

PLANIRANJE EKSPERIMENTA

DESIGN OF EXPERIMENT

Ružica Petrović, dipl. mat.
Miodrag Đorđević, dipl. mat.
CIM College
Niš, Jugoslavija

Ključne reči: dizajn, eksperiment, kvalitet, poboljšanje, varijacija, softver, DoE

REZIME

Planiranje eksperimenta je alat koji se koristi za poboljšanje kvaliteta proizvoda i procesa. Poboljšanje kvaliteta se ogleda u tome da se stalno dobijaju izlazi sa visokim nivoom performansi. Najbolje moguće performanse se mogu dobiti ukoliko se odredi optimalna kombinacija faktora. Konzistentnost performansi će biti postignuta ukoliko se proizvod ili proces učini otpornim na uticaj nekontrolisanih faktora. U ovom radu je prikazan koncept planiranja eksperimenta Tagučići metodom, teorijske osnove, mogućnosti primene, kao i softver koji je razvila firma CIM College, a koji omogućava laku i jednostavnu primenu ovog statističkog alata.

SUMMARY

Design of experiment - Taguchi Method is a new engineering design optimization strategy that improves the quality of existing products and processes. Improving is achieved by obtaining output with reduced variation and high level of process and product performances. The best performances will be gained through determining optimum combination of factors that affect the average and variation of a performance characteristic. Consistency of performances will be obtained by making the process or product resistant to influence of noise factors. This article expose a concept of design of experiment - Taguchi Method, its basic theories, possibility of implementation and software developed by CIM College which makes application of this powerful statistical techniques very simple.

1. POBOLJŠANJE KVALITETA

Definicija kvaliteta koju je dao dr Geniči Tagučići (Genichi, dr Taguchi), razlikovala se od dotadašnjih shvatanja. Njegovo viđenje kvaliteta proizvoda i usluga odnosilo se na zadovoljstvo kupca. Tagučići je definisao kvalitet proizvoda u negativom smislu: "Kvalitet određuje gubitak koji trpi društvo od trenutka kada je proizvod isporučen".

Ovakav gubitak uključuje i cenu nezadovoljstva kupca koje vodi srozavanju ugleda kompanije. Ovo se znatno razlikuje od tradicionalnog pogleda na gubitak i kvalitet koji su bili fokusirani isključivo na proizvođača i gde se kvalitet merio samo na osnovu troškova dorade, škarta, garancije i servisa. Kupac je najznačajniji deo procesa. Kvalitet proizvoda i usluga treba da osigura povratak kupca kompaniji, poveća reputaciju i proširi tržište.

Najbitniji koncept kvaliteta u Tagučićijevom viđenju kvaliteta je svakako da kvalitet treba da bude ugrađen u proizvod, od samog starta.

Dakle, proizvod prvo mora da bude dobar. Inspekcija i selektovanje proizvoda na izlazu iz procesa ne mogu doprineti poboljšanju kvaliteta. Mere poboljšanja kvaliteta treba sprovoditi još u toku dizajniranja proizvoda i procesa. Naravno, sa njihovim primenama treba nastaviti i u fazi proizvodnje. Ovakav pristup se često zove *off-line* strategija. Tradicionalnim procesom inspekcije

i selekcije se samo leče simptomi. Koncept kvaliteta, zbog toga treba razvijati na principima prevencije: problem treba napasti na samom izvoru, sve ostalo je kasno. Bitka se dobija pre bitke. Kvalitet je nešto što je ugrađeno u proizvod, nešto što ga čini robusnim i imunim na uticaje nekontrolisanih i nepoželjnih faktora iz okruženja. Ovo nas dovodi do drugog koncepta kvaliteta – minimiziranja varijacije.

Da bi se postigao vrhunski kvalitet, cilj mora da bude smanjenje odstupanja od ciljne vrednosti, a ne samo zadovoljenje specifikacija. Proizvod treba da bude dizajniran tako da bude otporan na nekontrolisane faktore okruženja, kao što su buka, temperatura, vlažnost. Smanjenje varijacije je ključ za poboljšanje kvaliteta. Ukoliko se odrede optimalne vrednosti kritičnih parametara i obezbedi da proizvodi zadovoljavaju ciljnu vrednost, uz minimalno odstupanje, kvalitet se može vrlo brzo poboljšati.

