

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 515

ISSN 1213-418X

Radovan Novotný

**ROLE VARIABILITY
V PLÁNOVÁNÍ
A ŘÍZENÍ KVALITY**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

Ing. Radovan Novotný, Ph.D.

**ROLE VARIABILITY V PLÁNOVÁNÍ
A ŘÍZENÍ KVALITY**

THE ROLE OF THE VARIATION
IN THE QUALITY PLANNING AND CONTROL

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

kvalita, proces, technologie, zlepšování, variabilita, kauzalita, statistika, regulace procesu, design, experiment, DOE, optimalizace, model

KEYWORDS

quality, process, technology, improvement, variation, causality, statistics, process control, experiment, DOE, optimization, model

MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE

Vědecké oddělení FEKT VUT v Brně

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 SLEDOVANÉ CÍLE A ÚVOD.....	5
1.1 Vědecká metoda a rozhodování na základě dat	5
1.2 Plánovaný experiment.....	6
1.3 Koncepce PDCA cyklu a metodologie DMAIC	8
2 KVANTIFIKACE VARIABILITY PARAMETRŮ KVALITY	10
2.1 Variabilita a její zdroje.....	10
2.2 Variabilita a popis variability.....	12
2.3 Variabilita a její důsledky pro návrh a vývoj	13
2.4 Optimalizace s ohledem na specifikovanou cílovou hodnotu.....	15
3 KAUZALITA A PREVENCE PROBLÉMŮ KVALITY.....	16
3.1 Potenciální příčiny, diagram příčin a následku a prevence.....	17
3.2 Modelování závislostí	19
4 KLASIFIKACE ZDROJŮ VARIABILITY A REGULACE PROCESŮ	21
4.1 Vymezitelná a náhodná složka variability	21
4.2 Regulační diagramy	22
4.3 Plánované experimenty a studium variability	23
4.4 Dvouúrovňové faktoriální plány	24
4.4.1 Faktoriální plány 2^2	24
4.4.2 Faktoriální plány 2^3	26
4.4.3 Obecné 2^k faktoriální plány.....	29
4.5 Středově složené experimentální plány a jejich generování	30
5 SHRNU TÍ A ZÁVĚRY.....	31
6 POUŽITÁ LITERATURA A ELEKTRONICKÉ DOKUMENTY	32

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Radovan Novotný je akademickým pracovníkem Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, kde od roku 2004 působí jako odborný asistent na Ústavu mikroelektroniky. Má desetiletou praxi v oblasti dalšího vzdělávání dospělých v oblasti řízení a zlepšování jakosti produktů a procesů, realizoval celou řadu přednášek pro účastníky z průmyslové praxe. V rámci široké spolupráce s průmyslovou praxí byl zapojen do řešení mnoha projektů souvisejících s aplikacemi statistického řízení procesů (SPC) a plánovaných experimentů (DOE).

Vysokoškolské vzdělání získal absolvováním magisterského studijního programu Elektrotechnika a informatika, když v roce 2000 na FEI VUT v Brně vystudoval obor Elektrotechnická výroba a management. Po dokončení vysokoškolských studií pracoval jako vývojový technolog zlepšování parametrů jakosti a spolehlivosti pasivních elektronických prvků ve firmě AVX Lanškroun. Státní doktorskou zkoušku v doktorském studijním programu Elektrotechnika, elektronika, komunikačních a řídicí technika, absolvovaném na FEKT VUT v Brně, složil v roce 2004. Doktorát získal ve studijním oboru Mikroelektronika a technologie.

Od roku 2000 pracoval na dvou projektech Grantové agentury ČR. Řešení projektu Empirické modely pro multiparametrické vyhodnocování parametrů jakosti byl zahájen 1.1.2003 a ukončen 31.12.2005. Projekt Vývoj v oblasti charakterizace technologických procedur byl zahájen 1.1.2007 a uzavřen bude 31.12.2009. Mimo tyto výzkumné projekty byl řešitelem tří projektů Fondu rozvoje vysokých škol a v rámci svého pracovního úvazku na Ústavu mikroelektroniky byl zapojen do řešení mnoha národních i mezinárodních projektů.

1 SLEDOVANÉ CÍLE A ÚVOD

Realizace pozorování a experimentů, studium variability a jejích příčin a hledání opatření pro adekvátní regulaci a návrh procesů a technologií, tedy aspekty, kterými se předkládaná habilitační práce zabývá, představuje z pohledu vědeckého poznávání světa kardinální aspekt. Pro vývoj a výzkum spjatý s mikroelektronickou průmyslovou výrobou je charakteristický tlak na využití nových či inovace stávajících technologických i konstrukčních řešení a rychlou komercializaci nových i inovovaných technologií, s čímž úzce souvisí řešení aspektů vhodné optimalizace technologií s ohledem na plnění specifikovaných požadavků v oblasti jakosti, spolehlivosti i výrobcem dosahované technologické výtěžnosti [1], [2]. Významný problém s tím související představuje zabezpečování, ověřování a prokazování jakosti i spolehlivosti [3], [4]. Inovace technologií výroby komponent a konstrukční změny vytvářejí nové požadavky na ověřování a predikce spolehlivosti, zkoumání technické životnosti, robustnosti a bezporuchovosti nových či inovovaných součástek, včetně odhalení slabin vyplývajících z konstrukčního či technologického řešení [4], [5], [6], [7].

Právě stabilitu i způsobilost technologií lze, vedle správného stanovení a dodržení podmínek montáže i provozu, označit jako zásadní faktor ovlivňující dosaženou jakost a spolehlivost [2], [3]. Způsobilost stabilních technologií, posuzovaná vzhledem k dané aplikaci a tolerančním limitům, zaručuje, že u produkovaných komponent bude jednak dosaženo hodnot kritických znaků jakosti vyhovujících s minimální variabilitou mezním hodnotám, jednak kritické parametry budou za dodržení provozních podmínek a podmínek skladování reálně kolísat ve specifikovaných mezích [4] [5]. Habilitační práce naznačuje směr, jak technologické problémy řešit a také prezentuje, jak s využitím matematické statistiky, tedy vědecky, technologie a procesy zlepšovat. Prezentované metodické postupy jsou použitelné nejen v oblasti zlepšování stávajících procesů, ale i v inovacích a dosahování průlomových zlepšení. Náplň této práce je odrazem autorova pedagogického působení v rámci výuky kurzu Řízení jakosti, doplněné o spolupráci s průmyslovou praxí, nejen v oblasti elektrotechnického průmyslu – např. AVX Lanškroun, Brisk Tábor, Hyundai Motor Manufacturing Czech.

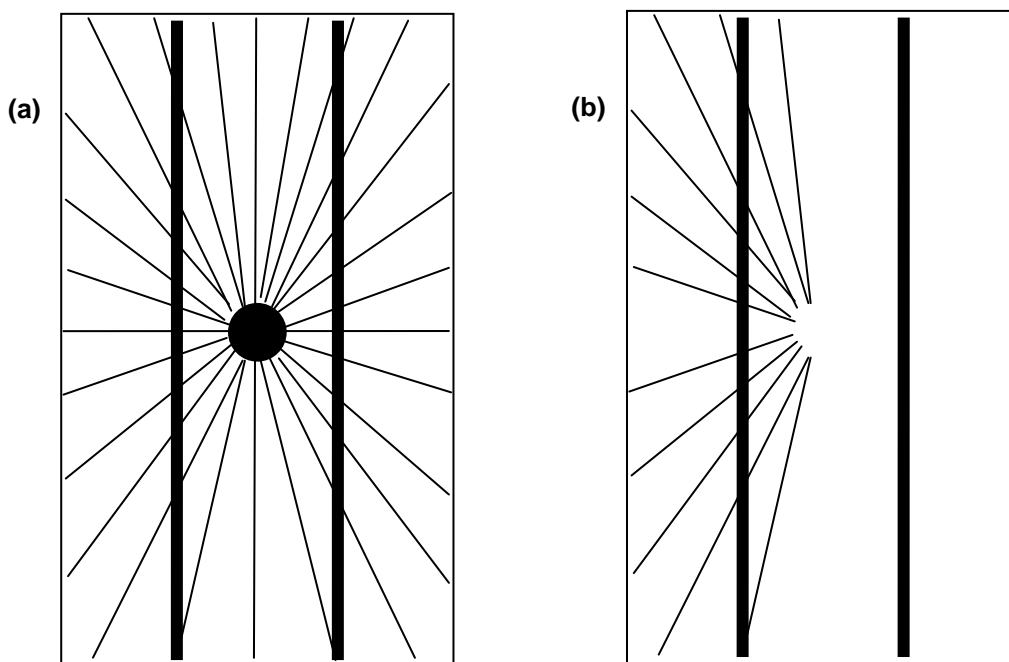
1.1 VĚDECKÁ METODA A ROZHODOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ DAT

Při uplatnění vědeckého přístupu je nutné udržovat zpětnou vazbu mezi teorií a pozorováním či experimentem, což odráží i schéma vazeb mezi důležitými prvky vědeckého přístupu k poznávání světa. Získávání dat, jako první krok vědeckého zkoumání a hlubšího poznání existujících zákonitostí, lze provádět prováděním pozorování nebo realizací experimentů. Účelem realizace pozorování a experimentálního šetření je:

- určování souvislostí a kauzální příčinné podmíněnosti jevů objektivní reality,
- pořizování informačního materiálu pro analýzu jevů a procesů,
- identifikace příčin a faktorů, které významně ovlivňují sledované procesy,
- hodnocení vzorků, materiálů, technologií a dosahovaných výsledků,
- přijetí či zamítnutí dopředu položených otázek či hypotéz a získání informačního materiál, který umožní položení nových otázek a hypotéz.

Je zřejmé, že pokud bude pozorování nebo experiment prováděn v nestabilních podmínkách a data budou odrážet nestabilní procesy, na které působí nenáhodné, nepředvídatelné a zároveň nežádoucí vlivy (vymežitelné příčiny variability), získaná data a informace nebudou odrážet situaci adekvátně a výsledky budou zkreslené. Pozorováním a měřením sledovaných vlastností zkoumaných jevů a objektů, prováděným zpravidla bez záměrného zasahování do sledované skutečnosti, lze získat celou řadu poznatků, které lze doplňovat informacemi z dalších zdrojů. Aby bylo pozorování v souladu s vědeckým přístupem, je nutné předběžně vyjasnit cíle, které mají být

studií sledovány, mít promyšlený plán pozorování a sběru dat (včetně adekvátnosti vzorkování), zvážit možnosti a adekvátnost použití přístrojů, umožňující posuzovat sledované vlastnosti na požadované úrovni rozlišení s adekvátní přesností a používat vhodné metody záznamu (např. protokolování, fotodokumentaci nebo videonahrávky). Myšlenkové zpracování informací, získaných prostřednictvím smyslových orgánů může být zavádějící a může představovat zásadní zdroj variability výsledků subjektivního hodnocení jevů a objektů. Má-li být v průmyslové praxi použito atributivní kontroly kvality, opírající se o hodnocení operátorem, prověření takového atributivního systému měření (tedy měření srovnáváním) typicky ukazuje, že vliv pracovníka vnáší do hodnocení takovou variabilitu, že výsledky nejsou hodnověrné. Praxe autora ukazuje, že typickým příkladem tohoto problému jsou situace, kdy má být posuzován barevný odstín komponent – reprodukovatelnost posouzení je natolik špatná, že systém měření musí být označen za nezpůsobilý. Jako příklad těchto problémů v případě svého působení v rámci projektů plánování a zlepšování kvality v průmyslových firmách autor s oblibou uvádí příklady neadekvátního vizuálního vnímání, ve kterých působí kognitivní optická iluze. Jedním z příkladů, kdy může být obraz interpretován různě, je Herignova iluze, která nese pojmenování po německém fyziologovi Karlu Heringovi (1834-1918). Typické vykreslení je uvedeno v jedné z možných modifikací na obrázku 1.1. Zkreslení způsobuje pozadí, které napodobuje perspektivu a vytváří dojem hloubky [9]. Vnímání pozadí pak zkresluje výsledný vnímaný obraz a v konečném důsledku neadekvátně ovlivňuje úsudek pozorovatele [10]. Premisou rozhodování je způsobilý systém měření a sběru dat.



Obr. 1.1: (a) Herignova iluze [8], kdy vnímání pozadí zkresluje skutečnost, že dvě vertikální čáry jsou rovnoběžné a rovné, (b) odstranění části pozadí ovlivňuje vnímání obrázku. Již při plánování kvality ve fázi vývoje technologie je nutné měřicí systém pro atributivní měření (např. vizuální kontrola) předem ověřovat a v případě jeho nezpůsobilosti hledat technické řešení zaručující jeho způsobilost.

1.2 PLÁNOVANÝ EXPERIMENT

Experiment představuje ověřování dopadů a vlivu nastavení experimentálních faktorů na vlastnosti sledované entity, reprezentované změřenými hodnotami odezvy. Evidentní snahou je zde z minima pokusů získat maximum informací, konkrétní cíle vyplývají z cílů příslušného výzkumu či šetření. Může se například jednat o určení toho, které faktory, respektive v jaké míře ovlivňují sledované odezvy.

Středem pozornosti také může být ověřování toho, jak je odezva ovlivněna interakcí těchto faktorů, jaké tu existují závislosti a jak jsou silné. V případě průmyslových experimentů jde obvykle o studium dopadu změn nastavení hodnot dílčích faktorů na výstupní proměnné, a hledání takové kombinace faktorů, která umožní dosahovat nejlepších výsledků [11]. Zkušenosti autora z průmyslové praxe říkají, že z pohledu plánování experimentu je nejtěžší vyjasnit a vydefinovat sledované cíle, vymezit definiční obor pro experimentální faktory, a vypořádat se s šumovými faktory a vlivy jako je technologická nekázeň.

Anglický statistik, biolog a genetik Ronald Fisher (1890-1962), formuloval základní principy statistického plánování experimentů, koncepce často označovanou akronymem DOE (Design of Experiments). Na konferenci v Indii údajně Fisher vyslovil konstatování, že „zavolání statistika až když je experiment provedený, může být jen tím, že ho požádáte o posmrtné ohledání: může být schopný říci, že pacient zemřel“ [12]. Jedna z autorových zkušeností v oblasti plánování průmyslových experimentů, ukázala na nutnost řídit se heslem „důvěřuj, ale prověřuj“. Slepá důvěra ve shodné tvrzení technologů nebo laborantů, že úroveň nastavené teploty jako experimentálního faktoru je 80 °C, vedla k tomu, že pátrání po příčinách rozporů v datech při vyhodnocení experimentu ukázala, že tomu tak ve skutečnosti nebylo. Výdaje na experiment, který díky tomuto selhal, byly nákladnou záležitostí. Zkušenosti říkají, že plánovaný experiment musí začít workshopem a držet se zásad metodologie DMAIC, která bude prezentována v další části.

Tab. 1.1: Experimentální plán a experimentální výsledky pro dílčí pokusy v případové studii, zavedené ve výuce kurzu Řízení jakosti. Data jsou pro účely realizace navrženého experimentu generována ve virtuální laboratoři, studenti navrhuji experiment, zjišťují odezvy a data následně vyhodnocují. Dalším z výstupů učení je vyvolání zájmu o diskusi otázek adekvátního zaokrouhlování výsledků.

