

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Испитивање машинских конструкција

Број индекса: 326/2011

Јасмина В. Миковић

**Испитивање механичких својстава
пластичних маса применом Тагучијевих
метода**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Добривоје Ћатић - ментор

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради следеће теме:

- Тагучијев рад
- Робусни дизајн
- Функција губитка квалитета
- Однос S/N
- Ортогоналне матрице
- Опис експеримента и приказ резултата.

Кандидат треба да учествује у изради епрувета које су потребне за испитивање, такође је потребно да учествује у спровођењу експеримента. Резултате добијене испитивањем на затезање треба статистички да обради применом Тагучијевих метода.

Препоручена литература:

- [1] Арсовски С., Вукичевић Т. и други, *Квалитет и менаџмент*, Министарство за науку и технологију Републике Србије, Београд, 1993.
- [2] Цветковић Д., *Дизајн и развој производа*, Универзитет Сингидунум, Београд, 2011.
- [3] Мајсторовић В., Станић Ј. и други, *Новије технике инжењерства и квалитета*, Систем квалитета, Институт за индустријске системе, ФТН, Нови Сад, 1994.

Крагујевац, фебруар 2013.

ментор:

Др Добривоје Татић, ред. проф.

САДРЖАЈ

ABSTRACT	I
РЕЗИМЕ	II
ПРЕДГОВОР	III
1. УВОД	1
2. ТАГУЧИЈЕВ РАД	3
3. ОСНОВЕ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА	5
4. РОБУСТАН ДИЗАЈН	10
4.1 Тагучијев робустан дизајн	11
5. ФУНКЦИЈА ГУБИТКА КВАЛИТЕТА	13
6. ОДНОС S/N КАО ПОКАЗАТЕЉ КВАЛИТЕТА	18
7. ОРТОГОНАЛНЕ МАТРИЦЕ	21
7.1 Одређивање параметара дизајна ортогоналне матрице	21
8. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА	27
8.1 Употреба Тагучијевих метода у производњи аутомобилских гума	27
8.2 Примена Тагучијевих метода за унапређење квалитета при обради стругањем потпомогнутим млазом високог притиска	27
8.3 Тагучијева метода код обликовања добављачких ланаца	30
9. ДОПРИНОС И ЗНАЧАЈ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА	34
9.1 Предности и недостаци Тагучијевих метода	38
10. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО	39
10.1 Одређивање ортогоналне матрице	43
10.2 Утицај фактора на затезну чврстоћу	44
10.3 Утицај фактора на издужење	52
11. ЗАКЉУЧАК	59
ЛИТЕРАТУРА	61

ABSTRACT

This thesis covers problems of Taguchi methods, more precisely its basis and applications. Within the first sections are presented the basics of Taguchi method, robust design, quality loss function, S/N ratio and Taguchi orthogonal arrays. There also is described manner of conducting the Taguchi methods.

It is important emphasis that this thesis contains section that is related to the application of Taguchi methods in the industry.

The special emphasis is placed on the experimental part. The influence of temperatures, velocity break, effect of the waters and UV radiation on samples of polyethylene has been interrogated. The Taguchi method, with orthogonal arrays and S/N ratio, has been used to analyse impact of various process parameters on tensile strength and percentage elongation of polyethylene. The study shows that the Taguchi methods are suitable to solve the stated problem with minimum number of trials.

Key words: Taguchi methods, robust design, quality loss function, S/N ratio, orthogonal arrays, polyethylene.

РЕЗИМЕ

Рад покрива тематику Тагучијевих метода, тачније њихових основа и примену. У оквиру рада кроз прва поглавља описане су основе Тагучијевих метода, робустан дизајн, функција губитка квалитета, однос S/N и Тагучијеве ортогоналне матрице. При том се описује и начин спровођења Тагучијевих метода.

Важно је нагласити да рад садржи и поглавље које се односи на примере примене Тагучијевих метода у индустрији.

Посебан акценат је стављен на експериментални део. Испитивани су утицаји температуре, брзине кидања, дејства воде и UV зрачења на узорке од полиетилена. Тагучи метода, са ортогоналним матрицама и однос S/N , коришћен је за анализу утицаја различитих параметара процеса на затезну чврстоћу и процентуално издужење полиетилена. Учињен је покушај да се смањи број експеримента и повећа поузданост експерименталних резултата. Истраживање је показало да су Тагучијеве методе погодане за решавање наведеног проблем са минималним бројем испитивања.

Кључне речи: Тагучијеве методе, робустан дизајн, функција губитка квалитета, однос S/N , ортогоналне матрице, полиетилен.

ПРЕДГОВОР

Тагучијеве методе представљају вид статистичке анализе осетљивости. Користе се како би се смањио број експерименталних узорака приликом извођења експеримента.

У првом делу рада описане су Тагучијеве методе и дати примери примене. Тагучијеве методе обухватају робустан дизајн, функцију губитка квалитета, однос S/N , ортогоналне матрице. Други део рада је заснован на експерименталним испитивањима.

Испитивање је спроведено како би се утврдило који фактори и колико утичу на лом и пропадање кошева замрзивача. Материјал који се користи за кошеви замрзивача је *Hostalen GC 7260*, полиетилен високе густине. Испитивана је затезна чврстоћа и процентуално издужење епрувета од полиетилена које су добијене бризгањем у „21. Октобру“ у Крагујевцу. Фактори који утичу на затезање епрувети су брзина затезања, температура, третирање у води и UV зрачење. Испитивање је спроведено у лабораторији *Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу*. Добијени резултати за три узорка по експерименту су статистички обрађени помоћу Тагучијевих метода, тачније коришћењем ортогоналних матрица и односа S/N .

Овом приликом желим да се захвалим:

Ментору др Добривоју Ћатићу, ред. проф, на стручном вођењу, саветима и помоћи током израде мастер рада.

Захваљујем се и др Србиславу Александровићу и др Драгану Адамовићу, редовним професорима са катедре за Производно машинство, који су омогућили спровођење експеримента и помогли током испитивања у лабораторији *Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу*.

Посебно се захваљујем фабрици „21. Октобар“ из Крагујевца која нам је изашла у сусрет и направила епрувете које су коришћене за испитивање.

А највише желим да се захвалим својим родитељима Велизару и Зорици, браћи Александру и Саши и осталим члановима породице на стрпљењу и што су увек били уз мене током студирања и писања овог мастер рада.

1. УВОД

Квалитет се у савременој привреди посматра са аспекта управљања, тако да управљање квалитетом треба да омогући унапређење квалитета пословања целокупног предузећа. Квалитет, заједно са диференцираношћу и тржишним комуницирањем*, представља кључни елемент за формирање успешне робне марке са стабилном тржишном позицијом [1].

Кључ успеха је постизање односа цена-квалитет, заснованог на континуалном унапређењу продуктивности пословања.

Унапређење квалитета пословања јесте основ за унапређење других фактора који утичу на конкурентску способност предузећа у међународним оквирима, посебно продуктивности пословања и формирања цена. Имплементација система квалитета и перманентно унапређење уграђеног система квалитета ствара услове за повећање продуктивности рада и целокупног пословања, што омогућава смањење трошкова и конкурентску цену на тржишту.

Посебно је битно да се оствари међузависност деловања пословне функције квалитета са пословном функцијом маркетинга, истраживања и развоја и производње.

Развој и раст предузећа одређен је повезаношћу три стратешке функције и њиховим дејством, а то су пословне функције:

- маркетинг,
- истраживање и развој и
- квалитет.

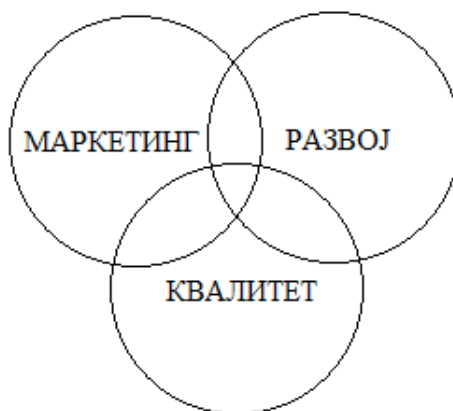
Међузависност пословних функција је приказана на слици 1.1.

Савремени концепт квалитета не подразумева само његову технолошку основу, већ се концепт квалитета из производње преноси на ниво извршног руководства, где дугорочно посматрано добија карактеристике управљања квалитета пословања предузећа у целини, при чему потрошач и постизање задовољства потрошача имају централно место. Квалитет пословања подразумева менаџмент приступ. Квалитет пословања подразумева три димензије: тржишну, пословну и друштвену.

Тржишни аспект квалитета обухвата - задовољавање купца, погодност за употребу, тржишну позицију, конкурентску предност. Пословни аспект квалитета подразумева –

* Тржишно комуницирање представља континуирану и динамичну размену информација са окружењем, односно оно представља двосмеран процес, за разлику од информисања које представља једносмерно преношење информација.

повећање ефикасности, снижење трошкова, повећање продуктивности, повећање профита, дугорочни опстанак. Друштвени аспект обухвата – заштиту здравља људи, штедњу природних ресурса, заштиту потрошача. Изврсна компанија мора да задовољи све наведене аспекте квалитета пословања [1].



Слика 1.1 Међузависност стратешких пословних функција

Управљање квалитетом представља скуп тренутних акција и акција током времена, којима се делује на систем, због остваривања постављених циљева квалитета, који морају бити комплементарни и међусобно усклађени. Управљање квалитетом представља и вид укупне функције управљања, која треба да одреди и спроводи политику квалитета уопште. Модел тоталног управљања квалитетом (*TQM – Total Quality Menagement*) представља највиши домет у области квалитета. Тоталним управљањем квалитетом могуће је достићи највиши ниво квалитета производа и услуга, такође, њиме је могуће реализовати циљеве производње. За развој система тоталног управљања квалитетом потребно је створити неопходне претпоставке, и то кроз образовање запослених, примену и развој нових техника унапређења квалитета, разраду пројеката унапређења квалитета и спровођење тих техника и кроз континуално и систематско планирање квалитета [2].

Тагучијеве методе представљају технику за унапређење квалитета. Основна намена ових метода је да се растерети функција контроле квалитета и да се обликује робусни (стабилни) систем.

У овом раду су објашњене Тагучијеве методе, које су разматране са аспекта Тагучијевог концептуалног оквира за процес побољшања квалитета. Дати су и примера примене Тагучијевих метода. Тагучијевим методама су обрађени и приказани резултати који су добијени експерименталним испитивањем полиетилена при различитим условима који се користи за кошеве замрзивача. Експеримент је спроведен да би се утврдило шта је узрок ломљења кошева.

2. ТАГУЧИЈЕВ РАД

Геничи Тагучи (*Genichi Taguchi*) је био статистичар и инжењер. Од 1950. године примењује се Тагучијева методологија за побољшање квалитета производа [3].

После Другог светског рата, јапански произвођачи су се борили да преживе са врло ограниченим ресурсима. Тагучи уводи револуцију процеса производње у Јапану кроз уштеду у трошковима. Он је схватио, као и многи други инжењери, који су производни процеси ометани спољашњим утицајима, буком. Међутим, Тагучи је схватио методе идентификације оних извора буке који имају највећи утицај на варијабилност производа. Његове идеје су усвојене од стране успешних произвођача широм света због својих резултата у стварању супериорних производних процеса уз знатно ниже трошкове [4].

После Другог светског рата радио је за јапанско Министарство здравља и социјалну заштиту и спровео прво истраживање о здрављу и исхрани нације. Применио је своје знање побољшања квалитета у фармацији Моренага (*Morinaga Pharmaceutical*) и радио је чак и на побољшању квалитета бомбона са укусом кафе Моранага Сиека (*Morinaga Sieka*), тачније на смањењу својства топљења карамела на собној температури.

Тагучијеве методе су статистичке методе које је развио др Геничи Тагучи како би побољшао квалитет производа и све чешће се примењују у биотехнологији, маркетингу и у презентовању. Многи традиционални статистичари запада сматрају ове методе контраверзним, али други прихватају концепцију ових метода као корисне додатке темељним знањима. Хидеки Аојама (*Hideki Aoyama*) је надалеко познат стручњак у објашњавању и разумевању Тагучијевих метода. Захваљујући развоју нових метода, али и усавршавању постојећих 1997. године Тагучи је ушао у америчку ауто-мото дворану славе, што је до тада успело његовим сународницима Еији Тосаоди (*Eiji Toyodi*) и Соичирои Хонди (*Soichiroi Hondi*) који се сматрају утемељивачима јапанских аутомобилских компанија [5].

Током 1940. године Тагучи је радио на унапређењу старије статистичке методе дизајн експеримента, *DOE* (*Design Of Experiments*) коју је 1920. године утемељио Р. А. Фишер (*R. A. Fisher*). Фишер је покушао да пронађе методу за посматрање променљивих попут кише, воде, ђубрива, сунца и слично, но Тагучи је радио на њеном поједностављењу како би била применљива у производњи. Тагучијева стандардизована *DOE* метода 1980. године представљена је у Сједињеним Америчким Државама и тако је постала једна од најефикаснијих метода која се користи у различитим индустријским компанијама, као што су Форд (*Ford*), Џенерал Моторс (*General Motors*), Крајслер (*Chrysler*), Зерокс (*Xerox*), Хјуз Аеркрафт (*Hughes Aircraft*). Исте године је уз помоћ

партнера Деминга (*Demming*) и компаније Форд основан Амерички институт за добављаче.

Тагучи је у Сједињеним Америчким Државама познат као вођа покрета индустријског квалитета и приписује му се започињање развоја робусног дизајна у Јапану пре 1980. године.

Тагучи се до пред смрт бавио консалтингом* у Јапану, а преминуо је 2. јуна 2012. године [3].

* Консалтинг је пословна активност којом се обезбеђују стручне препоруке и савети уз одређену финансијску надокнаду, у циљу решавања конкретних проблема у оквиру одређене области пословања.

3. ОСНОВЕ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА

Тагучијеве методе обухватају смањење варијације у процесу кроз робустан дизајн експеримената. Општи циљ ове методе је да се произведе висок квалитет производа по ниској цени за произвођача. Тагучи је тврдио да постоје варијације, због којих лош квалитет у процесу утиче не само на произвођача, већ и на друштво [6].

Тагучи је развио целокупну филозофију и удружене методе за инжењеринг квалитета, а једна од његових најважнијих идеја темељи се на томе да је:

- квалитетан производ је онај који изазива најмање трошкове, изражене новцем, према друштву током целог свог „животног века“. Однос између губитка и техничких особина производа изражава се функцијом губитка [5].

Различити типови услова односно промена (нпр. толерантне варијације, спољашњи услови, „расипање“ суседних система итд.) узрокују различита одступања на систему умањујући његов оптималан рад. Како би се избегао пораст таквих промена, потребно је развити робусне производе који функционишу оптимално и у различитим променљивим условима.

Проналажење дизајнерских параметара који повећавају робусност темељ је Тагучијевих метода. Робустан дизајн није директно усмерен на решавање проблема, већ креирање система који функционише приближно идеалној функцији у свим условима.

Из претходно наведеног произлази дефиниција:

- Тагучијеве методе су систем инжењеринга квалитета окренут ка смањивању трошкова.

Ове методе дају нагласак на ефикасну примену инжењерских стратегија више него на примену напредних статистичких метода.

Примена Тагучијевих метода могућа је у различитим околностима:

- у ефикасној оптимизацији извођења квалитета и цена,
- у брзом и тачном прибављању техничких информација, дизајнирању и производњи високо поузданих производа и производних процеса по ниским ценама,
- у развоју флексибилних технологија за дизајнирање читаве групе високо квалитетних сродних производа, чиме се знатно смањује време истраживања, развоја и испоруке,
- Тагучијеве методе најчешће се користи за побољшавање постојећих производа и производних процеса и
- Тагучијеве методе смањује потребу за експериментима.

Примена Тагучијевих метода помаже у остваривању две врсте циљева:

- 1) општи су циљеви они који се односе на оптимизацију производа и производних процеса, испитивање и проучавање више различитих фактора, односно њиховог деловања на коначан резултат, скраћивања потребног периода за извођење експеримента и фаза тестирања и
- 2) посебни (специфични) су циљеви они који се односе на проналажење фактора који имају више, односно мање утицаја, фактора који су толерантнији, то јест еластичнији на промене. Уз помоћ објективно добијених резултата могуће је дати информације о томе где је потребно распоредити ресурсе за побољшање квалитета. На овај начин се може управљати квалитетом добављача.

Тагучијеве методе су познате и као инжењеринг квалитета, а садрже следеће одреднице:

- дизајнирање параметара,
- одређивање варијација,
- идеални квалитет,
- *off-line* контролу квалитета,
- функцију губитка квалитета,
- однос „сигнала и шума“ и
- филозофију робусног дизајна.

