



## PLANOWANIE DOŚWIADCZEŃ W KREOWANIU JAKOŚCI

prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Polański, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

W swojej znanej książce Lester C. Thurow napisał ([7], s. 157): *Po raz pierwszy w dziejach ludzkości wszystko może być wyprodukowane i sprzedane wszędzie na świecie*. Fakt ten - określany mianem *globalizacji gospodarki* - stanowi silny, by nie rzec dominujący, bodziec eksponujący zagadnienia jakości.

Problematyka jakości jest - jak wiadomo - niezwykle rozległa i złożona. Poczynając od samej definicji jakości, aż do zagadnień normalizacji jakości; w tym znanych powszechnie norm ISO 9000. Aktualnie eksponowane są systemy zapewniania jakości produkcji wyrobów w całościowym techniczno - organizacyjnym ujęciu. Wymienić tu należy przede wszystkim zagadnienia pewnej *filozofii* jakości od zasady Pareto do słynnej metody Deminga z jego 14. *przykazaniami jakości*. Tu też należy lokalizować szczególne metody statystycznego sterowania procesem (*Statistical Process Control*); spektakularną metodę Taguchi i wiele innych.

Zagadnienia te - posiadają szczególnie obszerną bibliografię - tu ograniczę się jedynie do roli stosowanej teorii eksperymentu (w tym planowania doświadczeń) w kreowaniu nowej jakości.

### Eksperyment i jakość

Nie wierzę, aby istniała zalgorytmizowana procedura formalna kreująca nową jakość nawet przy użyciu superkomputerów <sup>\*)</sup>. A osądzając to stwierdzenie w realiach można przykładowo zapytać: *Jaki algorytm prowadzi od koncepcji dyskietki 360 kB do DVD?*

Podejmując zagadnienie roli teorii eksperymentu w kreowaniu nowej jakości można natomiast akceptować niżej podany tok rozumowania.

- ♦ **Jeśli** powstała już koncepcja - wiedza, intuicja, a nawet przypadek - kreowania nowej jakości - to najczęściej wymagane są *badania naukowe*, które - najogólniej rzecz ujmując - mogą być badaniami teoretycznymi i empirycznymi. Każde z tych badań są ważne i niezbędne - tyle tylko, iż *badania empiryczne* są z reguły bardziej *kosztowne i czasochłonne*.
- ♦ **Jeśli** dąży się do ograniczenia kosztów i przyspieszenia (konkurencja!) badań empirycznych prowadzonych w celu kreowania nowej jakości - **to** należy stosować *metody*

---

<sup>\*)</sup> Zob. artykuł M. Hetmańskiego pod znamionym tytułem: *Sztuczny intelekt jako mit informatyki*. Nauka PAN nr 1/99



teorii eksperymentu, a w tym planowanie doświadczeń i analizę matematyczną (statystyczną) ich wyników.

Innymi słowy: bazujące na teorii eksperymentu metody planowania doświadczeń należy stosować przede wszystkim w badaniach empirycznych kreujących nową jakość. Ich rola polega głównie na: (1) weryfikacji koncepcji i analizy teoretycznej oraz - co ma szczególne znaczenie utylitarne - (2) *optymalizacji* obiektów i procesów wieloparametrowych. A to, iż metody planowania doświadczeń mogą być również z powodzeniem stosowane w sterowaniu procesami w aspekcie zapewnienia wymaganej jakości - jest raczej znane (zob. [2] lub [6]).

## Badania doświadczalne jakości

Teoria eksperymentu stanowi już rozległą i stale rozwijającą dziedzinę wiedzy posiadającą obszerną bibliografię (zob. m.in. [3], [1], [5] i inne). Jej przydatność określa jednoznacznie podtytuł monografii Myers'a i Montgomery'ego [3]: *Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (notabene: renomowane wydawnictwa wydają z tej dziedziny co raz to nowe pozycje, a nie są to pozycje dotowane, lecz po prostu łatwo sprzedające się).