No.	Urovně faktorů pokusu			Sledovaná odezva				
	A	B	C	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	\bar{Y}
1	0,418	0,318	0,039	1,5245	1,5249	1,5248	1,5245	1,5247
2	0,418	0,397	0,109	1,5372	1,5401	1,5397	1,5392	1,5391
3	0,418	0,476	0,179	1,545	1,5455	1,5462	1,5505	1,5468
4	0,8105	0,318	0,109	1,5237	1,5276	1,5239	1,5289	1,5260
5	0,8105	0,397	0,179	1,5428	1,5458	1,5465	1,5427	1,5445
6	0,8105	0,476	0,039	1,5292	1,5263	1,5284	1,5278	1,5279
7	1,203	0,318	0,179	1,5206	1,5201	1,52	1,5237	1,5211
8	1,203	0,397	0,039	1,4855	1,4876	1,4881	1,4885	1,4874
9	1,203	0,476	0,109	1,5124	1,5128	1,5162	1,5139	1,5138

Legenda:
No. ... číslo pokusu
A... experimentální faktor A, poměr přísad Na₂O/P205
B... experimentální faktor B, poměr přísad BaO/P205
C... experimentální faktor D, poměr přísad Al₂O₃/P205
Y_i... index lomu jakožto sledovaná odezva pro čtyři opakování
 \bar{Y} ... průměrná hodnota indexu lomu při čtyřech opakováních

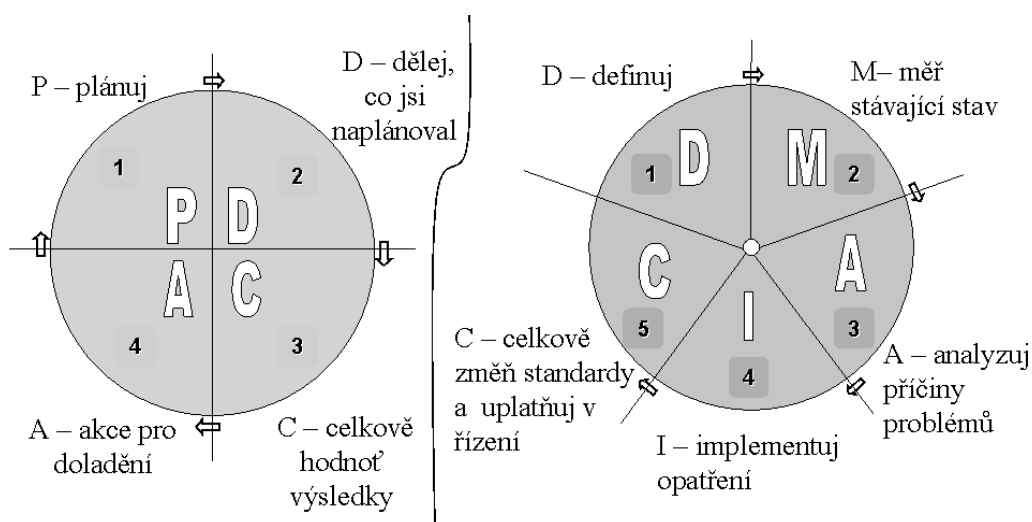
Za účelem objasňování vlivu dílčích nezávisle proměnných a jejich vzájemných kombinací, je připravovaný experiment v případě aplikace metod navrhování experimentů (DOE, Design of Experiments) rozplánován do jednotlivých pokusů. Před samotnou realizací experimentu se pak provádí plánování experimentu, což zahrnuje zejména určení experimentálních faktorů a počtu úrovní faktorů, definování plánovaných pokusů, popsaných příslušnými úrovněmi nastavení experimentálních faktorů apod. Experimentální plán udává, které pokusy charakterizované nastavením úrovní experimentálních faktorů bude provedeno. Jelikož počet kombinací úrovní nastavení experimentálních faktorů může být značný, je snahou vhodnou optimalizací počet

nutných pokusů minimalizovat [13], [14]. Příklad plánu experimentu, ve kterém byl sledován vliv tří experimentálních faktorů nastavovaných na třech úrovních, uvádí tabulka 1.1.

Aby byl realizovaný experiment efektivní, je důležité kvantifikovatelně vyjádřit závisle proměnnou (odezvu), zajistit, že systém měření závisle proměnných bude způsobitelný a nebude do výsledků vnášet neadekvátní variabilitu. Také je nutné zvažovat potenciální vnější rušivé vlivy, jako je například přechodový odpor elektrických kontaktů nebo anomální změna teploty. Výsledky experimentálních šetření jsou zásadním způsobem ovlivněny vzorkováním, tedy výběrem a přípravou statistických vzorků a zkoumaných entit. Tyto vlivy je nutné neopomínat, v rámci aplikace DOE zde napomáhá replikace, blokování a znáhodnění [15]. Z hlediska metodického se plánovaný experiment nejprve navrhuje, následně se provedou experimentální pokusy, získaná data se analyzují, výsledky se interpretují a vytvoří se závěry. I když všeobecně existuje snaha realizovat jeden velký experiment, který je nákladný a zodpoví na mnoho položených otázek, zkušenosti poukazují na nutnost postupovat sekvenčním přístupem [14]. Procedura uplatnění technik plánovaného experimentu pro účely hlubšího poznání studovaných jevů při respektování potřeby inkrementálního postupu obvykle sestává z exploratorní etapy a etapy podrobnějšího vyšetřování. V exploratorní etapě jsou prostřednictvím série menších experimentů identifikovány faktory (tj. nezávisle proměnné), které významným způsobem ovlivňují sledované odezvy (tj. závisle proměnné). Exploratorní etapa rovněž umožňuje vytvořit výchozí modely vztahů mezi sledovanými nezávisle a závisle proměnnými. V etapě podrobnějšího vyšetřování je mapováno chování významných technologických faktorů v předpokládaném provozním rozpětí.

1.3 KONCEPCE PDCA CYKLU A METODOLOGIE DMAIC

Pro výklad postupného zlepšování procesů a zvyšování míry poznání, vztahující se k uskutečňovaným procesům a souvisejícím jevům, použil američan Walter Shewhart (1891-1967) představu nutnosti postupného opakování čtyř kroků, formujících cyklus PDCA (Plan, Do, Check, Act). V době, kdy Shewhart začal pracovat u Western Electric Company, řízení kvality se zaměřovalo pouze na výstupní kontrolu a odstraňování nevyhovujících entit [16]. Shewhart začal uplatňovat postupné zlepšování procesů, kdy s rostoucí mírou poznání mohla být více ovlivňována variabilita a proměnlivost uskutečňovaných procesů i dosahovaných výsledků.



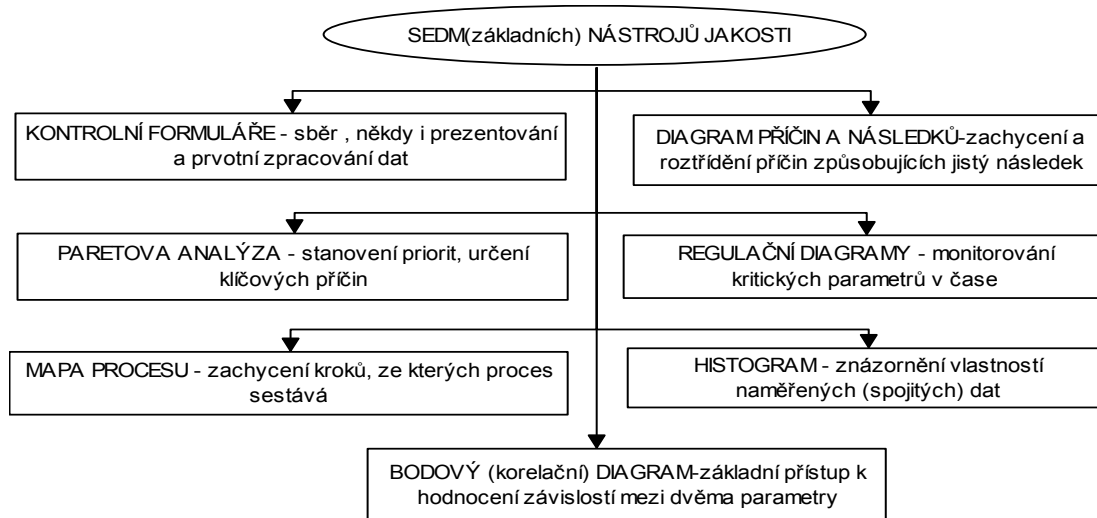
Obr. 1.2: (a) PDCA cyklus a (b) metodologie DMAIC jako dva možné přístupy zvyšování kvality uskutečňovaných procesů. DMAIC zhmotňuje vědecký přístup – nejprve je nutné definovat cíle, dále ověřit způsobnost systémů měření, změřit stávající stav, analyzovat příčiny odchylek či variability, implementovat a inovovat postupy a technologie, a v neposlední řadě zajistit standardizaci (fáze control).

PDCA cyklus říká (viz. obrázek 2.5-a), že jakékoli úsilí o zlepšování či inovaci začíná plánováním (Plan). K tomu je nezbytné rozpoznat existující problémy a rozpory, například v podobě rozporu mezi teorií a praxí, a připravit plán opatření, které by mohly přispět k odstranění problému. Druhým krokem je realizace naplánovaných opatření (Do), aby mohl být jejich dopad v následujícím kroku vyhodnocen. Ve třetím kroku (Check) je zhodnoceno, zda byl rozpor vyřešen a je zvažováno, jaké další potenciální změny je vhodné realizovat. Ve čtvrtém kroku jde o zapracování osvědčených změn a praktik do standardních postupů a řešení (Act).

Představu PDCA cyklu pro výklad problematiky řízení a zlepšování procesů s ohledem na kvalitu i efektivitu využil Shewhartův žák Edward Deming (1900-1993), který koncept popularizoval při svém působení v rámci poválečné obnovy japonského průmyslu. PDCA cyklus tak bývá někdy označován jako Shewhartův cyklus nebo rovněž jako Demingův cyklus. Koncepce six sigma jako cyklus potřebný pro zvládnutí uskutečňovaných procesů a rostoucího poznání souvisejících jevů uznává metodologii DMAIC, která je rozšířením původního PDCA cyklu (obrázek 2.5-b).

Metodologie DMAIC, uznává, že je nejdříve nutné definovat cíle, související problémy, rozpory a procesy (fáze Define) [17]. Teprve potom je vhodné pozorováním a experimenty získat potřebná data (fáze Measure), analyzovat příčiny vznikajících neshod, odchylek a nesrovnalostí (fáze Analyze), implementovat opatření a inovaci, které napomohou příčinám neshod a nesrovnalostí předcházet (fáze Improve) a v neposlední řadě v každodenní praxi uplatňovat osvědčené standardy (fáze Control). Metodologie DMAIC se široce uplatňuje v případě zlepšovacích projektů v oblasti průmyslových i transakčních procesů. Alternativou v oblasti procesů vývoje je metodologie DMADV.

V dílčích etapách cyklu zlepšování (PDCA, DMAIC nebo DMADV) se používají konkrétní metody a nástroje. Studenti základního kurzu řízení kvality bývají seznamováni se sedmi nástroji kvality. Užití těchto nástrojů vnáší do koncepce poznávání studovaných jevů, procesů a objektů důraz na zvažování možných příčin nežádoucích odchylek a neshod (diagram příčin a následku), ověřování vlivu příčin prostřednictvím sběru dat (kontrolní formuláře a tabulky pro sběr dat), oddělováním podstatného od nepodstatného (Paretova analýza) a rozhodování na základě dat (histogramy, regulační diagramy, korelační diagram). Má-li být dosaženo hlubší, průlomové zlepšení, je nutné používat nástroje a metody sofistikovanější. Six sigma tak zahrnuje do portfolia metod testování hypotéz, regresní analýzu, DOE, FMEA analýzu a další metody. Tyto jsou využívány v dílčích fázích DMAIC, respektive DMADV.



Obr. 1.3: Sedm nástrojů napomáhajících k pochopení podstaty zkoumaných jevů, procesů a objektů. Většina z těchto nástrojů jsou statistické metody – regulační diagramy, histogram, korelační diagram, Paretova analýza a tabulky pro sběr dat.

2 KVANTIFIKACE VARIABILITY PARAMETRŮ KVALITY

Cílem účelově realizovaného procesu nebo produktu je splnění potřeb a souvisejících specifikovaných požadavků. Podobně inovovaná technologie nebo konstrukční řešení je charakterizováno požadavkem na splnění tolerancí jistých parametrů kvality. Průmyslové i jiné podniky, uspokojující koupěschopnou poptávku v prostředí dokonalé konkurence, jsou nuceny realizované a plánované procesy ovlivňovat tak, aby byly existující požadavky uspokojovány s minimální proměnlivostí či variabilitou. Platí to i pro vývoj – například statistické navrhování tolerancí se postupně stává důležitou součástí praxe konstruktérů. Empirie potvrzuje premisu, že variabilita vlastností jevů, procesů a objektů je inherentním rysem objektivní reality. Jistá variabilita hodnot sledovaných parametrů kvality je nutně vrozená, a to i v situaci, kdy je technologie a proces ve stabilním, statisticky zvládnutém, stavu.

	Odchylka	Záznam					Četnost
		5	10	15			
	-10						
	-9						
Dolní toleranční mez →	-8						
	-7						
	-6						
	-5						
	-4	X	X				2
	-3	X	X				2
	-2	X	X	X			3
	-1	X	X	X	X		4
Cílová hodnota →	0	X	X	X	X	X	6
	1	X	X	X	X		4
	2	X	X	X	X		4
	3	X	X				2
	4	X	X				2
	5	X	X				2
	6	X					1
	7						
Horní toleranční mez →	8						
	9						
	10						

Obr. 2.1: Variabilita hodnot výběrového souboru sledovaného parametru kvality. Je zde vyjádřen jak statisticky dále vyhodnotitelný hlas procesu, tak hlas zákazníka, daný tolerancemi (LSL, dolní toleranční mez a USL, horní toleranční mez). Všechny tyto data jsou podstatné pro posuzování způsobilosti procesu, technologie nebo stroje.

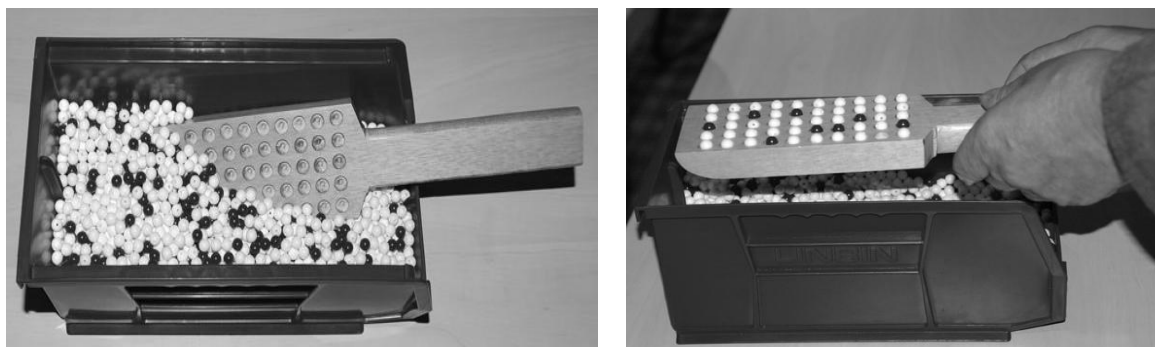
Aby byl proces způsobilý, neměla by být variabilita širší, než je tolerováno specifikacemi. Při hodnocení způsobilosti se tak srovnává maximálně přípustná variabilita daná specifikací, například dolní toleranční mezí a horní toleranční mezí, s existující variabilitou sledovaného znaku jakosti dosahovanou stabilním procesem [3]. Praktické zkušenosti ukazují, že se statistické navrhování tolerancí, nebo třeba ověřování způsobilosti strojů a technologií se někdy podceňuje. Konstruktéři někdy nekladou důraz na hledání řešení zohledňujících způsobilost dostupných technologií – příkladem budiž příliš přísné tolerance a související nároky na výrobu a kooperace.

2.1 VARIABILITA A JEJÍ ZDROJE

Vyhodnocení dat, získaných měřeními kritických parametrů výstupů třeba i regulovaného procesu, jako jsou elektrické nebo mechanické parametry vyrobených komponent, ukazuje, že hodnoty nejsou stejné, vykazují variabilitu a kolísají. Příklad variability v případě regulovaného procesu, reprezentovaného chováním kritického parametru kvality, zachycuje obrázek 2.1.

