

METODA TAGUCHI OPTIMALIZACJI JAKOŚCI

dr inż. Jacek Pietraszek, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wstęp

Pomimo kilkudziesięcioletniej już historii teoria eksperymentu jest dla większości osób pojęciem nowym. Jak pokazuje jednak praktyka przemysłowa, metody i techniki proponowane przez ten dział nauki znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle i handlu, przede wszystkim pod naporem czynników ekonomicznych, zmuszających do ciągłej obniżki kosztów i poprawy jakości. Poniżej przedstawione są – z konieczności w sposób uproszczony – podstawowe informacje o zastosowaniach teorii eksperymentu w dziedzinie statystycznej kontroli jakości i przykłady praktyczne zrealizowane przy pomocy programu *STATISTICA*.

Co to jest teoria eksperymentu

Teoria eksperymentu (ang. *design of experiment*, w skrócie DOE) jest to interdyscyplinarna dziedzina nauki, leżąca na pograniczu metrologii, matematyki stosowanej, statystyki i informatyki. Jej celem jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie:

jak zaplanować *doświadczenie*, aby przy możliwie najmniejszych kosztach uzyskać jak najwięcej użytecznej informacji.

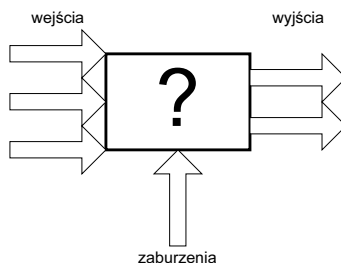
To powyższe krótkie sformułowanie wymaga nieco dłuższego rozwinięcia i wprowadzenia kilku pojęć niezbędnych do zrozumienia całego zagadnienia.

Przedmiotem badania jest pewien obiekt (np. urządzenie, proces technologiczny, zależność ekonomiczna itd.), który – z uwagi na nieznaną budowę – musi być opisany w kategoriach „czarnej skrzynki”: posiada kilka wejść, które pozostają pod kontrolą osoby przeprowadzającej badania oraz jedno lub kilka wyjść, których stany (wartości) są obserwowane i mierzone. Prócz kontrolowanych wejść, na obiekt działają także czynniki pozostające albo poza kontrolą badacza, albo wręcz nieznanne dla niego (zob. rysunek poniżej).

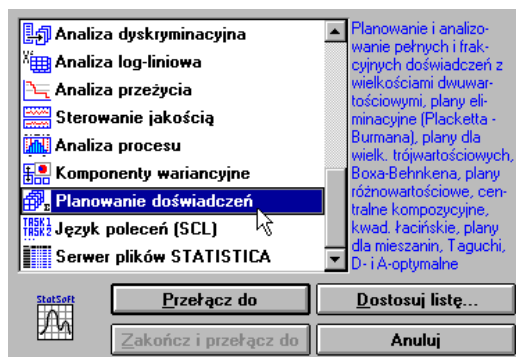
Celem badania jest określenie przybliżonego związku, który opisuje reakcje obiektu na wprowadzane zmiany wejść. Ujmując to w kategoriach matematycznych można powiedzieć, iż celem jest znalezienie związku wiążącego wielkości wejściowe z wielkościami wyjściowymi. Związek ten jest tylko aproksymacją, czyli przybliżeniem nieznanego, rzeczywistego powiązania istniejącego wewnątrz obiektu. W większości zastosowań uzyskanie jednak takiego przybliżenia w krótkim czasie i za rozsądną cenę jest



całkowicie wystarczające. Złożoność obliczeniowa efektywnych metod teorii eksperymentu jest zazwyczaj tak duża, że konieczne staje wykorzystanie komputera jako narzędzia do przeprowadzenia niezbędnych obliczeń. Nieoceniona staje się tu pomoc uzyskiwana dzięki wyspecjalizowanemu oprogramowaniu statystycznemu, uwzględniającemu specyfikę metod teorii eksperymentu. Takim właśnie programem jest *STATISTICA*, która m.in. zawiera moduł odpowiedzialny za planowanie doświadczeń.



