle tlumiče pod krycí trubkou je velmi dynamické, je zapotřebí citlivý těsnící systém chránit proti rázům od progresivní pružiny a proti možným nečistotám, které by samotné těsnění tlumiče mohly narušit a způsobit tak ztrátu funkce tlumiče v podobě vytékání oleje.
3. Spojení s ochrannou plastovou trubkou: Aby mohla být ochranná trubka typu harmonika funkční, musí být spojena na spodní straně k plastové krytce. Souží tedy jako spojovací část.

4. Nádoba na zachytávání oleje: Tlumič se po dobu své životnosti stává méně těsný, čímž se olej dostává v menším množství skrze těsnění. Takový olej, aby nezpůsobil další problémy, může být krytkou zachycen.
5. Jako vodící část pro ochrannou trubku: Pokud je design ochranné trubky navržen jako pevná plastová trubka a není tedy zachycen na krytce samotné, slouží krytka jako vodící část pro ochrannou trubku a zamezuje tedy poškrábání tlumiče ochrannou trubkou.

## 7.4 Design a požadované vlastnosti

Požadavky na design vycházejí z požadovaných funkcí. V posledních dvaceti letech v automobilovém průmyslu převažuje objem plastové výroby výrobu oceli. Důvodem je tlak na cenu. Cena oceli průběžně roste, je tedy záhodno hledat materiálové náhrady v oblastech, kde je to možné. Stejně tak složitější tvary není možné vyrobit technologií průběžného lisování kovů. Plastová krytka s sebou tedy nese několik výhod, až už cenových, tak i technologických. Vstřikování plastů je technologie velmi rozšířená a dovoluje plasty, tedy termoplasty, reaktoplasty a elastomery míchat s kompozitními příměsi. Tak lze dosáhnout vlastností, které vyhovují širokému rozsahu požadavků.

Aby bylo možné splnit výše uvedené funkce, musí dorazová krytka vykazovat jisté vlastnosti. Použitý materiál, zkoumaný v rámci této diplomové práce, je polyamid (PA6) s obsahem skleněných vláken. Obsah skleněných vláken bude dále zkoumán jako jeden z faktorů průmyslového experimentu. Jedná se tedy o kompozitní materiál vyrobený technologií vstřikování plastů do forem.

Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna, mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem (polymerní matricí), se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí. [14]

Kombinace Polyamidu 6 a skelných vláken se v automobilovém průmyslu osvědčila na mnoha aplikacích. Polyamidy obsahují velký podíl vody, což ovlivňuje jejich vlastnosti. Podíl vlhkosti se tedy musí regulovat, aby nebyly požadované vlastnosti ovlivněny. Mezi klíčové vlastnosti samotného polyamidu patří pružnost, tuhost a rázová pevnost. To jsou vlastnosti,

kteřé jsou pro výrobu dorazové plastové krytky pro tlumiče pérování vyžadovány. Přidáním skelných vláken se tuhost i pevnost výrazně zvýší.

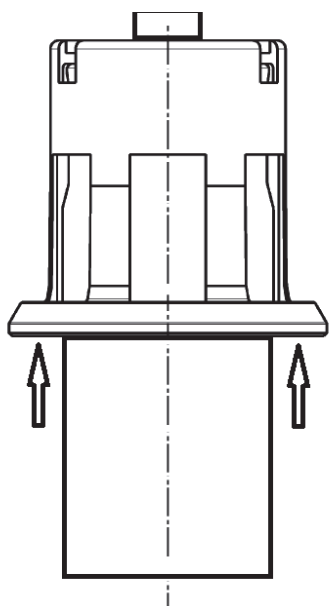
Skleněná textilní vlákna se začala vyrábět koncem 19. století. Sklo je odolné proti ohni a noha chemikáliím, má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti. Vlhkost však pevnost vláken snižuje a odolnost proti trvalému namáhání a pevnost v oděru je rovněž nízká. Průměrná hmotnost je asi 2500 kg/m<sup>3</sup>, bod tání až přes 1000° C, dlouhodobě snáší sklo teploty až 450° C. Filamenty (jednosměrné svazky) se zpracovávají na tkaniny, ve tkaninách se též kombinuje osnova nebo útek s přízemi z aramidových nebo uhlíkových vláken. Ze skleněných vláken se také zhotovují izolace proti žáru nebo chemickým vlivům ve formě rohoží (soudržnost je zajištěna lisováním nebo prošíváním vrstvy vláken) a hadic, stuh a šňůr. [14]



Obrázek 12 - vláknitý kompozit bez orientace [14]

Požadované mechanické vlastnosti:

1. Dynamická pevnost – odolnost proti cyklickému namáhání až do výše amplitudy ca 40kN
2. Teplotní odolnost – odolnost proti teplotnímu rozsahu -40 až 120°C
3. Rozměrová stálost – vlastnost zachovávat tvar i rozměry
4. Tuhost – míra změny vzhledem k velikosti vnější síly
5. **Výtlačná síla z těla tlumiče** – minimálně 250N



Obrázek 13 - měření výtlačné síly z těla tlumiče

Právě výtlačná síla je předmětem této diplomové práce. Jedná se o velmi důležitou charakteristiku, která zajišťuje dostatečné spojení s kovovým tělem tlumiče. Tato síla je důležitá k tomu, aby zajistila dostatečnou sílu proti plastovému krytu pístnice, který je na krytku připevněn a tím ji z těla tlumiče vytlačuje. Dynamickými rázy se také radiální tuhost plastové krytky snižuje, je proto důležité mít sílu v dostatečné výši. Praxe ukázala mnoho případů, kdy navrácené tlumiče od zákazníků mají často plastovou krytku z těla tlumiče “vyskočenou“. Definovat výtlačnou sílu znamená správně volit ty parametry, které ji ovlivňují. Průmyslový experiment je vhodným nástrojem Six sigma procesu, který pomůže se správnou volbou klíčových faktorů. Základními faktory se bude autor věnovat v další kapitole této diplomové práce.

Tabulka 10 - Srovnávací tabulka vlastností kompozitních a konvenčních materiálů [15]

<b>materiál</b>	<b>měrný Youngův modul Y.modul / hustota [MNm / kg]</b>	<b>měrná pevnost v tahu pevnost / hustota [kNm / kg]</b>
<b>Vysoce pevné Al – Zn – Mg slitiny</b>	25,7	180
<b>Kalené nízkoalokované oceli</b>	26,4	270
<b>PAD 6</b>	1,8	61
<b>PAD 6 plněný skleněnými vlákny, <math>V_f = 0,25</math></b>	9,5	141
<b>PES pryskyřice + skleněná vlákna, <math>V_f = 0,5</math> ve směru II s vlákny</b>	19,7	390
<b>Lamino – epoxidová pryskyřice + C-vlákna, <math>V_f = 0,6</math> ve směru II s vlákny</b>	135	865
<b>Přírodní materiály</b>	Nedostižné mnohonásobně vyšší hodnoty	
<b>Stéblo trávy (kompozit)</b>	Vlákno pavučiny je materiál s absolutně nejvyšší měrnou pevností	
<b>Pavoučí síť</b>	Vlákno pavučiny je materiál s absolutně nejvyšší měrnou pevností	

## 7.5 Naplánování plánovaného experimentu

Jelikož výtlačná síla plastové krytky je odezva, kterou chceme sledovat, je zapotřebí stanovit vstupující faktory (proměnné), které tuto charakteristiku ovlivňují. Takových faktorů bude více, a můžeme předpokládat i jejich interakce, tedy jejich vzájemné ovlivňování. K takovému účelu bude vyhotoven úplný faktoriální experiment o dvou úrovních. Auto této diplomové práce bude vycházet ze stávající situace, kdy bude hledat optimální odezvu na požadovaný parametr, tedy výtlačnou sílu.

