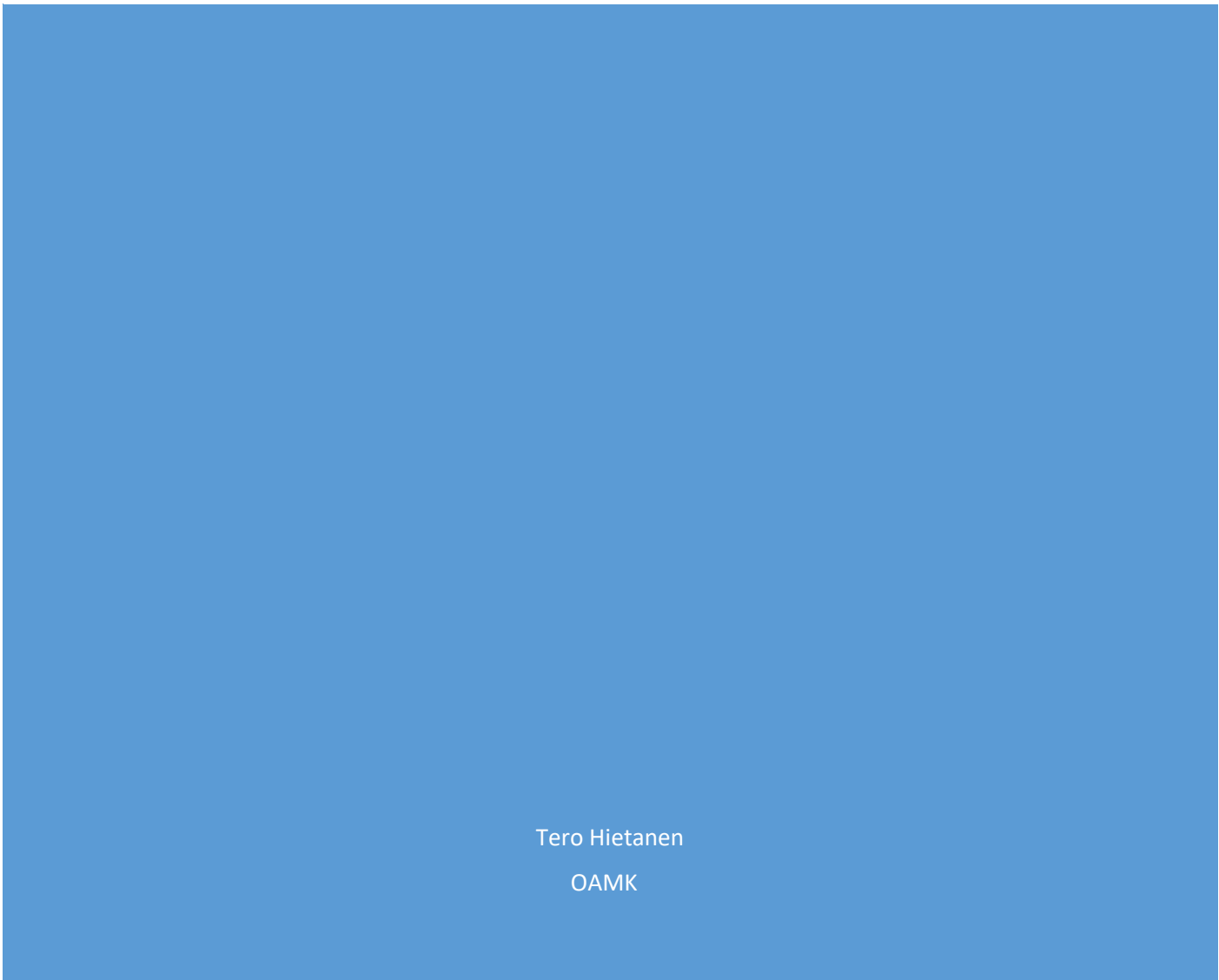




KOESUUNNITTELU TAGUCHI-MENETELMÄLLÄ

2019



Tero Hietanen
OAMK

Sisällys

1	Johdanto	2
2	Taguchi-laatufilosofia	4
3	Ortogonaalimatriisit	6
4	Taguchi-esimerkki Minitab-sovelluksella.....	9
5	Testattavien ominaisuuksien valinta	12
6	Yhteenveto	14