Nie jest tu oczywiście możliwa nawet skrótowa prezentacja podstaw teorii eksperymentu (np. praca [3] - to 700 stron!); możliwe i celowe jest natomiast krótkie określenie istoty jej zastosowań w empirycznych badaniach jakości.

Jakość dowolnego produktu charakteryzują pewne cechy - tzw. *wielkości wyjściowe*, które oznaczmy:  $q_p$ ;  $p = 1, 2, \dots, w$ . System produkcyjny i sam produkt określają z kolei pewne parametry - tzw. *wielkości wejściowe*, konstituujące jakość; oznaczmy je jako:  $x_k$ ;  $k = 1, 2, \dots, i$ . Stosując dekompozycję zagadnienia będziemy rozważać tylko jedną cechę:  $q$  (czyli dla  $p \equiv 1$ ,  $q_p \equiv q$ ). Umożliwia to niezbędną formalizację matematyczną polegającą na zdefiniowaniu tzw. *funkcji jakości*.

$$q = Q(x_1, \dots, x_k, \dots, x_i) \quad (1)$$

Przykładów powyższych funkcji jakości (1) może być bardzo wiele; najprostsze, a zarazem powszechne, to identyfikacja wielkości  $q$  z dowolną cechą jakości technologicznej np. właściwościami warstwy wierzchniej oraz wielkościami  $\{x_1, \dots, x_k, \dots, x_i\}$  interpretowanymi jako parametry technologiczne w procesie wytwarzania wyrobu [4]. Wymagana jest też odpowiedź na dwa fundamentalne pytania: po pierwsze - *po co?*, a po drugie - *jak?* - wyznaczane są funkcje jakości.

Ogólna odpowiedź na pytanie *po co* zawarta jest w stwierdzeniu, iż dysponowanie funkcjami jakości zapewnia (tabl. 1):

### Funkcja jakości:

$$q = Q(x_1, \dots, x_k, \dots, x_i)$$

*Zastosowania:*

- **Optymalizacja:**

- **Sterowanie**

$$q_{ex} = (q_{\min} \text{ OR } q_{\max}) \left\{ x_{1opt}, \dots, x_{iopt} \right\}$$

*Wyznaczanie empiryczne i przetwarzanie:*

### Teoria eksperymentu

1. Planowanie doświadczeń
  - (1) DOE
  - (2) System ekspertowy (rozmyty)
2. Analiza wyników
  - Aproksymacja:
    - (1) numeryczna
    - (2) + neuronowa
  - Optymalizacja
    - (1) numeryczna
    - (2) + genetyczna (algorytmy genetyczne)

**Tablica 1. Funkcja jakości: zastosowania, wyznaczanie i przetwarzanie**

1. **Optymalizację jakości**, czyli wyznaczenie zbioru wartości wielkości  $\{x_{1opt}, x_{kopt}, \dots, x_{iopt}\}$ , dla których:

$$q = q_{ex} = (q_{\min} \text{ OR } q_{\max}) \quad (2)$$

2. **Sterowanie jakością**, a w tym optymalne sterowanie numeryczne.

Ekspozowana jest tu oczywiście optymalizacja, gdyż wszystkie metody zapewnienia jakości, czy też sterowania jakością dotyczą *de facto* jakości optymalnej.

Nie rozwijając szerzej tych zagadnień, przejdziemy do drugiego pytania: *jak* uzyskać funkcje jakości? Odpowiedź ogólna jest następująca - albo na drodze ściśle teoretycznej analizy, albo na drodze badań empirycznych. Wybór zależy od konkretnej cechy jakości  $q_p$ , z tym jednak, iż wszystkie przesłanki wskazują na to, że **badania empiryczne** stanowią podstawową metodę kreowania funkcji jakości. Wynika to z faktu, iż właśnie badania empiryczne w znakomitej większości przypadków, odniesionych do konkretnych problemów jakości produktów przemysłowych - przy całym uznaniu dla nauk



teoretycznych - pozostają jedyną metodą pozyskiwania informacji o jakości. Osobiście nie wyobrażam sobie jak na przykład wyznaczyć chropowatość powierzchni szlifowanej bazując na fizyce ciała stałego, nauce o materiałach, czy też mechanice ciał odkształcalnych. Notabene, wiadomym jest, iż wiele postulatów ściśle teoretycznych i tak wymaga weryfikacji doświadczalnej. Jednocześnie **szczegółowa** odpowiedź na pytanie *jak* wyznaczyć funkcje jakości? - obecnie brzmi, jak to już stwierdzono, jednoznacznie: należy stosować metody współczesnej teorii eksperymentu.