Z pohledu způsobilosti bude proces nezpůsobilý, pokud bude rozpětí hodnot parametru daný běžnou variabilitou procesu, dosahovanou za specifikovaných podmínek s použitím dané technologie, daných postupů a kontrolních plánů, větší než dolní a horní toleranční limity příslušného parametru.

Američan Edvard Deming (1900-1993), statistik a konzultant zaměřující se na řízení a zlepšování průmyslových procesů, chápal variabilitu jako závažnou skutečnost. V rámci svých seminářů používal interaktivní výukovou simulaci, ve které účastníci simulovali výrobu. Někteří zastávali role snaživých pracovníků, jiní pracovníků kontroly jakosti a vedoucích. Simulace spočívá v tom, že z osudí se formou náhodného výběru vybírá jistý počet korálek, viz obr. 3.2. Výběr je realizován pomocí pádla s padesáti otvory, přičemž většina korálek v osudí má bílou barvu a některé korálky pak barvu červenou (20% v osudí).



Obr. 2.2: Demingova simulace variability experimentem červených korálek [11]. Jsou-li dodrženy regule, náhodné zdroje variability vytvářejí v průběhu simulace situaci, kdy vzniká dojem, že působí jako vymežitelný zdroj proměnlivosti pracovník. Nesprávné vyhodnocení situace vede k nesprávným rozhodnutím vedení.

Denní výroba každého pracovníka spočívá v tom, že korálky v osudí promíchá, například přesypáním z jedné krabičky do druhé. Pádlem bez třepání nabere korálky a přichází za inspektorem jakosti k nezávislému posouzení výsledků. Po zaznamenání výsledků se korálky vrátí zpět do osudí. Každý výběr z osudí představuje pracovní výsledky konkrétního pracovníka, počet bílých kuliček vyjadřuje počet kvalitních a shodných výrobků, počet červených kuliček počet nekvalitních a neshodných výrobků. Po každém výběru nezávislý inspektor jakosti provádí vyhodnocení a zápis výsledků.

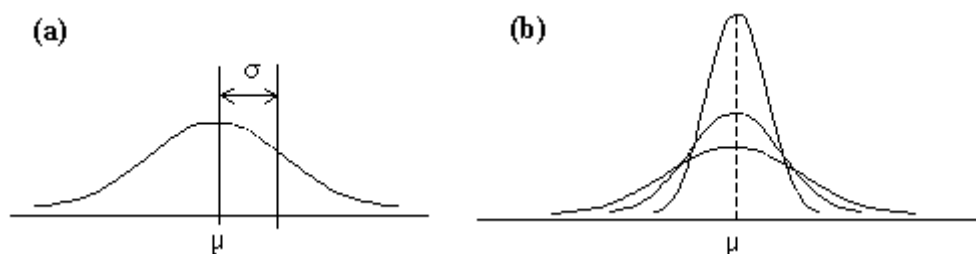
Tab. 2.1: Příklad výsledku simulace – počty neshodných zaznamenaných v experimentu červených korálek [19]. Vyhodnocení prostřednictvím grafů a popisné statistiky, je zavádějící, vzorek je natolik malý, že výběr není reprezentativní a závěry nejsou validní – vliv není statisticky významný.

Pracovník	Den				Celkem neshodných kusů	Průměrný počet neshodných
	1	2	3	4		
A	14	10	9	10	43	10,75
B	17	5	8	5	35	8,75
C	11	6	5	9	31	7,75
D	8	8	9	6	31	7,75
E	12	11	12	8	43	10,75
F	9	11	7	10	37	9,25
Celkem	71	51	50	48	220	
Průměr	11,83	8,50	8,33	8,00	9,17	9,17

Příklad výsledků simulace, uvedený v tabulce 2.1, ukazuje, že počet neshodných u jednotlivých pracovníků kolísá. Deming při provádění simulace zastával roli manažera a v průběhu simulace kriticky poukazoval na špatné výkony nejhorších pracovníků a nabádal je, aby se polepšili. Při následující analýze a rozboru výsledků simulace Deming poukazoval na to, že podstatná část variability v systému lze připsat systému, nikoliv lidem pracujícím v systému a že jedině vedení může změnit systém. Různé zdroje používají Demingův odhad, že systému lze často přisoudit až 94% variability, přičemž lidé pracující v systému ovlivňují jen 6% variability [20], [21], [22]. Použití této případové studie se osvědčilo i v autorově pedagogické praxi. S ohledem na omezení se osvědčilo použít osudí s hrachem a fazolemi. Získaná data lze následně statisticky vyhodnotit, a ilustrovat význam aplikace v tomto případě atributivních regulačních diagramů, prostřednictvím kterých lze získanou časovou řadu statisticky vyhodnotit a rozhodnout, zda je proces stabilní. Podle technické normy ČSN ISO 3534-2 se stabilním procesem rozumí proces, v němž míry (ukazatele) jakosti (např. průměr, rozptyl, podíl neshodných jednotek nebo průměrný počet neshod výrobku nebo služby) je ve statisticky zvládnutém stavu, tj. ve stavu, kdy kolísání mezi výsledky pozorovanými na vzorcích lze přičíst na vrub systému náhodných příčin, které nevykazují změny v čase.

2.2 VARIABILITA A POPIS VARIABILITY

Změnu hodnot sledovaných parametrů, jejich celkovou variabilitu, lze charakterizovat disperzí (dispersion) a posunem (drift). Stav procesu v jistém časovém období bývá z pohledu sledované charakteristiky popisován funkcí hustoty pravděpodobnosti, která odráží aktuální posun i disperzi. Z hlediska matematického popisu jde o vyjádření rozpylu n -tice naměřených výsledků kolem střední hodnoty. K vizuálnímu vyjádření a reprezentování variability se používá různých způsobů, častým způsobem je v případě spojitých dat použití histogramu nebo průběhu funkce hustoty pravděpodobnosti (viz obr. 2.3). Kvantitativně bývá posunutí popsáno statistickým odhadem ukazatelů polohy (např. průměr, medián) a disperze ukazateli proměnlivosti (např. rozpětí, směrodatná odchylka).



Obr. 2.3: Příklad průběhu funkce hustoty normálního rozdělení $f(x)$ reálné proměnné x , (a) zachycení významu konstant μ a σ , (b) průběhy funkce hustoty normálního rozdělení lišící se hodnotou konstanty σ (směrodatné odchylky).

Výsledky experimentu (náhodného pokusu) při mnohonásobném opakování vykazují zvláštní pravidelnost projevující se v relativním zastoupení různých možných výsledků. I když jsou hromadné jevy mnohotvárné a různorodé, lze pro jejich statistické zkoumání vystačit s relativně malým počtem typů teoretických rozdělení. Jako příklady teoretických rozdělení lze uvést například normální rozdělení, Studentovo t -rozdělení, Weibullovo rozdělení [23], chí-kvadrát rozdělení, Poissonovo rozdělení nebo exponenciální rozdělení [4].

Popis chování hodnot spojitě proměnné lze, v případě regulovaného procesu, charakterizovat funkcí hustoty normálního rozdělení, která je dána vztahem

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right], \quad (2-1)$$

kde symbol x označuje sledovanou náhodnou proměnnou, μ a σ jsou konstanty. Konstanta μ reprezentuje střední hodnotu a σ směrodatnou odchylkou. Vzhledem k tomu, že funkce hustoty pravděpodobnosti je určena hodnotou těchto dvou konstant, je normální rozdělení často označováno $N(\mu, \sigma)$. Plocha pod křivkou hustoty pravděpodobnosti odpovídající intervalu a, b udává pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty spadající do intervalu a, b . Příslušnou plochu lze spočítat jako integrál přes sledovaný interval a, b :

$$F(x) = \int_a^b f(x) dx. \quad (2-2)$$

V praktických aplikacích se k určení plochy pod křivkou funkce hustoty normálního rozdělení nejčastěji používá tabelovaných hodnot. Při výpočtu plochy pod křivkou normálního rozdělení je nejprve zapotřebí náhodnou proměnnou X mající normální rozdělení $N(\mu, \sigma)$ tzv. normováním neboli standardizací převést na náhodnou proměnnou Z mající normované normální rozdělení $N(0,1)$. Transformace se provádí pomocí vztahu

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}. \quad (2-3)$$

Prostřednictvím tohoto vztahu lze tedy jakoukoli normálně rozdělenou náhodnou proměnnou x transformovat na normovanou normálně rozdělenou veličinu z a provádět odhady pravděpodobnosti výskytu hodnot ve stanoveném intervalu – třeba intervalu vymezených tolerancemi.

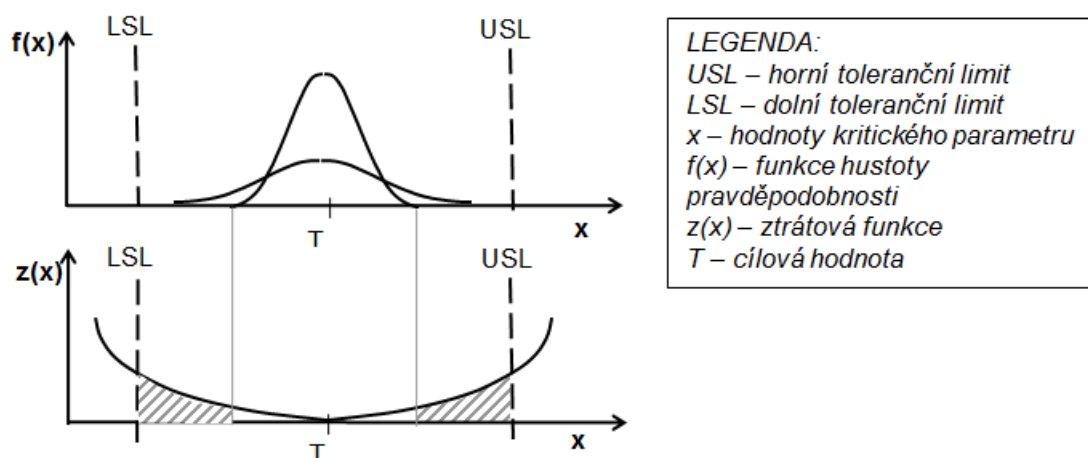
Použitelnost normálního rozdělení není omezena pouze na popis pravděpodobnostního chování normálně rozdělených veličin, ale je daleko širší. To vyplývá z toho, že jím lze aproximovat mnohá rozdělení, kde na kolísání náhodných veličin působí velký počet nezávislých a vzájemně nezávislých vlivů. Rozdělení součtu velkého počtu vzájemně nezávislých náhodných veličin se za velmi obecných podmínek blíží rozdělení normálnímu (tzv. centrální limitní teorém). Rozložení většiny pozorovaných veličin lze na normální rozložení převést vhodnou transformací (např. logaritmickou transformací – logaritmicko-normální rozdělení). Autorovy praktické zkušenosti ukazují, že v praxi pracovníci kvality a technologové automaticky spoléhají na využití modelu normálního rozdělení, aniž by nad ověřením platnosti tohoto předpokladu vůbec uvažovali. I když firmy investují do programového vybavení, umožňující ověřit a vybrat adekvátní typ rozdělení, často pracovníci ani nevědí, že by se tímto měli zabývat. Je zřejmé, že související odhady statistik, podobně jako indexů způsobilosti jsou tímto zásadně ovlivněny.

2.3 VARIABILITA A JEJÍ DŮSLEDKY PRO NÁVRH A VÝVOJ

Parametry jednotlivých výrobků, vyrobených stejnou technologií, stejnými stroji ze „stejných“ materiálů (stejně šarže) kolísají a fluktuují kolem středních hodnot, což se následně odráží v kolísání hodnot kritických parametrů součástí, dílců a komponent. Tato fluktuace je výslednicí vlivu různých zdrojů či příčin variability, jejichž působení lze studovat využitím statistických metod – nástrojů popisné a induktivní statistiky [7]. Příkladem nežádoucího dopadu variability může být dopad kontraktu na výrobu automatických převodovek, uzavřeného mezi Fordovými závody a Mazdou. Mazda měla vyrábět stejné automatické převodovky, jako byly vyráběny v Americe. Jak v Americe, tak v Japonsku se tedy vyráběly stejné převodovky a byly montovány pouze do amerických vozidel. Záznamy o reklamacích po čase ukázaly, že převodovky vyrobené

v Mazdě měly podstatně nižší míru reklamací, než převodovky vyrobené v Americe. Američané tuto skutečnost analyzovali a zjistili, že převodovky vyrobené v Mazdě byly vyrobeny přesněji, s menší variabilitou, než jejich vlastní. Podle tradičních standardů Ford vyráběl kvalitně, ale továrna Mazdy byla v tomto ohledu lepší [24].

Paradigma úsilí o minimalizaci variability odráží definici jakosti Japonce Geniicho Taguchiho (1924-). Podle jeho definice je jakost daná „minimalizací variability okolo cílové hodnoty“, což odráží skutečnost, variabilita skutečného provedení od toho, co je slíbeno či očekáváno. Důsledkem může být nesplnění funkčních požadavků na vyšší úrovni a v konečném efektu nespokojenosti zákazníků, nejenom těch koncových ale i třeba požadavků vyšších konstrukčních celků v případě modulárního řešení. Koncepce minimalizace variability okolo cílové hodnoty vychází z předpokladu, že čím více se budou skutečné hodnoty kritických parametrů vzdalovat od hodnoty cílové, tím více se zvyšuje pravděpodobnost neplnění požadavků na výstup a v konečném důsledku nespokojenost zákazníka a finanční ztrátu.



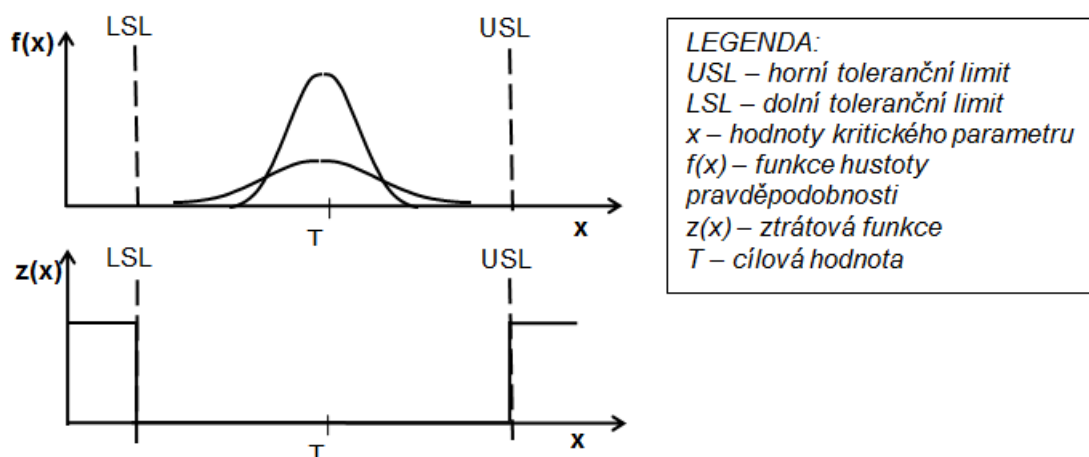
Obr. 2.4: Koncepce ztrátové funkce uznávající, že čím větší je odchylka od cílové hodnoty, tím větší je ztráta.

Závislost ztráty na odchylce od cílové hodnoty je kvadratická, například platí, že dvojnásobná odchylka od cílové hodnoty T způsobí čtyřnásobnou ztrátu. Ztrátová funkce $z(x)$ může být vyjádřena vztahem

$$z(x) = k \cdot (x - T)^2, \quad (2-4)$$

kde k je konstanta, x hodnota sledovaného parametru T cílová hodnota.