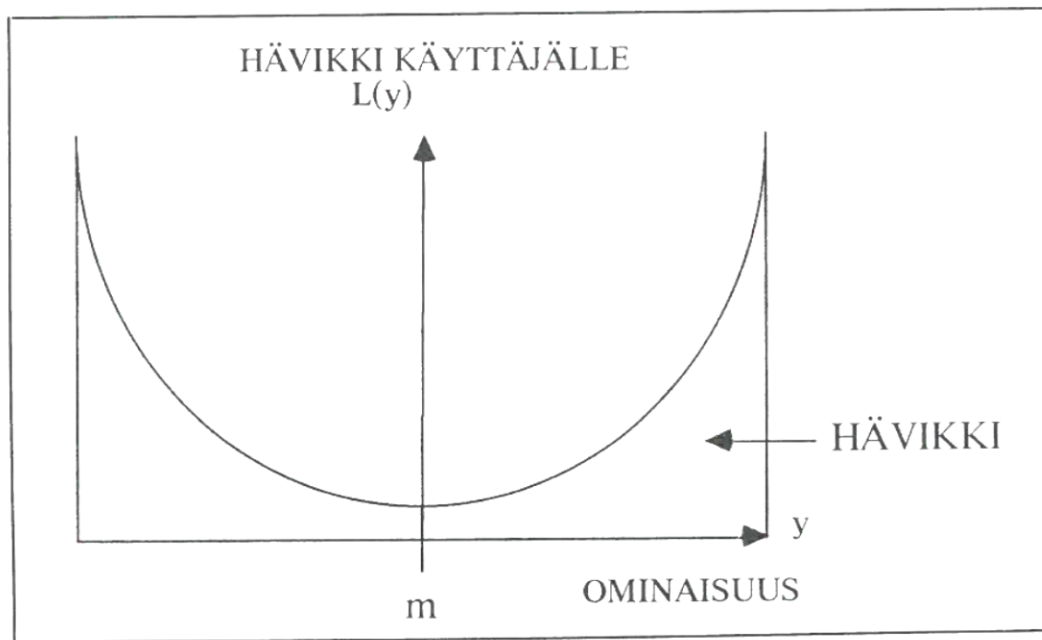
1 Johdanto

Englanninkielinen termi koesuunnittelulle on design of experiments, joka lyhennetään DoE. Desing of Experiments termille käytetään suomenkielessä myös vastinetta tilastollinen koesuunnittelu. Tämä tuokin hyvin esiin sen, mihin koesuunnittelussa tulisi pyrkiä. Tavoitteena on kokeellisen tutkimuksen suunnittelu ja kokeilla saadun mittausdatan tilastollinen analyysi. Usein tieteellisen toiminnan päämääränä on ilmiöiden selittäminen, ymmärtäminen, ennustemallien tekeminen ja lopulta, kontrolloiminen tarvittaessa. Teollisuudessa tutkimustoiminta ei ole itsetarkoitus, vaan niillä pyritään parantamaan tuotannon prosesseja. Kokeilla pyritään selvittämään prosessin eri hallintasuureiden vaikutuksia lähtösuureisiin siis niin sanottuja syy-seuraussuhteita. /1/

Materiaalissa tarkastellaan perinteistä ja laajasti käytettyä Taguchi-menetelmää. Menetelmä muodostuu kolmesta perusvaiheesta: systeemisuunnittelu, parametrisuunnittelu ja toleranssisuunnittelu, ja nämä yhteen sitovasta Taguchi-laatufilosofiasta. Taguchin laatufilosofian perusajatus voidaan kiteyttää seuraavaan neljään kohtaan:

1. Laadun parantaminen ja kustannusten alentaminen samanaikaisesti on mahdollista, kun pienennetään tuotteen ominaisuuksien vaihtelua. Perinteisessä ajattelussa laatu ja kustannukset ovat toistensa vastakohtia, mutta Taguchin kehittämällä menetelmällä saadaan aikaan oleellisesti parempaa laatua pienemmin kustannuksin.
2. Tuotteen ominaisuuksien vaihtelua pienennetään käsittelemällä ohjaus- ja häiriötekijöitä erillisinä niin, että tuotteesta tulee robusti: tuote kestää häiriöitä. Perinteisesti tuote suunnitellaan käyttämällä kalliita ja tiukatoleranssisia materiaaleja ja tuotteita häiriövaikutusten eliminointiin. Taguchi-menetelmässä halpojen ja suuritoleranssisten materiaalien ja osien ominaisuuksia (parametrejä) hyödynnetään niin, että tuotteesta tulee parempi ja halvempi.
3. Ohjaamalla ja valitsemalla suunnittelijan käytettävissä olevia tekijöitä voidaan minimoida sellaisten (häiriö)tekijöiden vaikutukset, joihin ei voida suoraan vaikuttaa. Perinteisessä suunnittelussa häiriötekijöiden vaikutukset pyritään ratkaisemaan eliminoimalla häiriö (lämpötila, värinä, kuluminen jne.) tavalla tai toisella. Taguchi-menetelmässä ongelma pyritään sen sijaan kiertämään hyödyntämällä eri parametrien keskinäisiä vaikutuksia, ja ongelma ratkaistaan ilman kallista eliminointia (esim. lisäkomponenttien käyttöä).
4. Vain tavoitearvo (paras arvo) on laatua. Perinteisesti ajatellaan, että toleranssin sisällä kaikki arvot ovat yhtä hyviä, vain toleranssin yli menevät arvot aiheuttavat tarvetta laadun parantamiseen. Taguchi-osoittaa, että asiakkaalle on olemassa vain yksi hyvä arvo. Kaikki tästä poikkeavat arvot merkitsevät asiakkaalle hävikkiä - olivat ne sitten toleranssien sisä- tai

ulkopuolella. Hävikki ei ole vakio, vaan se on verrannollinen poikkeaman neliöön



Kuva 1. Hävikkifunktio. /2. s. 32/

Taguchin ajatus hävikistä on esitetty kuvassa 1. Alueen reunat $-y$ ja $+y$ ovat perinteinen ajatus toleranssisuunnittelusta, jossa tuotteelle sallitaan tietty vaihteluväli. Muuttuja m on laadun optimi ja kaikki siitä poikkeavat y :n arvot sisältävät hävikkiä funktion $L(y)$ mukaisesti. Laatu-
funktio on pisteen m ympärille kehitetty Taylorin-sarjan kolmas termi.

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (1)$$

Missä vakio k on Taylorin-sarjan kerroin kolmannelle termille. Taguchi-menetelmässä k lasketaan yhtälöllä (2).

$$K = A_0 / (m - y_0)^2 \quad (2)$$

Yhtälössä 2 A_0 on tuotteen rahallinen hävikki ja y_0 on piste y -akselilla, jossa 50% käyttäjistä reklamoi tuotteen eli toleranssiraja.

