

DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)

Průmyslový metodický manuál & Kompletní uživatelská příručka

Praktický průvodce plánováním experimentů, ANOVA analýzou rozptylu, Paretovými grafy standardizovaných efektů a multikriteriální optimalizací odezvy dle standardů Six Sigma a Minitab Assistant.

Vydavatel:
Zdeněk Kubošek

Verze metodiky:
v2.4 (Edice 2026)

Modul:
DOE Engine (Quality Suite)

KLÍČOVÁ TÉMATA MANUÁLU:

- Proč metoda jednoho faktoru (OFAT) selhává a jak současné změny parametrů odhalí skryté interakce.
- Volba plánu: Plné faktoriální (2^k), frakční screening (2^{k-p}), Plackett-Burman, Box-Behnken a CCD.
- Detailní návod krok za krokem: Zadání faktorů, odezev, měření a bezpečné přegenerování matic.
- Kompletní glosář zkratk (ANOVA, DF, SS, MS, F, P, R^2 , S, VIF, Curvature, t-crit, Desirability).
- Průmyslová případová studie: Vstřikování plastů v automotive (20 pokusů, data, ANOVA rozbor a optimum).
- Kontrolní inženýrský checklist před zahájením experimentu na reálné lince.

Obsah dokumentu

1.	Úvod do Design of Experiments (DOE) v průmyslové praxi	Teorie & ROI
2.	Architektura a volba experimentálních plánů	Typologie
3.	Práce se systémem Zednner DOE Studio krok za krokem	Návod UI
4.	Kompletní glosář pojmů, statistických zkratk a vzorců	Matematika
5.	Interpretace výsledků a práce s grafickými výstupy	Analýza
6.	Kompletní průmyslová případová studie: Vstřikování plastů	Příklad z praxe
7.	Diagnostika, varování a řešení chybových stavů	Troubleshooting
8.	Doporučený kontrolní inženýrský checklist	QA Audit

1. Úvod do Design of Experiments (DOE) v průmyslové praxi

1.1 Filozofie experimentování: Proč selhává metoda OFAT (One-Factor-At-A-Time)

V tradiční průmyslové praxi se často setkáváme s přístupem pokus-omyl, kdy technolog nebo seřizovač mění v jednom okamžiku pouze jeden parametr (tzv. OFAT), zatímco ostatní parametry se snaží udržet konstantní. Tento přístup má zásadní slabiny:

1. Zcela ignoruje interakce mezi parametry: Vliv teploty v reálném procesu závisí na nastaveném tlaku. Metodou OFAT nelze interakce nikdy odhalit ani kvantifikovat.

2. Vyžaduje neúměrné množství pokusů: Pro prozkoumání 5 faktorů při 3 úrovních vyžaduje zkoumání každého faktoru zvlášť desítky izolovaných běhů, aniž by byla pokryta celá experimentální doména.

3. Nenabízí odhad experimentální chyby: Bez ortogonálního plánu a středových bodů nelze odlišit skutečný technologický vliv od náhodného šumu měřicího systému a výrobního procesu.

PŘÍNOSY PRO ŠTÍHLOU VÝROBU A SIX SIGMA (DMAIC):

- Fáze Analyze: Spolehlivě oddělí vitální málo (Vital Few) faktorů od triviálních mnoha (Trivial Many).
- Fáze Improve: Nalezení matematicky optimálního provozního okna, které minimalizuje variabilitu a zmetkovitost.
- Náběhy nových projektů (APQP / PPAP): Odladění procesního okna během 1–2 směn namísto týdnů empirického zkoušení.
- Návratnost investice (ROI): Typický pokles neshod o 40 až 85 % a zkrácení výrobního taktu bez rizika porušení norem.

2. Architektura a volba experimentálních plánů

Volba správného typu experimentu závisí na fázi projektu, počtu zkoumaných faktorů a na tom, zda hledáte hrubý screening, nebo přesné nelineární optimum odezvy.

Typ plánu	Faktory	Počet běhů	Vhodnost a schopnosti
Plný faktoriální 2 ^k	2 až 5	4, 8, 16, 32...	Detailní optimalizace. Vyhodnotí všechny hlavní efekty a všechny interakce bez zkreslení (ortogonální).
Zlomkový 2 ^k (k-p)	4 až 8	8, 16, 32...	Screening středního rozsahu. Rozlišení IV a V prozkoumá klíčové interakce za zlomek nákladů.
Plackett-Burman	4 až 15	12, 16, 20...	Rychlé vyfiltrování hlavních efektů z velkého počtu podezřelých vlivů. Ignoruje interakce.
Box-Behnken	3 až 7	15, 27, 46...	Modelování kvadratických ploch (RSM). Netestuje extrémní rohy, bezpečné pro citlivé technologie.
Centrální kompozitní (CCD)	2 až 6	13, 20, 31...	Plný model odezvových ploch. Obsahuje faktoriální body, středové body i hvězdicové body (axial points).