## 7.6 Popis stávající situace

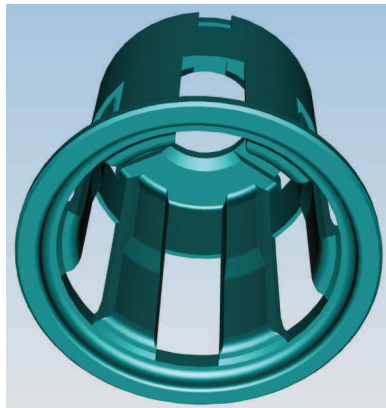
Plastová krytka již existuje jako prototyp. Její vlastnosti však nejsou optimální. Výtlačná síla dosahuje malých hodnot. Jako požadovaná hodnota, kterou bude tato diplomová práce řešit, je výtlačná síla  $>250\text{N}$  při  $23^\circ\text{C}$ . Jedná se tedy o jednostrannou toleranci. Jelikož by ale napětí bylo při vysokých hodnotách ( $>1\text{kN}$ ) zbytečně vysoké a mohlo způsobovat praskání krytky při samotném nalisování, bude cílená (tedy optimální) hodnota výtlačné síly kolem  $500\text{N}$ . Tato hodnota je tedy cílená.

Níže v tabulce jsou hodnoty naměřené pro prototyp dle stávající výkresové dokumentace.

Tabulka 11 - výtlačná síla (současný stav)

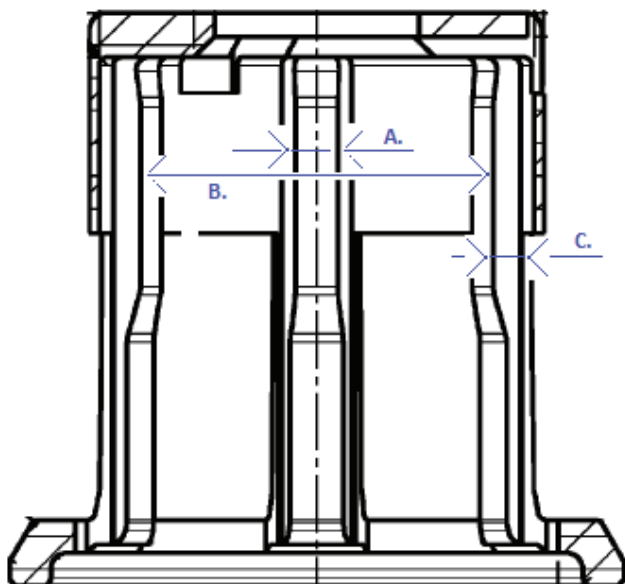
1.	123N
2.	121N
3.	118N
4.	139N
5.	124N
6.	115N
Průměr	123,3N

Dle výše uvedených naměřených hodnot, hodnota výtlačné síly je hluboko pod požadovanou hodnotou min 250N.



Obrázek 14 - plastová krytka 3D náhled





Obrázek 15 - plastová krytka v řezu (označené parametry)

Prvotní rozměry pro plastovou krytku byly definovány dle doporučených interakcí s kovovým tělem tlumiče softwarem Catia v.5. Jedná se tedy o teoretické výpočty, které jsou pouze jakýmsi prvotním odhadem. Rozměry je poté potřeba jemně dodefinovat, aby byly žádané charakteristiky na požadované úrovni. Pro teoretickou kalkulaci výtlačné síly bylo použito třecího koeficientu 0,15 dle definice použitého lakovacího procesu kovové trubky. Rozměry uvedené v tabulce číslo 12, jsou dle zkušeností zásadní k ovlivnění výtlačné síly plastové krytky. Buď všechny, nebo jejich část, budou použity jako faktory samotného experimentu.

Tabulka 12 - prvotní specifikace plastové krytky

	<b>Parametr</b>	<b>Nominální rozměr</b>	<b>tolerance</b>	<b>Skutečnost</b>
A.	Šířka žebra	8,8mm	±0,5mm	8,4mm
B.	Vnitřní průměr	47,1mm	±0,1mm	47,2mm
C.	Tloušťka stěny	4,15mm	±0,1mm	4,21mm

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

D.	Skleněná vlákna	30%	$\pm 2\%$	30%
----	-----------------	-----	-----------	-----

Rozměry těla tlumiče jsou definovány následovně:

- a) Vnější průměr 50,0  $\pm$ 0,05mm
- b) Frikční koeficient 0,12  $\pm$ 0,02

Prvotní náměry nám dávají údaje o stávajícím stavu, tedy jaké rozměry má stávající plastová krytka a jakých výtlačných sil dosahuje. Předmětem průmyslového experimentu bude její optimalizace s cílem dosáhnout vyšších hodnot okolo 500N. Proto byly definovány klíčové faktory, které tuto charakteristiku ovlivňují. Ty budou předmětem dalšího zkoumání.

## 7.7 Typ experimentu a zvolené faktory

Zvolené faktory byly předmětem brainstormingu. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, základní parametry pro definici výtlačné síly plastové krytky jsou následující. Za účelem experimentu budou stanoveny hraniční tolerance těchto klíčových faktorů, abychom lépe porozuměli jejich vlivům a korelacím s jinými faktory.

- a) Šířka žebra
- b) Vnitřní průměr
- c) Tloušťka stěny
- d) Procento skleněných vláken

Zvoleny tedy byly všechny faktory, které jsou pro výtlačnou sílu klíčové, a jejich vliv je rozhodující. V případě úplného experimentu  $2^k$  by bylo měřeno  $2^4$  jednotlivých měření, tedy 16 měření. Při počtu replikací 3 se jedná o 16 x 3 měření, tedy 48 měření. S ohledem na cenu jednotlivých vzorků, která činí zhruba 600 CZK, pokud budou vyhotoveny formou obrábění nebo 3D tisku, není cenová náročnost úplného experimentu nijak vysoká. Přesto bylo na základě samotné nákladovosti rozhodnuto pro poloviční experiment ( $1/2$ ) s nižším stupně rozlišení. Jednotlivé úrovně klíčových faktorů byly diskutovány v rámci týmu a definice je tedy následující, viz tabulka číslo 12.

## 7.8 Stupeň rozlišení návrhu

Pro dílčí faktoriální experiment se tedy snižuje stupeň rozlišení. To prakticky znamená snížení vypovídající hodnoty (princip zachování úspornosti). Přesto by mělo být docíleno zjištění významných faktorů. Pokud by nás nezajímala interakce třetího řádu (za předpokladu, že významný faktor se projeví stejně tak), můžeme počet pokusů (odezev) omezit.