Taguchi-menetelmällä voidaan ymmärtää kokonaista ajattelutapaa, filosofiaa, mutta yhtä hyvin se on joukko menetelmiä, joita voidaan käyttää itsenäisinä. Erityisesti parametrisuunnittelua on käytetty itsenäisenä menetelmänä, jolla on tehostettu kokeiden suunnittelua ja koetulosten tulkintaa. /2/

Huolellinen koesuunnittelu säästää kuitenkin kaikkia resursseja. Hyvin karkea jako koesuunnittelun eri vaiheille on: suunnittelu, toteutus, tulkinta. Yksiselitteistä listaa koesuunnittelun vaiheista ei ole olemassa, mutta voidaan esittää runko ajatukselle, mitä vaiheita suunnittelussa tulisi käydä läpi. Tässä kappaleessa olevaan listaan on käytetty runkona Taguchi-menetelmän mukaisia suunnitteluvaiheita. Aina ensimmäisenä tulee tunnistaa ongelma prosessissa. Ongelma voi olla esimerkiksi vanhentunut tuote tai tuotannossa esiintyvä suuri hävikki. Mikäli oltaisiin täysin

tyytyväisiä prosessiin, ei olisi muutostarvetta eikä näin ollen kokeidenkaan tarvetta. Kun ollaan havaittu ongelma, täytyy määrittää vaatimukset ja tavoitteet, millaiseksi halutaan prosessia muokata. Tavoite voisi olla esimerkiksi autoteollisuudessa tyypipäästöjen vähentäminen 5 %:lla tietyssä automallissa. Luetteloidaan menetelmät, joilla voidaan päästä määrättyyn päämäärään ja tavoitteeseen. Äärimmäisen tärkeää on tunnistaa ne hallintasuureet ja häiriösuureet, jotka vaikuttavat lopputuotteeseen. Mikäli prosessi ei ole entuudestaan kovin hyvin tunnettu, tämä voi vaatia haravointikokeiden suorittamista. 1. Tunnistetaan ongelma 2. Asetetaan tavoitteet 3. Valitaan ongelman ratkaisumenetelmä. Tässä vaiheessa täytyisi koesuunnittelijan pystyä ajattelemaan niin sanotusti laatikon ulkopuolelle. Mikäli halutaan parantaa prosessia, täytyisi löytää erikoisia, yllättäviä tai aivan uusia tekijöitä, jotka vaikuttavat lopputuotteeseen. Näiden avulla voidaan saavuttaa prosessiin uusia parannuksia. Usein ne kaikkein selvimmin tuotteeseen vaikuttavat tekijät on jo optimoitu. Nyt pitäisi löytää ne tekijät, jotka vaikuttavat, mutta eivät ole optimoituja. /1/

2 Taguchi-laatufilosofia

Perinteiset laatumenetelmät (tuotekehitysmenetelmät) ovat liittyneet kiinteästi tuotteen toimintaan (funktioon) ja siihen, miten hyvin tuote täyttää suunnitteluspesifikaatiot. Taguchi on omaksunut toisenlaisen näkökulman laatuun. Se perustuu hävikkiin, jonka tuote aiheuttaa käyttäjälle, jos tuotteen ominaisuudet vaihtelevat. Mitä pienempi hävikki, sitä laadukkaampi tuote. Taguchi määrittelee laadun seuraavasti:

“Laatu on hävikki, jonka tuote aiheuttaa yhteisölle sen jälkeen, kun se on toimitettu käyttäjälle.”

“The quality of product is the (minimum) loss imparted to society from the time the product is shipped.”

Taguchin laatufilosofia poikkeaa aikaisemmista laadun määritelmistä, mutta se mahdollistaa tuotteiden ja toiminnan kehittämisen yhä asiakaslähtoisemmäksi. Hävikki mitataan Taguchin ajattelussa aina rahana, joten määritelmä antaa myös uuden asiakaslähtöisen ulottuvuuden laatuksittain eli Taguchin termillä laatuhävikkiin. Taguchin mukaan vain tavoitearvo on hyväksyttävää laatua. Pienikin poikkeama aiheuttaa hävikkiä (kuva 1).

Taguchin ajattelu kaataa vanhan laatuksittainajattelun, jossa laatua mitattiin ennaltaehkäisy- ja tarkastuskustannusten sekä sisäisten ja ulkoisten virhekustannusten yhteismäärällä, jota pyrittiin minimoimaan. Nyt asiakkaan kokema hävikki minimoidaan suunnittelulla ja prosessiteknisin keinoin. Hävikkiä ei määritellä virheprosentteina tai niistä johdettuina kustannuksina, vaan tuotteen ominaisuuksien poikkeamat tavoitearvosta tai parhaasta arvosta lasketaan rahana.

Taguchi-menetelmän perusajatus on, että tuotteen tai prosessin laatu on suunniteltava itse tuotteeseen tai prosessiin. Taguchi jakaa suunnittelun kolmeen vaiheeseen, jossa tuotetta ja prosessia optimoidaan: systeemisuunnittelu, parametrisuunnittelu ja toleranssisuunnittelu.

Systeemisuunnittelussa valitaan materiaalit, osat ja alustavat tuoteparametrit. Myös prosessin suunnittelussa sovelletaan samaa perussuunnittelujaksoa. Apuvälineenä systeemisuunnittelussa käytetään QFD-menetelmää. Quality Function Deployment-tuotekehitysmenetelmän lähtökohtana on selvittää asiakkaan tarpeet ja odotukset. Sekä toteuttaa sen mukaisesti kaikki prosessit jotka luovat ja tuottavat tuotteita ja palveluita.

Parametrisuunnittelussa testataan ja optimoidaan alustavat systeemisuunnittelussa asetetut tuoteparametrit ja etsitään parhaat mahdolliset kombinaatiot. Tuote tai prosessi pyritään saamaan mahdollisimman vahvaksi (robustiksi) olosuhteiden aiheuttamia vaihteluita ja muita häiriöitä vastaan. Taguchi-menetelmässä parametrisuunnittelu on tärkein vaihe parannettaessa tuotteen laatua. Ominaisuuksien vaihtelua voidaan pienentää ilman, että kustannuksia lisätään.

