



UPOZNAVANJE SA PLANIRANJEM EKSPERIMENATA

INTRODUCTION TO DESIGN OF EXPERIMENT

Žana Krstić¹⁾

Rezime: *Kontinualno poboljšavanje kvaliteta je najvažniji cilj bilo koje organizacije. Poboljšanje procesa direktno se odražava na povećanje zarade, uz istovremeno snižavanje cena i pojačanu konkurentnost preduzeća. Vodeće svetske kompanije pronašle su način postizanja viskog kvaliteta sopstvenih proizvoda, a ključ njihovog uspeha leži u jakoj zastupljenosti statističkih metoda, a posebno DoE.*

Ključne reči: *kvalitet, eksperimentalne metode, process.*

Summary: *Business process improvement is the most important objective of any organization. Improvements in business processes translate directly to better profits by cutting costs and increasing competitiveness at the same time. Leading companies have found way to achieve high quality products and the key to their success has been the wide use of statistical methods in particular design of experiment.*

Key Words: *quality, experimental methods, process.*

1. UVODNA RAZMATRANJA

Eksperimentisanje podrazumeva plansku promenu kontrolnih faktora ili nezavisnih promenljivih kako bi se procenio efekat ovih promena na odziv procesa, odn. zavisno promenljivo.

Planiranje eksperimenta jeste metod kojim se još u fazi projektovanja i dizajniranja procesa ili proizvoda, pronalazi optimalna formula svih uticajnih parametara i kao takav predstavlja veoma važan alat koji se može koristiti u svim proizvodnim industrijama.

U istraživanju, razvoju i optimizaciji sistema, preporučuje se kad god je to moguće prikupljanje novih podataka, tj. izvodjenje eksperimenta. U industriji, planirani eksperiment se koristi radi ispitivanja uticajnih varijabli procesa. Kada se identifikuju stanje procesa i promenljive koje utiču na kvalitet, tada se svi napori mogu usmeriti na povećanje kvaliteta, pouzdanosti i efikasnosti. Pravilo je da samo planirani eksperiment ima oko 90% šansi da obezbedi informaciju koja će odgovoriti postavljenom cilju. Metod planiranje eksperimenata (DoE) predstavlja moćan instrument za dostizanje značajnih poboljšanja kvaliteta proizvoda i efikasnosti procesa.

2. EKSPERIMENTI U NAUCI I INDUSTRIJI

Eksperimentalne metode su jako zastupljene i u istraživanju i u industriji, ali često iz veoma različitih razloga. Osnovni cilj naučnog istraživanja je odgonetanje statističkog značaja efekta, koje pojedini faktor, ima na zavisnu promenljivu. U industrijskom okruženju osnovni cilj jeste sakupljanje što većeg broja podataka, u vezi faktora, koji utiču na proizvodni proces, iz što je moguće većeg broja opita.

DoE jeste set test uslova koji se koristi za ispitivanje prirode načina ponašanja nekih stvari, pod određenim uslovima. Specifičan set uslova, tzv. matrica dizajna, postavljen je radi analize rezultata (podataka), u cilju pravljenja modela bolje aproksimacije prirodnog stanja.

Svaka mašina, koja se koristi u proizvodnji, napravljena je tako da radnik koju njome rukuje može izvršiti podešavanje, tako utičući na kvalitet proizvoda. Eksperimenti omogućavaju proizvodnim inženjerima da izvrše podešavanja mašine, na sistematičan način, i da tako nauče koji faktori imaju najveći uticaj na krajnji kvalitet. Korišćenjem informacija, iz procesa podešavanja mašina može se konstantno poboljšavati kvalitet, sve do postizanja neke optimalne vrednosti kvaliteta.

1) Krstić Žana, dipl.ing., Direkcija Kvaliteta, Zastava Automobili, a.d. jeanna2507@yahoo.com

2.1 Šta je DoE?