To znamená, že některé vypočtené efekty nebude jednoduché přímo přiřadit faktorům či jejich interakcím. Stupeň rozlišení se označuje římskou číslicí od III. do V. [16]

- Čím je experiment úspornější, tím má menší rozlišovací schopnost
- Stupeň rozlišení experimentu značíme R
- V návrhu o rozlišení R budou interakce I-tého řádu rozlišené od jiných interakcí řádu nižšího než R-1 [16]

Částečný experimentu bude tedy jinak označen. V Minitabu se jedná o následnou terminologii:

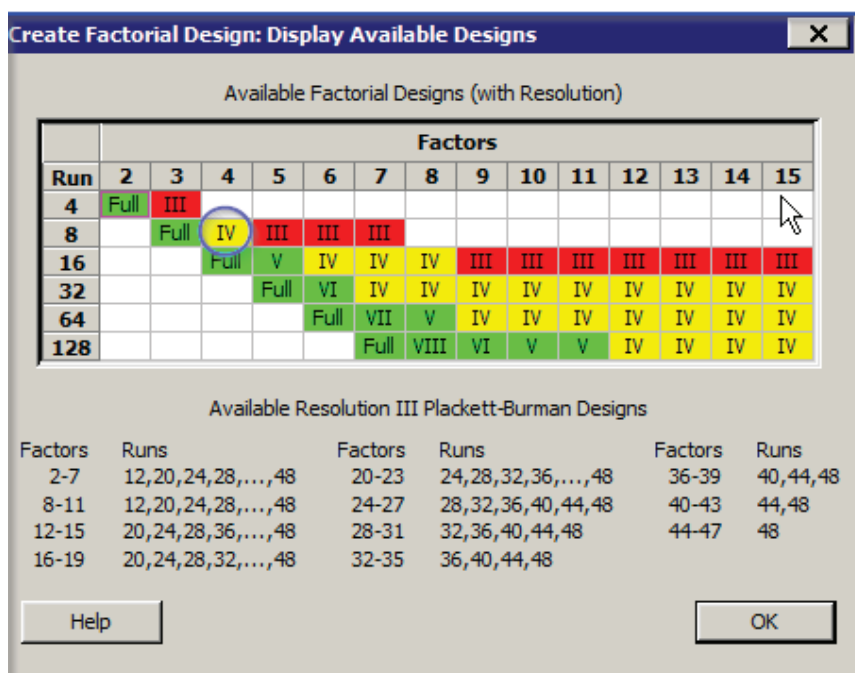
**I<sup>k-p</sup>**

I je počet úrovní

k je počet zkoumaných faktorů

p je počet faktorů, které jsme vnutili do původního úplného návrhu experimentu [16]

V našem případě se jedná o 8 měření x 3 replikace = 24 měření. To je přiřazeno ke stupni rozlišení IV., viz obrázek číslo 15 níže.



Obrázek 16 - Minitab (stupeň rozlišení)

Tabulka 13 - zvolené parametry a jejich úrovně

	Parametr	Nominální rozměr	tolerance	Skutečnost	MIN	MAX
A.	Šířka žebra	8,8mm	±0,5mm	8,4mm	6,8mm	10,8mm
B.	Vnitřní průměr	47,1mm	±0,1mm	47,2 mm	46,9mm	47,5mm
C.	Tloušťka stěny	4,15mm	±0,1mm	4,21mm	3,15mm	5,15mm
D.	Skleněná vlákna	30%	±2%	30%	0%	30%

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

## 7.9 Použitý Software

Autor této diplomové práce si vybral jako software pro vyhodnocení výsledků program Minitab. Důvodem je dostupnost programu v pracovním prostředí, stejně tak jeho vhodnost.

- Je to patrně nejčastěji používaný SW pro analýzu dat v podnikové sféře
- Určitě patří k těm uživatelky nejpřívětivějším – pro běžného uživatele MS Excel je zvládnutí základních funkcí otázkou půl hodiny [16]

## 7.10 Realizace plánovaného experimentu

Chceme-li mít jistotu, že z požadovaného experimentu získáme požadované informace, musíme použít všechny možné kombinace faktorů [16], avšak jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, bude vyhotoven experiment 1/2. S ohledem na dostupnost vzorků budou jednotlivé kombinace faktorů realizovány.

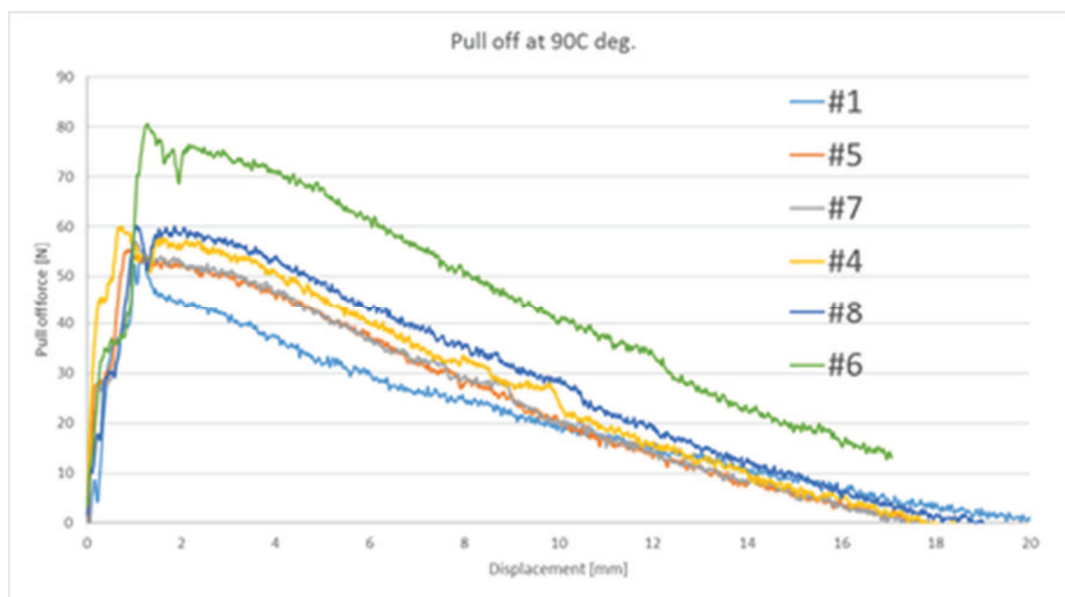
Byla definována odezвовá tabulka č. 14, ve které jsou vybrané faktory a jejich úrovně. Do posledního sloupce bude postupně hodnota výtlačné síly zaznamenána.

Tabulka 14 – pořadí jednotlivých měření

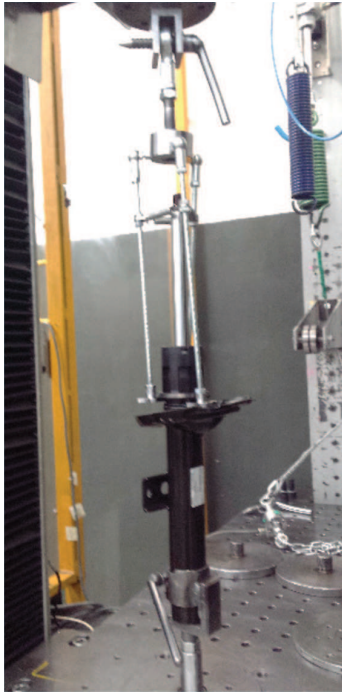
StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A Šířka žebra [mm]	B Vnitřní průměr [mm]	C Tloušťka stěny [mm]	D Skleněná vlákna [%]	Výtlačná síla [N]
12	1	1	1	10,8	47,5	3,15	0	
3	2	1	1	6,8	47,5	3,15	30	
11	3	1	1	6,8	47,5	3,15	30	
8	4	1	1	10,8	47,5	5,15	30	
17	5	1	1	6,8	46,9	3,15	0	
15	6	1	1	6,8	47,5	5,15	0	
13	7	1	1	6,8	46,9	5,15	30	
7	8	1	1	6,8	47,5	5,15	0	
1	9	1	1	6,8	46,9	3,15	0	
20	10	1	1	10,8	47,5	3,15	0	
10	11	1	1	10,8	46,9	3,15	30	
19	12	1	1	6,8	47,5	3,15	30	
6	13	1	1	10,8	46,9	5,15	0	
24	14	1	1	10,8	47,5	5,15	30	
21	15	1	1	6,8	46,9	5,15	30	
9	16	1	1	6,8	46,9	3,15	0	
4	17	1	1	10,8	47,5	3,15	0	
2	18	1	1	10,8	46,9	3,15	30	
22	19	1	1	10,8	46,9	5,15	0	
5	20	1	1	6,8	46,9	5,15	30	
14	21	1	1	10,8	46,9	5,15	0	
16	22	1	1	10,8	47,5	5,15	30	
18	23	1	1	10,8	46,9	3,15	30	
23	24	1	1	6,8	47,5	5,15	0	

## 7.11 Měřicí zařízení

Pro měření výtláčné síly plastové krytky bude použit trhacího stroje Instron a reportována jako tahová křivka (L-D) síla x dráha, vyhodnocena v Newtonech jako základní jednotka síly.