2. OSNOVE PLANIRANJA EKSPERIMENTA

Kod proizvodnih procesa postoji interesovanje za efekat uticajnih parametara. Obično se teži tome da se efekat faktora usmeri tako da oni deluju samo na posmatranu karakteristiku kvaliteta i to tako da se dobijaju željeni rezultati. To znači da se onemogućuje rasipanje proizvodnje i da se spreči škart. Samo proizvodnja koja daje kvalitetan proizvod sa niskim proizvodnim troškovima može da se nosi sa konkurentnim tržištem.

Svrha razvoja procesa i proizvodnje je poboljšanje njihovih performansi u odnosu na zahteve i očekivanja kupaca. Cilj eksperimenata je smanjivanje i kontrolisanje varijacije procesa; prema tome, treba otkriti koji parametri bitno utiču na performanse procesa i proizvoda. Funkcija gubitka ukazuje na potrebu da se otkriju i faktori koji utiču na srednju vrednost i faktori koji utiču na rasipanje karakteristika procesa. Odgovarajućim poboljšanjem srednje vrednosti procesa, kao i smanjenjem varijacije funkcija gubitka može se minimizirati. Zbog toga se preporučuje planiranje eksperimenta.

Planiranje eksperimenta je statistička tehnika koju je uveo Sir Ronald A. Fišer¹ u Engleskoj, dvadesetih godina prošlog veka. U svojim eksperimentima, Fišer je želeo da otkrije koje količine kiše, vode, đubriva, sunčeve svetlosti su potrebne da bi se postigao vrhunski prinos žitarica. Od tog vremena tehnika se dosta razvijala, ali samo u akademskom okruženju, bez nekih primena u proizvodnoj industriji. Nove tehnike i pristupi planiranja eksperimenta primenjivale su se u različitim sferama života i svaka od njih je imala svoje prednosti i mane. Tako su nastali Potpuni faktorski eksperiment, Parcijalni faktorski eksperiment, Latinski kvadrat, Grčko-latinski kvadrat, Plackett-Burman dizajn.

Četrdesetih godina prošlog veka, dr Geniči Tagučij je, koristeći planiranje eksperimenta, došao do značajnog otkrića. On je uložio ogroman napor, ne bi li ovu moćnu statističku tehniku učinio jednostavnijom za upotrebu i primenio je u procesu proizvodnje, da bi poboljšao kvalitet. Standardizovana verzija planiranja eksperimenta dr Tagučija, nazvana Tagučij metod ili Tagučij pristup, počela je da se primenjuje početkom osamdesetih godina u Americi. Danas je jedan od najprimamljivijih alata za poboljšanje kvaliteta, za inženjere svih profila.

Šta je to što čini Tagučij metod atraktivnijim od drugih tehnika? Tri koncepta su od presudnog značaja: novi koncept funkcije gubitka i pojma kvaliteta, koncept signal/šum (S/N) odnosa i koncept ortogonalnih nizova.

2.1. Nova definicija funkcije gubitka

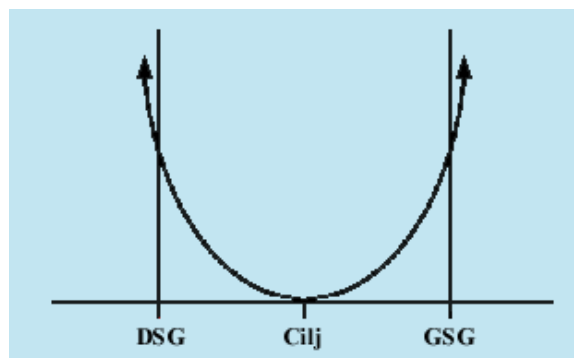
Tagučijeve analize su počele pitanjem kako definisati kvalitet. Formulirati kompletnu i sveobuhvatnu definiciju kvaliteta je, praktično, nemoguće. Kao jedan od načina za određivanje kvaliteta Tagučij je iskoristio pojam gubitka.