Planiranje eksperimenata (DoE) jeste metodologija primene statistike u procesu izvođenja eksperimenata. Može se koristiti i u laboratorijskim uslovima (za razvoj novih proizvoda i procesa) i u proizvodnji, za poboljšanje procesa.

Kod DoE statistički aparat koristi se za razvijanje matematičkih modela kojim će se predvideti način uticaja ulaznih promenljivih na izlazne promenljive (odzive). Model, koji prikazuje na koji način su ulazi i odzivi povezani, jeste rezultat izvođenja planirane sekvence većeg broja opita koje još nazivamo i dizajn eksperimenta. Matematički model omogućava istraživačima da predvide kako se odzivi menjaju i u kakvoj su interakciji sa ostalim uticajnim faktorima. Takođe, meri i kontroliše grešku eksperimenta.

DoE je metoda još nedovoljno iskorišćena, kao konkurentno oruđe, kojim se uvećava tačnost informacija, a koje istraživač dobija iz zadatog seta izvedenih eksperimenata. Takođe, pruža uvid u uzajamno dejstvo varijabli i odziva.

2.2 Zašto je planiranje eksperimenata potrebno?

Organizacije se nalaze pred izborom kako napraviti što bolji dizajn i skratiti vreme razvoja novog proizvoda, a sve to uz niže troškove proizvodnje gotovih proizvoda. Od zaposlenih se ne može tražiti da rade još više, to nije rešenje. Trebalo bi koristiti prave alae kvaliteta, koji bi pomogli ljudima, sa ciljem poboljšanja efikasnosti i efektivnosti. DoE jeste metoda, alat koji u tome mnogo pomaže. Boljim razumevanjem i primenom DoE tehničari, naučnici, istraživači i inženjeri mogu postići i za do 50% smanjenja vremena potrebnog za izvođenje eksperimenta, uz bolje razumevanje tehnologije, poboljšanje dizajna, smanjenje vremena razvoja i sniženje troškova.

Prilikom razvoja proizvoda i poboljšanja procesa mora potpuno definisati veza uzrok-posledica. U većini slučajeva te veze su vidljive i lako se mogu kvantifikovati. U nekim slučajevima, kod komplikovanog sistema, radi se o mnogo potencijalno uticajnih faktora i njihovih efekata. I baš u tom slučaju leži prava moć DoE.

Izvođenje eksperimenata podrazumeva plansku promenu kontrolnih faktora ili nezavisnih promenljivih kako bi se procenio efekat ovih promena na odziv, odnosno zavisno promenljivu. Razlikuju se dva pristupa u eksperimentisanju:

- klasični eksperiment i
- planirani eksperiment.

Klasični eksperiment

Klasičan eksperiment je pouzdan i konzervativan pristup eksperimentisanju danas ga koristi većina istraživačko-razvojnih ustanova). Omogućava izračunavanje efekta jednog faktora na odziv sistema. Rezultat svakog opita uzima se u obzir pre izvođenja sledećeg opita. Upoređivanjem rezultata jednog opita (opit 1) sa rezultatima drugog opita (opit 2) daje jasnu sliku za razumevanje procesa.

U praksi: upoređivanje rezultata dva opita je vrlo često statistički bez značaja za razumevanje procesa. Tako da se zaključuje kako je klasični pristup eksperimentu jednostavno neefikasan. Interakcije faktora se ne mogu otkriti klasičnim eksperimentom i one su najčešće izvor konfuzije u pogledu efekata faktora na odziv sistema. Klasični eksperiment onemogućava predviđanje odziva za uslove, koje se mogu u procesu promeniti, a nisu bili uključeni u eksperiment.

Planirani eksperiment

Planirani eksperiment (DoE) obezbeđuje praktičan i efikasan plan kako varirati faktore/ nezavisne promenljive da bi se odgovorilo na dobro definisan cilj istraživanja. Rezultat planiranog eksperimenta je maksimum informacija po opitu i objektivno razumevanje istraživačkog sistema. Obzirom na svoju superiornost, upoređujući sa klasičnim eksperimentom, planirani eksperiment ne prestaje da bude značajna prednost u odnosu na konkurenciju koja to ne koristi u svom istraživanju.