Obrázek 17 - křivka výtláčné síly (pouze referenční hodnoty)



Obrázek 18 - měření výtlačné síly na trhacím stroji

## 7.12 Naměřená data

Autor diplomové práce postupně naměřil, dle dostupnosti vzorků, všechny kombinace jednotlivých faktorů. Hodnoty byly zaznamenány do odezvové tabulky.

Tabulka 15 - odezвовá tabulka, naměřená data

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Šířka žebra	Vnitřní průměr	Tloušťka stěny	Skleněná vlák	Výtláčná síla (N)
12	1	1	1	10,8	47,5	3,15	0	181
3	2	1	1	6,8	47,5	3,15	30	71
11	3	1	1	6,8	47,5	3,15	30	130
8	4	1	1	10,8	47,5	5,15	30	490
17	5	1	1	6,8	46,9	3,15	0	288
15	6	1	1	6,8	47,5	5,15	0	121
13	7	1	1	6,8	46,9	5,15	30	890
7	8	1	1	6,8	47,5	5,15	0	181
1	9	1	1	6,8	46,9	3,15	0	339
20	10	1	1	10,8	47,5	3,15	0	134
10	11	1	1	10,8	46,9	3,15	30	985
19	12	1	1	6,8	47,5	3,15	30	48
6	13	1	1	10,8	46,9	5,15	0	1085
24	14	1	1	10,8	47,5	5,15	30	568
21	15	1	1	6,8	46,9	5,15	30	1142
9	16	1	1	6,8	46,9	3,15	0	228
4	17	1	1	10,8	47,5	3,15	0	124
2	18	1	1	10,8	46,9	3,15	30	1225
22	19	1	1	10,8	46,9	5,15	0	984
5	20	1	1	6,8	46,9	5,15	30	985
14	21	1	1	10,8	46,9	5,15	0	1162
16	22	1	1	10,8	47,5	5,15	30	477
18	23	1	1	10,8	46,9	3,15	30	1075
23	24	1	1	6,8	47,5	5,15	0	183

Dalším krokem k vyhodnocení experimentu bude výpočet efektů faktorů a jejich interakcí. Výsledkem je první, nahrubo načrtnutý model procesu. Ten bude mít podobu:

$$y = \text{konstanta} + a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + \dots + u \cdot x_1 \cdot x_2 \dots$$

y = odezva

a; b; c; .... Regresní koeficienty

x<sub>1</sub>; x<sub>2</sub>; x<sub>3</sub> ... hodnoty faktorů [16]



## 7.13 Vypočítané efekty (session Windows)

Tabulka 16 - vypočtené efekty

### Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		545.7	15.9	34.39	0.000	
Šířka žebra	323.7	161.8	15.9	10.20	0.000	1.00
Vnitřní průměr	-640.0	-320.0	15.9	-20.17	0.000	1.00
Tloušťka stěny	286.7	143.3	15.9	9.03	0.000	1.00
Skleněná vlákna	256.3	128.2	15.9	8.08	0.000	1.00
Šířka žebra*Vnitřní průměr	-117.0	-58.5	15.9	-3.69	0.002	1.00
Šířka žebra*Tloušťka stěny	-113.0	-56.5	15.9	-3.56	0.003	1.00
Šířka žebra*Skleněná vlákna	-64.7	-32.3	15.9	-2.04	0.058	1.00

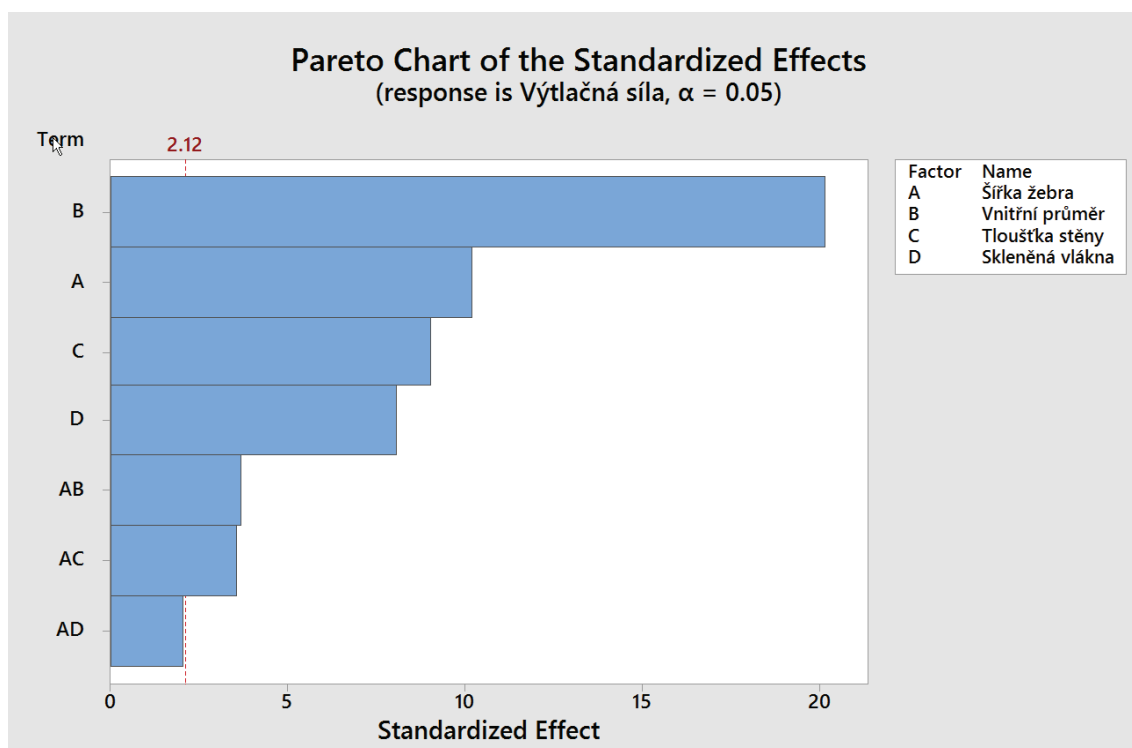
Effect: efekt faktoru nebo interakce faktorů

Coef: regresní koeficient (1/2 efektu)

P-Value: statistická významnost faktoru. Vliv mají takové faktory, kde hodnota je větší nežli zvolená hladina významnosti.

## 7.14 Paretův diagram (diagram významnosti)

Paretův diagram poslouží k oddělení faktorů či interakcí, které jsou významné a které nikoli.



Obrázek 19 - Pareto diagram

Dle Paretova diagramu je zřejmé, že významných vlivů je několik. Dalo by se říci, že všechny mají nějaký vliv a nedají se považovat pouze za šum. Přesto, největší vliv mají samotné faktory, nikoli jejich kombinace. Nejvyšší vliv na hodnotu výtlačné síly má vnitřní průměr krytky. Dále šířka žebra následovaná tloušťkou stěny. Jelikož jsou všechny faktory prakticky významné, nebudeme pokus opakovat s vyloučením těch nevýznamných, neboť v podstatě neexistují. Pokud by tomu tak bylo, vyloučením nevýznamných faktorů by bylo dosaženo lepší vypovídající schopnosti modelu.