Koncepce kvality, opírající se o paradigma ztrátové funkce, uznává, že prostřednictvím vhodných opatření je pak nutné usilovat, aby se hodnoty kritických parametrů maximálně blížily hodnotám cílovým. Paradigma ztrátové funkce uvažuje, že neustálé snižování kolem jejich cílových hodnot je pro zlepšování nutné, protože minimalizuje ztrátu. Variabilita je tedy nepřitelem jakosti, čím větší je variabilita, tím větší je pravděpodobnost, že produkt nesplní specifikované požadavky. Variabilita na úrovni komponentů, modulů, funkčních bloků a dalších vyšších celků přispívá ke ztrátám jakosti a souvisejícím finančním ztrátám (vícenákladům, důsledkům výpadků funkceschopnosti apod.). Tradiční koncepce kvality naopak uznává, že pokud hodnota sledovaného kritického parametru spadá do oblasti, vymezené tolerančním polem, vznikající ztráta je nulová (viz obr. 2.5).



Obr. 2.5: Tradiční koncepce uznávající, že hodnota kritického parametru mimo toleranční pole představuje ztrátu, odrážející náklady na nejakost. Koncepce six sigma uvažuje posun procesu o $1,5\sigma$, čímž vzniká definice vysoce způsobilých procesů.

O premisu, že variabilita je přirozenou vlastností jevů a objektů, se opírá celá řada koncepcí a metod. Příkladem je statistická regulace procesů (Statistical Process Control), koncepce six sigma, koncepce robustního řešení (Robust Design) nebo hodnocení způsobilosti procesů (process capability analysis). Tyto koncepce uznávají, že podstatou úsilí o vytvoření kvalitního produktu je pochopení variability a dosažení shody kritických parametrů s požadavky, respektive specifikacemi, a to i přes existenci nevyhnutelných fluktuací.

Tab. 2.2: Definiční vztahy pro výpočet průměrné kvadratické odchylky v závislosti na třech možných požadavcích na sledovanou hodnotu odezvy či parametru jakosti. Přístup k optimalizaci používaný v Taguchiho přístupu k plánovanému experimentu [37].

Definice cílové hodnoty znaku jakosti	Definiční vztah
Čím menší, tím lepší	$MSD_M = \frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}$
Čím blíže cílové jmenovité hodnotě, tím lepší	$MSD_N = \frac{(y_1 - T)^2 + (y_2 - T)^2 + \dots + (y_n - T)^2}{n}$
Čím větší, tím lepší	$MSD_V = \frac{\left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2}\right)}{n}$

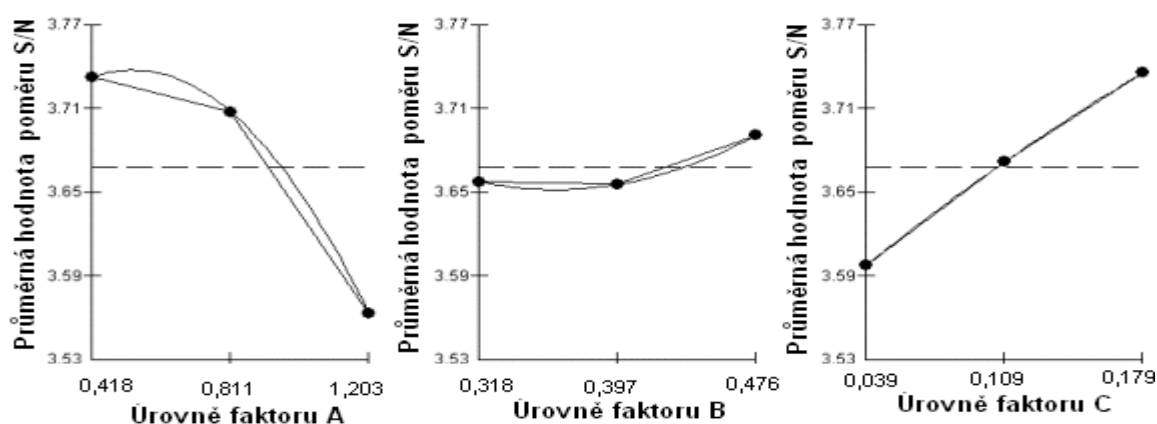
Legenda:
MSD... průměrná kvadratická odchylka hodnot sledovaného znaku jakosti vzhledem k cílové hodnotě
 y_1, y_2, y_3, \dots - i-tá experimentálně dosažená hodnota sledovaného znaku jakosti
T... cílová jmenovitá (nominální) hodnota
n... velikost výběrového souboru u kterého se sledují dosažené hodnoty sledovaného znaku jakosti

2.4 OPTIMALIZACE S OHLEDEM NA SPECIFIKOVANOU CÍLOVOU HODNOTU

Existuje-li požadavek na minimalizaci variability okolo cílové hodnoty, je sledován požadavek maximalizovat poměr signálu k šumu, S/N (Signal/Noise). Signálem se zde kontrast nastavení experimentálních faktorů na různých úrovních a šum představuje vliv šumových činitelů. Poměr signálu k šumu, S/N je vyjádřen vztahem

$$S / N = -10 \cdot \log(MSD), \quad (2-5)$$

kde MSD je průměrná kvadratická odchylka (Mean Squared Deviation) hodnot sledovaného znaku jakosti vzhledem k cílové hodnotě. Průměrná kvadratická odchylka hodnot je měřítkem variability okolo cílové hodnoty znaku jakosti. Definice sledované průměrné kvadratické odchylky musí vyplývat z daných konstrukčních či technologických požadavků, definujících cílovou hodnotu znaku jakosti. V případě konkrétního zadání pak mohou nastat tři možné požadavky: (1) cílem je, aby hodnoty sledovaného znaku jakosti dosahovaly minimálních hodnot, tj. čím menší, tím lepší, (2) cílem je, aby hodnoty sledovaného znaku jakosti dosahovaly s minimální variabilitou jisté nominální cílové hodnoty a (3) cílem je, aby hodnoty sledovaného znaku jakosti dosahovaly maximálních hodnot, tj. čím větší, tím lepší. Definiční vztahy určení MSD v těchto třech případech jsou shrnuty v tabulce 2.2. V případě experimentu (obr. 2.6), ve kterém byl ověřován vliv experimentálních faktorů, a experimentální pokusy byly provedeny opakovaně, je možné experiment vyhodnotit s využitím koncepce poměru signálu k šumu. Takové vyhodnocení přispívá ke zvážení nastavení pro minimalizování variability okolo cílové hodnoty.



Obr. 2.6: Grafy hlavních efektů, představující výsledky vyhodnocení experimentu, ve kterém byl hodnocen vliv tří faktorů. Výsledným doporučením pro minimalizaci variability okolo cílové hodnoty potom v tomto případě bylo nastavení faktoru A na nejnižší experimentální úrovni, faktoru B a faktoru C na nejvyšší experimentální úrovni.

3 KAUZALITA A PREVENCE PROBLÉMŮ KVALITY

Na každý jev nebo proces působí celá řada vlivů, které mohou průběh a dosahované výsledky ovlivňovat. Jako důsledek těchto vlivů parametry procesů i produktů kolísají a vykazují variabilitu či fluktuaci. Mnohé koncepce soudobého poznávání a ovlivňování objektivní reality se opírají o paradigma, že jevy mají identifikovatelné a ovlivnitelné příčiny a jsou kauzální. Příčiny předcházejí důsledek a časová následnost příčin a následku v sobě zahrnuje předpoklad směru plynutí času. [7]. Pro zabezpečování kvality je paradigma kauzality zásadním pojetím, Veber (1991) například uvádí, že "kvalita provedení výrobní operace je závislá na celé řadě činitelů. Patří k nim úroveň provedení předešlé operace, seřízení stroje pro danou operaci, přesnost stroje a nástrojů, teplotní poměry při průběhu operace, charakter zpracovávaného materiálu atd. Všechny tyto příčiny způsobují určité výkyvy v úrovni kvality výrobních operací [26]." V různých etapách životního cyklu produktu mohou vznikat různé potenciální příčiny problémů s jakostí a spolehlivostí. Příkladem mohou být přepravní podmínky, Espec Technology Report 3/1997 uvádí situaci, kdy byla, vzhledem k válce v Perském zálivu, lodní přeprava z Japonska do Evropy přes Suezský průplav zaměněna za železniční přepravu po Transsibiřské magistrále. To způsobilo zásadní změny v environmentálních podmínkách přepravy (extrémně záporné teploty a kolísání teploty, vlhkosti a vibrací). Následkem změny dopravní trasy byly stížnosti a reklamace výrobků [27]. Konkrétní zdroje variability a příčiny neshod odrážejí rozmanitá specifika konkrétních

materiálů, konstrukcí a technologií. Konkrétní studie, analýzy a rozborů mají napomoci porozumět mechanismům vad, odhalovat potenciální příčiny a zdroje nejakosti či nespolehlivosti výsledných konstrukčních či technologických řešení [28].

Studiu příčin variability nutně doprovází vědecké postupy poznávání a popisu světa. Vyslovování hypotéz, hledání možných teorií, jejich prověřování, přijetí, vyvrácení nebo upravovat [29]. V rámci vědeckého pojetí poznávání světa je na příčinné vztahy nutné pohlížet z hlediska pravděpodobnosti a domnělou existenci hypotetické příčinnosti potvrzovat nebo vyvracet pozorováním či experimentem. Ověřování existence hypotetické příčinnosti doprovázejí možná rizika či komplikace, což vede k nutnosti opakovaného pozorování, úsilí o dodržení stabilních podmínek experimentu či pozorování a snahu o odstranění případných vedlejších vlivů. Příhodný didaktický příklad, opomenutí vlivu jiných příčin poskytuje Mareš (1994): "...statistiky prokázaná vysoká korelace mezi platy anglikánských kněží a cenami whisky v Anglii. Ne že by pastoři dostávali plat na to, aby měli za co pít. Ani naopak nejsou jistě tak silnými spotřebiteli, aby jejich koupěschopnost diktovala ceny. Obě číselné řady rostou vinou třetího faktoru – inflace. Podobně dlouhodobá korelace mezi spotřebou benzínu a počtem krádeží aut nenaznačuje ani tak spolupráci mezi pumpaři a zloději, jako spíše celkový růst motorizace [30].

3.1 POTENCIÁLNÍ PŘÍČINY, DIAGRAM PŘÍČIN A NÁSLEDKU A PREVENCE

Proměnlivost vlastností sledovaných objektů a jevů a souvisejících hodnot sledovaných kritických proměnných je výslednicí působení velkého množství různých vlivů a příčinných faktorů (viz tab. 3.1). Při prvotním zkoumání je zapotřebí vytvořit seznam či soupis potenciálních vlivů či příčinných faktorů, který postihne různé kauzální zdroje.

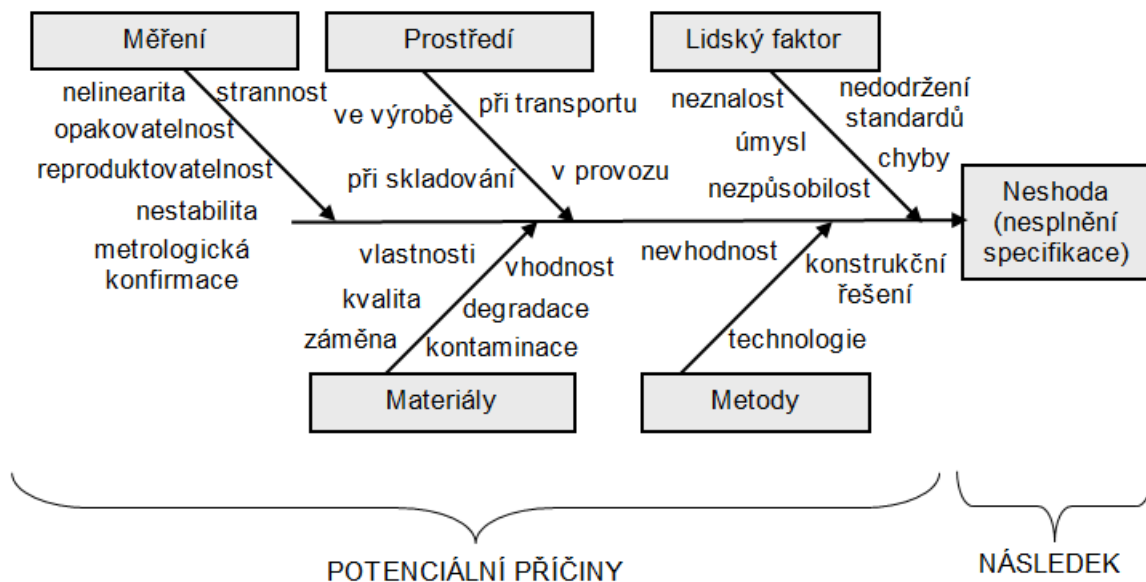
Tab. 3.1: Oblasti potenciálních příčin neshod a neplnění specifikací v různých etapách životního cyklu produktu, ovlivňující výslednou jakost a spolehlivost entity.

	Potencionální příčiny neshod v různých etapách životního cyklu
Oblast konstrukce (příležitosti pro DFMEA)	<ul style="list-style-type: none"> – Konstrukční nedokonalosti, chybné stanovení kritických jakostních parametrů a tolerancí – Nevhodnost řešení pro podmínky používání a klimatické podmínky – Nevhodná volba materiálu nebo technologie – Chyby v podkladech a technické dokumentaci
Oblast výroby (příležitosti pro PFMEA a G8D)	<ul style="list-style-type: none"> – Nezávládnutá technologie, chybějící či nevhodné standardy – Neshody a nedokonalosti ve výrobě (technologická nekázeň, nestabilní podmínky, jako je teplota, prašnost, vlhkost, seřízení a nepřesnost nástrojů) – Neshody a nekvalita vstupního materiálu nebo subdodávek (záměna materiálu, neplnění požadavků na kritické jakostní parametry)
Oblast transportu a skladování	<ul style="list-style-type: none"> – Nedodržení přepravních a skladovacích podmínek – Nedodržení klimatických podmínek při přepravě a překládání
Oblast provozu a užití (příležitost pro G8D)	<ul style="list-style-type: none"> – Nedodržení provozních a klimatických podmínek – Nesprávné používání nebo používání v nevhodných podmínkách – Nedodržení podmínek údržby či režimu provozu – Únava, stárnutí a opotřebení

K účelu prvotního studia působících příčin může být nápomocný diagram příčin a následku (Fishbone Diagram, Cause and Effect Diagram). Tento diagram ve tvaru rybí kosti shrnuje všechny možné příčiny, přispívající ke vzniku následku, a rozděluje je do vhodných kategorií. Autorem diagramu příčin a následku je japonec Kaoru Ishikawa (1915-1989), propagátor použití

maximálně nesložitých metod pro sběr a analýzu dat při řešení problémů s kvalitou. Ishikawa o diagramu píše „...obrázek ukazuje vztah mezi charakteristikami a příčinnými vlivy a proto jsem jej pojmenoval diagram příčin a efektu. Při řízení jakosti se nedá prostě vytyčit cíl a pobízet „pracujte, pracujte“. Musí se pochopit řízení procesů, zvládnout proces, který je souborem příčinných vlivů a v tomto procesu vytvořit způsoby výroby lepších výrobků, stanovit vyšší cíle a docílit efektů. Vytvořil jsem popsany diagram pro usnadnění tohoto způsobu myšlení. V roce 1952 použili v železárnách Kawasaki Iron Fukiai Works tento diagram při uplatňování standardizace a řízení. Výsledky byly potěšitelné a diagram se od té doby uplatnil na mnoha pracovištích na celém světě. Dr. Juran mě v roce 1962 poctil tím, že ve své rukověti řízení jakosti, QC Handbook, nazval diagram příčin a efektu Ishikawovým diagramem a pod tímto názvem je nyní všeobecně známý. Podle tvaru diagramu se mu také přezdívá rybí kostra [31].“

Všechny zdroje aktivované při uskutečňování procesů jsou vystaveny působení mnoha vlivů, výstupy jsou jimi ovlivňovány a právě diagram rybí kosti je může graficky znázornit. Výstup prvotního zkoumání kauzality na dané úrovni může být zachycen graficky, v diagramu je přehledně znázorněno, které možné vlivy mohou sledovaný následek způsobit.