Uspesna primena planiranog eksperimenta nije više privilegija profesionalnih statističara. Sa valjanom obukom i široko rasprostranjenim DoE-softverskim paketima, naučnici, istraživači i inženjeri sa malim ili nikakvim predznanjem iz statistike mogu koristiti planirani eksperiment sa iznenađujućom efikasnošću.

Još dvadesetih godina prošlog veka *Fisher* započeo razvoj efikasne i pouzdane metode utvrđivanja povezanosti između uzroka i efekata, radi analiziranja i proučavanja uticaja različitih tretmana na prihode žetve (na primer vrsta zemljišta, način đubrenja, itd.). Metoda je kasnije usavršena radovima *Yule*, *Box*, *Stu*, *B. Hunter*, *Schéffe*, *Cox*, *Taguchi* i drugi, tako da one danas predstavljaju izvanredan alat za bilo kakav zadatak optimizacije.

Osnovna ideja planiranog eksperimenta je da definiše minimalan set opita u kojima će svaki faktor biti variran na sistematski način. Ovaj set opita obično broji od 10 do 20 opita. Analiza podataka planiranog eksperimenta će utvrditi optimalne uslove, faktore koji su najznačajniji za odziv/zavisnu promenljivu, faktore koji nemaju

značajan efekat, prisutnost interakcija između faktora, sinergizam i itd.

Najvažnija prednost planiranog eksperimenta je u striktnoj matematički definisanoj istovremenoj promeni svih faktora u minimalnom broju opita eksperimenta. Čovečiji mozak najčešće može analizirati efekat jednog faktora u datom vremenu tako da za veći broj faktora i njihove kombinacije neophodna je matematika i računar.

Industrijski eksperiment

Generalno postoje dva pitanja u vezi sa eksperimentalnim ispitivanjima:

- 1- Kako dizajnirati optimalni eksperiment?
- 2- Kako analizirati rezultate eksperimenta?

Svaki tip dizajna eksperimenta ima različitu važnost, različit cilj. U svakom slučaju cilj jeste nepristanso proceniti posledice izmene podešavanja pojedinih faktora, bez obzira na podešavanje drugih faktora. Tehnički, cilj je pokušati napraviti dizajn kod koga glavni uticajni faktori nisu međusobno povezani.

Industrijski eksperiment se generalno izvodi u cilju povećanja nivoa znanja o određenom procesu. Performanse procesa mogu se poboljšati samo ako se process zaista dobro razumeve. Uspeh bilo kog industrijskog eksperimenta zavisi od većeg broja ključnih faktora, kao naprimer: statističkih znanja, komunikacije, rada tima, itd.

DoE je strategija industrijskog eksperimentisanja, na osnovu kojeg se mogu izvući pouzdani i validni zaključci, dobijeni na efikasan, efektan i ekonomičan način. U sledećem delu teksta navode se korisni saveti, pre svega za pogonske inženjere, radi izvođenja uspešnog eksperimenta, i to u industrijskom okruženju.

① *Dobro razumevanje problema.*

Istraživanje je pokazalo da je jedan od glavnih razloga za neuspešan industrijski eksperiment – nerazumevanje samog problema. Uspeh svakog eksperimenta, u velikoj meri, zavisi od prirode problema. Za uspeh su odgovorni i timski rad, a tim uglavnom čine zaposleni iz oblasti dizajna, proizvodnje, kvaliteta i rukovodstva. Nerazumevanje problema uvek donosi gubitke u vremenu i novcu, kao i povećanu frustriranost tima.