Ове одреднице су главна обележја Тагучијевих метода које због својих специфичности изазивају полемике међу светским статистичарима и научницима.

Када је реч о идеалном квалитету производа, у односу на остале теоретичаре, Тагучи се није слагао са традиционалним спецификацијама дизајна, те је креирао сопствену филозофију „идеалног квалитета“. Према Тагучију квалитетан производ требао би да има одређену циљну вредност која ближе означава критичну карактеристику производа. Сматрао је да циљ производње не треба да буде само квалитетан производ, већ трајни квалитетни производ који реализује своју функцију кроз цео свој животни век. Из ове филозофије, Тагучи је развио концепцију робусног дизајна.

Тагучијеве методе представљају један од примењених модела пројектовања за квалитет на бази експеримента, као алат који доприноси реализацији *TQM* принципа, односно принципа модела тоталног управљања квалитетом:

- иницијатива топ менаџмента,
- превентивне акције, а не утврђивање шкарта,
- за квалитет треба да су одговорни сви (уз заједничке циљеве и поделу рада на појединачне, тачно дефинисане задатке, чиме се постиже специјализација и повећава ефикасност),
- трошкови квалитета као мера квалитета,
- осигурати квалитет, односно радити исправно први и сваки наредни пут,
- едукација и мотивација свих запослених и
- континуално унапређење квалитета треба да буде сталан посао [7].

Параметар квалитета представља мерљиву карактеристику производа дефинисану техничком документацијом тог производа, односно спецификацијом. Поступак реализације Тагучијевих метода састоји се од утврђивања параметара квалитета производа пре израде прототипа, на основу посебних принципа, затим сужавања подручја њиховог расипања око циљне вредности, тако да се на тај начин смањује вероватноћа поремећаја у производњи и експлоатацији. Смањењем варијација

карактеристике производа подстиче се побољшање технологије процеса, повећање квалитета и смањење трошкова, што данас у свету представља тренд.

Тагучи је схватио да је најбоља прилика за отклањање варијација за време дизајнирања производа у самом производном процесу. Доследно томе развио је стратегију квалитетног инжењерства које се може користити у оба контекста. Процес има три фазе [5]:

- 1) одређивање система,
- 2) одређивање параметара и
- 3) одређивање толеранције одступања.

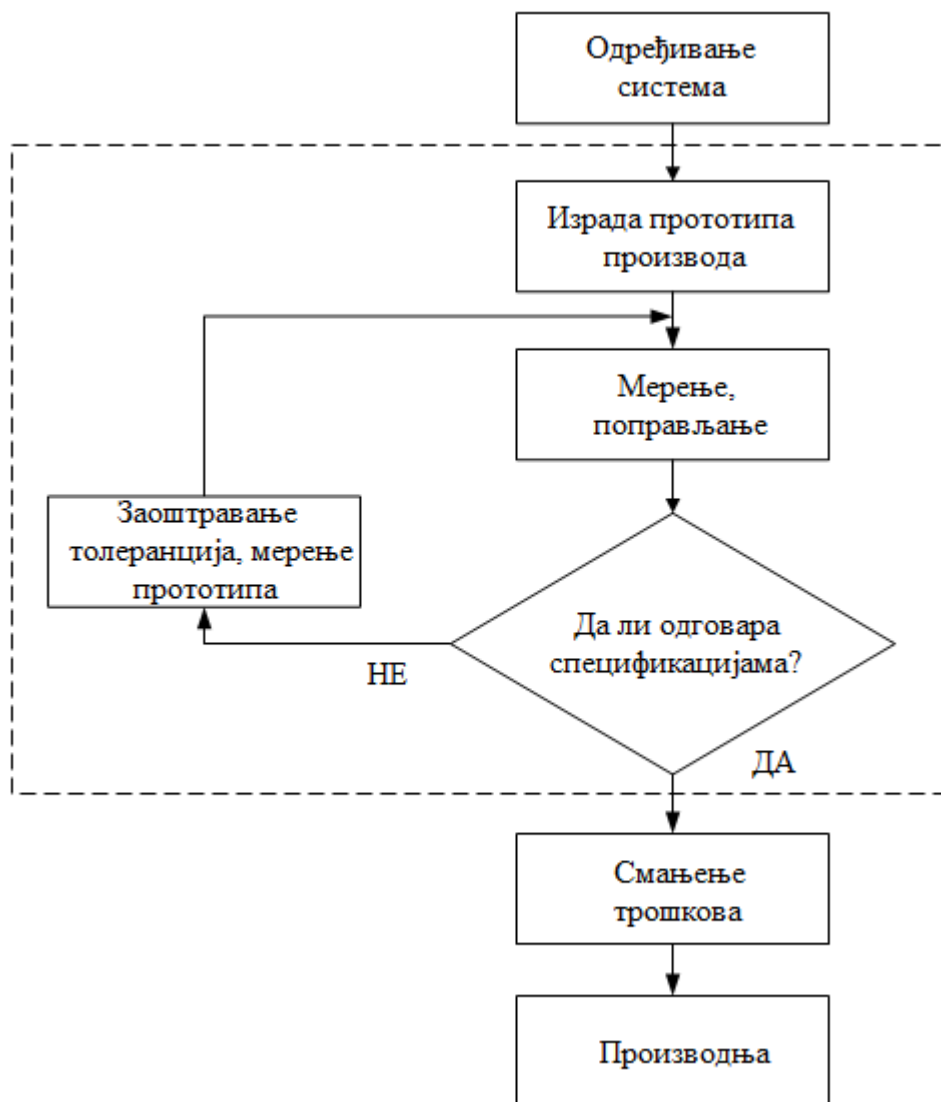
Код одређивања система Тагучијевом методом битно је одговорити на питање „како ће систем најбоље задовољавати потребе купаца“. Израда се организује на концептуалном нивоу, укључујући креативност и иновативност и захтева техничка знања из науке и инжењеринга. Важно је знати планирати систем који функционише унутар одређених номиналних услова.

Када је постављена концепција, треба одредити номиналне вредности различитих димензија и дизајнерских параметара и детаљно одредити фазу дизајнирања конвенционалног инжењерства. Важно је одредити параметре који се могу контролисати. Тагучијева радикална домишљатост уочљива је у томе што се захтева тачан избор вредности и то испод одређених вредности изведених захтева система. У многим околностима, ово омогућава да параметри буду изабрани како би смањили ефекте изведених варијација на производњу, околину и укупну штету односно робустификацију. Фактори који се могу поставити и одржавати зову се контролни фактори.

Када је успешно извршено одређивање параметара и разумевање ефеката различитих параметара на успешност, ресурси се могу усмерити на смањивање и контролисање варијација у неколико критичних делова (Паретово (*Paret*) правило). Важно је одредити уже рангове толеранције за оне факторе чије промене могу негативно утицати на промену производа или процеса.

Кроз ове фазе могу се уочити разлике између традиционалног начина планирања (слика 3.1) и Тагучијевих метода (слика 3.2). Код традиционалног планирања у првом плану је решавање проблема, док је код Тагучијевих метода важно избегавање, односно спречавање проблема.

Традиционална метода планирања полази од избора, израде прототипа, преко мерења и одређивања стопе толеранције до коначног резултата производње уз битно смањене трошкове производње.

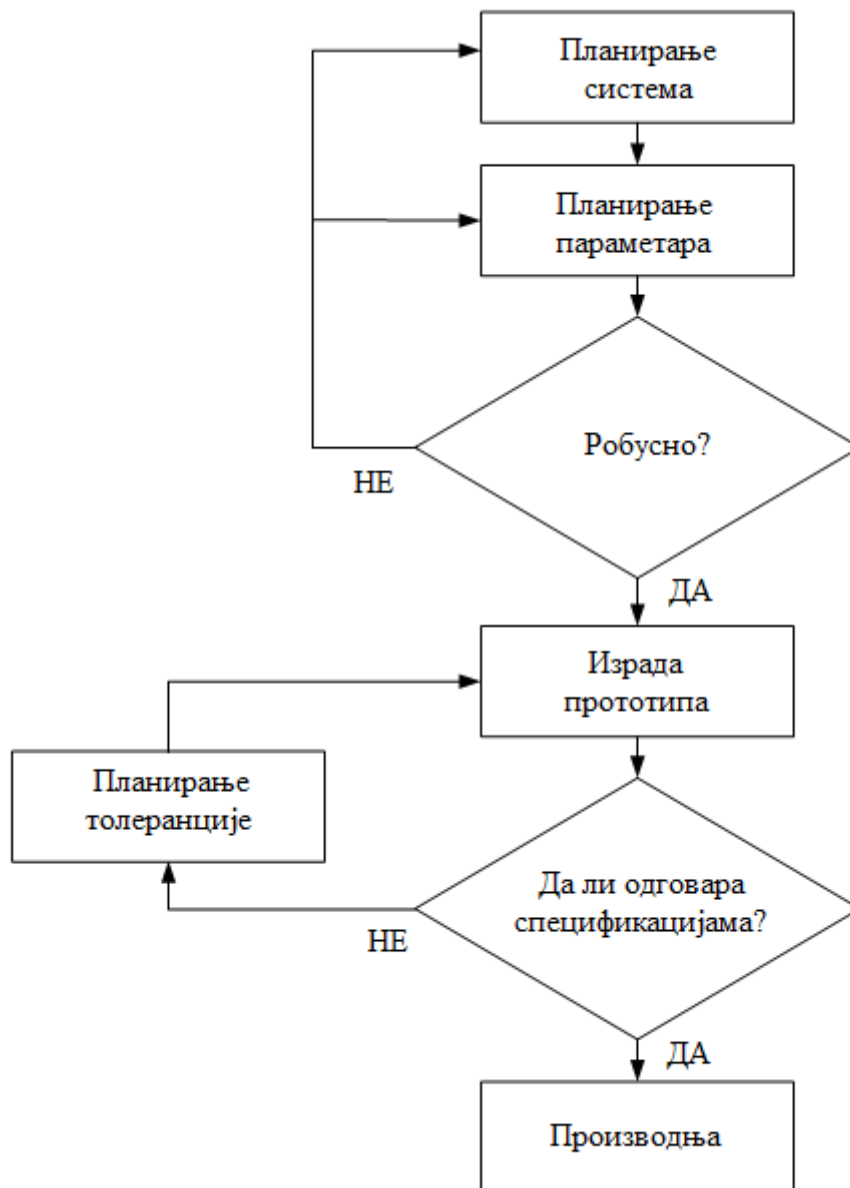


Слика 3.1 Традиционална метода планирања

Општи кораци који су укључени у Тагучијеве методе су [6]:

1. Дефинисање циља процеса, или тачније, циљне вредности за меру перформансе процеса. Ово може бити проток, температура, и тако даље. Циљ процеса може бити минимум или максимум, на пример, циљ може бити да се повећа стопа излазног тока. Одступање у перформансама од карактеристика циљне вредности се користи за дефинисање функције губитка процеса.
2. Одређивање параметара који утичу на процес пројектовања. Параметри су променљиве у оквиру процеса који утичу на меру перформансе, као што су температура, притисак, и тако даље, који се могу лако контролисати. Број нивоа који је потребан да се параметри могу мењати мора бити наведен. На пример, температура може да се мења на ниске и високе вредности од 40°C и 80°C. Повећањем броја нивоа варирајућих параметара повећава се број експеримената који се спроводи.
3. Направити ортогоналне низове за параметаре дизајна који показује број и услове за сваки експеримент.
4. Спровести експерименте који су назначени у низу, а на крају прикупити податаке о утицају на мере перформансе.

5. Комплетна анализа података како би се утврдио утицај различитих параметара на мерене перформансе.



Слика 3.2 Тагучијева метода планирања

4. РОБУСТАН ДИЗАЈН

Робустан производ (или процес) је дефинисан као онај који извршава своју функцију како треба, чак и под несавршеним условима као што су варијације процеса производње или одређени распон радних услова. На пример, термин бука се користи да опише неконтролисане варијације које могу утицати на перформансе, а каже се да квалитет производа треба да буде робустан у односу на фактор буке.

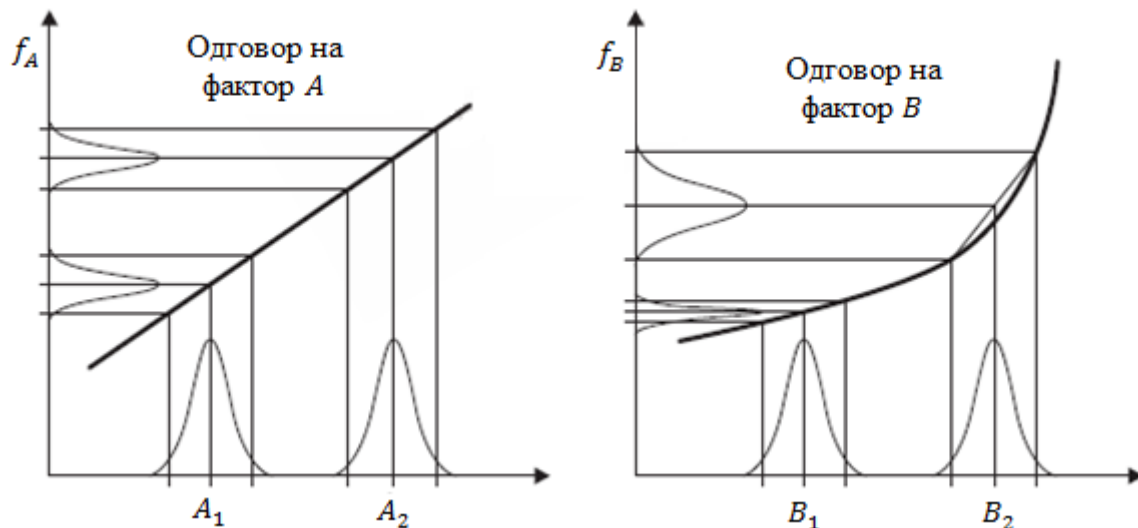
Робустан дизајн је делатност при развоју производа за побољшање жељене карактеристике производа, а при томе се смањује ефекат буке. У робусном дизајну користе се експерименти и анализе података за идентификацију робусних жељених вредности пројектних параметара који могу да се контролишу. Задате вредности робусног дизајна представљају комбинацију вредности параметара дизајна за које се добијају жељене перформансе производа, унутар распона радних услова и варијација производње [8].

Концептуално, робустан дизајн је једноставан за разумевање. За дате циљеве перформансе (на пример, безбедност путника на задњем седишту), може бити много комбинација вредности параметара који ће дати жељени резултат. Међутим, неке од ових комбинација су осетљивије на неконтролисане варијације од других. С обзиром да ће производ, вероватно, радити у присуству различитих фактора буке, требало би изабрати комбинацију вредности параметара која је најмање осетљива на неконтролисане варијације. Процес робусног дизајна користи експериментални приступ проналажењу ових робусних жељених вредности.

Да би се разумео концепт робусних жељених (задатих) вредности, требало би размислити о два хипотетичка фактора која утичу на неку меру перформанси сигурног појаса, као што је приказано на слици 4.1. Следе две претпоставке:

- фактор f_A има линеарни ефекат на перформансе и
- фактор f_B има нелинеарни ефекат.

У односу на оно што се тражи, бирају се жељене вредности за сваки фактор: A_1 или A_2 за фактор A и B_1 или B_2 за сваки фактор B . Под претпоставком да се ефекти f_A и f_B сабирају (додају), комбинација A_1 и B_2 ће обезбедити, приближно, исти ниво укупне перформансе као комбинација A_2 и B_1 . Варијација производње ће бити присутна у свакој изабраној (задатој) вредности, тако да стварна вредност не може да буде баш таква, као што је наведено. Избором вредности B_1 за фактор B , где је осетљивост одговора на фактор B релативно мала, нежељена варијација фактора B има релативно мали утицај на укупне перформансе производа. Дакле, избор B_1 и A_2 је више робусна комбинација жељених вредности од комбинација B_2 и A_1 .



Слика 4.1 Робустан дизајн користи нелинеарне односе како би идентификовао жељене вредности где су перформансе производа мање осетљиве на варијације

Процес робусног дизајна може се користити кроз неколико фаза процеса развоја производа. Као и код већине питања при развоју производа, што раније робусност може да се узме у обзир унутар процеса развоја производа, биће бољи резултати робусности.

Експерименти робусног дизајна могу се користити у фазама концепта, као начин да се прецизирају спецификације и да се поставе реалистични циљеви перформанси. Експерименти робусног дизајна се најчешће користе у току фазе детаљног пројекта (дизајна детаља), као начин да се обезбеде жељене перформансе производа под различитим условима.

За многе проблеме инжењерског дизајна, једначина заснована на основним физичким принципима може бити решена за избор робусних параметара. Инжењери не могу у потпуности да моделирају разне врсте независности, варијација и фактора буке који се јављају у реалним условима. Због тога, способност да се развију тачни математички модели је ограничена за многе инжењерске проблеме.