Obr. 3.1: Příklad diagramu příčin a následku, na levé straně diagramu jsou shrnuty potenciální příčiny, rozříděné do vhodných kategorií, na pravé straně diagramu je uveden následek. Z pohledu praktického využití je vhodné podotknout, že konstrukce by se měla opírat o skupinovou práci vhodně složeného týmu.

V okolí každé čáry, označující kategorii příčin, se zapisují dílčí možné příčiny, jejichž působení bývá graficky vykresleno čarou s šipkou, směřující k čáře kategorie příčin. Jako obecné kategorie možných příčin se v diagramu rybí kosti používá pět skupin potenciálních vlivů: vliv použitých materiálů (vstupní materiál použitý či spotřebovaný při realizaci souvisejících procesů nebo ovlivňující vlastnosti komponent, modulů a rozhraní), vliv technologií a postupů (procedury, standardy, normy a pracovní instrukce), vliv strojů či nástrojů (včetně informačních, diagnostických a komunikačních subsystémů), vliv lidského faktoru a vliv měření (systematické či náhodné vlivy). K vytvoření soupisu potenciálních příčin a zkoumání kauzality v řešené vědecké otázce není nutné opírat se pouze o studium podkladů související znalostní báze. Užitečné a nápomocné je realizovat brainstormingové sezení a synergického efektu skupinového řešení problémů.

3.2 MODELOVÁNÍ ZÁVISLOSTÍ

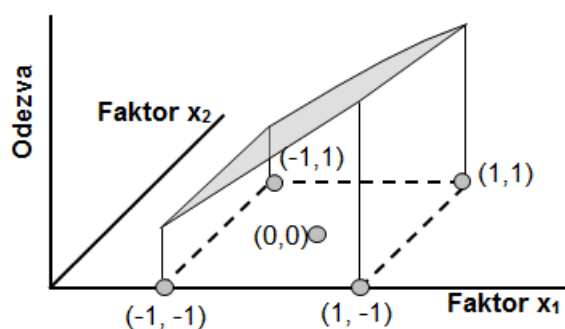
Při studiu vlivu nezávisle proměnných $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ na sledovanou závisle proměnnou y (odezvu) lze obecný model zapsat ve tvaru

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon, \quad (3-1)$$

kde f je funkce popisující skutečnou responzní plochu a ε je člen reprezentující zdroje variability, které nejsou postiženy funkcí f . Člen ε ošetřuje působení náhodných zdrojů variability projevujících se v existenci náhodné chyby. Pokud se bude střední hodnota ε rovnat nule, potom platí

$$E(y) = \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k). \quad (3-2)$$

Nezávisle proměnné v rovnicích 4-1 a 4-2 jsou vyjádřeny v originálních jednotkách. Pro účely usnadnění analýzy bývají nezávisle proměnné transformovány do kódovaných proměnných x_1, x_2, \dots, x_k , které jsou bezrozměrné, mají střední hodnotu rovnou nule a směrodatnou odchylku rovnou hodnotě jedna.



Obr. 3.2: Kódování nezávisle proměnných a představa responzní plochy, která má být identifikovaným modelem popsána. Nastavení experimentálních faktorů na dílčích úrovních předurčují pokusy, jejichž výsledky poskytují data pro hodnocení odezev.

Funkce popisující skutečnou responzní plochu může být za pomoci kódovaných proměnných symbolicky zapsána pomocí vztahu

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (3-3)$$

Protože je funkce neznámá, je zapotřebí ji provedením regresní analýzy aproximovat. Pro relativně malý region nastavení nezávisle proměnných bude pro aproximaci postačovat použití polynomu nižšího stupně, většinou prvního nebo druhého stupně. Pro účely určení směru, ve kterém se nachází optimum, bude postačovat polynom prvního stupně. V situaci potřeby určení lokálního optima a zohlednění zakřivení plochy je nutné použít polynom druhého a vyššího stupně. V případě dvou nezávisle proměnných lze model využívající polynomu prvního stupně vyjádřit za pomoci kódovaných proměnných vztahem

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \quad (3-4)$$

η . závisle proměnná, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ regresní koeficienty. Tento lineární empirický model neuvažuje vliv interakcí. Model prvního řádu lze obecně vyjádřit vztahem

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k. \quad (3-5)$$

V situaci, kdy existuje interakce mezi nezávisle proměnnými, je nutné použít model prvního řádu s interakcemi, který lze pro dvě nezávisle proměnné zapsat ve tvaru

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2. \quad (3-6)$$

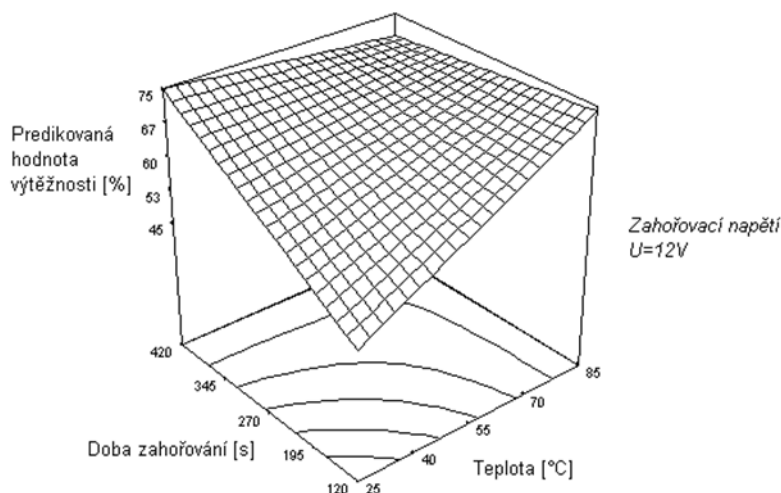
Interakce je v této funkci vyjádřena výrazem $\beta_{12} x_1 x_2$, což se v responzní ploše projevuje zakřivením plochy. V situaci, kdy ve studovaném oboru nezávisle proměnných existuje relativně velké zakřivení, je vhodnější použít model druhého řádu, který lze pro případ dvou nezávisle proměnných vyjádřit vztahem

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2. \quad (3-7)$$

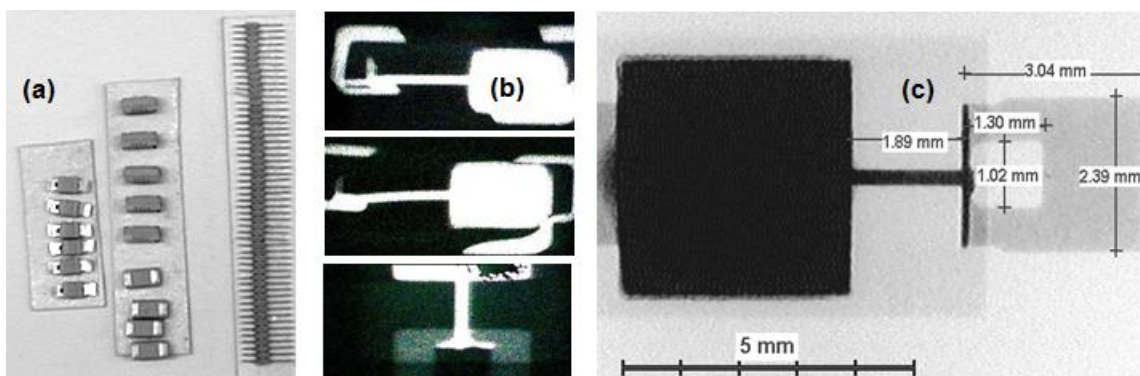
Model druhého řádu je možné zobecnit

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j. \quad (3-8)$$

Pro vytvoření adekvátního modelu, respektive výběru vhodného modelu, je nutné získávat dat, odhadovat regresní koeficienty a posuzovat adekvátnost identifikovaného modelu.



Obr. 3.3: Příklad responzní plochy predikované výtěžnosti, jako jedné ze sledovaných odezev, v závislosti na době a teplotě zahořování. Je to výsledek empirického modelu, adekvátnost byla ověřena diagnostikou reziduí. Výsledek autorem realizovaného experimentu, podrobněji diskutovaného v nezkrácené verzi habilitační práce.



Obr. 3.4: (a) Vylepené vzorky pro získání rentgenových snímků (b) rentgenové snímky použitelné pro analýzu vad, (c) invertovaný snímek pro hodnocení rozměrů. Příklad analýzy vad z nezkrácené verze habilitační práce.

4 KLASIFIKACE ZDROJŮ VARIABILITY A REGULACE PROCESŮ

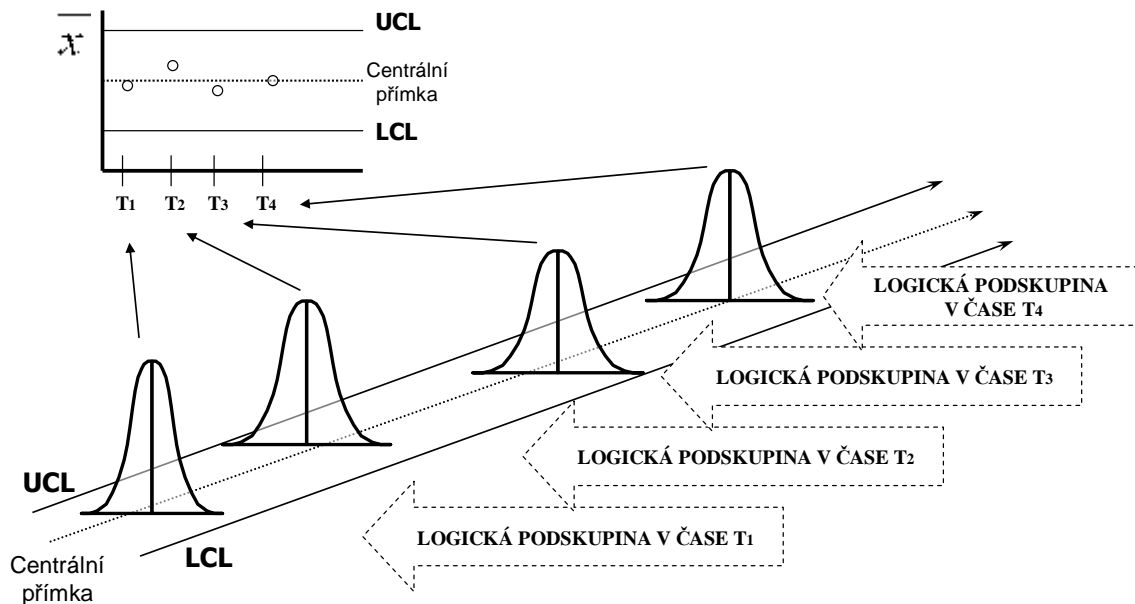
Američan Walter Shewhart (1891-1697), průkopník aplikace statistické regulace procesů a využití regulačních diagramů pro usměrňování procesů s ohledem na udržení stabilních výsledků, dělil zdroje variability do dvou skupin. V jedné skupině jsou příčiny vymezitelné (special, assignable causes), ve skupině druhé příčiny náhodné (common, chance, random causes). Paradigma tohoto rozdělení vede k premise, že v rámci stávajícího systému (konstrukčního a technologického řešení, používaných strojů a technologií, technologických postupů, vlivů okolního prostředí, apod.) je vždy nějaká variabilita, předurčená náhodnou složkou, nevyhnutelná.

4.1 VYMEZITELNÁ A NÁHODNÁ SLOŽKA VARIABILITY

Variabilitu sledovaných odezev mohou způsobovat identifikovatelné příčiny ve smyslu abnormálních událostí, které nejsou inherentní součástí souvisejících procesů a které lze alespoň teoreticky odstranit.

Vymezitelné příčiny jsou signálem, že se v procesu něco stalo nebo změnilo, jsou to přiřaditelné zdroje variability, které lze přijetím adekvátního nápravného opatření eliminovat. Příkladem vymezitelných příčin variability v případě průmyslového procesu může být záměna materiálu nebo použití neshodného materiálu, použití nesprávného přípravku, přerušení dodávky elektrické energie, nesprávná koncentrace roztoku nebo špatné seřízení stroje.

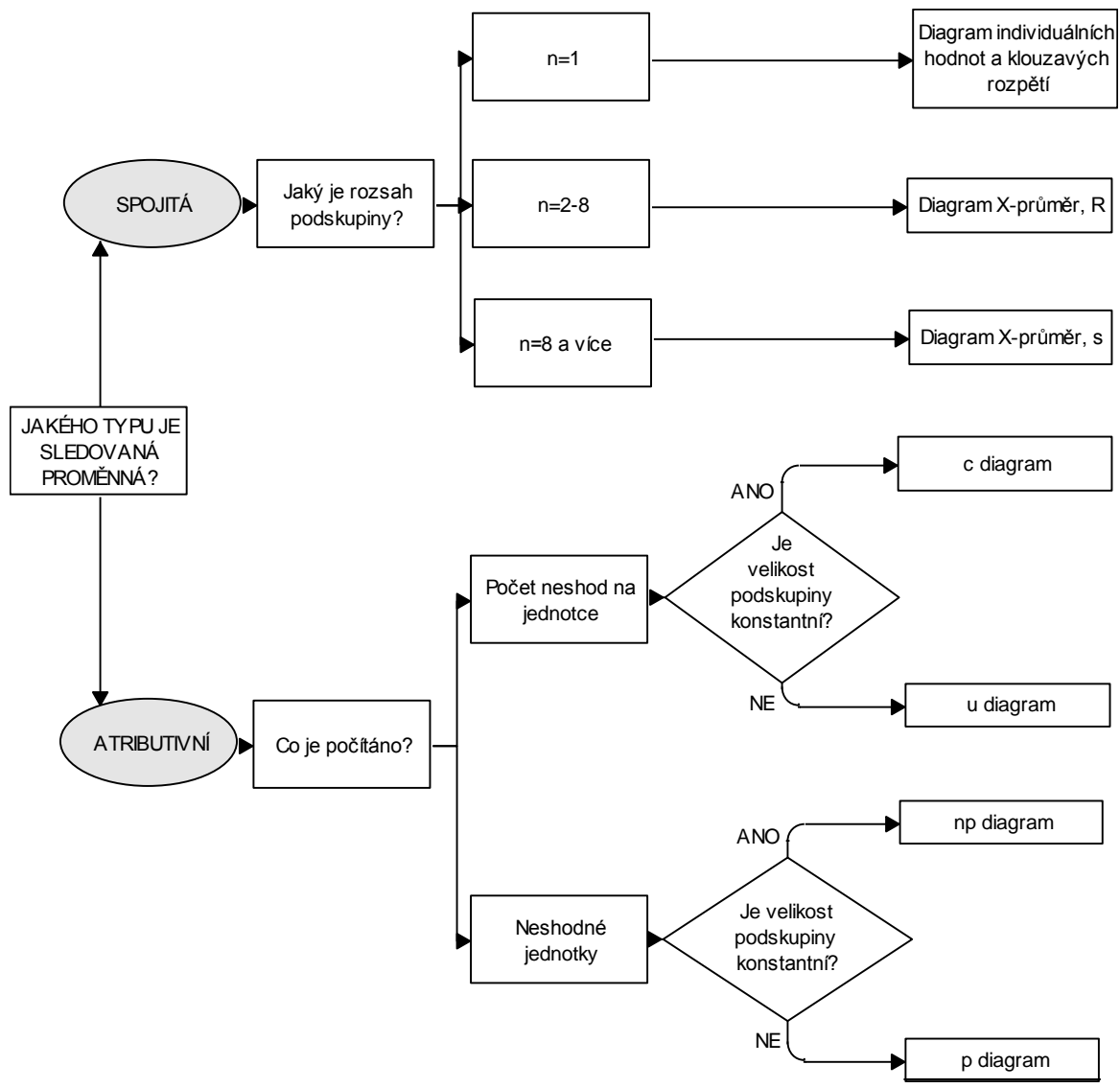
Přítomnost těchto neočekávaných příčin vyvolává neočekávané změny v procesu a vyvolává situaci, kdy proces je nestabilní a jeho výsledky nejsou predikovatelné. Techniky statistické regulace procesu se snaží postihnout právě přiřaditelné zdroje variability, které lze provedením "regulačního" zásahu eliminovat a převést zpět do stavu, kdy proces ovlivňuje jen náhodná složka variability. Je-li v regulačním diagramu identifikováno zapůsobení vymezitelné příčiny variability, příčinu je nutno identifikovat, odstranit a zamezit jejímu opakování.