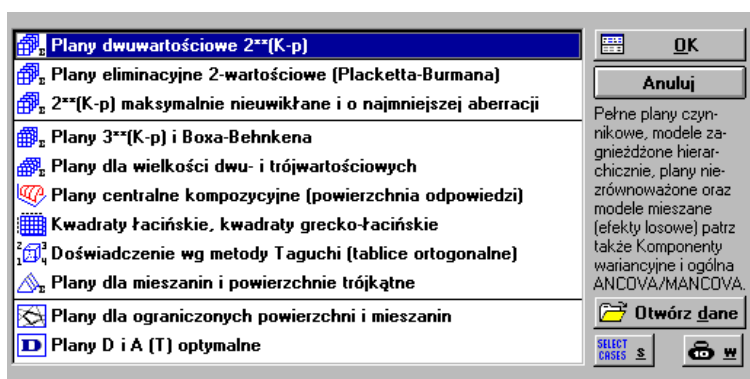
Zakres badań zależy od stawianych pytań oraz pozostającego w dyspozycji budżetu i wymaganego terminu udzielenia odpowiedzi. W najprostszych przypadkach (zazwyczaj na początku badań) pragnie się przede wszystkim określić, które czynniki w sposób istotny wpływają na badany obiekt. Pozwala to od razu wyeliminować czynniki nieistotne, których zbędne uwzględnianie w programie badań niepotrzebnie podnosiłoby koszty i przedłużało czas niezbędny na ich przeprowadzenie. Po określeniu istotnych wielkości wejściowych można przejść do dokładniejszych badań, których celem jest stworzenie związku matematycznego wiążącego wielkości wejściowe i wyjściowe. Na koniec dochodzi się do zwięźczenia: znalezienie wartości wielkości wejściowych, które zrealizują pożądany stan wyjść obiektu. W przypadku niektórych podejść m.in. Taguchi część związana z określaniem związku aproksymującego jest realizowana niejawnie i od razu przechodzi się do określania stanów optymalnych związanych z rozważanym kryterium jakości.



W trakcie badań niezbędne jest przeprowadzenie serii doświadczeń, w trakcie których bada się odpowiedź obiektu na pewne ściśle określone wartości wielkości wejściowych. Takie zestawy wartości wielkości wejściowych noszą nazwę planów doświadczeń (ang. *designs*). Postępując tradycyjnie przedział zmienności każdej wielkości wejściowej zostałby podzielony na równe odcinki, a wszystkie możliwe kombinacje ich wartości odpowiadałyby poszczególnym doświadczeniom. Tak było przez wiele lat, jednak w wieku

XX złożoność procesów stała się tak duża, a liczba istotnych wielkości wejściowych tak wielka, że metody tradycyjne stały się nieefektywne, a niekiedy wręcz niemożliwe do zastosowania.

Przykładowo: obiekt o 8 wielkościach wejściowych, czas jednego doświadczenia 1 dzień, koszt 1.500 zł. Postępowanie tradycyjne uwzględniające dwie wartości dla każdej wielkości prowadzi do programu badań obejmującego $2^8=256$ doświadczeń, czyli 51 tygodni roboczych, a koszt całości wynosi 384.000 zł. Analogiczny program badań zaprojektowany zgodnie z teorią eksperymentu obejmuje 16 doświadczeń (plan dwuwartościowy $2^{(8-4)}$), czyli nieco ponad trzy tygodnie robocze, a koszt całości wynosi 24.000 zł. Jest to więc badanie zrealizowane za ok. 6 % kosztów metody tradycyjnej i w odpowiednio krótkim czasie – uzyskuje się wiarygodne wyniki i dysponuje się kompletną dokumentacją statystyczną.



Z uwagi na zróżnicowanie potrzeb powstały różne plany doświadczeń: plany dwuwartościowe, które służą do określania związków liniowych oraz – w szczególnej odmianie planów eliminacyjnych – do identyfikacji istotnych wielkości wejściowych; plany trójwartościowe pozwalające na badanie obiektów, w przypadku których relacje wejście-wyjście są nieliniowe; plany centralne kompozycyjne służące przede wszystkim do określania tzw. powierzchni odpowiedzi; różne odmiany planów dla mieszanin; tablice ortogonalne dla metody Taguchi i wiele innych. Większość planów jest uwzględniona w module *Planowanie doświadczeń*, który jest częścią składową programu *STATISTICA*.