4.1 Тагучијев робустан дизајн

Робустан дизајн је нова концепција која се односи на производњу производа и услуга високог квалитета који немају грешака. Овај дизајн има високу толеранцију на факторе које није могуће контролисати. Тагучи је помоћу унутрашњег и спољашњег дизајна узео у обзир факторе буке (спољашње) и факторе дизајна (унутрашње). На овај начин настоји се да се произведу производи који неће имати грешака, али ће гарантовати функционисање и након планираног времена. На пример у аутомобилској индустрији инжењери тестирају ниво толеранције производа путем технике поузданости зване тестирање убрзаног живота (убрзана испитивања). Ова концепција дизајна треба производ да учини поузданијим и високо толерантним [5].

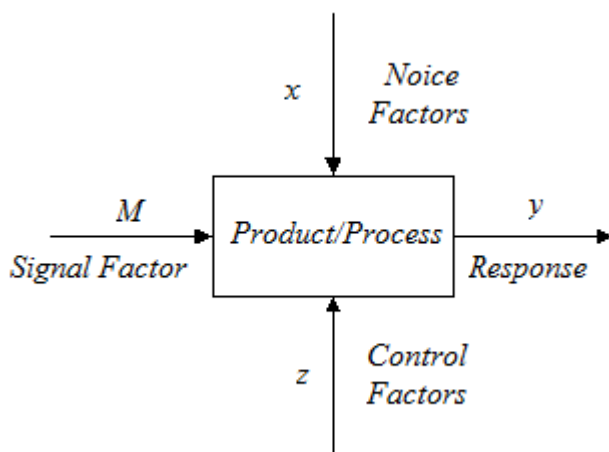
У данас неизбежној борби за побољшање квалитета производа, инжењери често извођењем експеримената теже усвајању робусних параметара, што подразумева:

- учинити технолошки процес неосетљивим на деловање променљивих спољашњих утицаја које је тешко контролисати,
- одредити границе параметара технолошких процеса са којима се постиже захтевана средња вредност и варијабилност актуалног показатеља својстава производа,
- учинити склопове производа неосетљивим на промене унесене компонентама.

При томе се не сме губити из вида тржишна прихватљивост цене производа [9].

Тагучијева метода у проблемима оптимизације се одвија у четири корака [10]:

- 1) дефинисање свих релевантних фактора (слика 4.2) специфичних за проблем оптимизације и њихове вредности,
- 2) одабир прикладних ортогоналних поља за управљачке факторе и шуме, међу стандардним или њихова модификација,
- 3) спровођење експеримената и анализа резултата и
- 4) спровођење верификацијских експеримената, којима треба потврдити побољшање које настаје оптималном комбинацијом фактора.



Слика 4.2 Концепција робусног дизајна

Signal Factor (M) је променљива чија вредност представља циљ процеса.

Control Factors (z) су променљиве на чије вредности дизајнери процеса могу директно утицати. У ствари је главни циљ спровођења експеримената, поставити вредности ових променљивих на оптималне нивое.

Noise Factors (x) су променљиве на чије вредности се не може директно утицати, због тога што их је тешко или чак немогуће контролисати.

Response (y) је стварни одзив процеса. Овај одзив је приказан помоћу појма карактеристика квалитета (*Quality Characteristic* – QC). Укратко, QC представља меру функционалности процеса за побољшање перформанси производа, то јест његовог квалитета [10].

5. ФУНКЦИЈА ГУБИТКА КВАЛИТЕТА

Тагучи сугерише да произвођачи прошире своје хоризонте узимајући у обзир трошкове друштва изазване одступањима производа од жељених карактеристика. Иако краткорочни трошкови могу једноставно бити неприлагођени, сваки производ произведен изван номиналног даће резултате са неким губитком за купца или шире друштво кроз бржи отказ. Ти су губици евидентни, али произвођачи их уобичајно игноришу јер су више заинтересовани за сопствене трошкове него трошкове друштва. У економији, теорија хаоса предвиђа да они штите тржиште од оперативне ефикасности. Тагучи говори, да ће такви губици кад тад и неизбежно пронаћи пут назад у компанију где су настали (ефекат сличан трагедији сличности) и да ће произвођачи радећи на њиховом смањивању повећати своју репутацију, освојити тржиште и остварити профит [5].

Такви су трошкови наравно мали када је производ близу номиналне вредности. Како се удаљава од номиналне вредности, губици расту до оне тачке где постају превисоки, а да би се занемарили. Увек постоји одређена граница. Тагучи жели наћи ефикасан начин њиховог статистичког представљања и дефинише три ситуације:

- 1) веће боље (нпр. пољопривредни принос),
- 2) мање боље (нпр. емисија угљен диоксида) и
- 3) “на мету“, нормално најбоље (нпр. сусрети на скуповима).

Прва два случаја се приказују једноставном монотоним функцијом губитка, а у трећем случају је Тагучи развио функцију квадратног модела губитка.

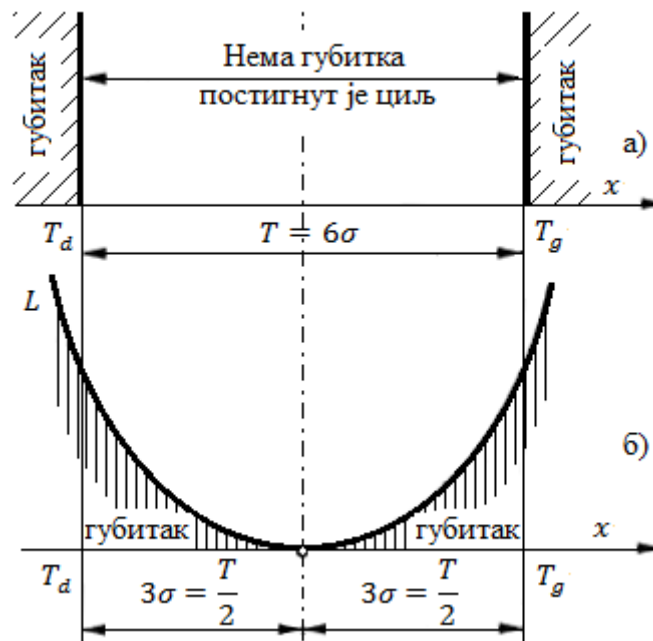
Квадратни модел губитка због грешке су такође користили Џон фон Нуман (*John von Neumann*) и Оскар Моргенштерн (*Oskar Morgenstern*) тридесетих година XX века.

Концепт губитка квалитета сматра се основом Тагучијеве филозофије квалитета и представља базу за разумевање свега онога што Тагучијеве методе чине. Концепт функције губитка представља и потврду њихове успешности у послу. Тагучијева идеја је садржана у корену два века старих математичких основа статистике које је поставио Гаус (*Gauss*), и које су биле основа за доношење одлука на основу статистичке теорије последњих шездесет година [11].

Тагучијева функција губитка квалитета дефинише три основна правила [5]:

- 1) одређивање спецификација - прво и најважније је одредити опасности,
- 2) одређивање циља са минималним одступањима (одређивање прикладних циљних вредности за поједине производе) и
- 3) дозвољавање неких варијација – смањивање варијација, а самим тим прилагођавање просека циљу.

Тагучијева идеја најбоље се може објаснити сликом 5.1.

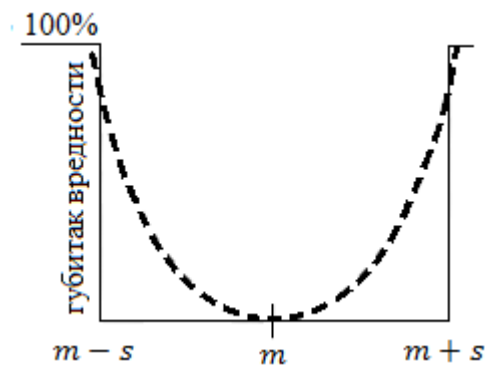


Слика 5.1 Графички приказ толерантног поља и функције губитка: а) класичан приказ, б) Тагучијев приказ

Ознаке на слици 5.1 представљају:

- T – толеранцијско поље, тачност обраде [m],
- T_d – доња граница толеранцијског поља [m],
- T_g – горња граница толеранцијског поља [m],
- $\bar{x}$ – просечна вредност расподеле (претпоставља се нормална расподела) [m],
- σ – просечно стандардно одступање расподеле и
- L – губитак вредности изражен новчано.

Графички приказ функције губитка, имплицитно идеја остајања унутар или ван спецификација је представљена на слици 5.2. Централни циљ, номинална мера представља идеални ниво пројектног параметра (m). Централни циљ одређује пројекат и овде се не поставља питање да ли је номинална мера правилно постављена, нити како је уопште треба поставити. Са $m - s$ и $m + s$ означена су два спецификациона лимита који у суштини представљају стандардне спецификационе лимите. Мера „изгубљене вредности“ представљена је на ординатној оси и она се односи на одступање дате карактеристике од жељене вредности, то јест од жељеног нивоа. Коришћена је процентуална скала са интервалом од 0 (нема губитка вредности) до 100% (апсолутни губитак вредности). Према Тагучију, вредност губитка ће бити одређена у условима када се „губици производа приписују друштву од момента када је производ допремљен крајњем кориснику“. Ова дефиниција, коју је дао Тагучи, јасно показује истицање квалитета у први план.

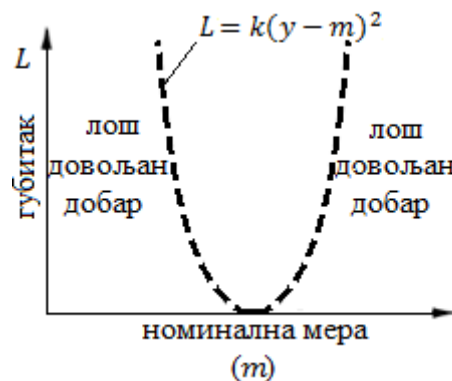


Слика 5.2 Функција губитка

Тагучијева дефиниција би могла да буде у супротности са производно-оријентисаном дефиницијом квалитета, да је то нераздвојно у многим ситуацијама базираним на теорији, то јест односу цена-квалитет, где трошкови шкарта дораде и поправке у гарантном року представљају суштинске мере у процесу реализације квалитета [12].

У дуалитету (улаз-излаз) непрекидна линија графика приказаног сликом 5.2 дефинише се као губитак. Све док је квалитет производа ван спецификација, сматра се да такав производ више није у продаји, читава његова вредност се губи (одбацује се као шкарт или се враћа на дораду).

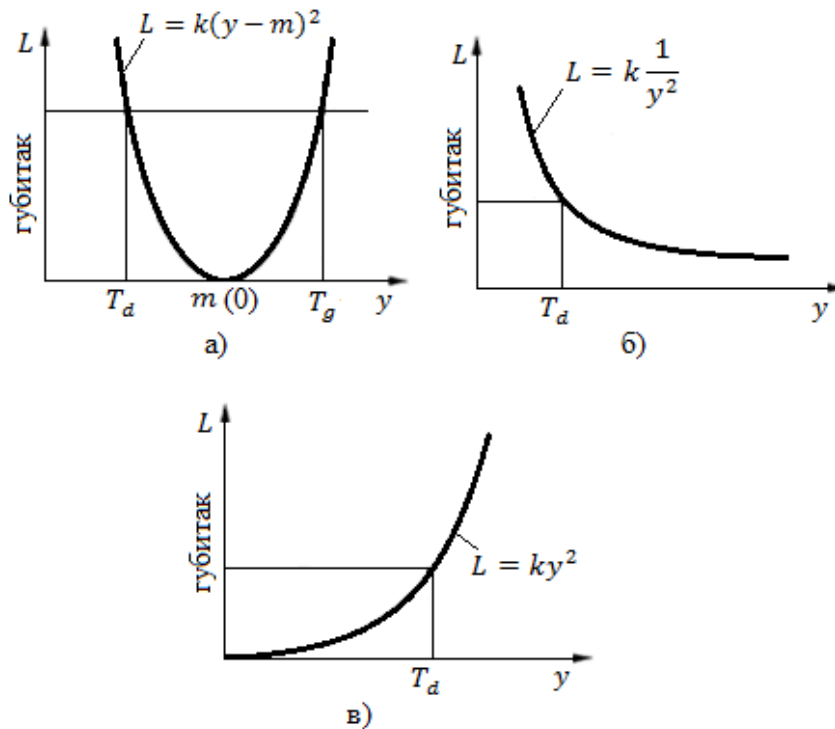
Тачан облик функције губитка је тешко, можда чак и немогуће одредити, али у пракси је често сасвим могуће извести добре апроксимације. Пошто функција може узети много различитих облика, Тагучи је нашао просту квадратну функцију која апроксимира понашање губитка у много случајева (слика 5.3). Функција губитка унапређује напоре ка сталном смањењу одступања у производним функционалним карактеристикама.



Слика 5.3 Квадратна функција губитка

Ова функција повезује реализацију одређеног параметра квалитета са друштвено мерљивим трошковима (губитком). Губитак може бити директан (трошкови сервиса, трошкови везани за превентиву и обуку радне снаге, трошкови контроле производа и производног процеса...), и индиректан (губитак тржишта, улагања у постизање конкурентности...). Све ове компоненте су укључене у коефицијент губитка који у Тагучијевој функцији фигурише ознаком „ k ” [7].

Зависно од спецификације карактеристике производа, постоје три карактеристична облика Тагучијевих функција губитка датих на слици 5.4 [7].



Слика 5.4 Карактеристични облици Тагучијевих функција губитка: а) тип N, б) тип B, в) тип S

Први облик функције, слика 5.4 а односи се на случај када је за параметар задата доња, односно горња граница толеранције (T_d , T_g) и номинална мера параметра (m). Тада се функција губитка дефинише у облику [13,14]:

$$L(y) = k(y - m)^2, \quad (5.1)$$

а укупан губитак посматран на узорку величине n :

$$L = k \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2, \quad (5.2)$$

где је:

$L(y)$ – функција губитка,

L – укупан губитак посматран на узорку величине n ,

k – коефицијент губитка (коефицијент функције губитка који зависи од трошкова проузрокованих лошим квалитетом),

y – посматрани параметар,

m – номинална вредност параметра и

n – величина узорка.

Овај облик функције губитка је тип N и односи се на случај када је номинална мера најбоља, то јест за нормалну вредност параметра ($y = m$) губитак је најмањи. У овом случају посматрани параметар може бити димензија, излазни напон и тако даље.

Други облик функције, слика 5.4 б, односи се на случај кад је за параметар задата доња граница толеранције (T_d). Тада се функција губитка дефинише у облику:

$$L(y) = k \frac{1}{y^2}, \quad (5.3)$$

а укупан губитак посматран на узорку величине n :

$$L = k \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}. \quad (5.4)$$

Овај облик функције губитка је тип *B* и односи се на случај када је већа вредност боља, то јест за максималну вредност параметра *y* губитак је најмањи. У овом случају посматрани параметар може бити снага, отпорност материјала, животни век производа и тако даље.

Трећи облик функције, слика 5.4 в, односи се на случај кад је за параметар задата горња граница толеранције (*T_g*). Тада се функција губитка дефинише у облику:

$$L(y) = ky^2, \quad (5.5)$$

а укупан губитак посматран на узорку величине *n*:

$$L = k \sum_{i=1}^n y_i^2. \quad (5.6)$$

Овај облик функције губитка је тип *S* и односи се на случај када је мање одступање пожељније, то јест за минималну вредност параметра *y* губитак је најмањи. У овом случају посматрани параметар може бити хабање алата, број оштећења, нечистоће у материјалу, и тако даље.

Функцију губитка је могуће приказати у следећем облику [15]:

$$L(y) = k(y - m)^2 = k[S_y^2 + (\bar{y} - m)^2], \quad (5.7)$$

где је:

$\bar{y}$ – средња вредност измерених карактеристика квалитета,

S_y^2 - варијанса – мера одступања карактеристика од $\bar{y}$ и

m - номинална вредност.

Варијанса S_y^2 је мера погодности изабраног технолошког процеса, односно, одступање које је генерисано у самом развоју. Вредност S_y^2 је могуће смањити спровођењем контроле квалитета у фази планирања и развоја производа (*off-line* контрола квалитета).

Одступање $(\bar{y} - m)^2$ је мера подешености технолошког процеса, односно, одступање које је генерисано у самом процесу. Вредност $(\bar{y} - m)^2$ је могуће смањити спровођењем контроле квалитета у току производног процеса (*on-line* контрола квалитета).

Квалитет мора бити уграђен у производ и процесе производње, те у производном процесу треба посветити више пажње *off-line* контроли, како би се уклонили проблеми који се јављају у производњи [5].