Obr. 4.1: Sledování zdrojů variability v diagramu průměrů. V regulačním diagramu jsou sledovány průměry logických podskupin, získaných vzorkováním v čase.

Výsledná variabilita sledovaných odezev je vedle vymezitelných zdrojů variability ovlivňována působením náhodných zdrojů variability. Náhodná složka variability odráží skutečnost, že jednotlivé složky dotčeného systému a souvisejících procesů náhodně fluktuují, což jsou vlivy inherentní způsobu řešení sledovaného systému. Široká škála spíše neidentifikovatelných příčin,

které náhodnou složku ovlivňují, nevykazují bezprostředně zjevnou zákonitost; jejich počet bývá značný a kolísání proměnné, kterou ovlivňují, bývá malé. Náhodná variabilita, způsobující na jisté úrovni rozlišení nevysvětlitelný šum, způsobuje kolísání odezev v jistých mezích a v daném systému nelze vliv této složky variability potlačit regulačními zásahy. Výše této složky variability závisí na inherentních vlastnostech dotčené soustavy, obecně může být ovlivněna fundamentálními opatřeními či změnami, jako je změna konstrukčního či technologického řešení nebo technologická modifikace použitého materiálu. Chování regulovaného procesu, vystaveného pouze náhodným vlivům vystihuje ustálený, stabilní, stav procesu, kdy je vytvořen stav predikovatelnosti výsledků, jelikož celkové působení náhodné složky je statisticky předvídatelné. Dosahované výsledky jsou pak statisticky stabilní, sledované odezvy kolísají v jistých mezích, ke střední hodnotě parametru je superponován normální šum.

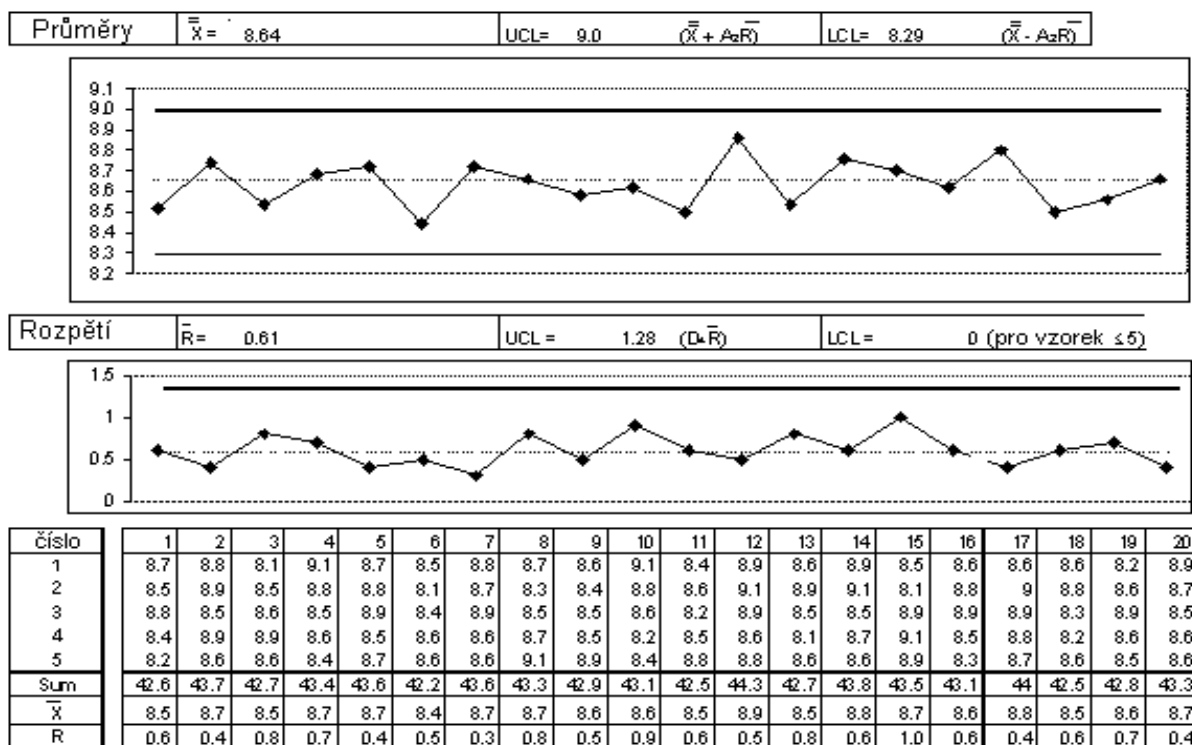


Obr. 4.2: Typy Shewhartových regulačních diagramů pro spojité a atributivní proměnné.

4.2 REGULAČNÍ DIAGRAMY

Používají se dva druhy Shewhartových regulačních diagramů, jednak regulační diagramy spojitých proměnných a jednak regulační diagramy atributivních proměnných (viz obrázek 4.2). Regulační diagramy spojitých proměnných, používaných při regulaci měření, vyžadují spojitá data. Atributivní regulační diagramy, používané při regulaci srovnáváním, pracují s atributivními

daty. V případě použití diagramů pro spojité proměnné je zapotřebí sledovat nejenom střední hodnotu, ale i disperzi. Proto se vždy používá dvojice diagramů, jeden pro monitorování polohy hodnot sledované proměnné (např. diagram výběrových průměrů) a druhý pro monitorování disperze (např. diagram výběrových směrodatných odchylek), viz příklad na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Příklad regulačního diagramu výběrových průměrů a výběrových rozpětí (\bar{x} , R)

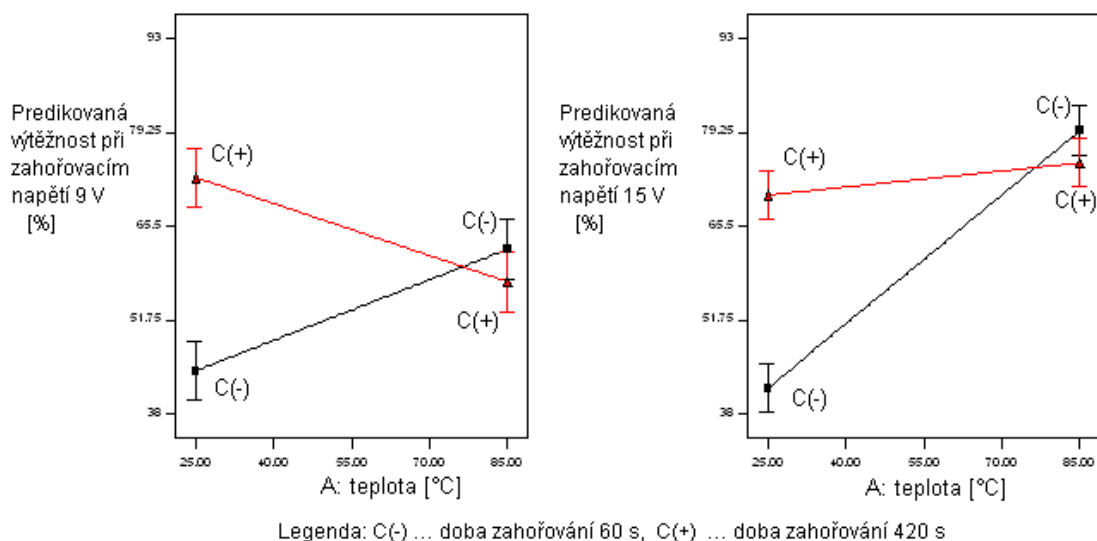
Působení vymezených příčin variability se v regulačním diagramu projeví nenáhodným uskupením bodů, které je identifikováno tzv. testy vymezených příčin. Norma ČSN ISO 8258 uvádí osm následujících případů, které lze považovat za signál zapůsobení vymezené příčiny variability: (1) jedna hodnota je mimo regulační meze, (2) devět hodnot v řadě za sebou je na téže straně od centrální přímky, (3) šest hodnot v řadě za sebou je plynule rostoucích nebo klesajících, (4) čtrnáct hodnot v řadě za sebou pravidelně alternativně kolísá, (5) dvě ze tří hodnot v řadě za sebou je mimo interval $\pm 2\sigma$, (6) čtyři z pěti hodnot v řadě za sebou jsou mimo interval $\pm \sigma$ na téže straně centrální přímky, (7) patnáct hodnot v řadě za sebou je uvnitř intervalu $\pm \sigma$, (8) osm hodnot v řadě za sebou je na obou stranách mimo interval $\pm \sigma$.

V případě, kdy regulační diagram zapůsobení vymezených příčin signalizuje, je zapotřebí: (i) identifikovat příčinu a provést opatření, které trvale zabráni opakovanému působení této příčiny, (ii) vyloučit příslušné podskupiny z dalšího hodnocení a přepočítat regulační meze a centrální přímky, (iii) opětovně analyzovat regulační diagram vůči revidovaným regulačním mezím. Tyto zásahy jsou součástí statistické regulace. Koncepce se nazývá statistickou regulací procesů, označovanou akronymem SPC, vytvořeného z anglického sousloví Statistical Process Control.

4.3 PLÁNOVANÉ EXPERIMENTY A STUDIUM VARIABILITY

Využití technik plánovaného experimentu umožňuje, na rozdíl od izolovaného použití technik regresní analýzy, získat maximum informací s minimálním množstvím požadovaných experimentů a experimentálních dat. Nespornou výhodou využití technik plánovaného experimentu je rovněž možnost sledovat nejen hlavní efekty, ale i efekty interakcí dílčích faktorů. Kapitola shrnuje přehled problematiky dvouúrovňových faktoriálních plánů a experimentálních plánů používaných

pro studium responzních ploch, tedy plánů, které představují účinné nástroje pro empirické studium kauzality. Součástí jsou i konkrétní příklady. V etapě charakterizace jsou nejprve identifikovány zásadní výstupní faktory (závisle proměnné) a zásadní vstupní faktory (nezávisle proměnné), a rámci etapy exploratorního šetření jsou získány data k prošetření chování v rámci stanoveného definičního oboru.



Obr. 4.4: Příklad grafu interakčního efektu změny dvou faktorů v exploratorní fázi šetření. (a) Predikce dopadu nastavení zahořovacího napětí na nižší úrovni nastavení a (b) predikce efektu nastavení zahořovacího napětí na vyšší úrovni. Empirický model byl vytvořen na základě dat získaných aplikací 2^4 faktoriálního plánu, tj. dokáže informovat o dopadu nastavení čtyř experimentálních faktorů variability [14].

4.4 DVOUÚROVŇOVÉ FAKTORIÁLNÍ PLÁNY

Specifickým případem experimentálního faktoriálního plánu je plán, prostřednictvím kterého je vyšetřován vliv k nezávisle proměnných, nastavovaných na dvou úrovních – nižší a vyšší úrovní nastavení [11], [14], [15]. Protože každá replikace takového experimentu má právě 2^k pokusů, jsou obvykle nazývány 2^k faktoriální plány. Pro označení nižší a vyšší úrovně nastavení se obvykle používají symboly minus (-) a plus (+), reprezentující kódované úrovně nezávisle proměnných. Kódované úrovně nezávisle proměnných vznikají transformací nezávisle proměnných vyjádřených v originálních jednotkách. Je-li například nezávisle proměnnou teplota, může být nastavení na nižší úrovni $t_{(-)} = 25\text{ °C}$ a na vyšší úrovni $t_{(+)} = 95\text{ °C}$.

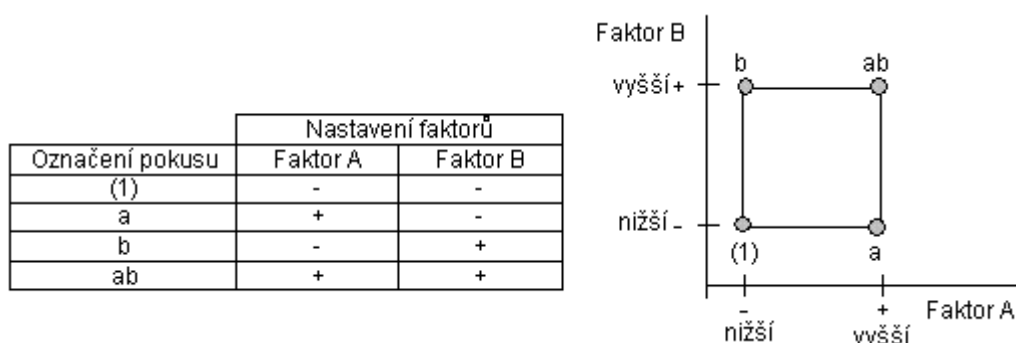
Faktoriální plány 2^k zastávají při popisu responzních ploch významnou roli. Uplatňují se zejména v exploratorní etapě empirického modelování, kdy mají být identifikovány významné nezávisle proměnné, popřípadě v identifikaci empirického modelu prvního stupně a určení směru optimálního nastavení. Mimo to jsou tyto plány použitelné pro rozšíření 2^k faktoriálních plánů na experimentální plány, které jsou adekvátní k prošetřování responzní plochy.

4.4.1 Faktoriální plány 2^2

Dvě nezávisle proměnné, nastavované na dvou úrovních, vytvářejí čtyři kombinace úrovní nastavení nezávisle proměnných [33]. Kombinace úrovní nastavení dvou nezávisle proměnných, faktoru A a faktoru B, jsou graficky znázorněny na obrázku 4.5. Každá z těchto kombinací určuje jeden pokus a jedna replikace ve 2^2 faktoriálním plánu tedy sestává ze čtyř pokusů označovaných následujícím způsobem:

- „a“ reprezentuje pokus, při kterém je faktor A nastaven na vyšší úrovni a faktor B na úrovni nižší,

- „b“ reprezentuje pokus, při kterém je faktor A nastavován na nižší úroveň nastavení a faktor B na úroveň vyšší,
- „ab“ představuje pokus, v němž jsou oba faktory nastaveny na vyšších úrovních a označení (1) reprezentuje pokus, při kterém jsou oba faktory nastaveny nižších úrovních.



Obr. 4.5: 2^2 faktoriální plán a odpovídající geometrické znázornění. Každý roh čtverce zobrazuje rozdílné nastavení faktorů.

Odhad průměrného efektu faktorů lze určit odečtením průměrné odezvy při nastavení faktoru na nižší úrovni od průměrné odezvy při nastavení faktoru na vyšší úrovni [33], [34]. Dále jsou uvedeny vztahy pro určení hlavních efektů A, B a interakčního efektu AB.

$$A = \bar{y}_{A(+)} - \bar{y}_{A(-)} = \frac{ab + a}{2 \cdot n} - \frac{b + (1)}{2 \cdot n} = \frac{1}{2 \cdot n} [ab + a - b - (1)], \quad (4-1)$$

$$B = \bar{y}_{B(+)} - \bar{y}_{B(-)} = \frac{ab + b}{2 \cdot n} - \frac{a + (1)}{2 \cdot n} = \frac{1}{2 \cdot n} [ab + b - a - (1)], \quad (4-2)$$

$$AB = \frac{ab + (1)}{2 \cdot n} - \frac{a + b}{2 \cdot n} = \frac{1}{2 \cdot n} [ab + (1) - a - b], \quad (4-3)$$

kde A, B jsou hlavní efekty faktorů A a B, AB je interakční efekt faktorů A a B, $\bar{y}_{A(+)}$ je průměrná hodnota v experimentu zjištěných odezev při nastavení příslušného experimentálního faktoru na vyšší úrovni, $\bar{y}_{A(-)}$ je průměrná hodnota v experimentu zjištěných odezev při nastavení příslušného experimentálního faktoru na nižší úrovni, symboly (1), a, b, ab reprezentují úhrnný součet hodnot odezvy všech n replikací pokusů v dílčích bodech experimentálního pokusu.