Użyteczność teorii eksperymentu w statystycznej kontroli jakości

Podstawowym celem produkcji jest uzyskanie produktów o pożądanym cechach. Nie jest to jednak obecnie wystarczające: cóż z tego, że zazwyczaj nasz produkt jest najlepszy, skoro zdarzają się kompromitujące wpadki z wadliwymi egzemplarzami! Wymaga to interwencji serwisu i podnosi koszty. Jak widać, konieczna jest także stabilność procesu produkcyjnego, co wymaga zminimalizowania zmienności cech wokół pożądanym, docelowych wartości nominalnych. Oznacza to zmniejszenie wrażliwości procesu na działanie zidentyfikowanych źródeł zmienności. W celu osiągnięcia tego stanu korzysta się z modeli matematycznych odpowiednich procesów prowadzących do powstania produktów – z tych



modeli uzyskuje się informację o charakterze niezbędnych korekt. Tu właśnie jest miejsce na zastosowanie teorii eksperymentu.

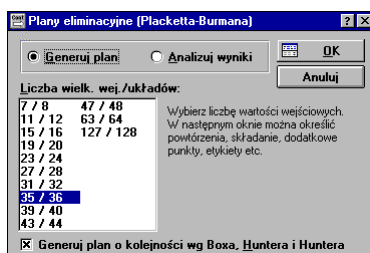
Teoria eksperymentu umożliwia:

- ♦ wyselekcjonowanie wielkości wejściowych w sposób istotny wpływających na kontrolowany proces,
- ♦ szybkie, tanie i wiarygodne zbudowanie odpowiedniego modelu i tworzących go związków matematycznych,
- ♦ określenie wartości wielkości wejściowych realizujących najbardziej pożądaną stan procesu (optymalizacja),
- ♦ określenie wpływu zmienności poszczególnych wielkości wejściowych na zmienność całego procesu – tym samym pozwala to na zidentyfikowanie wrażliwych miejsc procesu i ich wyeliminowanie lub ciągle nadzorowanie.

Teoria eksperymentu pozwala uzyskać powyższe informacje przy krótszym czasie i mniejszych kosztach niż przy zastosowaniu metod tradycyjnych.

Przykład 1

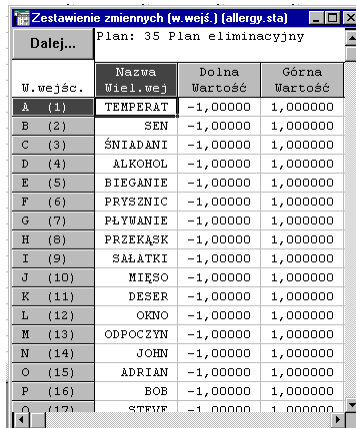
Podstawowym zagadnieniem w trakcie budowy modelu obiektu badań (materiału, urządzenia, procesu) jest zidentyfikowanie statystycznie istotnych wielkości wejściowych. Pozwala to w trakcie dalszych prac na pomijanie tych czynników, których wpływ jest nieistotny. W ten sposób od razu uzyskuje się znaczącą redukcję kosztów i czasu niezbędnego na przeprowadzenie badań.



Do przeprowadzenia takich wstępnych badań służą plany eliminacyjne Placketta-Burmana (ang. *screening designs*), które uwzględnione są w module *Planowanie doświadczeń* programu *STATISTICA*. Program umożliwia wykonywanie obliczeń dla zestawów danych uwzględniających do 100 wielkości wejściowych.

W celu zachowania dostatecznej ogólności, przykład operuje na danych dotyczących... alergii. Badaczem, jak i jednocześnie obiektem badań jest nękana przez katar sienny osoba, która pragnie zidentyfikować czynniki wpływające na występowanie alergii. W trakcie wstępnej selekcji wytypowane zostało 35 czynników, które mogą mieć wpływ na występowanie alergii. Są to zarówno osoby, jak i zwierzęta, czynniki fizyko-chemiczne oraz pewne zachowania samego chorego.