Reklamy wielu współczesnych produktów mają konsumenta informacją o zgodności z ISO 900x, lecz tak naprawdę należy raczej rozróżnić:

- ♦ jakość typowego produktu odpowiadającego pewnemu znanemu standardowi,
- ♦ *nową jakość*, czyli produkt wybiegający poza dotychczasowy standard.

Przypadek nowej jakości, wprost innowacji technicznej, ma największe znaczenie - decyduje o sukcesie finansowym firmy. Podstawowym źródłem innowacji technicznej, czyli produktów tworzących nową jakość w danej dziedzinie jest nauka. Spektakularny przykład: George Boole pisze w 1854 roku klasyczne dzieło, czysto naukowe: *An Investigation of the Laws of Thought* - tworzy tzw. algebry bulowskie; dzisiaj stanowią one fundament współczesnego przemysłu komputerowego. Obecnie doszliśmy do etapu, gdy naukę skojarzono z techniką i poczęto w nią inwestować, podobnie jak w każdą inną dziedzinę gospodarki rokującą przyszłe zyski. Reprezentują znany pogląd, że proces tworzenia produktów o całkowicie nowej jakości jest inspirowany i wspomagany przez badania naukowe. Ponownie przykład: laser; oczywiście jest, iż wymuszona emisja promieniowania elektromagnetycznego zachodzącego w układach atomów - to obszar *czystej* nauki. Natomiast zastosowania laserów - to produkty stanowiące całkowicie nową jakość; przykładów szczególnie dużo: obrabiarki laserowe, przyrządy pomiarowe, peryferie komputerów, łącza telekomunikacyjne itd.

Proces tworzenia nowej jakości integruje badania teoretyczne i badania empiryczne - są one wzajemnie sprzężone. Podkreślono już jednak, iż istnieje pomiędzy nimi istotna różnica - badania empiryczne są o wiele bardziej kosztowne. Jeżeli więc tworzy się produkt o nowej jakości, to uzasadnione jest dążenie, aby koszty i czas trwania badań - warunkujący szybkie wprowadzenie produktu na rynek, w myśl zasady: *pierwszy bierze wszystko* - były ograniczone. A rozwiązanie jest tylko jedno - ponownie stwierdzamy - należy stosować metody współczesnej **teorii eksperymentu**.

Teoria eksperymentu powstawała stopniowo; jej załóżki sięgają korzeniami jeszcze do opracowanej przez Legendre'a (1806) i niezależnie przez Gaussa (1809) matematycznej *metody najmniejszych kwadratów*, którą adaptowano dla potrzeb eksperymentu na początku XX wieku; klasyczny przykład podaje D.I. Mendelejew (1906). Dopiero jednak R.A. Fisher - angielski statystyk i genetyk tworzy podstawy tzw. matematycznego opracowania wyników pomiarów, publikując w 1925 r. pracę pod tytułem: *Statistical Methods for Research Workers*. A dziesięć lat później (1935) kładzie podwaliny teorii eksperymentu publikując: *The Design of Experiments*.

Następuje przełom w metodycznej koncepcji eksperymentu, dotychczas analizowano matematycznie wyniki pomiarów *dopiero po* przeprowadzeniu eksperymentu - teraz postępuje



się odwrotnie - *na samym początku* ustala się plan doświadczenia wynikający z... teorii eksperymentu. Plan zapewnia uzyskanie maksimum informacji doświadczalnej, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby pomiarów (czas i koszty badań!) - do niezbędnego minimum. Analiza matematyczna (statystyczna) wyników pomiarów - pozostaje nadal, lecz wykonywana jest dopiero po zakończeniu pomiarów, a stosowane metody analizy są ściśle związane z zastosowanym planem doświadczenia.