Off-line фаза планирања је Тагучијева метода где се на моделима, прототипу и симулацијама траже комбинације параметара и различитих ефеката.

То доводи до робусних производа, тј. процеса који су мање осетљиви на различите промене и сметње у самој производњи и током употребе.

6. ОДНОС S/N КАО ПОКАЗАТЕЉ КВАЛИТЕТА

Избор параметара према Тагучију остварује се методама планирања експеримента, при чему Тагучи предлаже коришћење, упоредо са обичним показатељима, нови показатељ квалитета, такозвани однос сигнал/шум (*signal/noise* - S/N) који у методологији има веома важну улогу [11].

Производ идеалног квалитета увек треба да одговори на исти начин на сигнале које добија од корисника. Када се окрене кључ у брави аутомобила очекује се да стартер окреће и стартује мотор. Код идеално квалитетног аутомобила, почетни процес ће се увек одвијати на исти начин, на пример, после три окрета стартера мотора, мотор се покреће. Ако у одговору на исти сигнал (окретањем кључ за паљење) постоји случајна варијабилност у овом процесу, тада је квалитет мањи од идеалног квалитета. На пример, због таквих неконтролисаних фактора као што су екстремна хладноћа, влага, хабање мотора, и тако даље, мотор се понекад стартује тек након двадесетог пута и на крају се уопште и не покрене. Овај пример илуструје кључни принцип у мерењу квалитета према Тагучију: „Ви желите да се смањи варијабилност у перформансама производа, као одговор на фактор шуме, док су максималне варијабилност у одговору на сигнални фактор“ [16].

Фактори шуме су они које оператер производа не може да контролише. У саобраћају на пример, у факторе шуме спадају температурне промене, различит квалитет бензина, хабање и тако даље.

Фактори сигнала су они фактори који су задати или под контролом оператера производа и користе се за своје намењене функције (окретањем кључа за паљење се покреће аутомобил).

Циљ напора за унапређење квалитета је да се препознају фактори којима је могуће управљати, а који су укључени у процес производње, како би се повећао S/N однос, тако да су фактори у експерименту представљени као контролисани фактори.

Квалитет се може квантификовати (вредновати) у смислу реаговања производа на факторе шуме и факторе сигнала. Идеалан производ ће само одговорити на сигнале оператера и биће ван утицаја случајних фактора шуме (време, температура, влажност, и тако даље). Дакле, циљ напора за унапређење квалитета може се изразити као покушај да се повећа S/N однос за одговарајући производ.

S/N односи које је предложио Тагучи 1987. године за различите облике функције губитка [17, 18]:

- За тип N , први облик Тагучијеве функције губитка (слика 5.4 а), у случајевима када се тежи средњој циљној вредности одзива (на пример величина честица, својства продукта):

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right), \quad (6.1)$$

где су:

- средња вредност одзива процеса:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (6.2)$$

- стандардно одступање:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}, \quad (6.3)$$

док је:

y_i – посматрани параметар, а

n - број експеримената.

Овај S/N однос може да се користи кад се идеалан квалитет изједначава са одређеном номиналном вредности. На пример, величина клипних прстенова за аутомобилске моторе мора да буде што ближе спецификацијама које могу да обезбеде висок квалитет.

- За тип B , други облик Тагучијеве функције губитка (слика 5.4 б), у случајевима када се тежи максималној циљној вредности одзива (на пример повећање продуката, конверзија реактаната у продукте):

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right). \quad (6.4)$$

- За тип S , трећи облик Тагучијеве функције губитка (слика.5.4 в), у случајевима када је циљна вредност одзива око нуле (на пример емисија штетних гасова, потрошња енергије):

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right). \quad (6.5)$$

Ови S/N показатељи су изведени из квадратне функције губитка и изражени су у децибел скали (dB).

Када су сви S/N показатеља израчунати за сваки круг експеримента, Тагучи предлаже графички приступ за анализу података. У графичком приступу, S/N показатељи и просечни одговори се цртају за сваки однос за сваки фактор и сваки одговарајући ниво. Графикони се испитују тако да се „изабере победник“, односно, да се одабере ниво фактора који би најбоље повећао S/N и довео до циљне вредности (што значи или их повећати или смањити). Коришћењем ове информације, контролни фактори могу се груписати на следећи начин:

1. фактори који утичу на варијације и просечне перформансе производа,
2. фактори који утичу само на варијације,
3. фактори који утичу само на просечне перформансе производа и

4. фактори који не утичу ни на варијације или просечне перформансе производа.

Фактори у првој и другој групи могу се користити да се смање варијације у систему, што га чини робуснијим. Фактори у трећој групи се користе за подешавање процеса до циљне вредност. Фактори у четвртој групи су постављени на најекономичнији ниво.

7. ОРТОГОНАЛНЕ МАТРИЦЕ

Тагучи је развио методу за дизајнирање експеримената да би се испитало како различити параметри утичу на средњу вредност и варијације карактеристика перформанси процеса који одређују колико добро функционише процес. Експериментални дизајн који је предложио укључује коришћење ортогоналних матрица за организовање параметара који утичу на процес и нивое на којима треба да се мењају. Примена ортогоналних матрица омогућава прикупљање неопходних података за утврђивање, који фактори највише утичу на квалитет са минималним бројем експеримената, чиме се штеди време и ресурси. Анализа променљиве на основу прикупљених података из Тагучијевог дизајна експеримената може да се користи за избор нова вредности параметара за оптимизацију карактеристика перформансе [6].

7.1 Одређивање параметара дизајна ортогоналне матрице

Утицај различитих параметара на перформансе карактеристика у скраћеном сету експеримената се може испитати коришћењем ортогоналне матрице експерименталог дизајна, коју је предложио Тагучи. Када су утврђени параметри који утичу на процес који се може контролисати, морају да се одреде нивои на којима се ови параметри могу мењати. Одређивање нивоа променљиве за тест захтева разумевање процеса, укључујући минималне, максималне и тренутне вредности параметара. Ако је разлика између минималне и максималне вредности параметра велика, вредности које се тестирају могу бити ниже или више од вредности које се могу тестирати. Ако је опсег параметара мали, тада се могу тестирати мање вредности или се могу тестирати вредности које треба приближити једне другима. На пример, уколико температура омотача реактора може да се мења између 20°C и 80°C, а познато је да је тренутна оперативна температура омотача 50°C, могу се изабрати три нивоа на 20°C, 50°C и 80°C. Морају се узети у обзир трошкови спровођења експеримената приликом одређивања броја нивоа параметара који ће бити укључени у експерименталном дизајну. У претходном примеру температуре омотача, требало би да се издвоје превисоки трошкови да се изведе експеримент за шездесет нивоа на једностепеним интервалима. По правилу, број нивоа за све параметре у експерименталном дизајну се бира да буде исти и помаже у избору одговарајуће ортогоналне матрице.

Када је познат број параметара и број нивоа, могуће је изабрати правилну ортогоналну матрицу. Табела 7.1 помаже у одабиру (селекцији) матрице. У њој се могу наћи називи одговарајуће матрице, гледајући колоне и редове који одговарају броју параметара и броју нивоа. Када је одређен назив (индекс у називу представља број експеримената који мора бити изведен), може да се формира предефинисана матрица. Ове матрице су створене помоћу алгоритма који је развио Тагучи који дозвољава да се свака променљива (фактор) и задати нивои подједнако тестирају. На пример, ако постоје три параметра (напон, температура, притисак) и два нивоа (високи, ниски), приказана табелом 7.2 за матрицу $L4$. У табели 7.2 може се видети да су у матрици дата четири различита експеримента. Нивои означени као 1, 2, 3 и тако даље, треба да се замене у матрици са стварним вредностима нивоа и да се разврстају. $P1$, $P2$, $P3$ треба да се замене са стварним параметрима (напон, температура, и тако даље).

Табела 7.1 Матрица која служи за селекцију

Број параметара (P)														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Број нивоа	2	L_4	L_4	L_8	L_8	L_8	L_{12}	L_{12}	L_{12}	L_{12}	L_{16}	L_{16}	L_{16}	L_{16}
	3	L_9	L_9	L_{18}	L_{18}	L_{18}	L_{18}	L_{27}	L_{27}	L_{27}	L_{27}	L_{27}	L_{36}	L_{36}
	4	L'_{16}	L'_{16}	L'_{16}	L'_{16}	L'_{32}	L'_{32}	L'_{32}	L'_{32}					
	5	L_{25}	L_{25}	L_{25}	L_{25}	L_{25}	L_{50}	L_{50}	L_{50}	L_{50}	L_{50}	L_{50}		

Број параметара (P)															
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
2	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32
3	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36								
4															
5															

Табелама од 7.2 до 7.7 приказане су ортогоналне матрице са својим називима.

Табела 7.2 Матрица L_4

Експеримент	P_1	P_2	P_3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Табела 7.3 Матрица L_8

Експеримент	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Табела 7.4 Матрица L_9

Експеримент	P_1	P_2	P_3	P_4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Табела 7.5 Матрица L_{12}

Експеримент	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
7	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Табела 7.6 Матрица $L16$

Експеримент	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$P6$	$P7$	$P8$	$P9$	$P10$	$P11$	$P12$	$P13$	$P14$	$P15$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Табела 7.7 Матрица $L'16$

Експеримент	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Уколико је матрица изабрана на основу броја параметара и нивоа и обухвата више параметара него што се користе у експерименталном дизајну, потребно је занемарити додатне колоне параметара. На пример, ако процес има 8 параметра и сваки параметар по 2 нивоа, на основу матрице за селекцију треба да буде изабрана $L12$ матрица. Табела 7.8 показује $L12$ матрицу која има колону за 11 параметара (од $P1$ до $P11$). Прве 3 колоне са десне стране треба занемарити.

Табела 7.8 Матрица L12 са занемарене 3 колоне

Експеримент	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
7	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

8. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА

8.1 Употреба Тагучијевих метода у производњи аутомобилских гума

Пример примене Тагучијевих метода у италијанској компанији Пирели (*Pirelli*) која производи аутомобилске гуме. Техничари у Пирелију су покушавали да се реше неугодног звука који је производио један од ремена за синхронизацију. Метода покушаја и погрешке (смањивање и повећање димензија ремена, разни облици монтаже и слично) била је мукотрпна и није уродила плодом. Тада су позвани техничари из Тагучијевог института и у врло кратком временском периоду открили извор звука, проблем је био у материјалу ремена. Када су променили материјал, не само да је нестао неугодан звук, већ се и животни век ремена удвостручио. Цена коштања новог материјала ремена била је иста као и претходно коришћеног [5].

8.2 Примена Тагучијевих метода за унапређење квалитета при обради стругањем потпомогнутим млазом високог притиска

Одређивање оптималних параметара обраде је континуирани инжењерски задатак чији циљеви су смањење трошкови производње и постизање жељеног квалитета производа. Површинска храпавост је карактеристика површине којом се описује квалитет површине у односу на обраду. Површинска храпавост је користан индекс квалитета производа и у већини случајева технички предуслов за механичке производе. Постизање жељеног квалитета површине је од великог значаја за функционално понашање делова. Пратећи савремене производне захтеве и технолошко-економске анализе операција обраде, у току процеса пројектовања, неопходно је одредити оптималне параметре за сечење, како би се постигли минимални трошкови или минимално време производње [19].

Висок притисак млаза уз окретање при стругању потпомогнутом млазом високог притиска (*HPJA High-pressure jet assisted turning*) представља иновативну методу за подмазивање и / или хлађење зоне резања током обраде. Овај машински процес је у стању да сече и легуре никла. Легуре никла су познате легуре које имају веома лоше перформансе при обради. Испитивана је храпавост површине у зависности од пет *HPJA*

параметара: пречник млазнице D_n , притисак млаза P , брзина резања V_c , стопе обртања и растојање између тачака удара млаза и резне ивице d .

Параметар храпавости R_a се експериментално мери током високог притисака млаза уз окретање легуре никла. Тагучијеве методе и *ANOVA* анализе се користе за анализу утицаја параметара сечења на храпавост.

Висок притисак млаза уз окретање (*HPJA*) је процес где се хлађење врши помоћу течности за подмазивање (*CLF*) и допрема се у зону резања под изузетно високим притисаком до $P = 300$ МПа и на нижем запреминском протоку него у случају конвенционалног, пружа боље подмазивање, хлађење и ефекат лома. Ово је иновативна метода подмазивање и/или хлађења зоне резања.

Експерименти су спроведени у скраћеном процесу на уздужном конвенционалном стругу, опремљеном са *Hammelmann* пумпом високог притиска, клипном пумпом притиска 150 МПа и 8 l/min. Течност која се користи је *Vasco 5000* мазиво за хлађење, 5,5% емулзија без хлора на бази биљног уља помешана са водом (pH 8,5-9,2).

Перформансе машине имају следеће параметре: *HPJA* пречник млазница D_n (0,25; 0,3 и 0,4 mm), притисак млаза P (50; 90 и 130 МПа), брзина резања V_c (46; 57 и 74 m/min), стопа обртања f (0,2; 0,25 и 0,224 mm/o) и растојање између тачака удара млаза и резне ивице d (0; 1,5 и 3 mm).

Сви експерименти су изведени коришћењем легуре никла *Inconel 718* која се испоручује у шипкама (пречника 145 mm и дужине 300 mm), са тврдоћом од 36 до 38 HRC. На основу овога прави се ортогонала матрица са три нивоа (кодирана: 1, 2 и 3). У табели 8.1 приказани су параметри машине и нивои. Површинска храпавост је мерена са инструментом синусног типа - *Mitutoyo-Surftest SJ-301*, вршено је читавање одговора површинске храпавости за три узастопна мерења.

Табела 8.1 Параметри машине и нивои

Ознака	Параметри	Ниво		
		1	2	3
<i>A</i>	Пречник млазница D_n (mm)	0,25	0,3	0,4
<i>B</i>	Растојање између тачака удара млаза и резне ивице d (mm)	0	1,5	3,0
<i>C</i>	Притисак млаза P (МПа)	50	90	130
<i>D</i>	Брзина резања V_c (m/min)	46	57	74
<i>E</i>	Стопа обртања f (mm/o)	0,2	0,224	0,25

Експериментални резултати, заједно са њиховим трансформацијама у *S/N* однос дати су у табела 8.2. Анализе заснована на Тагучијевим методама су вршене у *Minitab14* и *Qualitek-4* софтверима како би се одредили главни ефекти параметара сечења, извршила анализа варијансе (*ANOVA*) и утврдили оптимални услови.

На основу резултата може бити утврђено који контролни фактори имају јак утицај на параметар храпавости. Оптимални параметри сечења ових контролисаних фактора могу се веома лако утврдити на основу *S/N* односа. У табели 8.3 приказане су оптималне вредности контролисаних параметара. Најбољи параметар храпавости R_a је на вишим *S/N* вредностима.

Табела 8.2 Ортогонална матрица L27 се експерименталним резултатима и израчунатим S/N односима

	Фактори					$R_a(\mu m)$	S/N
	A	B	C	D	E		
	D_n	d	P	V_c	f		
1	1	1	1	1	1	2,54	-8,097
2	1	1	1	1	2	2,77	-8,05
3	1	1	1	1	3	3,76	-11,504
4	1	2	2	2	1	2,86	-9,128
5	1	2	2	2	2	3,09	-9,8
6	1	2	2	2	3	4,07	-12,129
7	1	3	3	3	1	2,63	-8,4
8	1	3	3	3	2	2,86	-9,128
9	1	3	3	3	3	3,85	-11,71
10	2	1	2	3	1	2,63	-8,4
11	2	1	2	3	2	2,85	-9,097
12	2	1	2	3	3	3,84	-11,687
13	2	2	3	1	1	3,10	-9,828
14	2	2	3	1	2	3,33	-10,449
15	2	3	1	2	1	4,31	-12,69
16	2	3	1	2	2	2,54	-8,097
17	2	3	1	2	3	2,76	-8,819
18	2	3	1	2	3	3,75	-11,481
19	3	1	3	2	1	2,52	-8,029
20	3	1	3	2	2	2,75	-8,787
21	3	1	3	2	3	3,74	-11,458
22	3	2	1	3	1	2,45	-7,784
23	3	2	1	3	2	2,68	-43,76
24	3	2	1	3	3	3,67	-11,294
25	3	3	2	1	1	2,41	-7,641
26	3	3	2	1	2	2,63	-8,4
27	3	3	2	1	3	3,62	-11,175

Оптимизација параметара сечења у оквиру задатих фактора нивоа, с обзиром на критеријум мање је боље, даје комбинацију контролних фактора: $A=3$, $B=3$, $C=1$, $D=3$, $E=1$. Ова комбинација омогућава најнижи параметар храпавости. Тест верификације је извршен након оптималне поставке контролних фактора. Разлика између израчунате и добијене вредности параметара храпавости R_a је веома мала.