Tab. 4.1: Tabulka ANOVA pro analýzu 2^k vyvážených faktoriálních plánů.

Zdroj	SS	df	MS	F
A	SS_A	1	$= SS_A/df$	$= [SS_A/df] / [SS_E/df]$
B	SS_B	1	$= SS_B/df$	$= [SS_B/df] / [SS_E/df]$
AB	SS_{AB}	1	$= SS_{AB}/df$	$= [SS_{AB}/df] / [SS_E/df]$
Residuální	SS_E	$4(n-1)$	$= SS_E/df$	
Celkem	SS_T	$4n-1$		

LEGENDA: SS – suma čtverců, df – počet stupňů volnosti, MS – průměrný čtverec, F – testová statistika

K určení toho, které efekty jsou statisticky významné, lze použít analýzu rozptylu. Pro experimentální data získaná 2^k vyváženými faktoriálními plány existuje specifická metoda provedení analýzy rozptylu. Pro sumy čtverců v případě faktoriálních plánů 2^2 platí [35].

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n \cdot 2^2}, \quad (4-4)$$

$$SS_B = \frac{[ab - a + b - (1)]^2}{n \cdot 2^2}, \quad (4-5)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab - a - b + (1)]^2}{n \cdot 2^2}, \quad (4-6)$$

kde SS suma čtverců příslušného zdroje variability, $ab + a - b - (1)$, $ab + b - a - (1)$ a $ab - a - b + (1)$ jsou kontrasty použité k odhadu efektů A , B a AB , n je počet replikací. Celková suma čtverců SS_T je určena obvyklým způsobem ze vztahu

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{ij}^2}{4n} \quad (4-7)$$

a suma čtverců reprezentující náhodnou složku se určuje odečtením

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}. \quad (4-8)$$

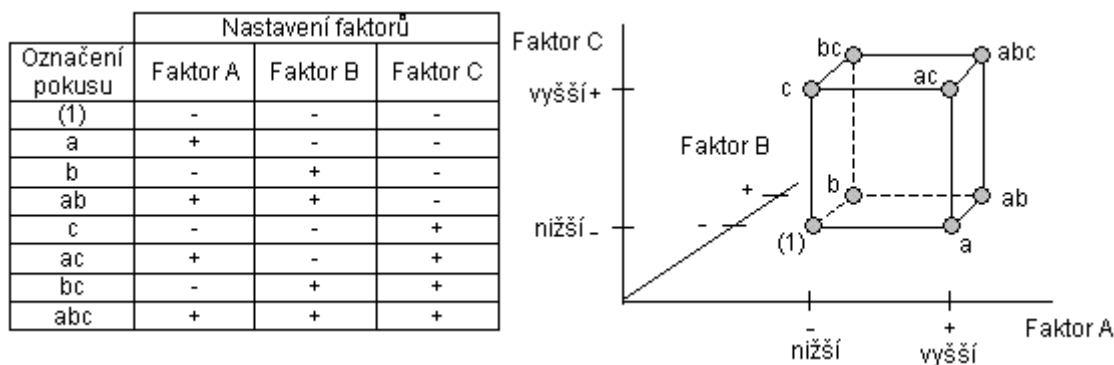
Kompletní rozklad, podle kterého se provádí analýza rozptylu v případě 2^k vyvážených faktoriálních plánů, je sumarizován v tabulce 4.1. Z odhadů efektů získaných na základě 2^k faktoriálního plánu lze vytvořit empirický model, přičemž pro případ 2^2 faktoriálního plánu se jedná o model polynomu prvního stupně ve tvaru

$$y = \beta_0 + \beta_A x_1 + \beta_B x_2 + \beta_{AB} x_1 x_2 + \varepsilon, \quad (4-9)$$

kde β_0 je absolutní člen určený jako celkový průměr všech pozorování, β_A , β_B , β_{AB} jsou hodnoty regresních koeficientů určené jako jedna polovina příslušného odhadu efektu, x_1, x_2 jsou kódované nezávisle proměnné a ε náhodná veličina zahrnující jak chybu měření, tak i chybu modelu. V konkrétním případě identifikovaný empirický model obsahuje vždy pouze ty členy, které jsou odvozeny z efektů, v předchozí části šetření určených jako statisticky významné. Po vytvoření modelu se pro každou replikaci dílčích pokusů obvykle vypočtou rezidua reprezentované rozdíly mezi skutečně pozorovanou hodnotou odezvy a hodnotou odezvy predikované vytvořeným empirickým modelem. Validita vytvořeného modelu se obvykle ověřuje posouzením normality rozdělení reziduí a prostřednictvím diagnostických grafů [34], [35], [36].

4.4.2 Faktoriální plány 2^3

Při použití 2^3 faktoriálních plánů se vyšetřuje vliv tří nezávisle proměnných, nastavovaných na dvou úrovních. Čtyři kombinace úrovní nezávisle proměnných, faktoru A , B a faktoru C , jsou graficky znázorněny na obrázku 4.6. Podobně jako v předchozí části, každá z těchto kombinací popisuje jeden pokus označovaných jako (1), a, b, ab, c, ac, bc a abc. Odhady hlavních efektů faktorů A , B a C mohou být vyjádřeny jako kontrasty mezi kombinacemi nastavení daného faktoru na vyšší úrovni a nižší úrovni [34], [35].



Obr. 4.6: Tabulka 2^3 faktoriálního plánu a jeho geometrická reprezentace.

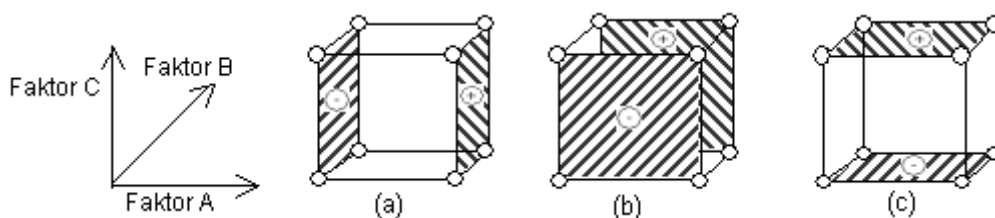
Kontrasty použité pro odhady efektů hlavních faktorů jsou ilustrovány na obrázku 4.6. Vztahy k odhadu efektů hlavních faktorů jsou následující:

$$A = \bar{y}_{A(+)} - \bar{y}_{A(-)} = \frac{a + ab + ac + abc}{4 \cdot n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4 \cdot n}, \quad (4-10)$$

$$B = \bar{y}_{B(+)} - \bar{y}_{B(-)} = \frac{b + ab + bc + abc}{4 \cdot n} - \frac{(1) + a + c + ac}{4 \cdot n}, \quad (4-11)$$

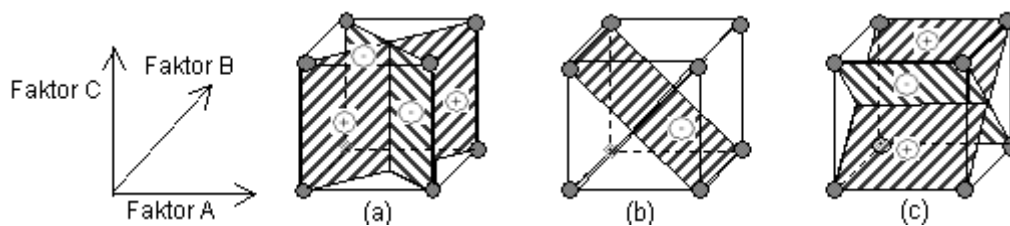
$$C = \bar{y}_{C(+)} - \bar{y}_{C(-)} = \frac{c + ac + bc + abc}{4 \cdot n} - \frac{(1) + a + b + ab}{4 \cdot n}, \quad (4-12)$$

kde A , B a C jsou hlavní efekty faktorů A , B a C , $\bar{y}_{\cdot(+)}$ je průměrná hodnota v experimentu zjištěných odezev při nastavení příslušného experimentálního faktoru na vyšší úrovni, $\bar{y}_{\cdot(-)}$ je průměrná hodnota v experimentu zjištěných odezev při nastavení příslušného experimentálního faktoru na nižší úrovni.



Obr. 4.7: Geometrické znázornění kontrastů pro určení hlavních efektů ve 2^3 faktoriálním plánu, (a) kontrasty pro určení hlavního efektu A , (b) kontrasty pro určení hlavního efektu B , (c) kontrasty pro určení hlavního efektu C .

Symboły (1), a , b , ab , použité v předchozích rovnicích, reprezentují úhrnný součet hodnot odezvy všech n replikací pokusů v dílčích bodech experimentálního pokusu. Kontrasty použité pro odhady dvoufaktorových interakčních efektů ilustruje obrázek 6.5 jako stěnové úhlopříčné roviny.



Obr. 4.8: Geometrické znázornění kontrastů pro určení dvoufaktorových interakčních efektů ve 2^3 faktoriálním plánu, (a) kontrasty pro určení interakčního efektu AB , (b) kontrasty pro určení interakčního efektu AC , (a) kontrasty pro určení interakčního efektu BC

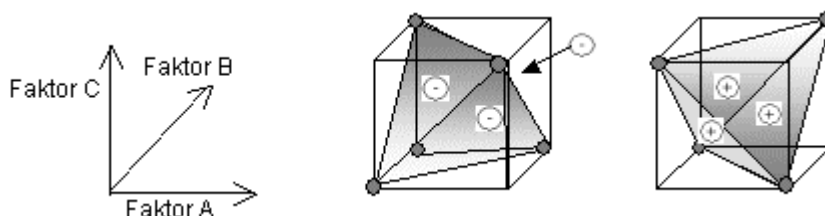
Dvoufaktorové interakční efekty jsou potom určovány jako rozdíl v průměrech mezi pokusy na příslušných stěnových úhlopříčných rovinách za využití následujících vztahů

$$AB = \frac{abc + ab + c + (1)}{4 \cdot n} - \frac{bc + b + ac + a}{4 \cdot n}, \quad (4-13)$$

$$AC = \frac{(1) + b + ac + abc}{4 \cdot n} - \frac{c + bc + a + ab}{4 \cdot n}, \quad (4-14)$$

$$BC = \frac{(1) + a + bc + abc}{4 \cdot n} - \frac{c + ac + b + ab}{4 \cdot n}, \quad (4-15)$$

kde AB , AC a BC jsou dvoufaktorové interakce faktorů A , B a C , symboly (1) , a , b , ab , ac , bc , abc reprezentují úhrnný součet hodnot odezvy všech n replikací pokusů v dílčích bodech experimentálního pokusu. Třífaktorová interakce ABC je definována jako průměr rozdílů mezi interakcí AB pro dvě rozdílné úrovně faktoru C , což je na obrázku 6.6 geometricky znázorněno prostřednictvím dvou tetraedrů.



Obr. 4.9: Geometrické znázornění kontrastů pro určení třífaktorové interakce ve 2^3 faktoriálním plánu

Odhad třífaktorové interakce ABC lze proto určit prostřednictvím následujícího vztahu

$$ABC = \frac{abc + c + b + a}{4 \cdot n} - \frac{bc + ac + ab + (1)}{4 \cdot n}, \quad (4-16)$$

kde ABC je třífaktorová interakce faktorů A , B a C , symboly (1) , a , b , ab , ac , bc , abc reprezentují úhrnný součet hodnot odezvy všech n replikací pokusů v dílčích bodech experimentálního pokusu.

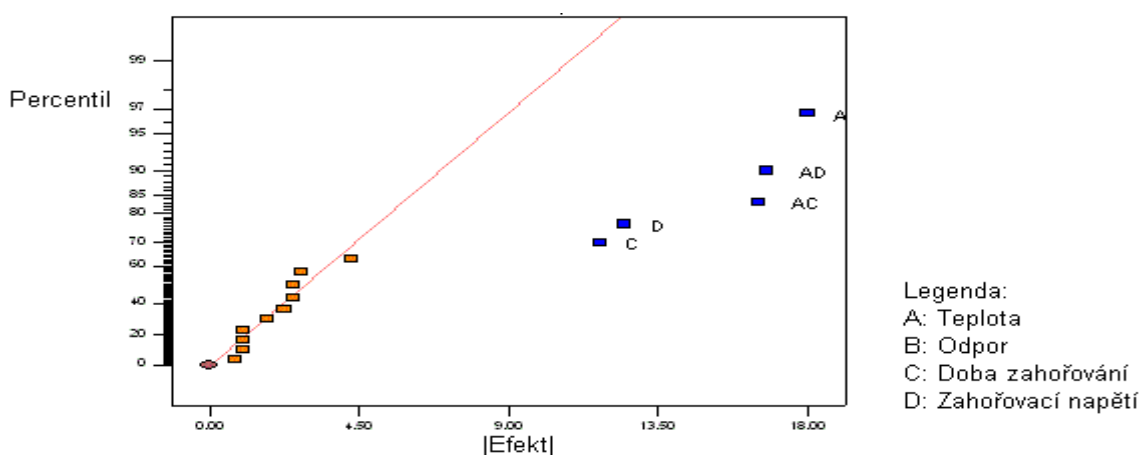
Sumy čtverců pro dílčí efekty potřebné k sestavení tabulky analýzy rozptylu lze spočítat jednoduše, protože každý efekt má příslušný kontrast o jednom stupni volnosti. Pro 2^3 faktoriální plán s n replikacemi lze potom sumy čtverců pro jednotlivé efekty určit prostřednictvím vztahu

$$SS = \frac{(\text{Kontrast efektu})^2}{n \cdot 2^3}, \quad (4-17)$$

kde n udává počet replikací a kontrast efektu je dán rozdílem kombinací nastavení daného faktoru na vyšší úrovni a nižší úrovni. Z odhadů efektů získaných na základě 2^3 faktoriálního plánu lze vytvořit empirický model, přičemž kompletní model v tomto případě nabývá tvaru

$$y = \beta_0 + \beta_A x_1 + \beta_B x_2 + \beta_C x_3 + \beta_{AB} x_1 x_2 + \beta_{AC} x_1 x_3 + \beta_{BC} x_2 x_3 + \beta_{ABC} x_1 x_2 x_3 + \varepsilon, \quad (4-18)$$

kde β_0 je absolutní člen určený jako celkový průměr všech pozorování, $\beta_A, \beta_B, \dots, \beta_{ABC}$ jsou hodnoty regresních koeficientů určené jako jedna polovina příslušného odhadu efektu, x_1, x_2, x_3 jsou kódované nezávisle proměnné a ε náhodná veličina zahrnující jak chybu měření, tak i chybu modelu. Po vytvoření modelu se analogicky jako v případě 2^2 faktoriálního plánu provádí diagnostika reziduí, prostřednictvím které se posuzuje adekvátnost modelu. Za účelem stanovení, které z hlavních a interakčních efektů statisticky významným způsobem ovlivňují sledovanou odezvu, lze vytvořit poloviční normální pravděpodobnostní graf, jehož příklad je uveden na obr. 4.10.



Obr. 4.10: Poloviční normální pravděpodobnostní graf poukazující na statisticky významné efekty. Jsou vyneseny hlavní i interakční efekty pro vyhodnocení exploratorního šetření využívajícího 2^4 faktoriálního plánu. Příklad autorem realizovaného plánovaného experimentu.

Na pravé straně tohoto grafu se nachází pět efektů: hlavní efekty A, C, D a interakční efekty AC a AD. Proto vzniká hypotéza, že je dosahovaná výtěžnost, tedy sledovaná odezva, statisticky významným způsobem ovlivňována právě těmito pěti efekty. Na základě údajů provedené ANOVA analýzy lze vytvořit závěr, že model zahrnující členy A, C, D, AC a AD je na hladině významnosti $\alpha = 0,01$ statisticky významný, a že také všechny efekty zahrnuté v modelu jsou na stejné hladině významnosti statisticky významné, protože pravděpodobnost obdržení F-hodnoty je menší než 0,01. Tabulka ANOVA a související podklady pro testování statistické významnosti jsou uvedeny v nezkrácené verzi habilitační práce.