② *Sprovođenje temeljne i sveobuhvatne Brainstorming sesije*

Uspešna primena DoE, u savremenom industrijskom svetu, zahteva povezivanje statistike, planiranja, inženjeringa, komunikacije i timske veštine. *Brainstorming* se mora tretirati kao integralni deo dizajna efektnog eksperimenta. U

toku izvođenja sesije preporučuje se razmatranje nekoliko ključnih stvari:

- identifikovanje varijabli procesa, kao i druge relevantne informacije,
- razvijanje timskog duha i pozitivnog stava, radi većeg angažovanja članova,
- davanje odgovora na pitanje u kojoj meri eksperiment simulira okruženje korisnika,
- ko će šta raditi i na koji način,
- koje vreme je potrebno istraživaču da krajnje rezultate prezentuje rukovodstvu?

③ *Izbor odgovarajućeg odziva, tj.*

karakteristika kvaliteta

Odziv, u kontekstu industrijskog eksperimenta, jeste performansa proizvoda, najčešće ona kritična za korisnika, a koja utiče na kvalitet proizvoda. Veoma je važno izabrati i meriti odgovarajući odziv eksperimenta. Sledeći saveti mogu poslužiti inženjerima prilikom selekcije karakteristika kvaliteta, za industrijski eksperiment:

- izabirati odzive (izlaze) koji se tačno i precizno mogu meriti,
- izabirati odzive koji su u direktnoj vezi sa transformacijom energije, tj. povezane sa osnovnim mehanizmom procesa proizvodnje,
- izabrati kompletne odzive, tj. potpuno opisuju vezu ulaz-izlaz procesa.

Nije dobro izabrati atributivne karakteristike (na primer, dobro/loše, u redu/u otkazu, pravilno/nepravilno) nego se usredsrediti na varijable. Atributivne karakteristike zahtevaju izabiranje većeg broja uzoraka i zato su takvi eksperimenti skupi i oduzimaju mnogo vremena.

④ *Izabrati odgovarajući dizajn eksperimenata*

Izbir dizajna ima uticaj na uspeh industrijskog eksperimenta, jer zavisi od različitog broja faktora, uključujući prirodu problema, broj faktora za ispitivanje, raspoložive resurse za eksperiment, vreme potrebno za kompletiranje eksperimenta i zaključak o eksperimentu. Izbir eksperimentalnog dizajna zavisi od sledećih faktora:

- broja faktora i interakcija (ako ih ima) koji se proučava,
- kompleksnost svakog dizajna,
- statistička validnost i efektivnost svakog dizajna,
- lakoća razumevanja i primena,
- priroda problema,
- cene i vremenska ograničenja.

⑤ *Izvođenje probnog eksperimenta*

Ova faza eksperimenta je korisna za smanjenje broja varijabli procesa na neki operabilan broj, te na taj način smanjenje broja opita i visine troškova celog eksperimentalnog procesa. Na primer, može se proučavati sedam faktora u samo osam test-izvođenja. Kada su

glavni faktori identifikovani, interakcije između njih mogu se proučavati korišćenjem celog ili frakcionog faktorskog eksperimenta.

© *Urediti izvođenje eksperimenta, ako je moguće*

Za industrijske eksperimente uređivanje procesa izvođenja eksperimenata, po nekom definisanom, logičnom redu, je veoma važno. Preporučuje se ovakav pristup, zato što istraživač ne može uvek biti siguran da su sve važne varijable procesa, koje utiču na odziv, uključene i uzete u obzir.

Svrha uređivanja jeste očuvanje eksperimenta, pre svega od skrivenih varijacija (na primer promene relativne vlažnosti, promena temperature okoline, itd.) ili buke. Ove promene, koje su skoro uvek vremenski zavisne, značajno utiču na odziv. Od velike važnosti je kvantifikovati efekte okolne buke i onda je sniziti na prihvatljivo nivo, a pre izvođenja pravog eksperimenta.