¹ Fisher, Sir Ronald A. (1890-1962) Čuveni britanski genetičar i statističar, utemeljivač eksperimentalnog dizajna. Njegove knjige *Statističke metode u istraživanjima* i *The Design of Experiment* su postale nezaobilazni udžbenici. Mnoge statističke tehnike, među kojima i ANOVA su proistekle iz njegovih radova. "F" oznaka za F-raspodelu nosi ime upravo po njemu.

U skladu sa tradicionalnim shvatanjem, sve dok su proizvodi u okviru granica tolerancije ne postoji gubitak. Dakle, u okviru granica tolerancije funkcija gubitka je jednaka nuli, ali van granica tolerancije gubitak je neprihvatljiv. Kao što se vidi ovakva funkcija gubitka je prekidna, deo-po-deo konstantna funkcija: sve dok smo u okviru granica tolerancije gubitak je zanemarljiv, čim pređemo granice tolerancije gubitak postaje neprihvatljiv.

Međutim deo-po-deo konstantna funkcija gubitka nije dobar način za određivanje gubitka, a samim tim ni kvaliteta? Jer, da li je gubitak stvarno jednak nuli dok smo u okvirima tolerancije, bez obzira na to koliko smo daleko od ciljne vrednosti? Savremeno (Tagučijevo) shvatanje kvaliteta kaže da kad god proizvod, makar i malo, odstupa od ciljne vrednosti, to izaziva gubitak, na primer, nezadovoljstvo kupca. Ovakav gubitak je definisan kvadratnom funkcijom koja zavisi od koeficijenta gubitka (k), disperzije (S_y^2) i odstupanja srednje vrednosti procesa (\bar{y}) od ciljne vrednosti (m):

$$L = k[S_y^2 + (\bar{y} - m)^2]$$



SLIKA 1. KVADRATNA FUNKCIJA GUBITKA.

Kako je sada gubitak definisan kvadratnom funkcijom odstupanja od nominalne vrednosti, onda bi cilj poboljšanja trebalo da bude smanjenje odstupanja od nominalne vrednosti, odnosno smanjenje varijacije, pre nego smanjenje broja proizvoda koji su izvan specifikacionih granica.

2.2. Odnos signal/šum

Proizvod idealnog kvaliteta bi trebalo da uvek na identičan način reaguje na iste signale korisnika. Na idealnom automobilu bi, na primer, trebalo da se nakon prvog okretanja ključa startuje motor. I tako bi trebalo da se ponavlja uvek, prilikom svakog paljenja. Međutim, ukoliko u odgovoru proizvoda na isti signal korisnika postoji određena varijacija, tada se može reći da postoji odstupanje od idealnog kvaliteta. Na primer, pod dejstvom nekih nekontrolisanih faktora, kao što su izuzetno niska temperatura, vlaga, stanje motora, kvalitet benzina itd, može se dogoditi da motor ne upali “iz prve”, ili da uopšte ne upali. Ovaj primer ilustruje, prema Tagučiju, ključni princip za poboljšanje kvaliteta proizvoda: “Minimizirati varijaciju performansi proizvoda u odzivu na faktore šuma, a maksimizirati odziv na signalne faktore”.

Faktori šuma su oni faktori koji nisu pod kontrolom korisnika. Signalni faktori su faktori koje postavlja ili kontroliše korisnik prilikom upotrebe proizvoda.

Konačno, cilj poboljšanja kvaliteta biće pronaći optimalne kombinacije i podešavanja kontrolisanih faktora koji su uključeni u proces proizvodnje, u cilju maksimiziranja odnosa signal/šum.

Zaključak prethodnih redova bi bio da se kvalitet može kvantifikovati u terminima odnosa reakcije proizvoda na faktore šuma i reakcije na signalne faktore. Proizvod idealnog kvaliteta bi imao odziv samo na signalne faktore i bio bi otporan na efekte slučajnih, nekontrolisanih faktora, faktora šuma. Prema tome, cilj poboljšanja kvaliteta može biti opisan kao pokušaj maksimiziranja odnosa signal/šum određenog proizvoda.