Dysponując tą wstępną listą podejrzanych czynników, badacz wybrał w module *Planowanie doświadczeń* pozycję *Plany eliminacyjne 2-wartościowe Placketta-Burmana*, Wskazał następnie plan dla 35 wielkości wejściowych składający się z 36 układów (zob. ilustracja powyżej). Analogiczny plan kompletny (dwuwartościowy) składałby się z 68.719.476.736 układów. Jak widać redukcja jest kolosalna! Po wygenerowaniu żądanego planu należy wprowadzić nazwy identyfikujące poszczególne wielkości wejściowe oraz ewentualnie określić nazwy dla poszczególnych wartości, które te wielkości mogą przyjąć (zob. ilustracja obok). Jeżeli symboliczne oznaczenie skrajnych wartości nie jest istotne dla użytkownika, można pozostawić oznaczenia kodowe, czyli -1 oraz $+1$. Wygenerowany plan należy rozszerzyć (dosłownie!) o jedną pustą kolumnę, która posłuży do wpisywania wyników badań i wartości wielkości wyjściowej.



W. wejśc.	Nazwa Wiel. wej.	Dolna Wartość	Górna Wartość
A (1)	TEMPERAT	-1,00000	1,00000
B (2)	SEN	-1,00000	1,00000
C (3)	ŚNIADANI	-1,00000	1,00000
D (4)	ALKOHOL	-1,00000	1,00000
E (5)	BIEGANIE	-1,00000	1,00000
F (6)	PRYSZNIC	-1,00000	1,00000
G (7)	PLYWANIE	-1,00000	1,00000
H (8)	PRZEKAŚK	-1,00000	1,00000
I (9)	SALÁTKI	-1,00000	1,00000
J (10)	MIEŚO	-1,00000	1,00000
K (11)	DESER	-1,00000	1,00000
L (12)	OKNO	-1,00000	1,00000
M (13)	ODPOCZYN	-1,00000	1,00000
N (14)	JOHN	-1,00000	1,00000
O (15)	ADRIAN	-1,00000	1,00000
P (16)	BOB	-1,00000	1,00000
Q (17)	STEFF	-1,00000	1,00000

Uzyskany plan należy zapisać w pliku, aby móc w przyszłości – po uzyskaniu wyników pomiarów – wykorzystać go do analizy statystycznej wyników.

Po przeprowadzeniu badań, czyli zrealizowaniu wszystkich przewidzianych planem doświadczenia układów, wpisano uzyskane wyniki do przygotowanej wcześniej kolumny w planie doświadczenia i przystąpiono do analizy.

Po wczytaniu danych wskazano wielkości wejściowe i wyjściowe, co jest niezbędne dla prawidłowego przebiegu analizy (zob. ilustracja poniżej).

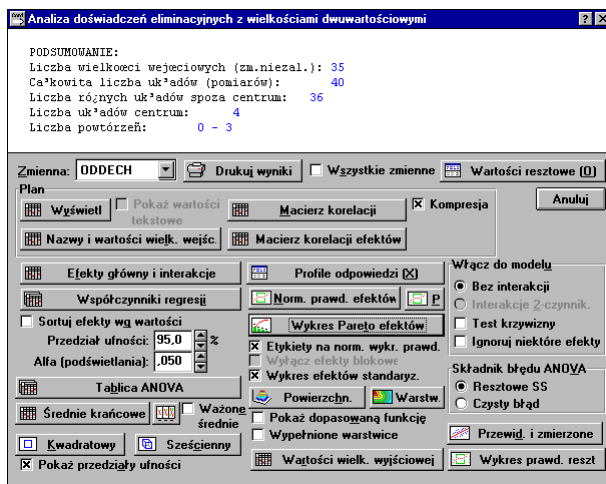


Wybierz zmienne (wielkości) zależne i niezależne			
23-GAZETA	34-LAKWŁOSY	23-GAZETA	34-LAKWŁOSY
24-MUZYKA	35-KASEK	24-MUZYKA	35-KASEK
25-KROCHMAL	36-DDDECH	25-KROCHMAL	36-DDDECH
26-GOLENIE	37-LZY	26-GOLENIE	37-LZY
27-WODAKOL	38-ZMĘCZENI	27-WODAKOL	38-ZMĘCZENI
28-SZAMPON		28-SZAMPON	
29-MYDŁO		29-MYDŁO	
30-PASTAZEB		30-PASTAZEB	
31-WILGOTNO		31-WILGOTNO	
32-POWIETRZ		32-POWIETRZ	
33-COLONZON		33-COLONZON	