Ⓣ *Ponavljati svaki opit eksperimenta, ako je moguće*

U DoE, postoji razlika između repliciranja i ponavljanja eksperimenata. Replikacija jeste proizvoljan proces izvođenja opita. Sa druge strane, ponavljanje je proces izvođenja većeg broja opita pod istim uslovima i sa istim podešavanjima mašine. Drugim rečima, kada se govori o ponavljanju tada nema govora o različitom postavljanju mašina. Replikacija zahteva ponovno postavljanje opitnih uslova, pa su tako troškovi izvođenja eksperimenta i vreme utrošeno znatno veći.

Ⓢ *Korišćenje Blok-strategije, radi povećanja efikasnosti eksperimenta*

Blok se koristiti za minimiziranje uticaja različitih faktora na eksperimentalne rezultate. Izvor neželjene varijabilnosti faktora mogu biti različiti uslovi od smene do smene, od jednog radnog dana do drugog ili od mašine do mašine. Blok-strategija sastoji se u blokiranju uticaja serija različitih smena, materijala, sirovina i tako dalje.

Ⓣ *Korišćenje sekvence manjih eksperimenata radi boljeg razumevanje procesa*

Dobra praksa je izvođenje niza manjih opita u početnoj fazi, bitnoj za razumevanje ponašanja procesa, mnogo bolja od sakupljanja informacija o istom procesu na osnovu jednog obimnog eksperimenta. Ukoliko se od početka krene sa netačnim pretpostavkama (na primer, izbor glavnih odziva) kao rezultat javljajući posledica je povećanje troškova i smanjenje podrške menadžmenta.

Ⓢ *Izvođenje verifikacionih eksperimenata*

Neophodno je izvesti „dokazne” eksperimente radi verifikovanja rezultata statističkih analiza.

Neki od mogućih uzroka za promašivanje cilja eksperimenata su:

- pogrešan izbor dizajna eksperimenata,
- nesvršishodan izbor odziva eksperimenata,
- neidentifikovanje ključnih varijabli procesa, i to uticajnih na odziv,
- neodgovarajući merni sistem,
- nedostatak statističkih znanja, itd.

3. ZAKLJUČAK

Kvalitet proizvoda i efektivnost procesa, u savremenoj industriji, mogu se postići pažljivo planiranim industrijskim eksperimentima. Mali broj inženjera, u industrijskom okruženju, jeste svestan uticaja takvih eksperimenata na proizvodni proces i probleme kontrole kvaliteta proizvoda, kao na primer smanjivanje broja škarta proizvoda, troškova kvaliteta, varijabilnosti procesa, dužine razvoja proizvoda i poboljšanja zarade, pouzdanosti i zadovoljenja korisnika.

Praktični saveti za izvođenje uspešnog eksperimenta: Imajte jasnu sliku problema. Izaberite projekat. Izvedite opsežnu i detaljnu *Brainstorming* sesiju. Timski rad i selekcija tima za eksperiment. Izaberite kontinualno merljive karakteristike ili odzive eksperimenta. Izaberite odgovarajući dizajn eksperimenta. Pri izvođenju probnog opita napravite logičan redosled izvođenja pravog eksperimenta. Ponovno izvođenje eksperimenata radi ublažavanja buke ili nekontrolisane varijacije. Poboljšanje efikasnosti eksperimenta korišćenjem blok-strategije. Izvođenje potvrdnih opita/eksperimenata.

LITERATURA

- [1] Antony, J. (1996), "Likes and Dislikes of Taguchi Methods", *Journal of Productivity*, Vol. 37, No.3
- [2] Antony, J. (1997), "Experiments in Quality", *Journal of Manufacturing Engineer, IEE*, Vol. 76, No.6.
- [3] Bhote, K.R. (1988), "DOE - The High Road to Quality", *Management Review*.
- [4] Box, G., Hunter, W. and Hunter, J.S. (1978), "Statistics for Experimenters", John Wiley and Sons, NY.
- [5] Schmidt, S.R. and Launsby, R.G. (1992), "Understanding Industrial Designed Experiments", Air Academy Press, Colorado Springs, Colorado.
- [6] Verseput, R. (1998), "DOE Requires Careful Planning", *R & D Magazine*.