Toleranssisuunnittelua käytetään pienentämään vaihtelua, mikäli sitä ei parametri-suunnittelussa pystytä riittävästi tekemään. Toleranssisuunnittelussa joudutaan lähinnä tiukentamaan tuotteiden tai prosessien niitä toleransseja, jotka vaikuttavat eniten tuotteen ominaisuuksien vaihteluun. Toleranssisuunnittelu merkitsee aina kustannuksia: ostetaan parempia materiaaleja, komponentteja tai koneita.

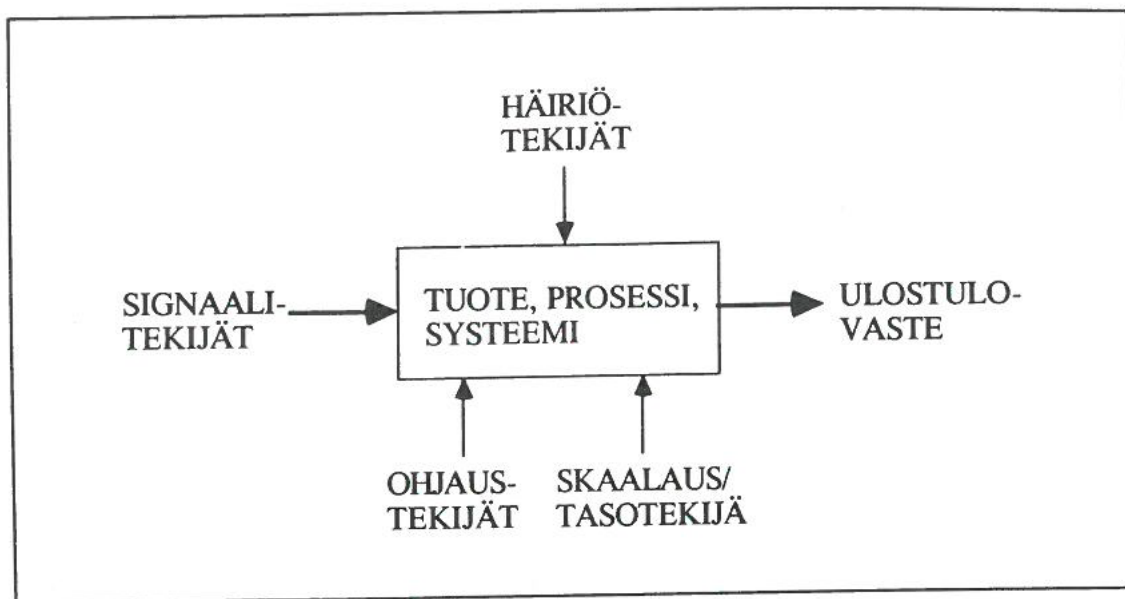
Taguchi-menetelmän parametrisuunnittelun tavoitteena on määrittää suunnittelijan valittavissa ja ohjattavissa olevien tekijöiden (esim. materiaalit, mitat, asetusarvot) ominaisarvot niin, että saavutetaan maksimaalinen suoritusarvo minimoitaessa häiriöitä ja kustannuksia. Perusstrategiana on määrittää suunnittelun ohjaustekijät (suunnittelutekijät) ja häiriötekijät sekä käsitellä niitä erillisinä. Tarkoitus on etsiä keskinäisvaikutuksia ohjaustekijöiden ja häiriötekijöiden väliltä. Tarkkaa keskinäisvaikutustekijää ei tarvitse välttämättä löytää. Riittää, kun ohjaustekijöistä ja niiden asetusarvoista löydetään parempi kombinaatio, jolla häiriötekijän vaikutus pienenee. Ohjaustekijöistä voidaan lisäksi etsiä tekijät, joita muuttamalla tuotteen suoritusarvoa voidaan parhaiten maksimoida.

Yleensä suunnittelussa lähdetään parhaista materiaaleista, joita suunnittelun edetessä korvataan halvemmilla. Parametrisuunnittelussa lähtökohtana ovat karkeat, halvat komponentit ja raaka-aineet. Perinteinen suunnittelu on yleensä ongelmien etsimistä ja syiden poistamista. Parametrisuunnittelussa vaihtelua (hävikkiä) pyritään pienentämään poistamatta vaihtelun syytä. Syyn poistaminen on usein kallista ja kustannuksia ei parametreja valittaessa ole tarkoitus nostaa. Häiriötekijät voidaan tunnistaa koesuunnittelulla ja käsitellä erikseen. Perinteisessä suunnittelussa käsitellään vain keskiarvoja, mutta parametri-suunnittelussa tutkitaan lisäksi poikkeamia (signaali-kohinasuhde). Jos poikkeamaa ei tunneta, on vaikea suunnitella toimenpiteitä sen estämiseksi.

Parametrit (tekijät) luokitellaan Taguchin mukaan neljään ryhmään:

1. Signaalitekijät ovat tekijöitä, joita käyttäjä asettaa halutessaan prosessista tai koneesta tietyn ulostulon (esim. ohjauskulma auton ohjausmekanismeissa).
2. Ohjaustekijät ovat tuotteen parametrien arvoja, jotka suunnittelija on asettanut. Tavoitteena on löytää ohjaustekijöille taso, jolla ominaisuus olisi paras mahdollinen (kriteereinä esim. stabiilisuus, robustisuus ja kustannukset).
3. Skaalaus- eli tasotekijöillä voidaan säätää haluttu funktio (yhteys) signaalitekijän ja ulostulon välille (esim. autossa ohjauksen välityssuhde).
4. Häiriö- eli kohinatekijät poikkeavat edellisistä siten, että niitä ei voi ohjata. Häiriötekijät vaikuttavat ulostuloon, ja niiden taso vaihtelee tuotteen ja olosuhteen mukaan.