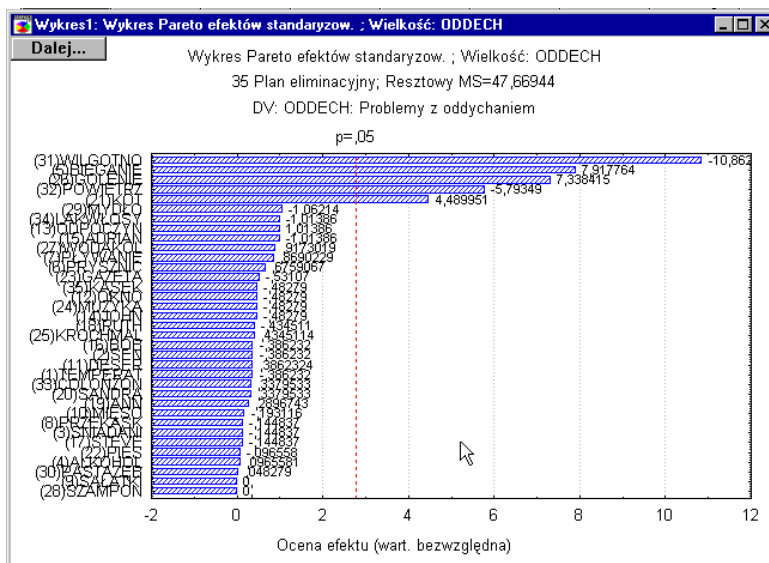
Zmienne zależne: 36-38 Wielkości wyjściowe: 1-35



Po ustaleniu wielkości wejściowych i wyjściowych (zależnych) program wyświetla zasadnicze okno analizy (zob. ilustracja poniżej), w którym dostępne są wszystkie opcje niezbędne do przeprowadzenia analizy statystycznej wyników badań. Okno to jest zasadniczym centrum kontrolnym prowadzonej analizy, m.in. umożliwia przeglądanie układów planu, ustalenie wielkości wyjściowej, która będzie analizowana, pozwala na wybranie modelu, który będzie stosowany do analizy wyników pomiarów, prezentuje efekty główne i interakcje, współczynniki regresji, wyniki analizy wariancji oraz umożliwia wyświetlenie wielu użytecznych wykresów – zarówno dwu-, jak i trójwymiarowych.



W celu szybkiego zapoznania się z wynikami analizy należy zapoznać się z wykresem Pareto, który w przejrzysty sposób, na wykresie słupkowym prezentuje wartości bezwzględne efektów.



Przyglądając się wykresowi (zob. ilustracja powyżej) można natychmiast dojrzeć, iż statystycznie istotne znaczenie dla trudności z oddychaniem mają takie czynniki, jak wilgotność w pokoju, uprawianie joggingu, używanie płynu do golenia, wietrzenie sypialni i kontakty z kotem. Znak efektu – ujemny lub dodatni – decyduje o charakterze wpływu wielkości wejściowej na trudności z oddychaniem: wzrost wartości czynników związanych z efektem ujemnym zmniejsza wartość wielkości wyjściowej (w tym przypadku trudności z oddychaniem); wzrost efektów związanych z efektami dodatnimi – zwiększa.

Wykres Pareto dostarcza informacji o charakterze głównie jakościowym, natomiast ilościowych – tablica ANOVA (analiza wariancji) (zob. ilustracja poniżej).

ANOVA; Zmn.: ODDECH; R ² = .95721; Popr.: 95091 (allegry.sta)					
35 Plan eliminacyjny; Czysty błąd MS=50,66667					
DV: ODDECH: Problemy z oddychaniem					
W. wejś.	SS	df	MS	F	p
(5) BIEGANIE	2988,44	1	2988,444	58,9825	,004587
(21) KOT	961,00	1	961,000	18,9671	,022368
(26) GOLENIE	2567,11	1	2567,111	50,6667	,005706
(31) WILGOTNO	5625,00	1	5625,000	111,0197	,001826
(32) POWIETRZ	1600,00	1	1600,000	31,5789	,011142
Brak dopas.	462,34	31	14,914	,2944	,970016
Czysty bł.	152,00	3	50,667		
Całk. SS	14355,90	39			

Biorąc pod uwagę fakt, iż stwierdzono nieistotność wielkości wejściowych (przy ustalonym wcześniej poziomie istotności $0,05$) prócz wspomnianych pięciu, program otrzymał polecenie ignorowania pozostałych efektów.