Експериментални резултати су анализирани и анализом варијансе (ANOVA), која се користи за идентификовање фактора који знатно утичу на мере перформанси. Резултати анализе приказани су у табели 8.4.

Проценат доприноса параметра се добија тако што се израчуна збир квадрата за сваки параметар и укупна сума квадрата.

Табела 8.3 Оптимални параметри сечења

Контролисани параметри	Ниво	Задати услови	R_a добијена коришћењем Тгучи метода	R_a добијена коришћењем врификационог теста
D_n (mm)	3	0,4	$S/N = 7,109$ $R_a = 2,267 \mu m$	$R_a = 2,45 \mu m$
d (mm)	3	3,0		
P (MPa)	1	50		
V_c (m/min)	3	74		
f (mm/o)	1	0,20		

Табела 8.4 ANOVA анализа

Col # / Factor	DOF (f)	Sum of Sqrs. (S)	Variance (V)	F - Ratio (F)	Pure Sum (S')	Percent P (%)
1 Dn	2	3.345	1.672	126.807	3.318	5.225
2 d	2	3.047	1.523	115.518	3.02	4.756
3 P	2	1.992	.996	75.53	1.965	3.095
4 Vc	2	.381	.19	14.474	.355	.559
5 f	2	54.525	27.262	2067.047	54.499	85.821
Other/Error	16	.21	.013			.544
Total:	26	63.503				100.00%

Тагучијева метода је коришћена за одређивање главних ефеката, значајне факторе и оптималне услове обраде, који утичу на вредности параметара храпавости R_a . На основу анализе коришћењем Тагучијевих метода, резултати указују да је међу свим значајним параметарма, највећи утицај има број обртања.

8.3 Тагучијева метода код обликовања добављачких ланаца

Добављачки ланац обухвата све активности укључене у производњу и испоруку завршног производа и/или услуге, од добављача до корисника. Управљање добављачким ланцем укључује следеће активности:

- управљање набавком и продајом,
- проналазак сирових материјала и компоненти неопходних за производњу и монтажу,
- производња и монтажа,
- складиштење и праћење стања залиха,
- примање наруџбина,
- дистрибуција широм добављачког ланца,
- испорука производа кориснику.

На примеру једног добављачког ланца приказана је сврсиходност примене Тагучи методе приликом његове оптимизације. Добављачки ланац се састоји из четири

произвођача ($P1-P4$), четири дистрибутера ($D1-D4$) и два трговца на велико ($W1$ и $W2$) [10].

Произвођачи производе дванаест врста производа које наручују дистрибутери, а од којих наручују трговци на велико. Сваки од произвођача не производи све производе, већ само по 6 производа различитих карактеристика (обима и времена обраде). Времена транспорта између појединих нивоа добављачког ланца се налазе у табели 8.5, а изражена су у сатима.

Табела 8.5 Време транспорта

	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$W1$	$W2$
$D1$	14	20	20	12	8	12
$D2$	18	16	13	19	10	11
$D3$	14	16	20	17	14	6
$D4$	20	12	14	20	16	8

Модел добављачког ланца је следећих карактеристика:

- Велетрговци $W1$ и $W2$ постављају наруџбине дистрибутерима девети дан симулације, где се количине наручених производа могу описати дискретном униформном расподелом $U(1,5)$. Одабир појединог дистрибутера од стране велетрговца је такође моделиран дискретном униформном расподелом $U(1,4)$, а време између две наруџбине велетрговца је описано негативном експоненцијалном расподелом $NegExp(4)$, где је параметар 4 изражен у сатима и представља просечно време између две наруџбине.
- Дистрибутери поседују у складиштима свих 12 производа. Такође, дистрибутери почињу са наруџбинама од произвођача осми дан симулације и то са константном количином од 50 комада сваког од производа за попуњавање складишта. Како је већ претходно речено, велетрговци започињу с наруџбинама према дистрибутерима девети дан симулације. Зависно од тренутног стања на складиштима дистрибутера и расположивости транспортних средстава, дистрибутер испоручује целу наручену количину, део наручене количине или ставља наруџбину у дуговање датом велетрговцу. Наружбина се сматра реализованом тек тада када је испоштована у потпуности по количини производа.
- Произвођачи производе седам дана без наруџбина дистрибутера. Произвођачи $P1$ и $P3$ производе производе 1-6, а $P2$ и $P4$ производе 7-12. Дистрибутери $D1$ и $D2$ наручују за попуњу складишта од произвођача $P1$ и $P2$, док $D3$ и $D4$ наручују од $P3$ и $P4$. Уколико произвођач може испоручити целу наручену количину од датог дистрибутера тада је испоручује, а уколико не, тада испоручује онолико колико је то у том тренутку могуће, што зависи од стања у складиштима готових производа и расположивости транспортних средстава. Наружбина се сматра реализованом тек када је испоштована цела количина наручених производа.
- Показатељи извођења добављачког ланца су: укупни трошак система као целине и просечна расположивост производа (број реализованих наруџбина/укупан број наруџбина) између два суседна нивоа ланца, то јест између произвођача и дистрибутера и дистрибутера и велетрговца.
- Укупан трошак система се састоји из: трошкова складиштења и транспортних трошкова, произвођача и дистрибутера и пенала због дуговања између нивоа у добављачком ланцу.
- Време симулације понашања модела је 3 месеца.

У табелама 8.6 и 8.7 приказани су контролисани фактори и шумови и њихови нивои.

Табела 8.6 Контролисани фактори модела добављачког ланца

Фактор	Ниво		
A: Број транспортера дистрибутера	10	12	14
B: Број транспортера произвођача	8	10	12
C: Величина наруџбине дистрибутера	10 ком.	20 ком.	30 ком.
D: Производна серија	5 ком.	10 ком.	20 ком.
E: Акумулација наруџбина	9 h	6 h	3 h

Табела 8.7 Шумови модела добављачког ланца

Фактор	Ниво	
Одступање времена наруџбине <i>P-D</i>	1 h	2 h
Одступање времена наруџбине <i>D-W</i>	30 min	1 h
Одступање времена транспорта <i>P-D</i>	3 h	5 h
Одступање времена транспорта <i>D-W</i>	2 h	4 h
Одступање у крајњој потражњи	30% нижа	30% већа

Одзив модела за сигналне факторе је типа QC , за укупни трошак система је облика мање је боље, а за нивое расположивости производа је веће је боље.

На основу табеле 8.8 може се одредити оптимална комбинација контролисаних фактора. Да би се одредила ова комбинација потребно је утврдити какав ефекат има сваки од фактора када се постави на одговарајуће нивое. Тако, на пример фактор број транспортера дистрибутера када се постави на ниво 1, то јест 10 транспортера, даје резултат са просечним S/N односом од -131,92 dB. Анализирајући на овакав начин све факторе и узимајући у обзир и остале мере одзива система из табеле 8.8, дошло се до следеће комбинације фактора која би требала да да резултат са највећом неосетљивошћу система на шумове: $A_2 B_2 C_2 D_2 E_1$.

Спровођењем верификацијских експеримената има за циљ испитивање да ли се постављањем контролисаних фактора на оптималне вредности постиже оптимизација у систему. Оптимална комбинација фактора ће се упоредити са случајно одабраном комбинацијом фактора од укупно 243 ($243=3^5$) које стоје на располагању. Случајно одабрана комбинација је $A_2 B_1 C_3 D_3 E_3$. Резултати експеримената спроведених са случајном комбинацијом фактора и оптималном комбинацијом фактора су представљени у табели 8.9.

Табела 8.8 Релативни ефекат контролисаних фактора

Фактор	Ниво	Укупан трошак (dB)	Укупан трошак (€)	P-D расположивост (dB)	P-D расположивост (%)	D-W расположивост (dB)	D-W расположивост (%)
A	10	-131,92	3651648,25	-5,28	0,68	-24,81	0,23
	12	-132,02	3675747,00	-2,44	0,78	-24,88	0,23
	14	-131,91	3649622,00	-2,62	0,77	-25,66	0,24
B	8	-132,02	3676580,75	-4,69	0,68	-26,88	0,23
	10	-131,94	3655807,00	-2,20	0,80	-24,28	0,24
	12	-131,89	3644629,00	-3,46	0,75	-24,20	0,22
C	10 ком.	-133,88	4224864,50	-0,12	0,99	-34,78	0,05
	20 ком.	-128,06	1937987,00	-1,67	0,83	-24,40	0,36
	30 ком.	-133,91	4814165,50	-8,56	0,41	-16,18	0,28
D	5 ком.	-131,93	3656292,75	-2,44	0,78	-24,64	0,24
	10 ком.	-131,92	3652803,25	-2,39	0,79	-24,62	0,22
	20 ком.	-132,00	3667921,75	-5,51	0,66	-26,10	0,24
E	9 h	-131,96	3654499,25	-2,44	0,78	-26,54	0,19
	6 h	-131,90	3653938,00	-3,98	0,74	-25,39	0,23
	3 h	-131,99	3668580,00	-3,92	0,71	-23,42	0,28

Табела 8.9 Резултати експеримената са случајном комбинацијом фактора и оптималном комбинацијом фактора

Комбинација	Укупан трошак (dB)	Укупан трошак (€)	P-D расположивост (dB)	P-D расположивост (%)	D-W расположивост (dB)	D-W расположивост (%)
$A_2 B_1 C_3 D_3 E_3$	-133,43	4847914,43	-16,03	0,158	-11,84	0,32
$A_2 B_2 C_2 D_2 E_1$	-120,39	1919121,49	-1,2	0,87	-16,45	0,29

Експерименти, како за оптималну тако и за случајну комбинацију контролисаних фактора, су спроведени тако да је свака од комбинација подвргнута комбинацијама шума помоћу плана експеримента садржаног у ортогоналној матрици L_8 . За сваку комбинацију шума су узета по три одговора. Укупан број експеримената по комбинацији је био 24.

9. ДОПРИНОС И ЗНАЧАЈ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА

Унапређење квалитета у земљама савремене тржишне привреде представља неопходан услов одржања на тржишту и развоја самог предузећа, па самим тим неопходно је унапређење квалитета посматрати систематски.

Тагучијеве методе представљају једну од техника које служе за унапређење квалитета и пре свега намена им је у растерећењу функције контроле квалитета и обликовање робусних система. Примена Тагучијевих метода захтева одговарајућу употребу статистичког експеримента и метода анализе. Тагучијеве методе и стандардни статистички приступ имају међусобно, поредећи их, више сличности него разлика.

Тагучијева функција губитка омогућава да се за сваки конкретан производ, процес или услугу, увек могу изразити губици у новчаним јединицама. Тагучијев приступ омогућава сабирање губитака по различитим показатељима квалитета и на тај начин се отклања проблем вишедимензионих показатеља квалитета. Овај начин дозвољава истовремено добијање процене свих новчаних средстава које треба уложити у побољшање квалитета, да би се за узврат дошло до жељених економских ефеката који се остварују са повишеним нивоом квалитета.

Тагучијеве методе за анализу не спадају у групу стандардних метода. Поређење Тагучијевих техника са конвенционалном статистичком праксом приказано је табелом 9.1 [12].

Значај Тагучијевих метода је у њиховој способности да доводе до знатних промена и у индустрији Сједињених Америчких Држава, односно до промена у америчким компанијама. У протеклом периоду од пет деценија коришћење традиционалне статистичке теорије није довело до важних промена, већ је традиционална теорија одражавала постојеће стање у индустрији. Промене у пословању компанија постале су очигледније кроз примену статистичког управљања процесом (*SPC*), док традиционално пројектовање експеримената даје значајније ефекте, уколико се модификује у смислу прихватања Тагучијевих метода. Промене које су се догодиле у америчким компанијама применом Тагучијевих метода су:

- дефиниција квалитета,
- систем финансијског управљања,
- пројектовање циљних вредности,
- побољшање производног процеса,
- хоризонталне техничке интеракције и
- индустријски стандарди.

Табела 9.1 Поређење Тагучијевих метода са стандардним статичким пројектом и методама анализе

	Тагучијеве методе	Стандардне методе
1.	<i>S/N</i> односи	Одговарајуће трансформације; анализа подразумева посебно стандардно одступање.
2.	Ортогоналне матрице	Контролни пројекти; факторијално и фракционо факторијални пројекти.
3.	Линеарни графици	Променљиве процедуре и табеле.
4.	Унутрашњи и спољашњи нивои	Анализа осетљивости; промена компоненти анализе; нацрти пројеката, разне компоненте анализе.
5.	Једнопотезни пројекти (носе победничку оптимизацију)	Стратегија секвенцијалног пројекта; одговарајуће површинске методе; компјутерске методе.
6.	Двофазна процедура (користи сигнал и промену сметње)	Посебна анализа локације и распрострањености; важност интеракција; преостала (резидуална) анализа
7.	Комплекс <i>ANOVA</i> за анализу	Нормална вероватноћа учртавања; остале грешке технике; стандардне регресионе технике.
8.	Дислоциране компоненте се не узимају у обзир у анализи	Резидуални елементи за учртавање и/или процедуре анализе резистентних података.

Дефиниција квалитета

Нова дефиниција квалитета представља једну од најважнијих промена у разним компанијама широм Сједињених Америчких Држава, па сходно томе долази до поновног дефинисања квалитета и побољшања квалитета, што у суштини представља последицу примене Тагучијевих метода. Имајућу у виду чињеницу да је главни циљ при пројектовању параметара смањење трошкова уз истовремено смањење варијабилности, ранија дефиниција квалитета као „усглашеност производа са спецификацијом“ не може да опстане у овим новим околностима. У новим околностима побољшање квалитета не подразумева решавање проблема, већ оно подразумева смањење варијабилности од циљних вредности. У Сједињеним Америчким Државама побољшање квалитета се мери на бази годишњих уштеда у трошковима. Пројектовање параметара директно води ка побољшању квалитета, с тим што се побољшање квалитета мери смањењем трошкова. Како су показатељи пословних резултата, углавном засновани на трошковима, пошто је побољшање квалитета усмерено ка смањењу трошкова, тако и побољшање квалитета постаје циљ коме теже запослени у компанијама.

Резултати истраживања везани за примену Тагучијевих метода у америчким компанијама, углавном се анализирају на основу годишњих уштеда у трошковима. Годишње уштеде представљају у суштини квантитативно истраживање резултата пословања. Дати су груби резултати три америчке компаније (једна велика, једна средња и једна мала). Корпорација *ITT* (велика) је од прве половине 1983. године оспособила приближно 1200 инжењера за примену Тагучијевих метода и спровела је преко 2000 истраживања. Компанија *Sheller Globe* (средња), спровела је обуку око 120 инжењера који су потом обавили око 225 истраживања. Извршена истраживања су компанији донела 10 милиона долара уштеде. Компанија *Flex Products*, са 12 обучених инжењера и 75 спроведених истраживања остварила је 1,4 милиона долара уштеде.

Велики део уштеда у трошковима остварених применом Тагучијевих метода се преноси на купца чиме се обезбеђује већа конкурентност и знатније учешће компанија на

тржишту. Побољшање квалитета применом ових метода постаје аутоматско пошто се и уштеде у трошковима реализују побољшањем квалитета, то јест смањењем варијабилности. *Ford* је била водећа америчка компанија која је променила политику квалитета захваљујући примени Тагучијеве технике побољшања квалитета и поред чињенице да су се инжењери компанија *Bell Labs* и *Xerox* бавили први експериментима са овом техником на америчком тлу. *General Motors* је текође прихватио ове методе 1987. године.

Систем финансијског управљања

Систем финансијског управљања је промена која представља последицу примене Тагучијевих метода, односно примене функције губитка квалитета. Применом функције губитка квалитета омогућено је квантитативно изражавање годишњих уштеда у трошковима у функцији побољшања карактеристике производа усмерених ка достизању циљних вредности, чак и када се наведена побољшања остварују у оквиру дефинисаних спецификација [20]. Ово ствара сасвим нову економску перспективу везану за квалитет, такође подстиче и континуална побољшања као метода за смањење трошкова у америчким фирмама. Каришћењем Тагучијеве функције губитка квалитета за анализу интерних губитака према критеријуму сортирања, у поређењу са губицима према критеријуму дисперзије, стручњаци су израчунали да ће потенцијалне уштеде бити три пута веће од уштеда које је могуће тренутно евидентирати кроз свој систем управљања трошковима. Уштеде које је могуће остварити овим путем касније се употребљавају за финансијска улагања у побољшање пројектовања. На овај начин компаније мењају свој финансијски систем како би могле да реализују годишње уштеде добијене овом функцијом губитка квалитета.