Pokud by vypovídající schopnost modelu byla nízká, mohl by být do experimentu zahrnut centrální bod. To je nastavení faktorů tak, že bod leží uprostřed prostoru, tedy všechny faktory jsou nastaveny na střed.

Paretoův diagram také potvrdil vhodnost užití dílčího faktoriálního experimentu. Tím byl celý experiment nákladově úspornější a jeho vypovídající hodnota je vysoká. Byly tedy nalezeny významné faktory, což je jeden z cílů průmyslového experimentu. Vypovídající

hodnota celého modelu je vypočítána v rámci Minitab jako R-sq (adj). Jedná se o koeficient mnohonásobné determinace. Tato hodnota je závislá na faktorech, jejich síle a počtu. Pokud by z experimentu byly vyloučeny slabé faktory (šum), tato hodnota R-sq by se neměla významně snížit. Byla tedy znovu provedena analýza faktoriálního experimentu, s vyloučením všech interakcí. Na obrázku číslo 19 a 20 je vidět tento rozdíl. Hodnota R-sq [%] se snížila o necelých 5,41%. To tedy znamená, že síla modelu je stále velmi vysoká. Pokud by byl odebrán již samotný faktor, a to nejslabší faktor “skleněná vlákna“, hodnota se sníží až na 77,16%, což je už výraznější pokles.

Koeficient mnohonásobné determinace vychází z metody nejmenších čtverců

Rovnice 15 - koeficient mnohonásobné determinace [17]

$$R^2 = 1 - \frac{Se}{St}$$

Se = reziduální počet čtverců

St = celkový součet čtverců

V modelu lineární regrese s absolutním členem leží hodnota R<sup>2</sup> v intervalu <0;1> a udává, jaký podíl rozptylu v pozorování závislé proměnné se podařilo regresí vysvětlit (větší hodnoty znamenají větší úspěšnost regrese) [17]

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
77.7266	97.73%	96.73%	94.89%

Obrázek 20 – Minitab (statistická významnost, všechny faktory a interakce)

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
121.504	93.41%	92.02%	89.48%

Obrázek 21 – Minitab (statistická významnost, pouze faktory, bez interakcí)

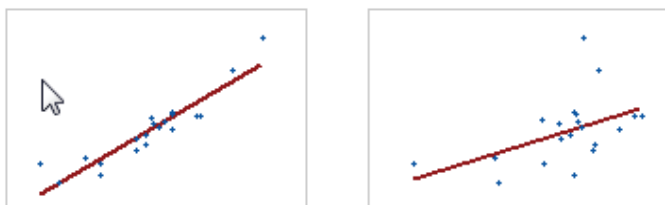
## Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
183.677	84.14%	81.76%	77.16%

Obrázek 22 - statistická významnost, pouze faktory (bez faktoru skleněných vláken)

**Hodnota S** = představuje směrodatnou odchylku vzdálenosti mezi hodnotou a proloženou křivkou. S je měřena v jednotkách odezvy. Používá se k vyhodnocení, jak dobře model popisuje odezvu. Menší hodnota S znamená lepší popis modelu odezvy

**Hodnota R-Sq** = je procento rozptylu v odezvě, které je vysvětleno modelem. Hodnota je kalkulována jako 1 minus podíl chyby součtu čtverců (což je rozptyl, který není vysvětlen modelem) a celkového součtu čtverců (což je celkový rozptyl v modelu). Vyšší hodnota stanovuje, jak dobře model sedí se skutečnými daty. Je vždy mezi 0 – 100%. Ke grafickému znázornění této hodnot se používá čárový graf, viz obrázek číslo 22.



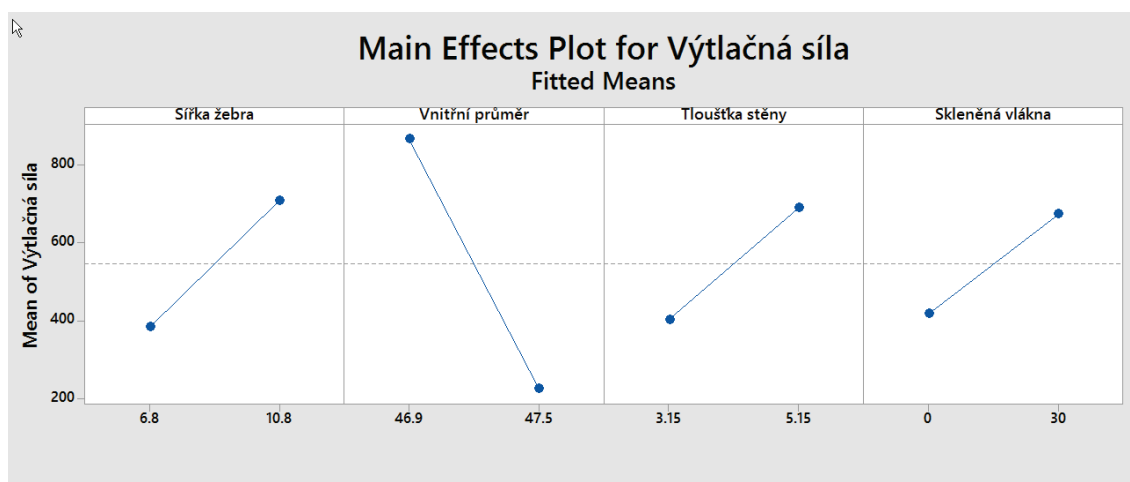
Obrázek 23 - čárový graf [7]

**Hodnota R-sq (adj)** = je procento rozptylu v odezvě, které udává model, upraven pro předpoklad v modelu vůči počtu měření. Hodnota je kalkulována jako 1 minus podíl středu chyby čtverce (MSE) vůči střední hodnotě celkového součtu čtverců (MS Total)

**Hodnota R-sq (pred)** = je kalkulována vzorce, který je ekvivalentní k odebrání každého měření z dat, odhadující regresní předpoklad, a definující jak dobře model předpokládá odebraná měření. Hodnota se pohybuje mezi 0 – 100%. Model, který má vyšší hodnotu, bude mít lepší schopnost předpokladu.