Wyniki analizy można zinterpretować w następujący sposób: największy wpływ na trudności z oddychaniem ma wilgotność powietrza, nieco mniejszy używanie płynu do golenia oraz uprawianie joggingu, jeszcze mniejszy wietrzenie, natomiast najmniej winny jest kot.

W powyższym przypadku przeprowadzenie 36 pomiarów umożliwiło wyselekcjonowanie 5 spośród 35 wielkości wejściowych, które ewentualnie powinny zostać dokładniej zbadane, aby wyjaśnić mechanizm wpływania na trudności oddechowe. Analogiczną analizę należałoby teraz powtórzyć dla pozostałych dwóch wielkości wyjściowych: objawów łzawienia i poczucia ogólnego zmęczenia. Oczywiście, może się okazać, że wielkościami istotnymi będą inne wielkości wejściowe.

Doświadczenie wg metody Taguchi (tablice ortogonalne)					
<input checked="" type="radio"/> Generuj plan		<input type="radio"/> Analizuj wyniki		<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Anuluj"/>
Liczba Maks. liczba Liczba wielk. wej. z poziomami:					
Tablica układów	wielk. wejśc.	2	3	4	5
L4	4	3	3	--	--
L8	8	7	7	--	--
L9	9	4	--	4	--
L12	12	11	11	--	--
L16	16	15	15	--	--
L16	16	5	--	--	5
L18	18	8	1	7	--
L25	25	6	--	--	6
L27	27	13	--	13	--
L32	32	31	31	--	--
L'32	32	10	1	--	9

W przypadku, gdyby zamiast badania alergii wystąpiło badanie procesu przemysłowego, należałoby teraz przystąpić do szczegółowych badań, które uwzględniałyby tylko istotne



wielkości wejściowe – wówczas zastosowanie znalazłyby np. centralne plany kompozycyjne, które umożliwiają stworzenie złożonego modelu matematycznego, który pozwala na przeprowadzenie optymalizacji (szukania minimum lub maksimum wartości wielkości wyjściowej).

Przykład 2

Odmiernym od tradycyjnego sposobem podejścia do zagadnień optymalizacji jest metoda *Taguchi*. Celem tej metody nie jest stworzenie modelu procesu, lecz ustalenie wartości parametrów, które zapewnią uzyskanie najlepszej jakości według zdefiniowanego kryterium.

Wprowadzane są pewne nowe pojęcia, takie jak: funkcja straty jakości, współczynniki stosunku sygnału do szumu (S/N) oraz tablice ortogonalne. Metoda Taguchi jest daleką krewniczką klasycznych planów ortogonalnych, zastosowanych tu do optymalizacji pewnej funkcji, zwanej funkcją straty jakości. Zależnie od charakteru procesu, który należy zbadać dobiera się funkcję straty jakości.

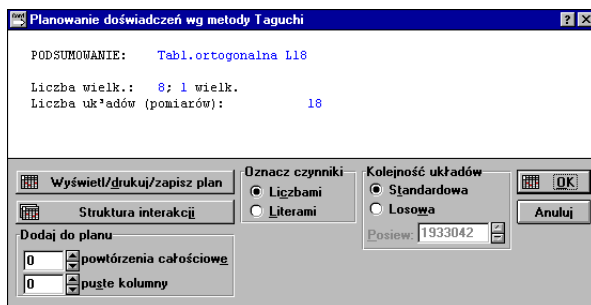
Program *STATISTICA* dysponuje sześcioma wariantami funkcji straty jakości: im mniejsze – tym lepsze, najlepsze – nominalne, im większe – tym lepsze, znakowany cel, częściowo – niesprawne, uporządkowane kategorie. Nazwy te częściowo wyjaśniają dziedzinę zastosowań, niemniej prawidłowe przygotowanie doświadczenia według metody *Taguchi* oraz interpretacja uzyskanych wyników są dużo trudniejsze niż w przypadku klasycznych metod. Program *STATISTICA* oraz towarzyszące mu podręczniki w wyczerpujący sposób wyjaśniają wątpliwości, zarówno poprzez prezentację strony teoretycznej, jak i praktycznych przykładów. Poniżej, w formie z konieczności skrótowej, przedstawiony jest jeden z przykładów (wg Phadke).