Dalsza formalizacja teorii eksperymentu następuje w latach 50. i 60. - wymienić tu należy przede wszystkim prace teoretyczne G.E.P. Boxa. Wprowadzone zostaje pojęcie *powierzchni odpowiedzi* (*response surface* por. tytuł [3]) i rozszerza się formalne podstawy matematyczne planowania doświadczeń. W okresie tym powstają tzw. plany frakcyjne typu  $2^{i-p}$ , a przede wszystkim, wyjątkowo skuteczna w zastosowaniach, metoda optymalizacji doświadczalnej tzw. *metoda Boxa - Wilsona*. Następny impuls - to już prace J. Kiefera i Wolfowitza (1959) wprowadzające pojęcie tzw. *planu ciągłego* podlegającego optymalizacji; interesująca może być tu informacja, iż prace rozwijające współczesną teorię eksperymentu były, w pewnym okresie, finansowane m.in. przez NASA. Nadal trwa nieustające *zapotrzebowanie* na teorię eksperymentu, wynikające z prostego faktu, iż jej stosowanie obniża i tak bardzo duże koszty badań doświadczalnych.

Tu wymagane jest wyjaśnienie istoty przydatności teorii eksperymentu. Badania doświadczalne, najogólniej rzecz ujmując, można wykonać stosując następujące metody:

- ♦ Metoda *tradycyjna*, która polega na tym, iż wpływ każdej wielkości wejściowej badany jest oddzielnie, przy ustalonych wartościach wszystkich pozostałych wielkości; otrzymuje się więc jedynie pojedyncze funkcje:

$$q = Q_1(x_1), q = Q_2(x_2), \dots, q = Q_i(x_i) \quad (3)$$

Informacja uzyskana za pomocą tej - powiedzmy zdecydowanie - archaicznej już metodyki jest znikoma. Optymalizacja nie może być poprawnie przeprowadzona, a zastosowanie do sterowania numerycznego - wykluczone. Jedyna zaleta to niskie koszty takich badań, wynikające z niezbyt dużej liczby pomiarów wymaganych do ich realizacji.

Koszty można różnie wyznaczać - jedno jest pewne: *koszty są zależne od całkowitej liczby pomiarów* wymaganych do zrealizowania badań doświadczalnych. Należy tu podkreślić, iż uwzględnia się tu koszty ogólne przypadające na jeden pomiar: od kosztów amortyzacji zainstalowanej aparatury badawczej, przez koszt przygotowania próbek, aż do ZUS dla sprzętaczki w laboratorium. W laboratoriach często koszty stanowią pochodną czasu pracy wykorzystywanej aparatury badawczej - zaskakująca jest ich wysokość! Ponieważ koszty te kształtują się bardzo różnie, poprzestaniemy na określaniu liczby pomiarów właściwych danej metodzie. Zakładając, że badany jest wpływ dziesięciu różnych wartości ( $n_k = 10$ ) każdej z dziesięciu ( $i = 10$ ) wielkości  $x_k$  (zob. wzór (1)) - obliczamy, iż należy wykonać:  $n = 91$  pomiarów; nie uwzględniając powtórzeń, zwykle pomiary powtarza się  $r = 3 \div 6$  krotnie (szczegóły obliczeń: [5], s. 102).