## 7.15 Efekty faktorů graficky

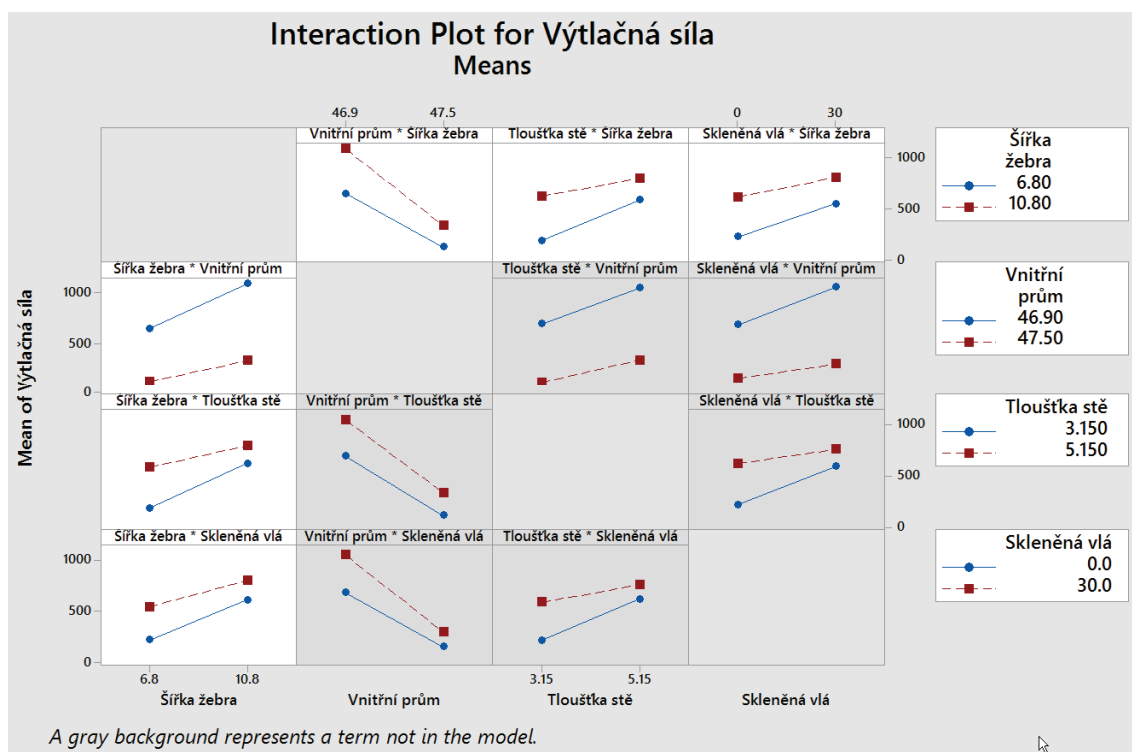
Ke grafickému zobrazení, kromě Paretova diagramu, je dobré využít efektu faktoru, viz obrázek číslo 16. Každý faktor je zde zobrazen v horní a dolní úrovni a jeho významu na výtlačnou sílu. Směr nahoru znamená vyšší výtlačná síla. Zde je znovu potvrzen fakt, že vnitřní průměr má největší vliv. Takové zobrazení pomůže k pochopení možných nastavení k dosažení optimální hodnoty. Cílem není nastavit všechny faktory na vyšší úroveň. Takové nastavení by bylo jistě s nejvyšší výtlačnou silou, ale to není smyslem. Napětí v plastové krytce by bylo nad potřeby designu a užití. Tato diplomová práce se zabývá využitím průmyslového experimentu o optimalizace plastové krytky. Budou tedy hledány takové kombinace faktorů, které povedou k optimální výtlačné síle za předpokladu únosného napětí v materiálu.



Obrázek 24 - efekty hlavních faktorů

## 7.16 Efekty interakcí faktorů graficky

Výhodou grafického zobrazení pro interakce faktoru je možnost vidět, kdy se změna jednoho faktoru viditelně projeví pouze na jedné úrovni a nikoli na druhé. To není případ pro interakce uvedené níže. Zde je vidět symetrie, to znamená, že není faktor, který by se projevil jinak v souvislosti s nastavením dalšího faktoru. V takovém případě by se přímky v rámci jednoho grafu lišily. Zkoumáním interakcí třetí úrovně není předmětem této diplomové práce. Na základě zkušeností by toto nemělo přidanou hodnotu, což potvrzuje i tato analýza.



Obrázek 25 - efekty interakcí faktorů druhého řádu

## 7.17 Optimalizace designu plastové krytky

Na počátku této diplomové práce byl definován cíl, tedy optimalizace designu plastové krytky k dosažení optimální výtlačné síly. Průmyslovým experimentem jsme dostali model, který pomůže k nastavení parametrů jednotlivých faktorů a tím k dosažení cílených hodnot. Původní hodnota výtlačné síly, s původními naměřenými rozměry, bylo hluboko pod požadovanou hodnotou min 250N. Původní design vykazoval výtlačnou sílu okolo hodnoty 120N. V programu Minitab je možné pomocí funkce Response optimizer (v rámci DOE) nastavit požadovanou výtlačnou sílu a jednotlivé faktory nastavit takovým způsobem, že bude hodnota dosažena.

Cílená hodnota: 500N

Interval spolehlivosti: 95%

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

Hodnota skleněných vláken byla při optimalizaci nastavena na pevnou hodnotu 30%. Důvodem je nedostupnost PA6.6 materiálů s volitelným obsahem skleněných vláken. Ostatní faktory jsou variabilní, tedy rozměrové, a je možné nastavit libovolnou hodnotu.

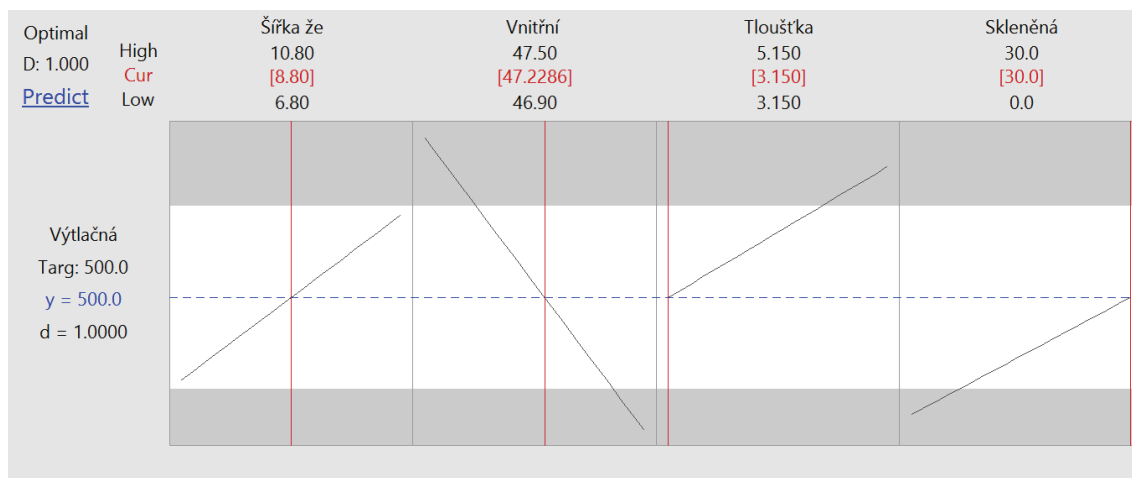
Matematický model tedy definuje následující parametry, viz obrázek číslo 26. V tabulce číslo 17 jsou hodnoty uvedeny, v porovnání se stávajícími (viz kapitola 6.3.3 této diplomové práce).

Co je tedy z navrhnutých rozměrů patrné. Oproti původnímu designu došlo k následujícím změnám. Ostatní parametry jsou zachovány.

1. Změna šířky žebra: +0,4 mm
2. Tloušťka stěny: -1,06 mm

Tabulka 17 - rozměry optimalizovaného designu

	<b>Parametr</b>	<b>Nominální rozměr</b>	<b>tolerance</b>	<b>Skutečnost (=&gt;120N)</b>	<b>Optimalizace (=&gt;500N)</b>
A.	Šířka žebra	8,8mm	±0,5mm	8,4mm	<b>8,8mm</b>
B.	Vnitřní průměr	47,1mm	±0,1mm	47,2 mm	<b>47,2 mm</b>
C.	Tloušťka stěny	4,15mm	±0,1mm	4,21mm	<b>3,15 mm</b>
D.	Skleněná vlákna	30%	±2%	30%	<b>30%</b>