Tuotteen, prosessin tai järjestelmän yleiseksi malliksi saadaan kuvan 2 mukainen kaavio. /2/



Kuva 2. Tuotteen tai prosessin optimoinnin malli /2 s. 49/

3 Ortogonaalimatriisit

Ortogonaalimatriisit ovat suhteellisen vanha keksintö. Ranskalainen matemaatikko Jacques Hadamard keksi nämä lineaariyhtälöt 1880-luvun lopulla. Kuitenkin vasta toisen maailmansodan jälkeen erityisesti Taguchi alkoi soveltaa niitä. Nykyisin tunnetaan yli 30 ortogonaalimatriisia [Karjalainen 1989]. Tavallisimpia koesuunnitteluun käytettyjä ortogonaanimatriiseja on esitetty wikipediassa: http://reliawiki.org/index.php/Taguchi_Orthogonal_Arrays

Ortogonaalimatriisin edut tulevat esiin vertailtaessa perinteisiä ja Taguchi - koesuunnittelumenetelmää. Esimerkiksi 3 muuttujalle, joille sallitaan kaksi tilaa, tulee perinteisessä

koesuunnittelussa $2^3=8$ koetta. Taguchi-menetelmässä kuvan 3 ortogonaalimatriisilla saadaan 4 koetta.

Run	Columns		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

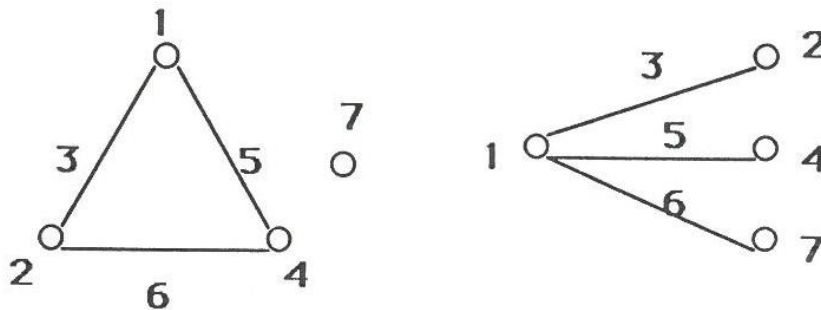
Kuva 3. L4-matriisi 2^3 -kokeesta. /3/

Sarakkeissa on muuttujien 1-3 alempi ja ylempi tila, nämä esitetään usein -1 ja 1 tasoina, jolloin ortogonaalisuus voidaan laskennallisesti osoittaa. Vertikaaliakselilla ovat kokeiden 1-4 parametriasettelut.

Taguchi suosittaa vähintään kolmen tason koetoimintaa, jolloin epälineaarisuudet saadaan esiin ja näin voidaan valita sopivat parametrit. Klassista menetelmää käytettäessä kokeiden määrä kasvaa huomattavasti kolmea tasoa tutkittaessa. Kokeet vievät paljon aikaa, rahaa ja resursseja. Harva suunnittelija ryhtyy tekemään edes kuvan 4 koesarjaa kahdella tasolla (8 koetta), puhumattakaan kolmen tason vaatimasta 27:stä kokeesta. Klassisessa menetelmässä suunnittelija muuttaa yleensä yhtä tekijää kerrallaan ja tutkii sen vaikutuksen. Tällöin koe ei kuitenkaan takaa toistettavuutta käytännössä (tuotannossa), ja koemäärä on suuri. Usein käy niin, että prototyyppi toimii, mutta tuotantolaite ei. Tämän ongelmakentän ratkaisemiseksi Taguchi käyttää ortogonaalisia matriiseja.

Mikäli parametrien tai häiriösignaalien välillä on ristikkäisvaikutuksia, niin nämä voidaan huomioida lineaarikuvaajilla. Lineaarikuvaaja on graafinen esitys joka, kertoo mihin sarakkeeseen keskinäisvaikutus heijastuu. Jokaiselle ortogonaalimatriisille on laadittu omat lineaarikuvaajat, joilla kokeet voidaan laatia siten, että ristikkäisvaikutukset tulevat huomioiduksi. Kuvassa 4 on L8 (2^7) kokeen matriisi ja sen lineaarikuvaajat. Vasemman puolimmaisesta lineaarikuvaajasta nähdään, että muuttujien 1 ja 3 ristikkäisvaikutus heijastuu muuttujaan 3.

KOE- NUMERO	TEKIJÄ							KOETULOS
	1	2	3	4	5	6	7	
1	1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	2	2	2	2	Y2
3	1	2	2	1	1	2	2	Y3
4	1	2	2	2	2	1	1	Y4
5	2	1	2	1	2	1	2	Y5
6	2	1	2	2	1	2	1	Y6
7	2	2	1	1	2	2	1	Y7
8	2	2	1	2	1	1	2	Y8



Kuva 4. L8-ortogonaalimatriisi sekä lineaarikuvaajat. /2 s. 60/

Koesuunnittelussa ortogonaalisuus merkitsee ”balansoitua, eriteltävissä olevaa”. Ortogonaalimatriisien etuina ovat joustavuus ja kyky käsitellä suurta määrää muuttujia pienellä määrällä kokeita. Kaikkein tärkein syy ortogonaalimatriisien käyttöön teollisuudessa on kuitenkin se, että tulokset ovat luotettavia ja toistettavia. Normaaleilla koejärjestelyillä kokeiden määrää vähennettäessä myös niiden luotettavuus kärsii. Ortogonaalimatriiseilla voidaan eri tekijöiden vaikutukset erotella ja arvioida yhtä tarkasti. Käyttämällä systemaattisesti ortogonaalimatriiseja tulosten toistettavuus paranee. Kokeita yleensä tehdään, että tuote/prosessi saadaan toimimaan luotettavasti tulevaisuudessa. Ortogonaalimatriisien etuna on myös, että päätekijät saadaan esiin.