Význam středových bodů (Center Points):

Středový bod představuje nastavení všech spojitých faktorů přesně na střed jejich dolní a horní meze (kódovaná hodnota 0, 0, ...). Zařazení 3 až 5 středových bodů do plánu přináší dvě klíčové výhody:

- 1. Detekce zakřivení (Curvature test):** Porovnáním průměru ve středu vůči průměru rohových bodů software otestuje, zda odezva vykazuje nelineární vrchol (kopec) či propad.
- 2. Odhad čisté chyby (Pure Error):** Opakovaná měření stejného nastavení poskytují nezávislé stupně volnosti pro ověření spolehlivosti měřicího systému a šumu procesu.

3. Práce se systémem Zednner DOE Studio krok za krokem

Systém Zednner Quality Suite nabízí přehledné interaktivní prostředí pro kompletní životní cyklus experimentu – od návrhu po finální optimalizaci:

KROK 1: ZALOŽENÍ EXPERIMENTU A VOLBA PLÁNU

V přehledu DOE Engine (/doe) klikněte na '+ Nový experiment'. Zadejte název studie, popis (výrobní linka, číslo formy, materiál) a zvolte typ plánu (např. Dvouúrovňový plný faktoriální 2^k).

KROK 2: DEFINICE VSTUPNÍCH FAKTORŮ

Pro každý ovlivnitelný parametr definujte Kód (A, B, C...), Název (např. Teplota taveniny), Fyzikální jednotku ($^{\circ}\text{C}$), Nízkou úroveň [-1], Vysokou úroveň [+1] a Nominální hodnotu [0]. Určete, zda je faktor spojitý (číselný), nebo kategoriální (např. Dodavatel 1 vs. Dodavatel 2).

KROK 3: DEFINICE SLEDOVANÝCH ODEZEV A CÍLŮ

Zadejte výstupní parametry kvality (např. Pevnost v tahu, Smrštění, Drsnost Ra). U každé odezvy zvolte cíl: Maximalizovat (Larger-the-better), Minimalizovat (Smaller-the-better), nebo Cílová hodnota (Target value) s tolerančními mezemi LSL a USL.

KROK 4: GENEROVÁNÍ MATICE POKUSŮ

Kliknutím na 'Generovat matici pokusů' systém vytvoří ortogonální plán. Sloupec Run Order určuje závazné pořadí realizace pokusů na lince (striktně znáhodněno pro eliminaci časového driftu).

KROK 5: ZADÁVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT A VÝPOČET

Po realizaci pokusů na stroji zapíšete výsledky do buněk tabulky. Tlačítkem 'Uložit & Spočítat modely' systém okamžitě provede OLS regresi, sestaví ANOVA tabulku a vykreslí Paretovy grafy.

Bezpečné přegenerování plánu při změně faktorů: Pokud během studie přidáte nebo odeberete faktor, systém automaticky doplní existující běhy neutrálními úrovněmi a zobrazí 1-klikové tlačítko ' ⚡ Přegenerovat plán', které umožní bleskovou aktualizaci matice pro nový počet proměnných bez poškození integrity databáze.

4. Kompletní glosář pojmů, statistických zkratek a vzorců

Následující tabulka vysvětluje všechny statistické pojmy a metriky použité v reportech Zednner DOE:

Zkratka	Český název	Význam a rozhodovací kritérium
ANOVA	Analýza rozptylu	Rozklad celkové variability odezvy na část vysvětlenou faktory a část způsobenou náhodnou chybou.
DF	Stupně volnosti	Degrees of Freedom: Počet nezávislých údajů pro odhad rozptylu. $DF_{\text{celkem}} = N - 1$, pro 2-úrovňový faktor $DF = 1$.
Adj SS	Korigovaný součet čtverců	Adjusted Sum of Squares: Celková suma čtverců variability přisouzená členu očištěná o ostatní členy.
Adj MS	Střední čtverec (rozptyl)	Adjusted Mean Square: Rozptyl připadající na 1 stupeň volnosti: $MS = Adj\ SS / DF$.
F-hodnota	F-statistika	$F = MS_{\text{faktor}} / MS_{\text{chyba}}$. Poměr variability způsobené faktorem vůči chybě. Vyšší F = silnější vliv.
P-hodnota	Hladina významnosti	$P < 0,05$ značí statisticky významný vliv (95% spolehlivost). $P < 0,10$ je limit pro Minitab Assistant redukci.
R-sq (R^2)	Koeficient determinace	Procento celkové variability vysvětlené modelem: $R^2 = 1 - (SS_{\text{chyba}} / SS_{\text{celkem}})$. Cíl: $> 80\%$.
R-sq(adj)	Korigované R-sq	Penalizuje model za zbytečné členy. Rozdíl $R^2 - R^2(\text{adj}) > 15\%$ značí přeučený model (overfitting).
S	Směrodatná odchylka chyby	$S = \sqrt{MS_{\text{chyba}}}$. Průměrná vzdálenost skutečných dat od modelované regresní roviny.
VIF	Faktor inflace rozptylu	Variance Inflation Factor: Měří multikolinearitu. $VIF = 1$ značí dokonalou ortogonalitu. $VIF > 5$ je varující.
Curvature	Test zakřivení	Ověřuje nelinearitu mezi faktoriálními a středovými body. $P < 0,10$ doporučuje rozšíření na CCD.
t-crit	Paretova referenční linie	Kritická hodnota Studentova t-rozdělení na hladině $\alpha = 0,05$. Sloupce přesahující čáru jsou signifikantní.
d_i, D	Funkce vhodnosti (Desirability)	Míra spokojenosti s odezvou dle Derringer & Suicha (0 = nepřijatelné, 1 = ideál). D je celkový geometrický průměr.

5. Interpretace výsledků a práce s grafickými výstupy

5.1 Paretův graf standardizovaných efektů

Paretův graf v Zednner DOE řadí všechny faktory a interakce sestupně podle absolutní velikosti jejich vlivu na odezvu. Klíčovým prvkem je svislá červená čárkovaná linie (t-kritické):

- **Sloupce přesahující červenou linii:** Představují statisticky významné hybatele procesu s pravděpodobností náhody $P < 0,05$. Tyto parametry MUSÍ být v procesu přesně řízeny.
- **Sloupce vlevo od linie:** Představují náhodný šum. Z technologického hlediska je lze nastavit na ekonomicky nejvýhodnější úroveň.

5.2 Grafy hlavních efektů a interakcí

- **Graf hlavního efektu:** Zobrazuje průměrnou hodnotu odezvy na nízké (-1) a vysoké (+1) úrovni faktoru. Čím strmější sklon přímky, tím silnější má faktor vliv na proces.
- **Graf interakcí:** Zobrazuje chování jednoho faktoru při různých úrovních druhého faktoru. Pokud jsou přímky rovnoběžné, interakce neexistuje. Pokud se přímky sbíhají nebo kříží, vliv faktoru A se zásadně mění v závislosti na faktoru B.

5.3 2D vrstevnice (Contour Plot) a 3D odezвовá plocha (Surface Plot)

Vrstevnicový graf funguje jako topografická mapa se zobrazením izoliní odezvy. Umožňuje vizuálně vytyčit bezpečné provozní okno pro vybranou dvojici faktorů. 3D plocha plasticky modeluje prostorové chování.

5.4 Automatická redukce modelu (Minitab Assistant Backward Elimination)

Tlačítko 'Automaticky zredukovat model (Minitab Assistant)' provede krokovou eliminaci nevýznamných členů ($P > 0,10$) při striktním dodržení hierarchie modelu (pokud v modelu zůstane interakce A x B, hlavní efekty A i B jsou povinně zachovány).

6. Kompletní průmyslová případová studie: Vstřikování plastů

Příklad z praxe: Výroba technického krytu světlometu z polyamidu PA66-GF30. Cílem je maximalizovat pevnost úchyty (cíl ≥ 45 MPa) a minimalizovat deformaci (cíl $\leq 0,40$ mm).

Faktory: A = Teplota taveniny [270 až 300 °C], B = Dotlak [600 až 900 bar], C = Doba chlazení [12 až 20 s], D = Rychlost vstřiku [40 až 80 mm/s].