- ♦ Metoda *badawczych kompletnych* polega na wykonaniu pomiarów wartości wielkości wyjściowej - parametru  $q$  dla *wszystkich możliwych* wzajemnych skojarzeń wartości



wielkości wejściowych  $x_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, i$ . Niestety ponieważ mają to być wszystkie skojarzenia - to liczba pomiarów może być wyjątkowo duża, gdyż występuje tzw. *eksplozja kombinatoryczna*. Badania kompletne dostarczają pełnej informacji: poznane zostanie ekstremum i wyznaczona aproksymująca funkcja jakości zapewniająca sterowanie. Niestety metoda ta może być całkowicie nierealna w zastosowaniach praktycznych, właśnie ze względu na absurdalnie duże liczby wymaganych pomiarów. Wystarczy przykładowo przeliczyć, iż dla całkowicie realnej w zastosowaniach przemysłowych, liczby wielkości wejściowych  $i = 10$  oraz  $n_1 = n_2 = \dots = n_{10} = 10$  i liczby powtórzeń pomiarów  $r = 3$  otrzymuje się:  $N = 3 \cdot 10^{10}$  pomiarów. Nawet wykonując 1 milion pomiarów dziennie przez 300 dni w roku, czas takich badań wyniesie... 100 lat.

I w ten sposób stanęliśmy przed dylematem: albo tanio uzyskać mało przydatne wyniki badań empirycznych wykonanych metodą tradycyjną, albo doskonałe wyniki, lecz po absurdalnie wysokich kosztach metody badań kompletnych. Wielu szefów przemysłowych laboratoriów badawczych, czy innych jednostek badawczo - rozwojowych powinno wiedzieć, że... istnieje trzecie wyjście: metody stosowanej teorii eksperymentu!

♦ Metody *teorii eksperymentu* - polegają na **teoretycznym** opracowaniu takiego skojarzenia wartości wielkości wejściowych  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$ , aby:

- 1 możliwe było wyznaczenie *aproksymującej funkcji* - tu funkcji jakości (wg wzoru (1)), w pełni przydatnej do:
  - *optymalizacji*, tj. wyznaczenia zbioru  $\{x_{1opt}, x_{2opt}, \dots, x_{iopt}\}$  spełniającego warunek ekstremalizacji (wg wzoru (2)),
  - *sterowania numerycznego* jakością w systemie produkcyjnym lub stwierdzenia zgodności parametru jakości  $q$  z jego wartością wymaganą (SSP - SKJ);
- 2 jednocześnie cel powyższy powinien być osiągnięty przy ograniczonej liczbie pomiarów ( $n$  lub  $N = r \cdot n$ , gdzie  $r$  - liczba powtórzeń pomiarów), gdyż tym samym ograniczone zostaną koszty i czas trwania badań doświadczalnych.

Każde skojarzenie wartości wielkości wejściowych  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$  nazywane jest *u - układem planu doświadczenia*; a wszystkie układy ( $u = 1, 2, \dots, n$ ) - tworzą **plan doświadczenia** (szczegóły zob. [5], s. 19 ÷ 25).

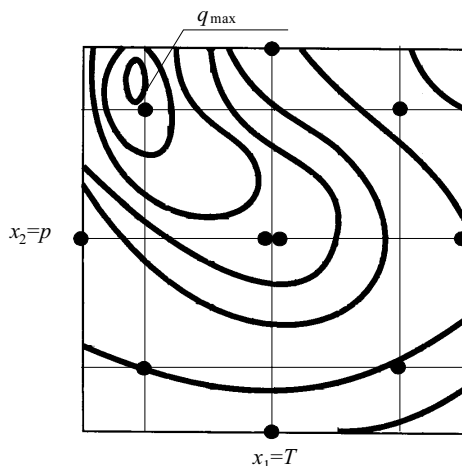
Nie jest oczywiście możliwe, aby w ramach niniejszego opracowania prezentować szczegóły; zainteresowanych odsyła się przede wszystkim do dostępnych polskich prac np. [5] lub też dokumentacji programu *STATISTICA*. Można natomiast - uwzględniając ponadto, że *verba docent, exempla trahunt* (słowa uczą przykłady pociągają) - podać prosty przykład ilustrujący istotę współczesnej metodyki badań doświadczalnych.