2.3. Ortogonalni nizovi

Treći bitan pojam u Tagučić pristupu su ortogonalni nizovi. Ortogonalni nizovi su otkriveni krajem devetnaestog veka. Otkrio ih je francuski matematičar Žak Adamar (Jacques Hadamard) i njihovo originalno ime je Adamarove matrice, ali s obzirom na to da se ove matrice koriste kako bi se očuvala ortogonalnost u eksperimentu, mnogo poznatije su pod imenom ortogonalni nizovi. Koristeći ortogonalne nizove, Tagučić je razvio sistem tabeliranih nizova, koji omogućuju nezavisno ocenjivanje maksimalnog broja glavnih faktora uz minimalan broj eksperimenata. Ortogonalni nizovi daju kombinacije nivoa faktora i redosled testiranja i upravo zbog njihove ortogonalnosti moguće je proceniti uticaj više faktora na karakteristiku kvaliteta.

TABELA 1. ORTOGONALNI NIZ L4.

Kombinacija	A	B	C	Rezultati testa		
1	1	1	1	y_1	y_5	y_9
2	1	2	2	y_2	y_6	y_{10}
3	2	1	2	y_3	y_7	y_{11}
4	2	2	1	y_4	y_8	y_{12}

Tagučić metod koristi ortogonalne nizove prilikom izbora kombinacija nivoa faktora za testiranje. Korišćenjem ortogonalnih nizova znatno je smanjen broj testova, samim tim eksperimenti postaju znatno ekonomičniji i to ne utiče na efikasnost eksperimenta. Tagučić metod je najprilagodljiviji različitim situacijama i mogu ga koristiti i razumeti ljudi kojima statistika nije bliska.

3. PROCES PLANIRANJA EKSPERIMENTA

Tokom planiranog eksperimenta se istovremeno izračunavaju sposobnosti dva ili više parametara da utiču na srednju vrednost, kao i na varijaciju određenih karakteristika procesa. Da bi se ovaj zadatak izvršio efektno i da bi rezultati bili statistički validni, potrebno je da se nivoi faktora variraju na pravi način. Ispravan redosled nivoa faktora i kombinacija za testiranje se dobija korišćenjem ortogonalnih nizova. Rezultate određenih testova treba ispitati, i zatim analizirati čitav skup dobijenih podataka, da bi se otkrilo koji faktori i na kom nivou utiču na karakteristike procesa i da li nivo faktora treba smanjivati ili povećavati da bi se došlo do poboljšanja procesa. U osnovi analize rezultata nalazi se analiza varijansi. Važno je primetiti da je planiranje eksperimenta jedan iterativni proces; jedan eksperiment vodi do narednih izvođenja. U početnom testiranju se, iz skupa svih faktora za koje se smatra da bi mogli da utiču na određene karakteristike procesa, izdvaja nekoliko važnih faktora. Ovo je obično mali eksperiment sa puno faktora i par nivoa uticaja. U kasnijim fazama dolazi do filtriranja i razdvajanja značajnih od neznačajnih faktora, tako da se broj faktora smanjuje, a broj nivoa može da se poveća.

Svaki eksperiment je podeljen u tri glavne faze, bez obzira na to koji je pristup u pitanju. Tri faze su: faza planiranja, faza izvršenja i faza analize i potvrde.

Faza planiranja je, očigledno, najvažnija faza za dobavljanje informacija. U fazi planiranja se određuju problemi i ciljevi eksperimenta, selektuju se faktori koji bi mogli značajnije da utiču na karakteristike procesa koje se prate i biraju se nivoi dejstva ovih faktora. Zbog toga je ovo najvažnija etapa u eksperimentu. Pravilan izbor faktora i nivoa nema statističku prirodu i zavisi od poznavanja procesa i proizvoda. Takođe, pažnju treba obratiti na izbor odgovarajućeg ortogonalnog niza jer korišćenje prevelikog niza može znatno povećati cenu eksperimenta, dok korišćenje premalog može učiniti da rezultati ne budu potpuno jasni.

Druga faza je faza izvršenja. Tada se kombinacije faktora testiraju po redosledu koji je dobijen na osnovu randomizacije i broja ponavljanja testova. Kada je eksperiment dobro isplaniran i izvršen, analiza je mnogo lakša i mnogo je verovatnije da će se dobiti pozitivne informacije o faktorima i nivoima.