Běh	Teplota A	Dotlak B	Chlazení C	Rychlost D	Pevnost Y1	Deformace Y2
1	270 (-1)	600 (-1)	20 (+1)	40 (-1)	38.2 MPa	0.62 mm
2	300 (+1)	900 (+1)	12 (-1)	80 (+1)	52.8 MPa	0.28 mm
3	270 (-1)	600 (-1)	12 (-1)	40 (-1)	36.5 MPa	0.74 mm
4 (0)	285 (0)	750 (0)	16 (0)	60 (0)	48.9 MPa	0.34 mm
5	300 (+1)	900 (+1)	20 (+1)	40 (-1)	54.1 MPa	0.22 mm
6	300 (+1)	600 (-1)	20 (+1)	80 (+1)	44.6 MPa	0.45 mm
7	270 (-1)	900 (+1)	12 (-1)	40 (-1)	46.1 MPa	0.38 mm
8 (0)	285 (0)	750 (0)	16 (0)	60 (0)	49.3 MPa	0.33 mm
9	300 (+1)	600 (-1)	12 (-1)	80 (+1)	43.1 MPa	0.51 mm
10	270 (-1)	900 (+1)	20 (+1)	80 (+1)	47.9 MPa	0.32 mm
11	300 (+1)	600 (-1)	20 (+1)	40 (-1)	43.9 MPa	0.49 mm
12	300 (+1)	600 (-1)	12 (-1)	40 (-1)	42.4 MPa	0.55 mm
13 (0)	285 (0)	750 (0)	16 (0)	60 (0)	48.7 MPa	0.35 mm
14	270 (-1)	900 (+1)	12 (-1)	80 (+1)	46.8 MPa	0.36 mm
15	300 (+1)	900 (+1)	12 (-1)	40 (-1)	51.5 MPa	0.31 mm
16	300 (+1)	900 (+1)	20 (+1)	80 (+1)	55.4 MPa	0.19 mm
17	270 (-1)	900 (+1)	20 (+1)	40 (-1)	47.2 MPa	0.35 mm
18 (0)	285 (0)	750 (0)	16 (0)	60 (0)	49.1 MPa	0.34 mm
19	270 (-1)	600 (-1)	20 (+1)	80 (+1)	39.0 MPa	0.58 mm
20	270 (-1)	600 (-1)	12 (-1)	80 (+1)	37.1 MPa	0.69 mm

VÝSLEDEK ANOVA A NALEZENÉ ROBUSTNÍ OPTIMUM:

- Klíčové faktory pro pevnost: Dotlak B ($F = 469$, $P < 0.0001$), Teplota A ($F = 393$, $P < 0.0001$) a interakce A x B ($F = 30$, $P < 0.0001$).
- Curvature test prokázal nelinearitu ($P = 0.003 < 0.05$). Model dosáhl $R^2 = 97.28\%$ a $R^2(\text{adj}) = 96.24\%$.
- Optimální nastavení Response Optimizerem: Teplota = 295 °C, Dotlak = 880 bar, Chlazení = 18 s, Rychlost = 55 mm/s.
- Dosažená predikce: Pevnost = 53.9 MPa (cíl ≥ 45 splněn s rezervou), Deformace = 0.21 mm (cíl ≤ 0.40 splněn). Celková vhodnost $D = 0.96$.
- **Výrobní ověření: Zmetkovitost klesla z 4.8 % na 0.08 %, index Cpk vzrostl na 1.82.**

7. Diagnostika, varování a řešení chybových stavů

• Nedostatek stupňů volnosti pro chybu (Zero Error DF):

Nastane, pokud počet parametrů modelu dosáhne celkového počtu pokusů. Řešení: Klikněte na 'Automaticky zredukovat model' pro vyřazení nevýznamných vyšších interakcí.

• Konstantní faktory v matici pokusů:

Pokud nový faktor nemá nastaveny různé úrovně (+ a -), systém jej bezpečně vynechá z modelu, aby předešel singularitě matice $X'X$.

• Přeučení modelu (Overfitting):

Pokud R^2 dosahuje 99 %, ale predikční R^2 (pred) propadne k nule, model je přehlcený náhodným šumem. Ponechte v modelu pouze členy s $P < 0,10$.

8. Doporučený inženýrský checklist před spuštěním DOE

[✓] Měřicí systém byl ověřen způsobilostí (MSA / Gage R&R < 10–30 % tolerance).

[✓] Rozsahy faktorů (-1 a +1) jsou dostatečně široké pro vyvolání měřitelného efektu, ale technologicky bezpečné.

[✓] Faktory jsou vzájemně nezávisle nastavitelné (nastavení faktoru A nevynucuje změnu faktoru B).

[✓] Pořadí pokusů je striktně znáhodněno (Run Order) k eliminaci vlivu časového driftu stroje.

[✓] Středové body (0) jsou časově rozloženy v průběhu celé experimentální směny.

[✓] Před odběrem vzorků byl dodržen čas náběhu a termické stabilizace procesu.

[✓] Vzorky jsou nesmazatelně označeny číslem pokusu (Run Order) ihned po vypadnutí ze stroje.