W fabryce podłoży krzemowych służących do produkcji układów scalonych wdrożono program poprawy jakości. Celem jego było uzyskanie redukcji liczby defektów powierzchni w przeliczeniu na pojedyncze podłoże oraz zmniejszenie zmienności grubości warstwy osadzonej. Wybrano sześć wielkości wejściowych, których wartości będą zmieniane w trakcie procesu optymalizacji.

Dane: TAGUCHI.STA 32v * 18c					
Badanie produkcji podłoży krzemowych					
1	2	3	4	5	
NIEUŻ 1	TEMPERAT	CISNIEN	AZOT	SIL	
1	1	TO_M25	PO_M200	NO	SO_
2	1	TO_M25	PO	NO_M150	SO_
3	1	TO_M25	PO_P200	NO_M75	
4	1	TO	PO_M200	NO	SO_
5	1	TO	PO	NO_M150	
6	1	TO	PO_P200	NO_M75	SO_
7	1	TO_P25	PO_M200	NO_M150	SO_
8	1	TO_P25	PO	NO_M75	SO_
9	1	TO_P25	PO_P200	NO	
10	2	TO_M25	PO_M200	NO_M75	
11	2	TO_M25	PO	NO	SO_
12	2	TO_M25	PO_P200	NO_M150	SO_
13	2	TO	PO_M200	NO_M150	
14	2	TO	PO	NO_M75	SO_
15	2	TO	PO_P200	NO	SO_
16	2	TO_P25	PO_M200	NO_M75	SO_

Są to: temperatura osadzania, ciśnienie osadzania, przepływ azotu, przepływ silanu, czas osadzania oraz metoda oczyszczania. Każda z tych wielkości może przybierać jedną z trzech możliwych wartości. Z uwagi na to, że celem badań jest uzyskanie poprawy jakości według wcześniej wspomnianych kryteriów wybrano metodę Taguchi.

Dysponując tymi informacjami przystąpiono do wyboru tablicy ortogonalnej (pojęcie analogiczne do planu doświadczenia), która najlepiej będzie pasowała do rozważanego zagadnienia. Tablicą taką jest tablica L18, która m.in. pozwala uwzględnić posiadaną liczbę trójwartościowych wielkości wejściowych. Tablica ta umożliwi zastosowanie do 7 trójwartościowych wielkości wejściowych, więc niektóre kolumny tablicy nie będą stosowane.



Po wybraniu tablicy L18 można przejść do dalszych czynności. Po wygenerowaniu żądanego planu należy wprowadzić nazwy identyfikujące poszczególne wielkości wejściowe oraz ewentualnie określić nazwy dla poszczególnych wartości, które te wielkości mogą przyjąć (zob. ilustracja poniżej). Jeżeli symboliczne oznaczenie skrajnych wartości nie jest istotne dla użytkownika, można pozostawić oznaczenia kodowe, czyli 1, 2 oraz 3. Wygenerowany plan należy rozszerzyć o taką liczbę pustych kolumn, ile jest rozważanych wielkości wyjściowych. Posłużą one do wpisywania wyników badań: wartości wielkości wyjściowych. Należy, co jest szczególnie ważne, dokonać randomizacji kolejności układów, aby uniezależnić się od ewentualnych błędów systematycznych.

Dalej...					
Śred = -45,362 Sigma = 24,4841					
Efekt	SS	df	MS	F	p
(1) TEMPERAT	4427,238	2	2213,619	27,33269	,002033
(2) CIENIENI	3415,549	2	1707,774	21,08677	,003657
(3) AZOT	1029,517	2	514,759	6,35599	,042341
(4) SILANE	371,932	2	185,966	2,29622	,196156
(5) CZAS_OSA	378,279	2	189,140	2,33540	,192206
(6) CZYSZCZ	163,519	2	81,759	1,00953	,428281
Resztowe	404,940	5	80,988		

Oczekiwany wsp. S/N w warunkach optymalnych (taguchi.sta)			
PLANOW. DOEWIAD. Śred = -45,362 Sigma = 24,4841			
W. wejśc.	Wartość	Efekt Rozmiar	B ² d Stand.
(1) TEMPERAT	TO_M25	21,13454	3,673962
(2) CIENIENI	PO_M200	17,81443	3,673962
(3) AZOT	NO	6,33433	3,673962
(4) SILANE	SO_M100	6,15938	3,673962
(5) CZAS_OSA	TO_P8	4,82536	3,673962
(6) CZYSZCZ	CM_2	3,78573	3,673962
Oczekiw. S/N		14,69174	



Uzyskany plan należy zapisać w pliku, aby móc w przyszłości – po uzyskaniu wyników pomiarów – wykorzystać go do dalszej analizy statystycznej wyników.