U fazi analize se, na osnovu prethodne dve faze, generišu informacije o značajnosti faktora i nivoa. Ova faza je bazirana na statistici. Zbog toga je vrlo često nerazumljiva ljudima kojima statistika nije bliska. Za analiziranje rezultata testova koristi se statistički alat – analiza varijansi (ANOVA). ANOVA celokupnu varijaciju rezultata testova deli na komponente koje se pripisuju različitim izvorima varijacije. Na osnovu veličine tih komponenti i vrednosti F-testa se utvrđuje značajnost faktora i određuje se optimalna kombinacija koja će dati proizvod sa najboljim performansama.

Nad podacima dobijenim iz eksperimenta se može izvršiti dvojaka analiza. Osnovna analiza je analiza varijansi nad vrednostima koje su dobijene kao rezultati testova. Na taj način će se dobiti faktori koji značajno utiču na srednju vrednost karakteristike i optimalna kombinacija nivoa faktora, pri kojoj će srednja vrednost karakteristike najmanje odstupati od ciljne vrednosti.

Druga analiza je analiza odnosa signal-šum [1]. Naime, rezultati testova se mogu transformisati u veličinu signal-šum, koja na određeni način kvantifikuje varijaciju. Nakon analize tako transformisanih podataka dobiće se faktori koji značajno utiču na varijaciju karakteristike i optimalna kombinacija nivoa faktora, pri kojoj se varijacija, izazvana dejstvom faktora šuma, redukuje na najmanju moguću meru.

Na ovaj način se dobija kombinacija nivoa kontrolnih faktora pri kojoj će biti postignuta ciljna vrednost uz minimalnu varijaciju. Visoka konzistentnost performansi proizvoda doprineće poboljšanju kvaliteta proizvoda i procesa.

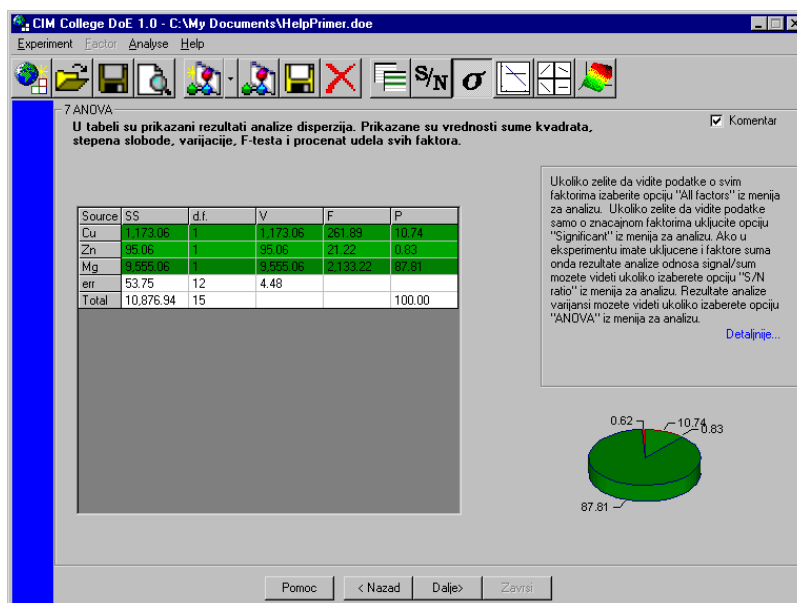
Nakon analize, poželjno je izvršiti potvrdu dobijenih rezultata. Prilikom potvrde eksperimenta, vrši se testiranje samo optimalne kombinacije, i to sa većim brojem ponavljanja nego u samom eksperimentu. Ukoliko se dobijeni rezultati poklapaju sa rezultatima analize, tj. očekivanim vrednostima, onda će to značiti da se rezultati eksperimenta, sa velikom verovatnoćom, mogu prihvatiti kao tačni.