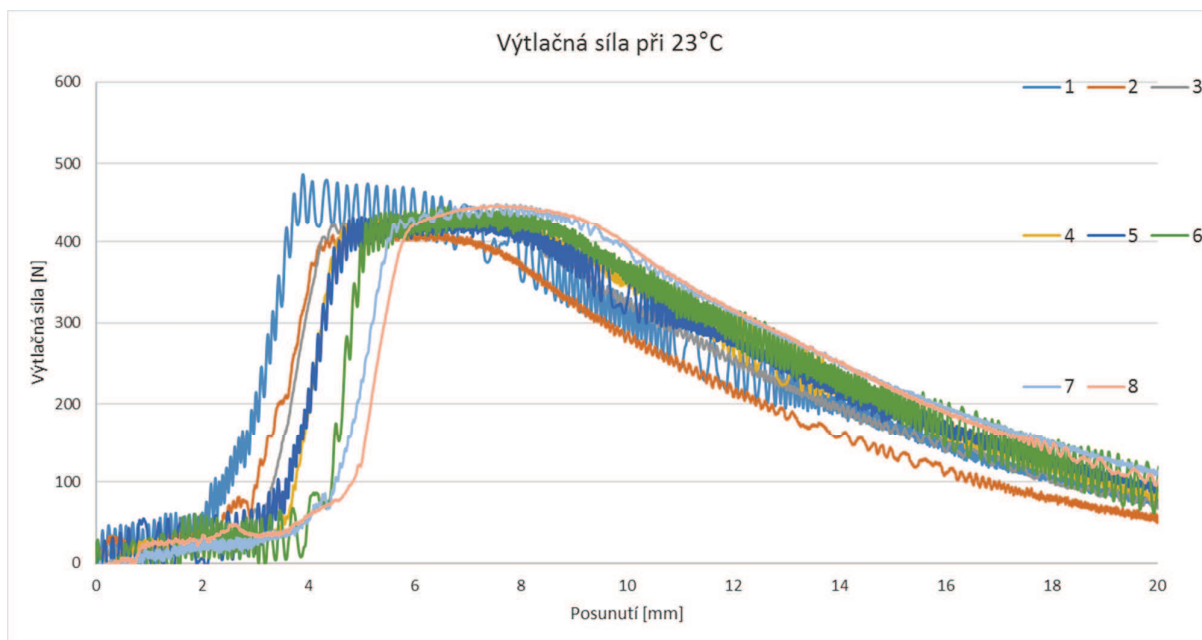
Obrázek 26 - Response optimizer (hledání optimální odezvy)

Byly vyrobeny, dle zadaných parametrů, čtyři kusy vzorků plastových krytek. Technologie výroby byla stejná, jako u předešlých pokusů, tedy třískové obrábění.

Parametry testování:

- a) Rychlost                    1mm/s
- b) Teplota                    23°C
- c) Použitý stroj              Instron (trhací stroj, elektromechanické provedení)
- d) Měřicí hlavice            5kN





Obrázek 27 - výtlačná síla optimalizovaných dílů (Graf: síla x dráha)

Tabulka 18 - naměřené hodnoty

Vzorek	Teplota	Fmax [N]
1.	23°C	486
2.		413
3.		437
4.		438
5.		435
6.		446
7.		449
8.		448

Průměr		444
Směrodatná odchylka		20,05

Dle naměřených hodnot je zřejmé, že rozptyl hodnot je relativně malý. To bude posléze vyhodnoceno standardními statistickými metodami. Je zřejmé, že cílená hodnota 500N je téměř docílena. Na ověření takového tvrzení, tedy srovnání střední hodnoty s cílenou hodnotou, použijeme jedno výběrový T-test.

### 7.18 T-test – test střední hodnoty s cílenou

Jednovýběrový t-test používáme v experimentálních situacích, kdy známe střední hodnotu  $m$  základního souboru (např. fyziologické hodnoty sledované veličiny) – tuto je pak možno považovat za konstantu. V experimentu pak ověřujeme hypotézu, že pokusný výběrový soubor pochází z populace, která má stejnou střední hodnotu jako tato známá konstanta. Testujeme nulovou hypotézu:  $H_0: m = \text{konst.}$  [17], vůči alternativní hypotéze  $H_a: m \neq \text{konst.}$

Při testu vycházíme z dat sledovaného výběrového souboru, u kterého předpokládáme, že pochází z populace s určitými parametry  $\mu$  a  $s^2$  a dále ze známé střední hodnoty základního souboru  $m$ , která je rovna určité (známé) konstantě. Nejprve vypočteme aritmetický průměr a rozptyl výběrového souboru (počet členů:  $n$ ). [17]

Rovnice 16 - výpočet testové statistiky

$$X_{OBS} = Z_{H_0} = \frac{\bar{x} - \mu}{s} \cdot \sqrt{n}$$

$\bar{x}$  - průměr výběrového souboru

$\mu$  - střední hodnota základního souboru

$s$  – směrodatná odchylka výběrového souboru

$n$  – počet členů výběrového souboru

Je-li  $t \leq t_{1-\alpha/2(v)}$  => statisticky nevýznamný rozdíl mezi střední hodnotou  $m$  a známou konstantou při zvolené  $\alpha$  (nezamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ , tzn. výběrový soubor pochází z populace se známou střední hodnotou  $m = \text{konst.}$ ). [17]

Je-li  $t > t_{1-\alpha/2(v)}$  => statisticky významný rozdíl mezi střední hodnotou  $m$  a známou konstantou ( $\alpha = 0,05$ ) nebo statisticky vysoce významný rozdíl (při  $\alpha = 0,01$ ) (zamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ , tzn. výběrový soubor nepochází s populace se známou střední hodnotou a pochází z jiné populace, kde  $m \neq \text{konst.}$ ). [17]

V případě zkoumání dat v rámci této diplomové práce se jedná o následující případ.

Rovnice 17 - výpočet testové statistiky

$$t = \frac{444 - 500}{20,03} * \sqrt{8} = -2,79$$

$-2,79 < 1,86$  (tabulky studentova rozdělení)

Hladina významnosti  $\alpha=0,05$

Na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  nezamítáme nulovou hypotézu, tedy střední hodnota výtlačné síly se rovná cílené hodnotě 500N.

## 8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prokázat, zda je forma plánovaného experimentu vhodná metoda k definici či optimalizaci designu výrobku. To bylo bezesporu prokázáno, neboť výsledné hodnoty samotného zkoumání odpovídají požadavkům a zadání. Nejdůležitějším prvkem samotného experimentu byla jeho definice. V první části této diplomové práce byly jednotlivě rozebrány všechny možnosti, jak je možné k takové problematice přistupovat. Vhodný se ukázal dílčí faktoriální experiment. Jeho výhoda spočívá v nižší nákladovosti. Hlavní předností je ukázat na důležité faktory, které mohou, ale nemusí, být předmětem dalšího zkoumání. V této diplomové práci bylo jednoznačně správné použití dílčího faktoriálního experimentu  $2^4$ , což vedlo ke snížení nákladů na prototypové díly na polovinu a vypovídající hodnota samotných měření pokryla požadavky na sledované faktory. Byly nalezeny faktory a

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky

regresní analýzou nalezeny optimální parametry klíčových faktorů prvního řádu ke stanovení cílené hodnoty. Výsledné náměry vykazovali určitý rozptyl, ten je však s ohledem na technologii výroby vstřikování plastů běžný. Avšak hodnoty, jak prokázáno jednovýběrovým T-testem, se shodují s cílenou. Dalším krokem, v rámci procesních validačních zkoušek, bude takové měření zopakovat s použitím sériových dílů, nikoli obráběných.

Existuje několik dalších možností, jak se dopracovat k optimální odezvě určité charakteristiky. Asi nejčastějším řešením dnešní doby je simulace metodou konečných prvků. Avšak k nalezení přesnějších hodnot je zapotřebí potvrdit tzv. zpětným přístupem kalkulované hodnoty. Vhodnou formou je právě průmyslový experiment.

Nebylo předmětem této diplomové práce zabývat se interakcí třetího řádu. Byly definovány klíčové faktory na úrovni prvního řádu. Nejsilnějším faktorem byl definován vnitřní průměr, jehož význam a kombinace s ostatními méně významnými faktory byl klíčový k definici výsledných parametrů.