Пројектовање циљних вредности

Функција квалитета планирања и пројектовање производа мора да успостави циљне вредности, како би се обезбедила ефективност пројектовања параметара. Све се то чини ради задовољења потреба купца. Када се успоставе циљне вредности, у раној фази развоја производа, потребно је оптимизирати пројекте производа функцијом пројектовања, нарочито у случају међусобно сукобљених захтева. Међусобни компромиси (купац/продавац) који се чине у раним фазама, што је чест случај у америчким компанијама, онемогућавају оптимизацију производа у циљу побољшања његове функције. Све ово условљава битне промене у самом начину пројектовања.

Побољшање производног процеса

Према традиционалном схватању сматра се да су сви делови производа који се налазе у границама спецификације усаглашени делови и по овом традиционалном мишљењу то представља све оно што се од производа и захтева. Међутим, Тагучијеве методе значајно мењају систем производње. Применом методе пројектовања параметара и линијске контроле квалитета долази до [20]:

- континуалног побољшања које се одражава кроз смањење варијабилности,
- стварања нових смерница за побољшање самог процеса обезбеђења средстава и
- мањег ослањања на контролне карте.

Традиционална контрола путем контролника „иде/не иде“ замењена је анализом циљева или такозваном анализом „оптималне вредности“. Ово подразумева активност функције квалитета за решавање проблема везаних за смањење варијабилности. Сви запослени се тада усредсређују на циљне вредности.

Нове смернице забрањују трошење капитала све док се постојећа опрема не побољша применом Тагучијевих метода. Нове смернице оптимизирају постојећу опрему пројектовањем параметара пре него што се одобри пројекат за набавку исте или модерније опреме.

Фирме које су примениле контролу квалитета на производној линији смањиле су потребу за активностима статистичког управљања процесом (*SPC*), методи која није заснована на трошковима. Метода контроле квалитета на производној линији, коју је Тагучи развио, обухвата обрачун трошкова са аспекта обезбеђивања оптималних интервала контролисања и испитивања, што је у Јапану нашло широку примену.

Хоризонталне техничке интеракције

Тагучијеве методе захтевају међуфункционалну тимску интеракцију, што доводи до промена у начину пословања фирми, а све то у циљу побољшања квалитета. У компанијама које спровode тимску обуку за примену Тагучијевих метода, уз практично обављање истраживања и представљање резултата, појављује се интензивна хоризонтална интеракција. То ефективно мења интерно повезивање са вертикалног (глас руководиоца) на хоризонтално (глас купца) повезивање.

Индустријски стандарди

У Јапану удружење за стандарде уводи општа правила за дефинисање толеранција на сродним компонентама на основу следећих аспеката:

- трошкова дисперзије,
- способности процеса и
- вредности односа S/N .

Јапански стандарди, који користе функцију губитка квалитета, дефинисани су тако што се истовремено остварују најнижи трошкови и највиши квалитет. У различитим индустријским делатностима аспект стандардизације постаје додатна предност за повећање ефикасности пројектних активности. Применом технологије Тагучијевих метода успостављају се уопштена правила за дефинисање толеранција на бази резултата економских и функционалних анализа.

9.1 Предности и недостаци Тагучијевих метода

Предност Тагучијевих метода је што наглашава средњу карактеристичну вредност перформанси која је близу циљне вредности, а не као вредност у оквиру одређених спецификацијских граница, чиме се побољшава квалитет производа. Поред тога, Тагучијева метода за експериментални дизајн је једноставана и лака за примену у многим инжењерским ситуацијама, што је моћан и једноставан алат. Може се користити за брзо сужавање обима истраживачког пројекта или да идентификује проблеме у процесу производње са подацима који већ постоје. Такође, Тагучијева метода омогућава анализу различитих параметара без претерано великог броја експеримената. На пример, за процес са 8 параметара, сваки са 3 нивоа, било би потребно извршити 6561 (3^8) експеримената за тестирање свих комбинација променљивих. Међутим, коришћењем Тагучијеве ортогоналне матрице, неопходно је извршити само 18 експеримената. На тај начин, омогућена је идентификација кључних параметара који имају највећи утицај на перформансе карактеристичне вредности, тако да је могуће извести експеримент са овим параметрима, а параметри који имају мали ефекат могу се игнорисати [6].

Главни недостатак Тагучијевих метода је у томе што су добијени резултати само релативни и тачно не показује како параметар који има највећи утицај утиче на перформансе карактеристичне вредности. Пошто се применом Тагучијевих ортогоналних матрица не користе све могуће комбинације променљивих, ова метода не би требала да се користи у случајевима када је потребно извршити експерименте за све комбинације променљивих. Тагучијева метода је критикована због тешкоће прорачуна при интеракцији између параметара. Осим тога, Тагучијева метода се бави пројектовањем квалитета, а не побољшањем лошег квалитета, па се најефикасније примењује у раним фазама развоја процеса. Употреба експерименталног дизајна може бити мање исплатива.

10. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

Полиетилен, *PE (Polyethylene)* је полимерни материјал који се данас највише користи у индустријској производњи. Откривен је 1889. године, а први пут је у индустрији коришћен 1939. године. Највише се употребљава за производњу амбалаже, фолија, резервоара, боца, црева за наводњавање, посуда у домаћинству и делова беле технике [21].

У току израде мастер рада вршено је испитивање *PE – Hostalen GC 7260* који се користи за кошеве замрзивача. Разлог тога је пуцање и пропадање серије бризганих кошева од *Hostalena* приликом употребе. Проблем се јавља када кош после извесног времена под оптерећењем и сниженом температуром пуца. Карактеристике *Hostalena GC 7260*: антиоксидант, добро течење, добра обрадивост, висока густина, висока чврстоћа. Остале карактеристике *Hostalen GC 7260* су приказане у табели 10.1.

Hostalen GC 7260 је полиетилен високе густине која се користи у општој намени, бризгањем се добијају делови као што су затварачи, делови играчака, делови за купатила и различите врсте паковања. Овај материјал показује добро течење и високу крутост и користи се за ињекционо бризгање и друге процесе конверзије. Није намењен за употребу у медицинске и фармацеутске сврхе [22].

Епрувете које се користе за испитивање поменутог проблема су бризгана од *Hostalena GC 7260* на температури 210°C при притиску од 100 bar, а хлађене су у калупу 35 s. Бризгање је извршено у фабрици 21. Октобар у Крагујевцу на машини *IDRA* (слика 10.1)



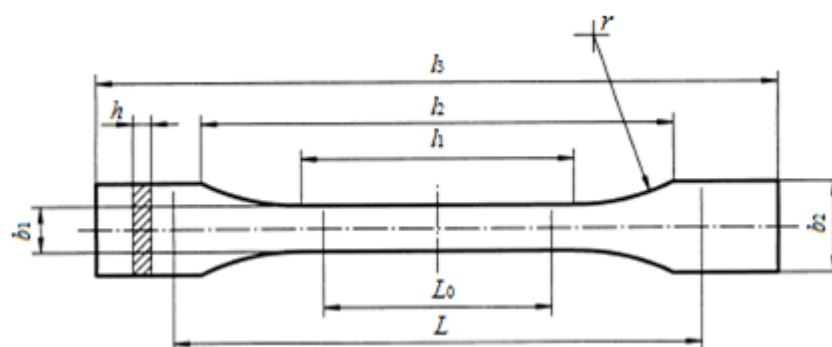
Слика 10.1 Машина за бризгање IDRA

Табела 10.1 Карактеристике Hostalena GC 7260

Физичке карактеристике	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Густина	0,960	g/cm ³	ISO 1183
Брзина протока - отопљене масе			ISO 1133
190°C/2,16 kg	8,0	g/10 min	
190°C/5,0 kg	23	g/10 min	
FNCT ² (50 °C)	2,5	H	Интерна метода
Карактеристике тврдоће	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Тврдоћа по Шору (<i>Shore</i>), скала <i>D</i>	61		ISO 868
Тврдоћа притиском кугле - по Бринелу (<i>Brinell</i>)	58,0		ISO 2039 – 1
Механичке карактеристике	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Модул еластичности	1450	MPa	ISO 527 – 2
Напон кидања	30,0	MPa	ISO 527 – 2
Напон затезања	7,0	%	ISO 527 – 2
Карактеристике при удару	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Отпорност на жилавост – Шарпи (<i>Charpy</i>)			ISO 179 / 1eA
-30°C	4,5	kJ/m ²	
23°C	4,0	kJ/m ²	
Термичке карактеристике	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Викерсова температура омекшавања	74,0	°C	ISO 306/B50

Епрувете које се користе су стандардног облика (*ISO 527-2:1996*), типа *A* [23]. На слици 10.2 дат је приказ епрувете са њеним димензијама.

Епрувете су испитиване на затезање на кидалици *ZWICK* (Computerized materials testing machine *zwick/roell Z 100* – компјутеризовани мерни систем за испитивање материјала *ZWICK/ROELL Z 100*) која је приказана на слици 10.3. Испитивање је вршено у лабораторији Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.



Слика 10.2 Димензије епрувете за испитивање затезањем

На слици 10.2 су:

- l_3 - укупна дужина епрувете, најмање 150 mm,
- l_1 - дужина суженог паралелног дела 80 ± 2 mm,
- b - ширина суженог паралелног дела $10 \pm 0,2$ mm,
- r - радијус 20 до 25 mm,
- l_2 - дужина између паралелних страна 104 до 113 mm,
- b_2 - ширина крајева $20 \pm 0,2$ mm,
- b_1 - ширина суженог дела $10 \pm 0,2$ mm,
- h - дебљина $4 \pm 0,2$ mm,
- L_0 - размак између мерних ознака (мерна дужина) $50 \pm 0,5$ mm и
- L - почетни размак између чељусти 115 ± 1 mm.



Слика 10.3 Компјутеризовани мерни систем за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z 100

Пре него што је извршено затезање различитим брзинама, епрувете су подвргаване различитим условима, третиране су у води и на сниженим температурама, док су подједнако биле изложене *UV* зрачењу.

Сходно Тагучијевим методама, фактори који утичу на затезање епрувете су брзина, температура, третирање у води и *UV* зрачење.

Брзине које се користе за испитивање су одабране на основу стандарда *ISO 527-1:1996* (Одређивање затезних својстава пластичних маса). Коришћене брзине су 50, 100 и 200 mm/min [24].

Температура замрзавања је 0°C , замрзивач хлади углавном на -20°C , док је температура до које може да се користи *PE* -40°C , тако да су то и коришћене температуре приликом испитивања.

Поједине епрувете нису третиране водом, а остале су третиране 1 дан (24 h), односно 7 дана (168 h). Све епрувете су подједнако биле изложене сунчевој светлости.

Помоћу Тагучијевих метода, робусног дизајна, ортогоналних матрица и S/N односа, ће се испитати утицај поменутих фактора, прво на затезну чврстоћу, а затим на издужење.

Хлађење епрувета је извршено помоћу ацетона и сувог леда, док се температура мерила термометром. Овакав начин хлађења је изведен због непостојања коморе за хлађење на кидалици. Температура је покушана да се измери инструментом за бесконтактно мерење температуре у тачки (ST8855), али мерење није било успешно због прозирности полиетилена. Због тога је коришћен термометар за мерење температуре. Епрувете су хлађене за 10°C нижу температуру од поменуте због загревања епрувети док се поставе у чељусти кидалице. На слици 10.4 приказано је како је вршено хлађење, а на слици 10.5 приказано је затезање епрувете.



Слика 10.4 Хлађење епрувета



Слика 10.5 Затезање епрувете

10.1 Одређивање ортогоналне матрице

Потребно је одредити ортогоналну матрицу на основу фактора и нивоа фактора.

Услови за сваки параметар и ниво су:

- **A: Брзина**
 - $A1 = 50 \text{ mm/min}$
 - $A2 = 100 \text{ mm/min}$
 - $A3 = 200 \text{ mm/min}$
- **B: Температура**
 - $B1 = 0^\circ\text{C}$
 - $B2 = -20^\circ\text{C}$
 - $B3 = -40^\circ\text{C}$
- **C: Третирање водом**
 - $C1 = 0\text{h}$
 - $C2 = 24\text{h}$
 - $C3 = 168\text{h}$
- **D: UV зрачење**
 - $D1 = D2 = D3 = 168 \text{ h}$

У овом случају се користи $L9$ матрица за четири променљиве (табела 7.4) са по три нивоа. Матрица треба да се попуни као што је приказано табелом 10.2.

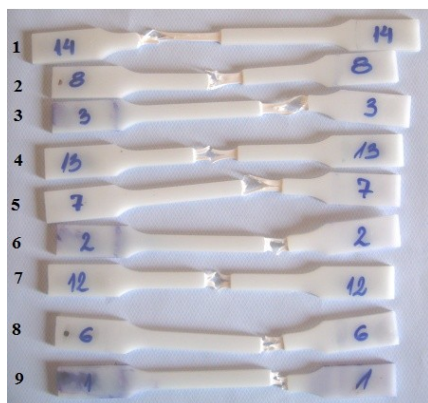
Табела 10.2 Матрица са вредностима променљивих на различитим нивоима

Број експеримената	Брзина	Температура	Вода	UV зрачење
1	50	0	0	168
2	50	-20	24	168
3	50	-40	168	168
4	100	0	24	168
5	100	-20	168	168
6	100	-40	0	168
7	200	0	168	168
8	200	-20	0	168
9	200	-40	24	168

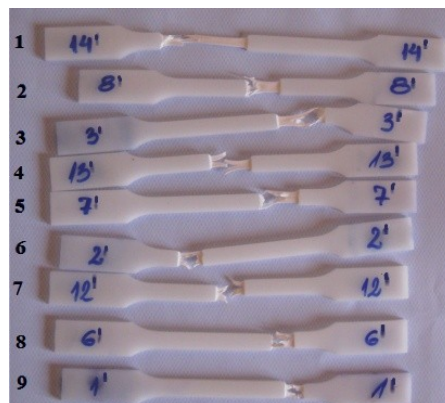
Ова поставка омогућава да се изврши тестирање за све четири променљиве, без потребе да се изврши 64 (4^3 , где је 4 број променљивих, а 3 број нивоа за сваку променљиву) експеримената. Последња колона ће бити занемарена, јер су епрувете биле изложене UV зрачењу исти временски период.

10.2 Утицај фактора на затезну чврстоћу

Затезна чврстоћа која се добија спроведеним испитивањем за свако тестирање по три узорка, је у табели 10.3, док су на сликама 10.6, 10.7 и 10.8 приказане епрувете после кидања. Потребно је израчунати S/N однос за сваки експеримент, креирати график одзива и одредити параметаре који имају највећи и најмањи утицај на принос.



Слика 10.6 Епрувете после кидања, девет испитивања, први узорак



Слика 10.7 Епрувете после кидања, девет испитивања, други узорак



Слика 10.8 Епрувете после кидања, девет испитивања, трећи узорак

Табела 10.3 Приказ добијених резултата затезне чврстоће у МПа

Број експеримената	A	B	C	D	Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3	Средња вредност
1	50	0	0	168	34,31	34,18	34,57	34,35
2	50	-20	24	168	38,91	38,88	38,90	38,89
3	50	-40	168	168	37,88	37,80	37,92	37,86
4	100	0	24	168	34,68	34,73	34,52	34,65
5	100	-20	168	168	37,84	37,82	37,81	37,82
6	100	-40	0	168	39,47	39,52	39,46	39,48
7	200	0	168	168	35,25	35,02	35,20	35,16
8	200	-20	0	168	37,64	37,73	37,51	37,63
9	200	-40	24	168	39,11	39,08	39,02	39,07

Након добијених резултата треба да се израчуна S/N односа за све извршене експерименте. Добијени резултати S/N односа приказани су у табели 10.4.