4. CIM COLLEGE DESIGN OF EXPERIMENT

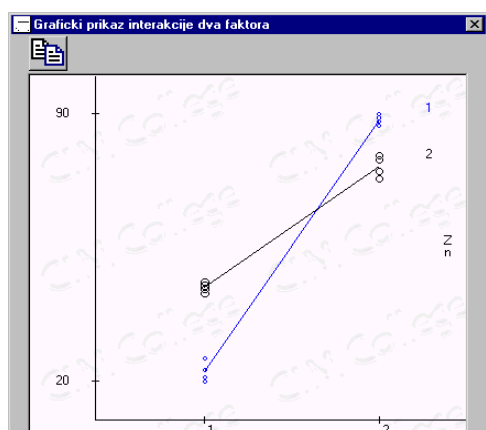
Složen matematički aparat koji se nalazi u osnovi planiranja eksperimenta može vrlo lako da uplaši i obeshrabri, i da time oteža primenu ovog moćnog statističkog alata. Srećom, razvijeni su programi koji primenu statističkih alata, uz pomoć kompjutera, veoma pojednostavljuju.

CIM College DoE je softverski paket koji primenu planiranja eksperimenta čini lakom, čak i za one korisnike koji nikada nisu imali kontakt sa statistikom. Zamišljen kao čarobnjak (wizard) program, prosto, vodi korisnika kroz sve faze planiranja eksperimenta, od početne faze izbora i definisanja kontrolnih faktora i faktora šuma, preko izbora odgovarajućih ortogonalnih nizova i randomizacije, do različitih vrsta analize rezultata i faze potvrde eksperimenta [2]. Korisniku je omogućeno lako kreiranje kontrolnih i faktora šuma, sa dva, tri i četiri nivoa. Nakon toga, na osnovu broja definisanih faktora i nivoa, program predlaže koji bi ortogonalni niz trebalo da se koristi i automatski dodeljuje faktore i interakcije kolonama ortogonalnog niza.

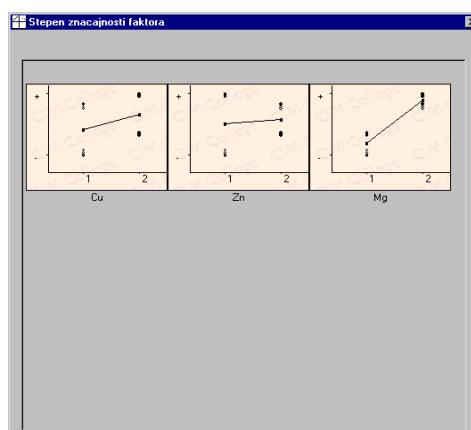
Ono što naročito izdvaja ovaj softver od drugih, sličnih programa je poslednja faza eksperimenta, faza analize i potvrde. CIM College DoE raspolaže različitim vrstama analize rezultata [1], od osnovne analize varijansi i grafičkih analiza, pa do analiza odnosa signal-šum, sa nekoliko različitih transformacija (S/N odnos koristeći samo disperziju, S/N odnos koristeći i disperziju i srednju vrednost, log S koeficijent).



SLIKA 2. ANALIZA VARIJANSI REZULTATA EKSPERIMENTA.



SLIKA 4. GRAFIČKI PRIKAZ INTERAKCIJE DVA FAKTORA.



SLIKA 3. GRAFIČKI PRIKAZ EFEKATA SVIH FAKTORA.

Nakon faze analize, program, na osnovu tipa karakteristike, određuje optimalnu kombinaciju nivoa kontrolnih faktora, koju korisnik treba samo da potvrdi. Nakon izvedenih i unetih rezultata testova potvrde, program kreira detaljan izveštaj o uspešnosti eksperimenta i celokupnom eksperimentu [2].

5. ZAKLJUČAK

U ovom tekstu su date osnove planiranja eksperimenta Taguchi metodom ili Robust dizajnom. Ovaj metod na najbolji način spaja ekonomično i tačno, moćno i lako za upotrebu. Ovim metodom se veoma brzo mogu eliminisati izvori suvišne varijacije. Robust dizajn je prava formula za proizvod vrhunskog kvaliteta, formula za zadovoljstvo kupca, formulu za uspeh. U vreme 3.4 defekta u milion mogućnosti, u vreme zero-defekta, svako odstupanje od cilja se kažnjava. Ukoliko želite da dostignete Six sigma, ukoliko želite pogodak pravo u centar, uvek, onda Vam je Design of Experiment neophodan.

6. REFERENCE

- [1] Phillip J. Ross: Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill, 1996.
- [2] CIM College: Design of Experiment 2000.