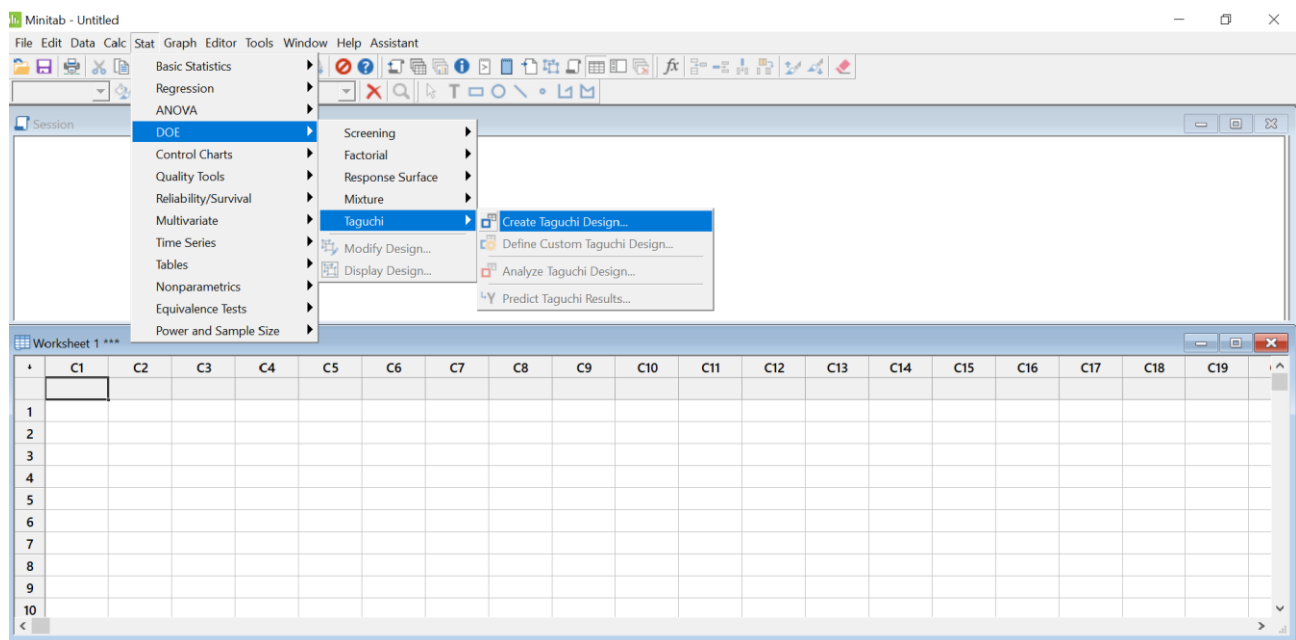
Haittana ortogonaalimatriisien käytössä on, että laatuominaisuutta on mitattava kohtuullisen tarkkaan, että tulokset ovat luotettavia. Tekijöiden keskinäisvaikutukset saattavat lisäksi harhauttaa analyysin tulosta. Tämä voidaan huomioida tarkastuskokeella. Haittana saattaa olla myös, että joka kokeen jälkeen ei päästä säätämään, mikä on usein insinöörien tavoitteena. Yksittäistä koetulosta on vaikea tulkita, joten koesarja on tehtävä loppuun ennen analyysijä. Organisaatio saattaa myös vierastaa koemenettelyä sen ”matemaattisen luonteen” takia.

Ortogonaalimatriisien edut tulevat kuitenkin erityisen hyvin esille silloin, kun tekijöitä, keskinäisvaikutuksia ja tasoja on paljon. Jos on esimerkiksi testattava 13 tekijän vaikutus kolmessa tasossa, vaaditaan kaikkien kombinaatioiden testaamiseen $3^{13} = 1\,594\,323$ koetta. Ortogonaalimatriisia käytettäessä selvittää 27 kokeella. Tämä säästää paljon aikaa ja rahaa. /2/

4 Taguchi-esimerkki Minitab-sovelluksella

MINITAB tarjoaa laajan joukon yleisiä tilastollisia ominaisuuksia kuten, tilastollisen prosessinohjauksen, koesuunnittelun, luotettavuusanalyysin ja mittaussysteemin analysoinnin. Minitabia käytetään esim. Lean Six Sigma -menetelmien opettamisessa kaikissa johtavissa koulutus- ja konsultointiyrityksissä, kuten Juran Instituutissa, Amerikan laatu yhdistyksessä, Six Sigma Qualtecissä. Myös Suomessa Minitab on keskeinen ohjelmisto Lean Six Sigma -menetelmän käyttöönotossa ja koulutuksessa.

Minitab-sovelluksesta on saatavissa erilaisia kokeiluversioita. Tässä luvussa esiteltävä esimerkki on tehty 30 päivän kokeilu versiolla. Koesuunnittelu ei sinänsä vaadi exceliä erikoisempaa työkalua, siinä vaiheessa, kun ortogonaalimatriisit ovat saatavilla. /4/



Kuva 5. Taguchi-koesuunnittelu esimerkki Minitab-ohjelmistolla.

Minitab tarjoaa laajan kirjon erialaisia koesuunnittelun matriiseja.