1. Израчунавање S/N односа за први експеримент

$$\begin{aligned}\bar{y}_1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{34,31 + 34,18 + 34,57}{3} = 34,35 \\ S_1 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_1)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_1)^2}{n-1} \\ S_1^2 &= \frac{(34,31 - 34,35)^2 + (34,18 - 34,35)^2 + (34,57 - 34,35)^2}{3-1} = \\ &= \frac{0,0016 + 0,0289 + 0,0484}{2} = 0,03945 \\ S/N_1 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_1^2}{S_1^2} \right) = 10 \log \frac{34,35^2}{0,03945} = 10 \log 29909,31559 = 44,758\end{aligned}$$

2. Израчунавање S/N односа за други експеримент

$$\begin{aligned}\bar{y}_2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{38,91 + 38,88 + 38,90}{3} = 38,89 \\ S_2 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_2)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_2)^2}{n-1} \\ S_2^2 &= \frac{(38,91 - 38,89)^2 + (38,88 - 38,89)^2 + (38,90 - 38,89)^2}{3-1} = \\ &= \frac{0,0004 + 0,0001 + 0,0001}{2} = 0,0003 \\ S/N_2 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_2^2}{S_2^2} \right) = 10 \log \frac{38,89^2}{0,0003} = 10 \log 5041440,333 = 67,025\end{aligned}$$

3. Израчунавање S/N односа за трећи експеримент

$$\begin{aligned}\bar{y}_3 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{37,88 + 37,80 + 37,92}{3} = 37,86 \\ S_3 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_3)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_3 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_3)^2}{n-1}\end{aligned}$$

$$S_3^2 = \frac{(37,88 - 37,86)^2 + (37,80 - 37,86)^2 + (37,92 - 37,86)^2}{3 - 1} = \frac{0,0004 + 0,0036 + 0,0036}{2} = 0,0038$$

$$S/N_3 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_3^2}{S_3^2} \right) = 10 \log \frac{37,86^2}{0,0038} = 10 \log 377205,1579 = 55,766$$

4. Израчунавање S/N односа за четврти експеримент

$$\bar{y}_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{34,68 + 34,73 + 34,52}{3} = 34,65$$

$$S_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_4)^2}{n - 1}} \Rightarrow S^2_4 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_4)^2}{n - 1}$$

$$S_4^2 = \frac{(34,68 - 34,65)^2 + (34,73 - 34,65)^2 + (34,52 - 34,65)^2}{3 - 1} = \frac{0,0009 + 0,0064 + 0,0169}{2} = 0,0121$$

$$S/N_4 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_4^2}{S_4^2} \right) = 10 \log \frac{34,65^2}{0,0121} = 10 \log 99225 = 49,966$$

5. Израчунавање S/N односа за пети експеримент

$$\bar{y}_5 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{37,84 + 37,82 + 37,81}{3} = 37,82$$

$$S_5 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_5)^2}{n - 1}} \Rightarrow S^2_5 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_5)^2}{n - 1}$$

$$S_5^2 = \frac{(37,84 - 37,82)^2 + (37,82 - 37,82)^2 + (37,81 - 37,82)^2}{3 - 1} = \frac{0,0004 + 0 + 0,0001}{2} = 0,00025$$

$$S/N_5 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_5^2}{S_5^2} \right) = 10 \log \frac{37,82^2}{0,00025} = 10 \log 5721409,6 = 67,575$$

6. Израчунавање S/N односа за шести експеримент

$$\bar{y}_6 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{39,47 + 39,52 + 39,46}{3} = 39,48$$

$$\begin{aligned}
 S_6 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_6)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_6 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_6)^2}{n-1} \\
 S_6^2 &= \frac{(39,47 - 39,48)^2 + (39,52 - 39,48)^2 + (39,46 - 39,48)^2}{3-1} = \\
 &= \frac{0,0001 + 0,0016 + 0,0004}{2} = 0,00105 \\
 S/N_6 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_6^2}{S_6^2} \right) = 10 \log \frac{39,48^2}{0,00105} = 10 \log 1484448 = 61,716
 \end{aligned}$$

7. Израчунавање S/N односа за седми експеримент

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_7 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{35,25 + 35,02 + 35,20}{3} = 35,16 \\
 S_7 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_7)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_7 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_7)^2}{n-1} \\
 S_7^2 &= \frac{(35,25 - 35,16)^2 + (35,02 - 35,16)^2 + (35,20 - 35,16)^2}{3-1} = \\
 &= \frac{0,0081 + 0,0196 + 0,0016}{2} = 0,01465 \\
 S/N_7 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_7^2}{S_7^2} \right) = 10 \log \frac{35,16^2}{0,01465} = 10 \log 84384 = 49,263
 \end{aligned}$$

8. Израчунавање S/N односа за осми експеримент

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_8 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{37,64 + 37,73 + 37,51}{3} = 37,63 \\
 S_8 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_8)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_8 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_8)^2}{n-1} \\
 S_8^2 &= \frac{(37,64 - 37,63)^2 + (37,73 - 37,63)^2 + (37,51 - 37,63)^2}{3-1} = \\
 &= \frac{0,0001 + 0,01 + 0,0144}{2} = 0,01225 \\
 S/N_8 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_8^2}{S_8^2} \right) = 10 \log \frac{37,63^2}{0,01225} = 10 \log 115593,2163 = 50,629
 \end{aligned}$$

9. Израчунавање S/N односа за девети експеримент

$$\bar{y}_9 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{39,11 + 39,08 + 39,02}{3} = 39,07$$

$$S_9 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_9)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_9 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_9)^2}{n-1}$$

$$S_9^2 = \frac{(39,11 - 39,07)^2 + (39,08 - 39,07)^2 + (39,02 - 39,07)^2}{3-1} =$$

$$= \frac{0,0016 + 0,0001 + 0,0025}{2} = 0,0021$$

$$S/N_9 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_9^2}{S_9^2} \right) = 10 \log \frac{39,07^2}{0,0021} = 10 \log 726888,0476 = 58,615$$

Табела 10.4 Резултати S/N односа

Број експеримената	A	B	C	D	Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3	S/N
1	1	1	1	1	34,31	34,18	34,57	44,758
2	1	2	2	2	38,91	38,88	38,90	67,025
3	1	3	3	3	37,88	37,80	37,92	55,766
4	2	1	2	3	34,68	34,73	34,52	49,966
5	2	2	3	1	37,84	37,82	37,81	67,575
6	2	3	1	2	39,47	39,52	39,46	61,716
7	3	1	3	2	35,25	35,02	35,20	49,263
8	3	2	1	3	37,64	37,73	37,51	50,629
9	3	3	2	1	39,11	39,08	39,02	58,615

Потребно је израчунати просечне вредности S/N односа за сваки фактор. Добијени резултати за све факторе приказани су у табели 10.8.

1. Прорачун просечног S/N односа за фактор A (брзина)

Табела 10.5 омогућава праћење фактора A и S/N односа за различите нивое.

Табела 10.5 Означени фактор A и S/N однос и нивои који се посматрају за одређивење просечног S/N односа за фактор A

Број експеримената	A	B	C	D	S/N
1	1	1	1	1	44,758
2	1	2	2	2	67,025
3	1	3	3	3	55,766
4	2	1	2	3	49,966
5	2	2	3	1	67,575
6	2	3	1	2	61,716
7	3	1	3	2	49,263
8	3	2	1	3	50,629
9	3	3	2	1	58,615

$$S/N_{A1} = \frac{(S/N_1 + S/N_2 + S/N_3)}{3} = \frac{44,758 + 67,025 + 55,766}{3} = 55,85$$

$$S/N_{A2} = \frac{(S/N_4 + S/N_5 + S/N_6)}{3} = \frac{49,966 + 67,575 + 61,716}{3} = 59,75$$

$$S/N_{A3} = \frac{(S/N_7 + S/N_8 + S/N_9)}{3} = \frac{49,263 + 50,629 + 58,615}{3} = 52,84$$

2. Прорачун просечног S/N односа за фактор B (температура)

Табела 10.6 омогућава праћење фактора B и S/N односа за различите нивое.

Табела 10.6 Означени фактор B и S/N однос и нивои који се посматрају за одређивење просечног S/N односа за фактор B

Број експеримената	A	B	C	D	S/N
1	1	1	1	1	44,758
2	1	2	2	2	67,025
3	1	3	3	3	55,766
4	2	1	2	3	49,966
5	2	2	3	1	67,575
6	2	3	1	2	61,716
7	3	1	3	2	49,263
8	3	2	1	3	50,629
9	3	3	2	1	58,615

$$S/N_{B1} = \frac{(S/N_1 + S/N_4 + S/N_7)}{3} = \frac{44,758 + 49,966 + 49,263}{3} = 47,99$$

$$S/N_{B2} = \frac{(S/N_2 + S/N_5 + S/N_8)}{3} = \frac{67,025 + 67,575 + 50,629}{3} = 61,74$$

$$S/N_{B3} = \frac{(S/N_3 + S/N_6 + S/N_9)}{3} = \frac{55,766 + 61,716 + 58,615}{3} = 58,70$$

3. Прорачун просечног S/N односа за фактор C (дејство воде)

Табела 10.7 омогућава праћење фактора C и S/N односа за различите нивое.

Табела 10.7 Означени фактор C и S/N однос и нивои који се посматрају за одређивење просечног S/N односа за фактор C

Број експеримената	A	B	C	D	S/N
1	1	1	1	1	44,758
2	1	2	2	2	67,025
3	1	3	3	3	55,766
4	2	1	2	3	49,966
5	2	2	3	1	67,575
6	2	3	1	2	61,716
7	3	1	3	2	49,263
8	3	2	1	3	50,629
9	3	3	2	1	58,615

$$S/N_{C1} = \frac{(S/N_1 + S/N_6 + S/N_8)}{3} = \frac{44,758 + 61,716 + 50,629}{3} = 52,37$$

$$S/N_{C2} = \frac{(S/N_2 + S/N_4 + S/N_9)}{3} = \frac{67,025 + 49,966 + 58,615}{3} = 58,54$$

$$S/N_{C3} = \frac{(S/N_3 + S/N_5 + S/N_7)}{3} = \frac{55,766 + 67,575 + 49,263}{3} = 57,53$$

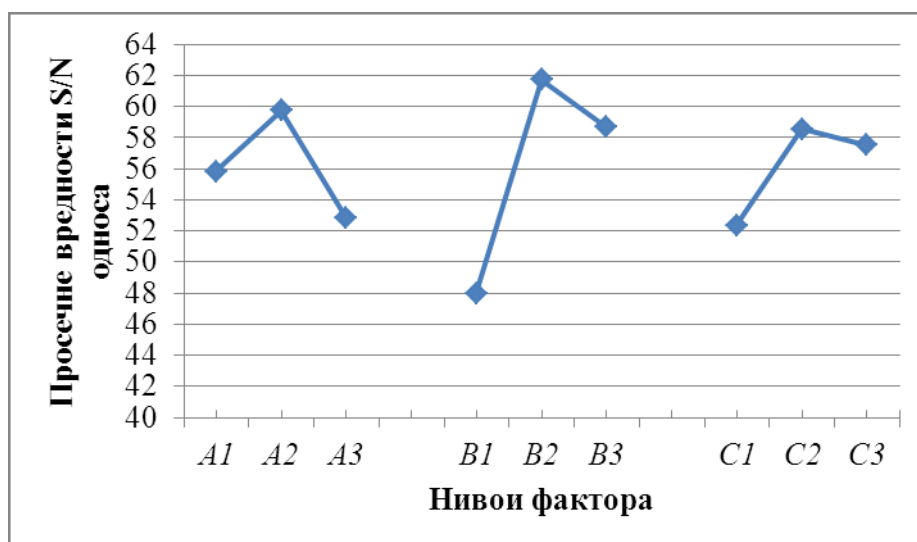
4. Прорачун просечног S/N односа за фактор D (изложеност UV зрачењу)

У овом случају неће се разматрати фактор D , нити ће се израчунавати просечан S/N однос за поменути фактор, јер су све епрувете које су тестиране подједнако биле изложене UV зрачењу.

Табела 10.8 Просечне вредности S/N односа за све факторе

Ниво	A	B	C	D
1	55,85	47,99	52,37	
2	59,75	61,74	58,54	
3	52,84	58,70	57,53	

График одзива фактора A , B и C на затезну чврстоћу за прорачунате S/N односе када је номинална вредност најбоља приказан је на слици 10.9.



Слика 10.9 График одзива фактора A, B и C на затезну чврстоћу

На основу добијених просечних вредности S/N односа за све факторе врши се израчунавање ефекта ових фактора на основу одређивања опсега дејста (табела 10.9):

$$\Delta = \text{Max} - \text{Min}, \quad (10.1)$$

где је:

Δ - опсег дејства,

Max - максимална просечна вредност S/N односа за фактор и

Min - минимална просечна вредност S/N односа за фактор.

$$\Delta_A = \text{Max}_A - \text{Min}_A = 59,75 - 52,84 = 6,91$$

$$\Delta_B = \text{Max}_B - \text{Min}_B = 61,74 - 47,99 = 13,75$$

$$\Delta_C = \text{Max}_C - \text{Min}_C = 58,54 - 52,37 = 6,17$$

Табела 10.9 Опсег дејства фактора и рангирање фактора

Ниво	A	B	C	D
1	55,85	47,99	52,37	
2	59,75	61,74	58,54	
3	52,84	58,70	57,53	
Δ	6,91	13,75	6,17	
Ранг	2	1	3	4

Уочава се да највећи утицај на затезну чврстоћу има температура, а најмање утицаја има вода којом су третиране епрувете, док је утицај UV зрачења занемарен јер су све епрувете које су тестиране подједнако биле изложене зрачењу.

10.3 Утицај фактора на издужење

Сprovedеним испитивањем поред затезне чврстоће добијени су и резултати процентуалног издужења од номиналне вредности, дужине 80 mm епрувете за свако тестирање. У табели 10.10 приказани су резултати процентуалног издужења за три узорка.

Табела 10.10 Приказ добијених резултата издужења у %

Број експеримента	A	B	C	D	Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3	Средња вредност
1	50	0	0	168	73,12	72,84	73,67	73,21
2	50	-20	24	168	32,79	32,76	32,78	32,78
3	50	-40	168	168	40,73	40,64	40,77	40,71
4	100	0	24	168	39,83	39,89	39,64	39,79
5	100	-20	168	168	34,76	34,74	34,73	34,74
6	100	-40	0	168	21,62	21,64	21,61	21,62
7	200	0	168	168	27,81	27,62	27,77	27,73
8	200	-20	0	168	19,05	19,09	18,97	19,04
9	200	-40	24	168	13,93	13,92	13,89	13,91

Као у претходном прорачуну потребно је да се израчуна S/N однос за све извршене експерименте. Добијени резултати S/N односа приказани су у табели 10.11.

1. Израчунавање S/N односа за први експеримент

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{73,12 + 72,84 + 73,67}{3} = 73,21$$

$$S_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_1)^2}{n-1}} \Rightarrow S_1^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_1)^2}{n-1}$$

$$S_1^2 = \frac{(73,12 - 73,21)^2 + (72,84 - 73,21)^2 + (73,67 - 73,21)^2}{3-1} =$$

$$= \frac{0,0081 + 0,1369 + 0,2116}{2} = 0,1783$$

$$S/N_1 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_1^2}{S_1^2} \right) = 10 \log \frac{73,21^2}{0,1783} = 10 \log 30060,03421 = 44,78$$

2. Израчунавање S/N односа за други експеримент

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{32,79 + 32,76 + 32,78}{3} = 32,78$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_2)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_2)^2}{n-1} \\
 S^2_2 &= \frac{(32,79 - 32,78)^2 + (32,76 - 32,78)^2 + (32,78 - 32,78)^2}{3-1} = \\
 &= \frac{0,0001 + 0,0004 + 0}{2} = 0,00025 \\
 S/N_2 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_2^2}{S^2_2} \right) = 10 \log \frac{32,78^2}{0,00025} = 10 \log 4298113,6 = 66,33
 \end{aligned}$$

3. Израчунавање S/N односа за трећи експеримент

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_3 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{40,73 + 40,64 + 40,77}{3} = 40,71 \\
 S_3 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_3)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_3 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_3)^2}{n-1} \\
 S^2_3 &= \frac{(40,73 - 40,71)^2 + (40,64 - 40,71)^2 + (40,77 - 40,71)^2}{3-1} = \\
 &= \frac{0,0004 + 0,0049 + 0,0036}{2} = 0,00445 \\
 S/N_3 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_3^2}{S^2_3} \right) = 10 \log \frac{40,71^2}{0,00445} = 10 \log 372427,8876 = 55,71
 \end{aligned}$$

4. Израчунавање S/N односа за четврти експеримент

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_4 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{39,83 + 39,89 + 39,64}{3} = 39,79 \\
 S_4 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_4)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_4 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_4)^2}{n-1} \\
 S^2_4 &= \frac{(39,83 - 39,79)^2 + (39,89 - 39,79)^2 + (39,64 - 39,79)^2}{3-1} = \\
 &= \frac{0,0016 + 0,01 + 0,0225}{2} = 0,01705 \\
 S/N_4 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_4^2}{S^2_4} \right) = 10 \log \frac{39,79^2}{0,01705} = 10 \log 92858,8915 = 49,68
 \end{aligned}$$

5. Израчунавање S/N односа за пети експеримент

$$\begin{aligned}\bar{y}_5 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{34,76 + 34,74 + 34,73}{3} = 34,74 \\ S_5 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_5)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_5 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_5)^2}{n-1} \\ S_5^2 &= \frac{(34,76 - 34,74)^2 + (34,74 - 34,74)^2 + (34,73 - 34,74)^2}{3-1} = \\ &= \frac{0,0004 + 0 + 0,0001}{2} = 0,00025 \\ S/N_5 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_5^2}{S_5^2} \right) = 10 \log \frac{34,74^2}{0,00025} = 10 \log 4827470,4 = 66,84\end{aligned}$$