Statistické metody, jehož součástí je průmyslový experiment, jsou silným nástrojem průmyslových aktivit při statistickém sledování procesu či vývojových aktivitách, což prokázalo užití takových metod v rámci této diplomové práce. Statistických softwarů je několik, kde již vložené algoritmy usnadňují práci s daty. Tato diplomová práce popsala detailně přístup k experimentu  $2^4$ . Samotné vzorce byly popsány a vysvětleny.

## CITOVANÁ LITERATURA

- [1] Likeš J., „Navrhování průmyslových experimentů,“ Praha, Nakladatelství technické literatury, 1968.
- [2] „interquality,“ Projekty a poradenství, [Online]. Available: <http://www.interquality.cz>. [Přístup získán 15 May 2017].
- [3] Töpfer A., „Six Sigma : koncepce a příklady pro řízení bez chyb,“ Brno, Computer Press, 2008.
- [4] Dohnal G., „Základy navrhování průmyslových experimentů DOE,“ Ústav technické matematiky Fakulty strojní ČVUT v Praze, Praha, 2014.
- [5] Anthony J., Design of Experiment for Engineers and Scientists, Oxford, 2003.
- [6] Michálek J., „Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE),“ AVČR, Brno, 2010.
- [7] Minitab, „<http://www.minitab.com>,“ 2003. [Online].
- [8] Jarošová E., Navrhování experimentů, základ inovací a neustálého zlepšování, Praha: Česká společnost pro jakost, 1997.
- [9] Montgomery D. C., Design and Analysis of Experiments, 5th edition, New York: Arizona State University, 2001.
- [10] Bedáňová I., „Veterinární a farmaceutická univerzita Brno - Biostatistika,“ [Online]. Available: <https://cit.vfu.cz>.
- [11] Tošenovský J., „PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTŮ,“ Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2012.
- [12] „Autolexicon,“ [Online]. Available: <http://www.autolexicon.net>.

- [13] „Partinfo,“ [Online]. Available: <http://www.partinfo.co.uk/>.
- [14] Vnouček M., „Kompozitní materiály,“ Fakulta strojní západočeské univerzity strojní v Plzni.
- [15] Tomková B., „Textilní kompozity,“ Technická Univerzita Liberec - Katedra textilních materiálů.
- [16] Miller I., Návrh a analýza experimentu pomocí MINITAB, Praha: Interquality, 2010.
- [17] Friesl M., „Pravděpodobnost a statistika hypertextově,“ [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~friesl/hpsb/koefdet.html>.
- [18] Jarošová E., Navrhování experimentů, Česká společnost pro jakost, 1997.
- [19] Richard N., „Worcester polytechnic institut,“ 27 08 2014. [Online]. Available: [https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-082714-135653/unrestricted/How\\_to\\_Use\\_Minitab\\_4\\_Design\\_of\\_Experiments.pdf](https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-082714-135653/unrestricted/How_to_Use_Minitab_4_Design_of_Experiments.pdf).

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - geometrický pohled na $2^3$ faktoriál [9].....	28
Obrázek 2 - interakce tří faktorů [9].....	30
Obrázek 3 – Odezva změny úrovně faktoru .....	36
Obrázek 4 - graf hlavních efektů [7] .....	37
Obrázek 5 - pozitivní interakce [12].....	38
Obrázek 6 - Pareto analýza [7].....	39
Obrázek 7 - zadní náprava osobního vozidla [12] .....	40
Obrázek 8 - jednoplášťový tlumič [13] .....	41
Obrázek 9 - dvouplášťový tlumič [13] .....	41
Obrázek 10 - tlumič pérování v řezu .....	42
Obrázek 11 - plastová krytka tlumiče pérování .....	43
Obrázek 12 - vláknitý kompozit bez orientace [14].....	45
Obrázek 13 - měření výtlačné síly z těla tlumiče.....	46
Obrázek 14 - plastová krytka 3D náhled .....	48
Obrázek 15 - plastová krytka v řezu (označené parametry) .....	49
Obrázek 16 - Minitab (stupeň rozlišení).....	52
Obrázek 17 - křivka výtlačné síly (pouze referenční hodnoty).....	54
Obrázek 18 - měření výtlačné síly na trhacím stroji .....	55

Obrázek 19 - Pareto diagram .....	58
Obrázek 20 – Minitab (statistická významnost, všechny faktory a interakce) .....	59
Obrázek 21 – Minitab (statistická významnost, pouze faktory, bez interakcí).....	59
Obrázek 22 - statistická významnost, pouze faktory (bez faktoru skleněných vláken) .....	60
Obrázek 23 - čárový graf [7].....	60
Obrázek 24 - efekty hlavních faktorů.....	61
Obrázek 25 - efekty interakcí faktorů druhého řádu .....	62
Obrázek 26 - Response optimizer (hledání optimální odezvy).....	64
Obrázek 27 - výtlačná síla optimalizovaných dílů (Graf: síla x dráha).....	65

## SEZNAM GRAFŮ

**No table of figures entries found.**

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Pořadí experimentu (9) .....	22
Tabulka 2 - znáhodněné pořadí jednofaktorového experimentu (9) .....	23
Tabulka 3 - data z měření pevnosti v tahu (lb/in <sup>2</sup> ) (9).....	24
Tabulka 4 – Seznam faktorů a úrovní (11) .....	27
Tabulka 5 - Plán experimentu (11).....	27
Tabulka 6 - matice designu faktoriálu 2 <sup>3</sup> (9).....	28
Tabulka 7 - popis veličin .....	29
Tabulka 8 - algebraické znaky pro kalkulace efektů v designu 2 <sup>3</sup> (9).....	33

---

Využití metody plánovaného experimentu k návrhu vhodného designu plastové krytky



Tabulka 9 – Kombinace faktorů dílčího faktoriálu (8).....	34
Tabulka 10 - Srovnávací tabulka vlastností kompozitních a konvenčních materiálů (15).....	47
Tabulka 11 - výtlačná síla (současný stav) .....	48
Tabulka 12 - prvotní specifikace plastové krytky .....	49
Tabulka 13 - zvolené parametry a jejich úrovně.....	52
Tabulka 14 – pořadí jednotlivých měření.....	53
Tabulka 15 - odezvová tabulka, naměřená data .....	56
Tabulka 16 - vypočtené efekty.....	57
Tabulka 17 - rozměry optimalizovaného designu.....	63
Tabulka 18 - naměřené hodnoty.....	65

## **SEZNAM ROVNIC**

Rovnice 1 - model pro dva faktory experimentu (8).....	27
Rovnice 2 - efekt faktoru A (9).....	29
Rovnice 3- efekt faktoru A (9).....	29
Rovnice 4 - efekt faktoru A (9).....	29
Rovnice 5 - efekt faktoru B (9) .....	30
Rovnice 6 - efekt faktoru C (9) .....	31
Rovnice 7 - interakce dvou faktorů (9).....	31
Rovnice 8 - interakce faktoru AB (9).....	31

Rovnice 9 - interakce faktoru AB (9).....	31
Rovnice 10 - interakce faktoru AC (9).....	31
Rovnice 11 - interakce faktoru BC (9).....	32
Rovnice 12 - interakce faktorů ABC (9).....	32
Rovnice 13 - hledání optimální odezvy.....	34
Rovnice 14 - odezva po změně faktoru (4).....	35
Rovnice 15 - koeficient mnohonásobné determinace (17).....	59
Rovnice 16 - výpočet testové statistiky.....	66
Rovnice 17 - výpočet testové statistiky.....	67

## **PŘÍLOHY**