Taguchi Design

Type of Design

☒ 2-Level Design (2 to 31 factors)

☐ 3-Level Design (2 to 13 factors)

☐ 4-Level Design (2 to 5 factors)

☐ 5-Level Design (2 to 6 factors)

☐ Mixed Level Design (2 to 26 factors)

Number of factors: 3

Display Available Designs...

Designs... Factors...

Options...

Help OK Cancel

Taguchi Design: Design

Runs	$2^{\wedge}$ Columns
L4	$2^{\wedge} 3$
L8	$2^{\wedge} 3$
L12	$2^{\wedge} 3$
L16	$2^{\wedge} 3$
L32	$2^{\wedge} 3$

☐ Add a signal factor for dynamic characteristics

Help OK Cancel

Kuva 6. Kolmen muuttujan ja kahden tilan L8-matriisin valinta.

Esimerkissä valittiin perinteisen koesuunnittelun 8-kokeen matriisi. L4-ortogonaalimatriisin tulos on esitetty esimerkissä myöhemmin.

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L8(2³)

Factors: 3

Runs: 8

Columns of L8(2⁷) array: 1 2 4

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	A	B	C																
1	1	1	1																
2	1	1	2																
3	1	2	1																
4	1	2	2																
5	2	1	1																
6	2	1	2																
7	2	2	1																
8	2	2	2																
9																			
10																			

Kuva 7. L8-matriisi kolmelle muuttujalle.

Perustuotteena esimerkissä on sähkövastus, johon on syötetty virtaa ja mitattu vastuksen lämpötilaa. Vastuslankana on käytetty Kuparia 1 ja Alumiinia 2. Toinen muuttuja on vastuslangan halkaisija ja kolmantena suunnittelutekijänä on langan pituus. Tällaista vastusratkaisua voisi käyttää esimerkiksi teollisuuden sähkösaatoissa. Esimerkissä on lisäksi käytetty lämpötilaa ulkoisena häiriötekijänä ja lämpötilalla on kaksi tasoa. Mittaustulokset on esitetty sarakkeissa C4-T ja C5-T. Esimerkissä on käytetty tuloksia youtubesta löytyvästä taguchi-luennosta. /5/

Taguchi Design

Design Summary

Taguchi Array L8(2³)

Factors: 3

Runs: 8

Columns of L8(2⁷) array: 1 2 4

	C1	C2	C3	C4-T	C5-T	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	Wire mat.	Diam.	Length	Res. T1	Res. T2														
1	1	5	200	101.5	107.9														
2	1	5	500	100.8	102.1														
3	1	10	200	99.7	104.6														
4	1	10	500	98.4	101.7														
5	2	5	200	104.5	108.9														
6	2	5	500	105.4	110.6														
7	2	10	200	103.2	108.3														
8	2	10	500	107.4	111.1														
9																			
10																			

Kuva 8. Sähkövastuksen lämpötilamittausten koejärjestely.

Saman kokeen Taguchi-menetelmän mukaisessa koejärjestelyssä L4-matriisissa (kuva 3) siis olisivat kuvasta 8 sarakkeet 1,4,6 ja 7. /4/

5 Testattavien ominaisuuksien valinta

Oikean ja sopivan laatuominaisuuden etsiminen vie eniten aikaa kokeellisessa suunnittelussa. Omissa konsultoinneissaan Taguchi käyttää 80 % ajasta juuri tähän. Optimoitavaa laatutekijää on syytä harkita huolellisesti. Toisaalta vaikuttavien muuttujien lisääminen ei välttämättä lisää liikaa varsinaisten kokeiden määrää.

Perusohjeita testattavan kohteen valintaan ovat:

1. Määritä prosessin tai tuotteen syötteen ja ulostulon suhde. Laatuominaisuuden, jota halutaan optimoida, pitäisi olla suoraan yhteydessä tuotteen tai prosessin mekanismiin, eikä ympäristötekijöihin.
2. Laatuominaisuuden tulisi olla jatkuva muuttuja.
3. Laatuominaisuuden tulisi olla yksiselitteinen eli keskinäisvaikutuksia tulisi välttää, vaikka ne voidaanakin ottaa huomioon.
4. Laatuominaisuus tulisi olla helposti mitattavissa.
5. Laatuominaisuuden pitäisi kattaa kaikki input-output-suhteet.
6. Jos tuotteessa tai prosessissa on feedback-mekanismi, on tämä tutkittava erikseen.

Kun sopiva laatuominaisuus on löydetty, etsitään tarvittavat signaali-, ohjaus-, skaalaus- ja mahdolliset häiriötekijät. Kolme ensin mainittua tekijää (ja mahdolliset ristikkäisvaikutukset) sijoitetaan sopivaan ortogonaalimatriisiin, tehdään kokeet ja tutkitaan, mitkä tekijät ovat vaikuttavia tekijöitä.

Ensimmäisen parametrisuunnittelun perusajatuksena on määritellä parametrit niin, että tuotteen tai prosessin optimiarvo saavutetaan ja häiriötekijät minimoidaan. Signaali-kohinasuhde ottaa huomioon häiriöluonteiset tekijät ja sen avulla etsitään suhteelle maksimiarvo eri parametrien osalta.

Signaali-kohinasuhde tulee elektroniikan ja radiotekniikan käsitteistöistä. Taguchi on laajentanut käsitteen muillekin aloille. Signaali-kohinasuhde mittaa tavoitearvon ja hajonnan, jonka mitta on hävikki, välistä suhdetta Y/s logaritmisena (keskinäisvaikutuksia voidaan vähentää logaritmisuudella). Taguchi käyttää tavoitearvon (keskiarvon) ja hajonnan suhdetta, eikä pelkästään hajontaa, koska keskiarvo ja hajonta ovat riippuvaisia toisistaan. Signaali-kohinasuhdetta on kolmea perustyyppiä, joille jokaiselle on oma laskukaavansa (yksikkönä desibeli, dB). /2/

1. Suurempi on parempi:

$S/N = -10 \log\{1/n \sum_i (1/y_i^2)\}$; jossa y_1, y_2, y_3 jne. ovat yhden kokeen tuloksia, ja n on koetoistojen määrä.