6. Израчунавање S/N односа за шести експеримент

$$\begin{aligned}\bar{y}_6 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{21,62 + 21,64 + 21,61}{3} = 21,62 \\ S_6 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_6)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_6 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_6)^2}{n-1} \\ S_6^2 &= \frac{(21,62 - 21,62)^2 + (21,64 - 21,62)^2 + (21,61 - 21,62)^2}{3-1} = \\ &= \frac{0 + 0,0004 + 0,0001}{2} = 0,00025 \\ S/N_6 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_6^2}{S_6^2} \right) = 10 \log \frac{21,62^2}{0,00025} = 10 \log 1869697,6 = 62,72\end{aligned}$$

7. Израчунавање S/N односа за седми експеримент

$$\begin{aligned}\bar{y}_7 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{27,81 + 27,62 + 27,77}{3} = 27,73 \\ S_7 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_7)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_7 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_7)^2}{n-1} \\ S_7^2 &= \frac{(27,81 - 27,73)^2 + (27,62 - 27,73)^2 + (27,77 - 27,73)^2}{3-1} = \\ &= \frac{0,0064 + 0,0121 + 0,0016}{2} = 0,01005 \\ S/N_7 &= 10 \log \left(\frac{\bar{y}_7^2}{S_7^2} \right) = 10 \log \frac{27,73^2}{0,01005} = 10 \log 76512,72637 = 48,84\end{aligned}$$

8. Израчунавање S/N односа за осми експеримент

$$\bar{y}_8 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{19,05 + 19,09 + 18,97}{3} = 19,04$$

$$S_8 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_8)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_8 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_8)^2}{n-1}$$

$$S^2_8 = \frac{(19,05 - 19,04)^2 + (19,09 - 19,04)^2 + (18,97 - 19,04)^2}{3-1} =$$

$$= \frac{0,0001 + 0,0025 + 0,0049}{2} = 0,0075$$

$$S/N_8 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_8^2}{S_8^2} \right) = 10 \log \frac{19,04^2}{0,0075} = 10 \log 48336,21333 = 46,84$$

9. Израчунавање S/N односа за девети експеримент

$$\bar{y}_9 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{13,93 + 13,92 + 13,89}{3} = 13,91$$

$$S_9 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_9)^2}{n-1}} \Rightarrow S^2_9 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_9)^2}{n-1}$$

$$S^2_9 = \frac{(13,93 - 13,91)^2 + (13,92 - 13,91)^2 + (13,89 - 13,91)^2}{3-1} =$$

$$= \frac{0,0004 + 0,0001 + 0,0004}{2} = 0,00045$$

$$S/N_9 = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_9^2}{S_9^2} \right) = 10 \log \frac{13,91^2}{0,00045} = 10 \log 429973,5556 = 56,33$$

Табела 10.11 Резултати S/N односа

Број експеримената	A	B	C	D	Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3	S/N
1	1	1	1	1	73,12	72,84	73,67	44,78
2	1	2	2	2	32,79	32,76	32,78	66,33
3	1	3	3	3	40,73	40,64	40,77	55,71
4	2	1	2	3	39,83	39,89	39,64	49,68
5	2	2	3	1	34,76	34,74	34,73	66,84
6	2	3	1	2	21,62	21,64	21,61	62,72
7	3	1	3	2	27,81	27,62	27,77	48,84
8	3	2	1	3	19,05	19,09	18,97	46,84
9	3	3	2	1	13,93	13,92	13,89	56,33

Израчунае просечне вредности S/N односа за сваки фактор приказани су у табели 10.15.

1. Прорачун просечног S/N односа за фактор A (брзина)

Табела 10.12 омогућава праћење фактора A и S/N односа за различите нивое.

Табела 10.12 Означени фактор A и S/N однос и нивои који се посматрају за одређивење просечног S/N односа за фактор A

Број експеримената	A	B	C	D	S/N
1	1	1	1	1	44,78
2	1	2	2	2	66,33
3	1	3	3	3	55,71
4	2	1	2	3	49,68
5	2	2	3	1	66,84
6	2	3	1	2	62,72
7	3	1	3	2	48,84
8	3	2	1	3	46,84
9	3	3	2	1	56,33

$$S/N_{A1} = \frac{(S/N_1 + S/N_2 + S/N_3)}{3} = \frac{44,78 + 66,33 + 55,71}{3} = 55,607$$

$$S/N_{A2} = \frac{(S/N_4 + S/N_5 + S/N_6)}{3} = \frac{49,68 + 66,84 + 62,72}{3} = 52,747$$

$$S/N_{A3} = \frac{(S/N_7 + S/N_8 + S/N_9)}{3} = \frac{48,84 + 46,84 + 56,33}{3} = 50,67$$

2. Прорачун просечног S/N односа за фактор B (температура)

Табела 10.13 омогућава праћење фактора B и S/N односа за различите нивое.

Табела 10.13 Означени фактор B и S/N однос и нивои који се посматрају за одређивење просечног S/N односа за фактор B

Број експеримената	A	B	C	D	S/N
1	1	1	1	1	44,78
2	1	2	2	2	66,33
3	1	3	3	3	55,71
4	2	1	2	3	49,68
5	2	2	3	1	66,84
6	2	3	1	2	62,72
7	3	1	3	2	48,84
8	3	2	1	3	46,84
9	3	3	2	1	56,33

$$S/N_{B1} = \frac{(S/N_1 + S/N_4 + S/N_7)}{3} = \frac{44,78 + 49,68 + 48,84}{3} = 34,433$$

$$S/N_{B2} = \frac{(S/N_2 + S/N_5 + S/N_8)}{3} = \frac{66,33 + 66,84 + 46,84}{3} = 60,003$$

$$S/N_{B3} = \frac{(S/N_3 + S/N_6 + S/N_9)}{3} = \frac{55,71 + 62,72 + 56,33}{3} = 58,253$$

3. Прорачун просечног S/N односа за фактор C (дејство воде)

Табела 10.14 омогућава праћење фактора C и S/N односа за различите нивое.

Табела 10.14 Означени фактор C и S/N однос и нивои који се посматрају за одређивање просечног S/N односа за фактор C

Број експеримената	A	B	C	D	S/N
1	1	1	1	1	44,78
2	1	2	2	2	66,33
3	1	3	3	3	55,71
4	2	1	2	3	49,68
5	2	2	3	1	66,84
6	2	3	1	2	62,72
7	3	1	3	2	48,84
8	3	2	1	3	46,84
9	3	3	2	1	56,33

$$S/N_{C1} = \frac{(S/N_1 + S/N_6 + S/N_8)}{3} = \frac{44,78 + 62,72 + 46,84}{3} = 51,447$$

$$S/N_{C2} = \frac{(S/N_2 + S/N_4 + S/N_9)}{3} = \frac{66,33 + 49,68 + 56,33}{3} = 57,447$$

$$S/N_{C3} = \frac{(S/N_3 + S/N_5 + S/N_7)}{3} = \frac{55,71 + 66,84 + 48,84}{3} = 57,117$$

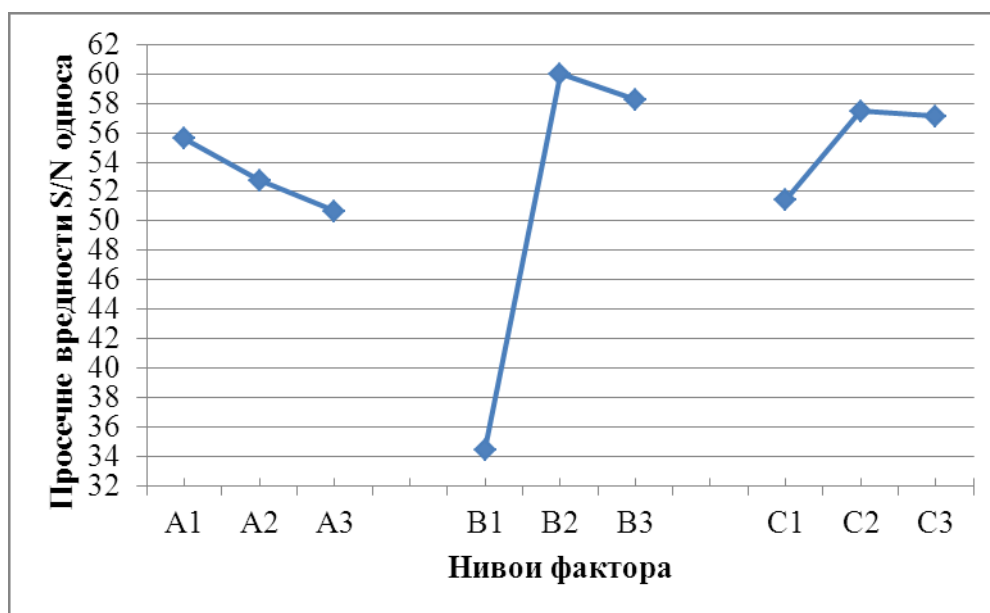
4. Прорачун просечног S/N односа за фактор D (изложеност UV зрачењу)

Прорачун просечног S/N односа за фактор D неће се вршити као ни у претходном прорачуну, због подједнако изложеног временског периода UV зрачењу.

Табела 10.15 Просечне вредности S/N односа за све факторе

Ниво	A	B	C	D
1	55,607	34,433	51,447	
2	52,747	60,003	57,447	
3	50,67	58,253	57,117	

График одзива фактора A , B и C на издужење за прорачунате S/N односе када је номинална вредност најбоља приказан је на слици 10.10.



Слика 10.10 График одзива фактора A, B и C на издужење

Вредности опсега дејства и рангирање фактора приказане су у табели 10.16.

$$\Delta_A = \text{Max}_A - \text{Min}_A = 55,607 - 50,67 = 4,937$$

$$\Delta_B = \text{Max}_B - \text{Min}_B = 60,003 - 34,433 = 25,57$$

$$\Delta_C = \text{Max}_C - \text{Min}_C = 57,447 - 51,447 = 6$$

Табела 10.16 Опсег дејства фактора и рангирање фактора

Ниво	A	B	C	D
1	55,607	34,433	51,447	
2	52,747	60,003	57,447	
3	50,67	58,253	57,117	
Δ	4,937	25,57	6	
Ранг	3	1	2	4

Највећи утицај на издужење као и на затезну чврстоћу тестираних епрувета има температура.

11. ЗАКЉУЧАК

Тагучи је својим истраживањима означио посебан приступ проблематици осигурања квалитета у индустријској производњи. Узео је у обзир чињеницу да је производни процес у ужем смислу под контролом, док су пројектантске и конструкцијске активнисти, по правилу, ван контроле. Његов приступ претпоставља истовремено анализирање свих фаза производног процеса јаким координацијом, при чему се не врши занемаривање специфичности производних процеса. Тагучијеве методе представљају технику унапређења квалитета.

Тагучијеве методе су усмерене ка стварању и производњи производа који имају предност у смислу нижих цена, а који ће у исто време задовољити захтеве корисника. Ове методе откривају доследно нове могућности стварања конкурентних производа и услуга.

Тагучијева функција губитка омогућава да се за сваки конкретан производ увек могу изразити губици у новчаним јединицама.

Тагучијеве методе представљају интегрални скуп метода. Ове методе су усмерене ка томе да се још у току развоја обезбеди испорука производа, не само са задатим номиналним вредностима квалитета, него и са минималним расипањем око тих номиналних вредности.

Тагучијеве методе омогућавају анализу различитих параметара без великог броја експеримената, идентификацију кључних параметара који имају највећи утицај на посматрани процес. Недостатак Тагучијевих метода је због тешкоће прорачуна при дејству између параметара, када на процес који се испитује утиче већи број параметара.

Експеримент је спроведен како би се утврдило који од утицајних фактора има највећи утицај на затезну чврстоћу и процентуално издужење епрувета од полиетилена. Фактори који утичу на затезну чврстоћу и издужење епрувета полиетилена су брзина затезања, температура, дејство воде и UV зрачење.

Применом Тагучијевих метода, тачније анализом добијених експерименталних резултата помоћу ортогоналних матрица и S/N односа, долази се до закључка да на затезну чврстоћу и процентуално издужење испитиваних епрувета највећи утицај има снижена температура. Брзина затезања и дејство воде имају веома мало утицаја, док је утицај UV зрачења занемарен.

Треба напоменути да би испитивање на сниженим температурама било тачније и лакше да је кидалица на којој се вршило затезање имала комору за хлађење. Пошто кидалица

нема комору за хлађење, епрувете су хлађене за 10°C нижу температуру од температуре на којој је потребно извршити испитивање. Епрувете су хлађене помоћу ацетона и сувог леда на ниже температуре зато што долази до загревања епрувета док се пренесу из кадице у којој је вршено хлађење до чељусти кидалице.

Температура је мерена термометром, јер инструментом за безконтактно мерење температуре у тачки (ST8855) није могло да се измери тачна температура охлађене епрувете због прозирности полиетилена.

Такође се уочавају разлике добијених резултата испитивања код епрувети које су биле бризгане међу првим и међу последњим. Епрувете које су прве бризгане су се пре кидале, претпоставља се због неустаљене температуре на почетку процеса. Све епрувете су се током затезања кидала на страни до уливног језгра, вероватно зато што се тај део калупа спорије хладио.

Тагучијеве методе се осим у Јапану користе у Великој Британији и Сједињеним Америчким Државама. У последње време у Европи све је већи број научних радова чији се садржај базира на примени Тагучјевих метода у различитим областима индустрије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ђорђевић Д., *Управљање квалитетом*, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михаило Пупин“, Зрењанин, 2007.
- [2] Арсовски С., Вукичевић Т. и други, *Квалитет и менаџмент*, Министарство за науку и технологију Републике Србије, Београд, 1993.
- [3] Genichi Taguchi, http://en.wikipedia.org/wiki/Genichi_Taguchi, preuzeto 25.04.2013.
- [4] Genichi Taguchi and Taguchi Methods - Practical, Rapid Quality, <http://www.skymark.com/resources/leaders/taguchi.asp>, preuzeto 25.04.2013.
- [5] Ivić K., Marinković R., Jurković Z., *Управљање променама применом Тагуџи методе*, Стручни рад, Економски Вјесник, Осиек, No.1 Српњан 2011.
- [6] *Design of experiments via Taguchi methods*, https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Design_of_experiments_via_taguchi_methods:_orthogonal_arrays, preuzeto 16.04.2013.
- [7] Redžić S., *Тагуџијева функција губитка и инверзна функција вјероватноће губитка као алати унапређења квалитета*, Научно-стручни skup, Квалитет '99. Zenica, 11. и 12. Новембар 1999.
- [8] Цветковић Д., *Дизајн и развој производа*, Универзитет Сингидунум, Београд, 2011.
- [9] *Uvod*, <http://www.sfsb.unios.hr/>, preuzeto 7.04.2013.
- [10] Grubić T., Bilić B., *Integrating process and ontology to support supply chain modelling*, Fakultet za strojarstvo, Maribor, 2011.
- [11] Спасојевић К., *Приказ Тагуџијевих метода са примерима практичне примене*, Дипломски рад, Машински факултет Крагујевац, 1996.
- [12] Gunter B., *A Perspective on the Taguchi Methods*, Quality Progress, June 1987.
- [13] Bijedić N., *Elementi, statistika vjerovatnoća i planiranje eksperimenta*, Univerzitet u Mostaru, Mašinski fakultet, Mostar, 1998.

- [14] Мајсторовић В., Станић Ј. и други, *Новије технике инжењерства и квалитета*, Систем квалитета, Институт за индустријске системе, ФТН, Нови Сад, 1994.
- [15] Ивановић М., *Оцена квалитета применом Тагучијеве функције губитка*, 23. годишња JUSK конференција, Београд, мај 1996.
- [16] *Taguchi Methods*,
<http://www.statsoft.com/textbook/experimental-design/#taguchi>, preuzeto 6.04.2013.
- [17] Ukrainczyk M., *Design of Experiments in Industry*, Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam, Zagreb, 2010.
- [18] Wysk, R. A., Niebel, B. W., Cohen, P. H., and Simpson, T. W., *Manufacturing Processes: Integrated Product and Process Design*, McGraw Hill, New York, 2000.
- [19] Kramer D., Sekulić M., Kovač P., Gostimirović M., Kopač J., *The implementation of Taguchi method for quality improvement in high-pressure jet assisted turning process*, Jurnal of Production Engineering, No.2 2012.
- [20] Lawrence P.S., *The power of Taguchi Methods*, Quality progress, Januарu 1987.
- [21] *Materijali-polietilen*,
<http://www.plastikainfo.com/tehnologija/materijali-polietilen-polyethylene-pe>, preuzeto 12.04.2013.
- [22] *Hostalen GC 7260*, <http://www.ides.com/>, preuzeto 12.04.2013.
- [23] ISO 527-2, *Plastics - Determination of tensile properties*, Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, 1996.
- [24] ISO 527-1, *Plastics - Determination of tensile properties*, Part 1: General principles, 1996.