4.4.3 Obecné 2^k faktoriální plány

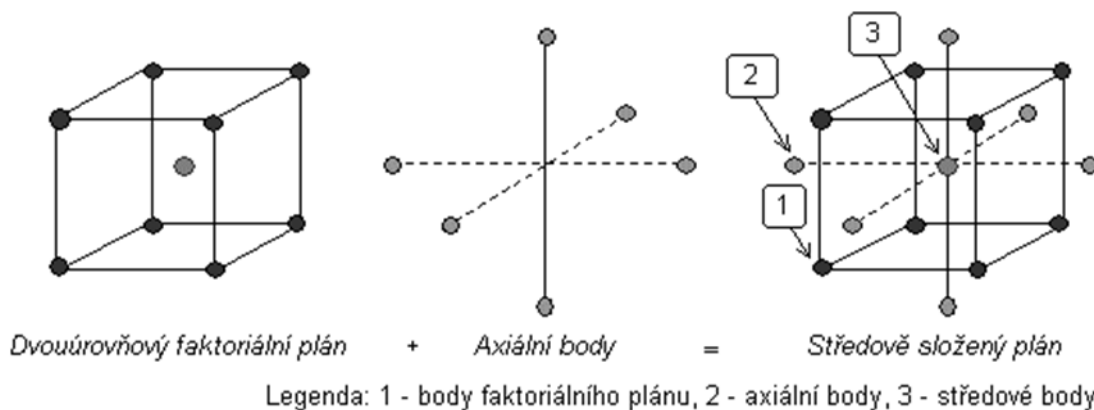
Přístup k vytváření a analýze dvouúrovňových faktoriálních plánů prezentovaný v předchozích podkapitolách je možné zobecnit na případ obecného 2^k faktoriálního plánu. V tomto experimentálním plánu bude vystupovat k faktorů nastavovaných na dvou úrovních a úplný empirický model pro 2^k faktoriální plán bude obsahovat k hlavních efektů, $\binom{k}{2}$ dvoufaktorových

interakcí, $\binom{k}{3}$ třífaktorových interakcí, ..., a jednu k faktorovou interakci. Úplný empirický model

pro 2^k faktoriální plán bude tedy obsahovat $2^k - 1$ efektů. Často používaným způsobem určení statisticky významných efektů je použití polovičního normálního pravděpodobnostního grafu. Prostřednictvím tohoto grafu lze identifikovat ty efekty, které jsou vzhledem k experimentálnímu šumu relativně větší.

4.5 STŘEDOVĚ SLOŽENÉ EXPERIMENTÁLNÍ PLÁNY A JEJICH GENEROVÁNÍ

Při studiu responzní plochy se často používá středově složený experimentální plán, protože umožňuje realizovat sérii na sebe navazujících experimentů, prostřednictvím kterých jsou postupně získávána data charakterizující sledovaný proces nebo systém [35]. Sledovanými faktory jsou typicky faktory určené v předcházejícím exploratorním šetření za statisticky významné, tedy v případě dříve prezentovaného příkladu doba zahořování, hodnota zahořovacího napětí a teplota zahořování. Samotný středově složený experimentální plán (viz obr. 4.11), jehož konkrétní příklad je uveden v nezkrácené verzi habilitační práce, sestává ze tří typů bodů. První z nich jsou faktoriální body vymezené dvouúrovňovým faktoriálním plánem, druhým body axiální. Pro axiální body jsou všechny faktory kromě jednoho nastaveny na prostřední úrovni nastavení a jeden faktor je nastaven na vnější hodnotu směrem k vyšším či nižším úrovním nastavení. Axiální body představují nové extrémní hodnoty, na které je každý faktor během experimentu nastavován. Zbývají středové body, pro které jsou všechny faktory nastaveny na prostřední úrovni. Středově složený návrh je rozšířením dvouúrovňového faktoriálního plánu se středovými body o skupinu axiálních bodů umožňujícího odhadovat zakřivení responzní plochy.



Obr. 4.11: Diagram znázorňující generování středově složeného experimentálního plánu pro případ tří faktorů. Středově složený plán obsahuje vždy dvojnásobný počet axiálních bodů, než je počet faktorů a proto středově složený plán s k faktory má $2 \cdot k$ axiálních bodů.

Vzdálenost od středu návrhového prostoru vyjádřená v kódovaných jednotkách k faktoriálním bodům je $r \pm 1$ a vzdálenost středu návrhového prostoru k axiálním bodům je $\pm \alpha$, přičemž $|\alpha| > 1$. Konkrétní hodnota proměnné α závisí jednak na vlastnostech, které jsou od experimentálního plánu požadovány a jednak na počtu experimentálním plánem sledovaných faktorů či nezávisle proměnných. V případě středově složeného experimentálního plánu se odhad regresních koeficientů vytvářeného empirického modelu provádí technikou vícerozměrné regrese. Dále je uveden příklad způsobu odhadu regresních koeficientů vytvářeného empirického modelu predikujícího výtěžnost. Adekvátnost vytvořeného empirického modelu lze podobně jako v případě dvouúrovňového faktoriálního plánu provést diagnostikou reziduí. Příklad výpočtu pro stanovení odhadu regresních koeficientů vytvářeného empirického modelu je uveden v nezkrácené verzi habilitační práce.

5 SHRNUTÍ A ZÁVĚRY

Předkládaná habilitační práce staví na premise, že empirické přístupy k charakterizaci procesu umožňují nejenom jeho optimalizaci, ale i statistické řízení a vyhodnocování stability. Souvisejícím tématem jsou rozbor technologické výtěžnosti, prognózování způsobilosti i predikce spolehlivosti vyráběných komponent a získávání informací potřebných pro statistické navrhování tolerancí. Aplikace technik plánovaných experimentů umožňuje identifikovat důležité faktory ovlivňující sledované odezvy, a optimalizovat konstrukční a technologické řešení. Význam těchto metod v oblasti zlepšování, inovací a optimalizace technologií je neopomenutelný. V práci jsou shrnuty stěžejní problémy systematického studia variability, které je z pohledu vědeckého přístupu k poznávání vlastností jevů, objektů a souvisejících procesů jedinečným a nenahraditelným pojetím.

Vědecký přínos předkládané práce představuje předložení paradigmatu, které spojuje několik koncepcí a metodik, které se studiem variability úzce souvisí. Variabilita vlastnosti jevů a objektů, které jsou jednotlivými vědeckými obory a disciplínami studovány, tyto obory a disciplíny vzájemně propojuje. Zobecnitelnou platnost pro vědeckou práci, popis a charakterizování sledovaných aspektů má nejen paradigma variability, ale i metodické aspekty jejího studia, hodnocení a ovlivňování. Na základě v práci vyložených souvislostí lze vymezit těchto sedm zobecněných principů:

- v prošetřované situaci existuje několik málo vlastností (parametrů, atributů), které jsou vzhledem k definovaným cílům kritické,
- kritické vlastnosti (parametry, atributy) jsou potenciálně ovlivňovány souborem potenciačních vlivů nebo příčin,
- jen některé z potenciačních příčin, které odezvu ovlivňují statisticky významným způsobem, lze označit jako kořenové,
- má-li být studován nějaký jev, je zapotřebí vyslovovat hypotézy o tom, které vlivy a příčiny tento jev a jeho kritické vlastnosti ovlivňují,
- kritické vlastnosti (parametry, atributy) a jejich hypotetickou determinaci, danou působením různých vlivů a příčin, je zapotřebí (v rámci možností) vyhodnocovat na základě dat získávaných pozorováním a experimenty,
- je-li používán systém měření, je nutné prověřovat, zda je způsobilý a nevnáší do výsledků nadměrnou variabilitu,
- i potvrzená příčinně-důsledková vazba je zatížena nějakou nejistotou a kauzalita by tak měla být diskutována v pravděpodobnostní dimenzi.

Tyto zobecněné principy, vyplývající z předkládané práce, poskytují vodítka k vytváření teoretického aparátu a použitelných modelů pro lepší vědecké chápání či poznání jevů, procesů a objektů.

Z pedagogického hlediska poskytují tyto zobecněné principy nově definované zásady pro tvorbu znalostní báze a kvalitativní výklad prezentované problematiky. Ve vazbě na obor habilitačního řízení jsou prezentované myšlenky uplatnitelné při tvorbě technologického know-how, v oblasti analýzy vad, odhalování příčin neshod, nedokonalostí, nízké výtěžnosti a reklamací vyráběných elektronických komponent, sledování změn parametrů procesů a produktů v závislosti na podmínkách a čase, studiu degradačních mechanismů a určování rozhodujících faktorů ovlivňujících vznik vad včetně dokumentace symptomů, následků a příčin vznikajících vad.

V práci prezentovaný pohled na problematiku, výběr, charakteristiku a diskusi dílčích témat byl ovlivněn dosavadním odborným i pedagogickým působením autora. Práce je odrazem dosaženého stupně poznání, selekcí a vzorkováním vstupních informací, dosavadní publikační činnosti a oblastí odborného zájmu, získaných zkušeností a také prací v podmínkách vzácnosti.

6 POUŽITÁ LITERATURA A ELEKTRONICKÉ DOKUMENTY

- [1] ELSAYED, Elsayed A. *Reliability engineering*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] KUO, Way; CHIEN, Wei-Ting Kary; KIM, Taeho. *Reliability, Yield, and Stress Burn-in: A Unified Approach for Microelectronics Systems Manufacturing & Software Development*. Springer Science & Business Media, 1998.
- [3] NOVOTNÝ, Radovan. *Řízení jakosti. Management jakosti produktů a procesů v organizaci*. 1. vyd. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., Ondráčkova 105, 628 00 Brno, 2004. 150 s. ISBN 80-214-2719-1.
- [4] NOVOTNÝ, R. *Spolehlivost a diagnostika*. Vydání první. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2001. s. 1-159. ISBN: 80-214-1993-8.
- [5] CALABRO, R. *Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi*. SNTL Praha 1965, 309 s.
- [6] PYZDEK, Thomas; KELLER, Paul A. (ed.). *Quality engineering handbook*. CRC Press, 2003.
- [7] NOVOTNÝ, R. *Systematické studium variability v kontextu vědeckého přístupu*. Systematické studium variability v kontextu vědeckého přístupu. 1. Brno: VUTIUM, 2009. s. 1-35. ISBN: 978-80-214-3828-6.
- [8] *20 Amazing Optical Illusions* [online]. 2007-2014 [cit. 2014-09-10]. Dostupný z WWW: <<http://listverse.com/miscellaneous/20-amazing-optical-illusions>>.
- [9] Seznam encyklopedie : *Figura a pozadí* [online]. 1996-2014 [cit. 2014-10-20]. Zdroj: CoJeCo. Dostupný z WWW: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/41759-figura-a-pozadi>>.
- [10] *Hering illusion* [online]. [2014], 3 December 2014 [cit. 2014-12-15]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hering_illusion>.
- [11] NOVOTNÝ, R. *Experimental Design for Quality Evaluation and Improvement*. In Quality 2003. Ostrava: Dům techniky Ostrava, 2003. s. D- 9 (s.)ISBN: 80-02-01558- 4.
- [12] UPTON, G, COOK, I. *Oxford Dictionary of Statistics*. [s.l.] : Oxford University Press, 2002. 245 s. ISBN 978-0-19-954145-4.
- [13] NOVOTNÝ, R. *Optimalizace technologického procesu s využitím techniky DOE*. Q magazín, 2003, roč. 2003, č. 6, s. 245 (s.)ISSN: 1213- 0451.
- [14] NOVOTNÝ, R. *Empirický přístup v optimalizaci procesu zahořování*. VUT v Brně, 2004.
- [15] MONTGOMERY, Douglas C.; WILEY, John. *Design and analysis of engineering experiments*. John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [16] En.wikipedia.org : Walter A. Shewhart [online]. [2015] , 5 December 2015 [cit. 2015-12-18]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Walter_A._Shewhart>.
- [17] NOVOTNÝ, R. *Šest pilířů koncepce six sigma a jejich praktická úskalí*. Moderní řízení, 2007, roč. 2007, č. 3, s. 30-37. ISSN: 0026- 8720.
- [18] Thecqiscotland.org : CQI Scotland - EoS Reports [online]. 2007 [cit. 2014-11-10]. Dostupný z WWW: <http://www.thecqiscotland.org/East/e_reports.htm>.
- [19] MARTIN , J. *What is the Red Bead Experiment?* [online]. [2004] [cit. 2014-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://maaw.info/DemingsRedbeads.htm>>.
- [20] Managementwisdom.com : About Dr. W. Edwards Deming [online]. 2007 [cit. 2014-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://managementwisdom.com/abdrweddem.html>>.
- [21] How badly is this system broken? [online]. [1996] [cit. 2014-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/2918184/QUIZ-How-badly-is-this-system-broken>>.

- [22] MOTWANI, Jaideep. A business process change framework for examining lean manufacturing: a case study [online]. 2003 [cit. 2014-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.emeraldinsight.com/Insight/ViewContentServlet;jsessionid=251561349ADF236E7EF5D63A0CFB31C9?Filename=Published/EmeraldFullTextArticle/Articles/0291030505.html>>. ISSN 0263-5577.
- [23] NOVOTNÝ, R. *Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2002, roč. 17/ 2002, č. 2, ISSN: 1213- 1539.
- [24] *The Ford story I have*. [online]. 1998 [cit. 2015-01-16]. Dostupný z WWW: <<http://elsmar.com/ubb/Forum5/HTML/000027.html>>.
- [25] FOX, M. – GENTLE, J. *Principy a techniky managementu jakosti*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2001. ISBN 80-214-1928-8
- [26] VEBER, J. *Zabezpečování jakosti výrobků v průmyslové praxi*, SNTL Praha 1991, s. 103. ISBN 80-03-00503-5
- [27] Espec technology report No. 3/1997 [online]. Tabai Espec corp. , [1997] [cit. 2001-03-14]. Dostupný z WWW: <www.espec.co.jp/english/tech-info/tech_info/pdf/tecrep7.pdf>.
- [28] NOVOTNÝ, R. *Analýzy vad při zabezpečování spolehlivosti elektronických součástek*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2001, roč. 28/ 2001, č. 6, s. 1 (s.)ISSN: 1213-1539.
- [29] EINSTEIN, A. – INFELD, L. *Fyzika jako dobrodružství poznání*. Orbis Praha 1962.
- [30] MAREŠ , M. *Statistiky chtějí opatrnost* [online]. Vesmír.cz, 2003 [cit. 2005-06-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek.php3?CID=5092,%20cit.%2010/9/2008>>.
- [31] ISHIKAWA, K. *Co je celopodnikové řízení jakosti? Japonská cesta*. ČSJ 1994. ISBN 80-02-00974-6
- [32] MORITA, A.: *Made in Japan*, Pragma Praha 1992, 241 s., ISBN 80-85213-20-6
- [33] NOVOTNÝ, R. *Dvouúrovňové faktoriální plány pro empirické studium kauzality*. In Elektrotechnika a informatika 2003. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003, s. 100 - 103, ISBN 8070829931.
- [34] BREYFOGLE, F. *Implementing Six Sigma*. John Wiley and Sons New York 1999. ISBN 0-471-29659-7
- [35] MYERS, R., MONTGOMERY, D. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York: JOHN WILEY & SON, 1995. 700 stran. ISBN 0-471-58100-3.
- [36] NOVOTNÝ, R. *Plánování a vyhodnocení experimentů s využitím dvouúrovňových faktoriálních plánů*. In Analýza dat 2003/II - sborník přednášek. Pardubice: Trilobyte, 2003, s. 141 – 144.
- [37] NOVOTNÝ, R. *Taguchiho přístup v optimalizaci technologického procesu*. In Analýza dat a statistické metody pro praxi. Pardubice: 2002. s. 163 (s.)ISBN: 80-238-9281- 9.