Po przeprowadzeniu badań, czyli zrealizowaniu wszystkich przewidzianych planem doświadczenia układów, wpisano uzyskane wyniki do przygotowanej wcześniej kolumny w planie doświadczenia i przystąpiono do analizy danych.

Na początek przeprowadzono analizę liczby defektów znalezionych na podłożu krzemowym. Po wskazaniu wielkości wejściowych (niezależnych) i wyjściowych (każde powtórzenie pomiaru wielkości wyjściowej wprowadzono jako osobną kolumnę) należy wybrać odpowiednie kryterium opisujące rodzaj analizowanego problemu. W idealnym przypadku w ogóle nie powinny występować defekty powierzchni, więc najlepszym kryterium będzie sformułowanie: „*im mniejszy-tym lepszy*”.

Szybką ocenę wyników analizy można uzyskać obserwując wartości średnich krańcowych (ilustracja obok). Pamiętając, że wartości średnie odnoszą się do przekształcenia logarytmicznego i powinny mieć jak najwyższą wartość można dostrzec, że najlepsze wartości uzyskuje się przy temperaturze T0_M25 i ciśnieniu P0_M200 itd. Należy zwrócić uwagę na to, że wartości są ujemne, a więc największe wartości mają najmniejszą wartość bezwzględną – może to być na pierwszy rzut oka mylące. Dysponując tą wstępną wiedzą można przejść do analizy wariancji, aby ocenić stopień wpływu poszczególnych wielkości wejściowych na uzyskiwane wyniki.

Średnia Eta wz. wielk. wejś. (taguchi.sta)				
Dalej...				
Gred = -45,362 Sigma = 24,4841				
Efekt	Wart.	Grednie	Ocena Paramet.	O
TEMPERAT	T0_M25	-24,2275	21,1345	2
	TO	-50,1039	-4,7419	1
	TO_P25	-61,7547	-16,3926	1
CIŚNIENI	P0_M200	-27,5476	17,8144	2
	PO	-47,4418	-2,0798	2
	PO_P200	-61,0967	-15,7346	1
AZOT	NO	-39,0277	6,3343	3
	NO_M150	-55,9925	-10,6304	1
	NO_M75	-41,0659	4,2961	2

Ze wstępnej analizy wariancji widać, iż dominujący wpływ na uzyskane wyniki ma temperatura, nieco mniejsze ciśnienie i przepływ azotu, natomiast pozostałe wielkości wejściowe mają wpływ śladowy. Statystycznie istotny (poniżej 0,05) jest wpływ temperatury i ciśnienia.

Typ problemu: Im mniejsze tym lepsze
 Wartości zm. zal. (y) muszą być ≥ 0 . Wartości idealnej jest 0. Dane przekształcono: $ETA = -10 \cdot \log_{10}(\text{SUM}(y^2)/N)$
 UWAGA: przekształcenia są wykonywane w obrębie układów dla zmiennych.

Generuj plan **Analizuj wyniki**

Rodzaj problemu: Im mniejsze - tym lepsze

Zmienne

Zależne: S_DEF1-S_DEF9

Niezależne (wielkości wejściowe): TEMPERAT-CZAS_OSA-CZYSZCZ

OK Anuluj

SELECT CASES W



Obecnie można przejść do wyznaczenia wartości Eta w znalezionych warunkach optymalnych (ilustracja poniżej). Wartość obliczona posłuży następnie do przeprowadzenia doświadczenia weryfikującego, które rozstrzygnie, czy uzyskany wynik jest prawidłowy, czy też – z powodu np. pominięcia istotnej wielkości wejściowej – jest błędny.

Z uwagi na statystyczną istotność (analiza wariancji) za optymalne warunki tzn. dające najmniejszą liczbę defektów można uznać temperaturę T0_M25 i ciśnienie P0_M200.

W przypadku niestabilności grubości podłoży krzemowych należy powyższą analizę powtórzyć, aczkolwiek w tym przypadku dobrym kryterium analizy byłoby „*najlepsze-nominalne*”.