2. Pienempi on parempi:

$S/N = -10 \log\{1/n \sum_i (y_i^2)\}$

3. Tavoitearvo on paras:

$S/N = 10 \log\{Y_{av}^2/s^2 - 1/n\}$; jossa Y_{av} on mittaustulosten keskiarvo, s on standardi-poikkeama ja n on koetoistojen määrä.

Parametrisuunnittelun ensimmäisessä vaiheessa erotellaan ohjaustekijät häiriötekijöistä. Tämän jälkeen ohjaustekijöistä muodostetaan sisämatriisi ja häiriötekijät sijoitetaan ulkomatriisiin (taulukko 1). Jokaista ohjaustekijää (A, B, C ja D) testataan häiriöolosuhteita muuttellessa. Näin voidaan testata kunkin ohjaustekijän häiriöherkkyys, ja kullekin ohjaustekijälle voidaan määrätä paras mahdollinen arvo. Kuvan 7 minitab esimerkissähän on periaatteessa samanlainen asettelu. Taulukossa 1 häiriömuuttujia on 3 (E-G) ja niille tehdään 2 tasolla perinteisen koesuunnittelun mukainen taulukointi.

					G	1	1	1	1	2	2	2	2
					F	1	2	1	2	1	2	1	2
					E	1	1	2	2	1	1	2	2
Nro	A	B	C	D	Nro	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
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									

Taulukko 1. Esimerkki koejärjestelyistä. /2. s. 67/

Esimerkissä ohjaustekijöitä muutetaan kolmessa tasossa (1-3) ja niitä testataan häiriötekijöitä (E, F ja G) vastaan kahdessa tasossa (1-2). Yhden ohjaustekijöiden muodostaman rivin yhdistelmää vastaava koesarja käsittää 8 erilaista häiriötekijöiden yhdistelmää, joista saadaan koetulos Y. Esimerkkitapauksessa on siis tehtävä 72 koetta.

Materiaalissa tarkastellaan koesuunnittelua keskittyen Taguchi-menetelmään. Esitettyä teoriaa ja esimerkkejä voidaan soveltaa esim. tiedonkeräyksessä ja tutkimuksessa, yleisemmin menetelmää on käytetty laadun varmistuksessa. Esitelty menetelmä ei ole ainoa ja erilaisia tilastolliseen laskentaan perustuvia menetelmiä on lukuisia. Menetelmällä on kuitenkin laaja käyttäjäkunta sekä paljon onnistuneita referenssejä.

Johdanto kappaleessa selvitetään koesuunnittelun periaatteita ja tavoitteita. Luvussa esitellään Taguchin-laatukäsitys paraabelimaisen häviöfunktion avulla. Perusajatuksena on, että kaikenlainen poikkeaminen optimista on hävikkiä. Funktion reunoilla on kuvattu perinteisen toleranssiajattelun rajat. Luvussa 2 tarkastellaan Taguchin-laatufilosofiaa sekä esitellään systeemi-, parametri- sekä toleranssisuunnittelun periaatteet.

Menetelmä perustuu ortogonaalimatriiseihin, joita käyttämällä voidaan kokeiden määrää vähentää ratkaisevasti riittävällä luotettavuudella. Materiaalissa on linkki tavallisimpiin matriiseihin, joita voidaan varsin hyvin soveltaa yleisissä taulukkolaskentasovelluksissa sellaisenaan. Luvussa kerrotaan myös miten menetelmässä käsitellään muuttujien välistä epälineaarisuutta sekä ristikkäisvaikutuksia.

Sovellusesimerkki koesuunnittelun hyödyntämisestä on esitetty luvussa 4. Esimerkissä on hyödynnetty kaupallista minitab-sovellusta, joka sisältää useita tilastollisia menetelmiä kuten esimerkiksi varianssianalyysin laskennan. Tuotteen ominaisuuksien optimoinnissa tavalliset mitattavat parametrit ja häiriöt on usein optimoitu. Iso työ on kuitenkin löytää uusia laadun parantamisen piirteitä. Viimeisessä kappaleessa tarkastellaan menetelmää prosessina sekä signaali-kohinasuhteen merkitystä esim. tarvittavien kokeen toistojen määrään liittyen.

Tässä materiaalissa on pitkälti referoitu Eero Karjalainen menetelmästä tuottamaa aineistoa. Materiaalia voi soveltaa osana koesuunnittelua tai tuotekehitystä käsittelevissä opintojaksoissa. Matemaattinen tarkastelu on ohutta ja esimerkiksi ortogonaalimatriiseihin tai tilastolliseen matematiikkaan ei pureuduta syvällisesti. Aineistossa kerrotaan kuitenkin riittävästi koesuunnittelun ja tiedon keräämisen periaatteista, jotta menetelmää voisi soveltaa laboratioharjoituksissa.

Kirjallisuusluettelo

1. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201805101719.pdf> 14.5.2019
2. *Karjalainen, Eero. 1999 2.p: Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla - Taguchi menetelmä.*
3. http://reliawiki.org/index.php/Taguchi_Orthogonal_Arrays 31.5.2019
4. https://www.laatutieto.fi/product_catalog.php?c=52 3.6.2019
5. <https://www.youtube.com/watch?v=VPMhTpr95IM> 15.4.2019