Zakładamy, że dowolny produkt (wyrób) charakteryzowany jest przez parametr jakości  $q$ , np. parametrem jakości może być odporność na zużycie eksploatacyjne np. zużycie ściernie, zmęczeniowe itp. (rys. 1). Jakość produktu niech z kolei zależy od pewnych wielkości -

czynników, które możemy, oczywiście w pewnym zakresie, dowolnie zmieniać. Przykładowo niech będzie to:  $x_1 = T$  - temperatura oraz  $x_2 = p$  - ciśnienie stosowane w procesie wytwarzania danego produktu; mogą być oczywiście każde inne parametry charakteryzujące technikę wytwarzania danego wyrobu. Przy całym szacunku dla nauk teoretycznych - odpowiedź na pytanie: jak parametry procesu wytwarzania, tu: temperatura ( $T$ ) i ciśnienie ( $p$ ), wpływają na parametr jakości  $q$  - może być uzyskana jedynie na drodze badań doświadczalnych. Tym bardziej, iż wymagane są konkrety, a nie sugestie typu: *dobrze jest stosować raczej niską temperaturę*, a konkrety to odpowiednie wzory empiryczne. Natomiast wzory empiryczne to funkcje aproksymujące o postaci określonej wzorem (1), a w rozpatrywanym przykładzie będzie to funkcja jakości:

$$q = Q(T, p) \quad (4)$$

Postawmy pytanie: *po co nam funkcja?*; czy nie jest to zbyt teoretyzowanie, gdy należy tylko poznać: temperaturę i ciśnienie, które powinno być stosowane w procesie wytwarzania. I konkretna odpowiedź: nie ma lepszego sposobu określenia *najlepszej* temperatury i ciśnienia, jak zastosowanie matematycznej *procedury optymalizacji* funkcji aproksymującej. Praktyk przez *najlepsze* rozumie taką temperaturę (oznaczymy ją:  $T_{opt}$ ) i ciśnienie ( $p_{opt}$ ), które zapewnią np. maksymalną wartość parametru jakości  $q_{max}$ . Pełna zgoda, tylko że teoretycznie oznacza to rozwiązanie typowego zadania optymalizacji: dla jakich  $T$  oraz  $p$  funkcja celu osiąga maksimum:  $\max(Q)$ , a zastosowana przy tym procedura optymalizacji będzie właściwa nie tylko dla dwóch wielkości  $T$  i  $p$ ., lecz dla dowolnej liczby:  $i$  - wielkości wejściowych. Można też, o ile to wynika z realiów eksperymentu, wyznaczyć minimum funkcji aproksymującej - stanowiącej w tym przypadku tzw. funkcję celu optymalizacji.



**Rys. 1. Przykład wyznaczania funkcji jakości  $q = Q(T, p)$  z zastosowaniem tzw. centralnego kompozycyjnego planu doświadczenia (linie ciągłe - rzeczywista, nieznaną funkcja jakości posiadająca maksimum  $q_{max}$ , punkty - układy planu doświadczenia)**



I drugie, może ważniejsze, uzasadnienie celowości wyznaczania funkcji: współczesne maszyny są *sterowane numerycznie* przez komputery, a komputery sterując optymalnie muszą dysponować funkcją.

W odniesieniu do metod teorii eksperymentu można wyróżnić dwa odmienne podejścia:

1. można rozwijać teorię eksperymentu opracowując teoretycznie nowe plany doświadczeń, nowe metody analiz statystycznych wyników itp.,
2. można też - i tym się będziemy wyłącznie zajmować - stosować już istniejące plany doświadczeń i metody analiz statystycznych.

A w obszarze zastosowań teorii eksperymentu, aktualnie dominuje komputerowe wspomaganie zarówno planowania doświadczeń, jak i analizy wyników pomiarów.

## Komputerowe wspomaganie doświadczeń

W latach 80. rozpoczyna się, trwający do dzisiaj, mariaż teorii eksperymentu z komputerem. To co w epoce przedkomputerowej stanowiło nie tyle trudny, co niezwykle żmudny problem obliczeniowy - obecnie rozwiązuje jedno *kliknięcie* myszą na ekranie komputera. Spektakularnym przykładem jest aproksymacja metodą najmniejszych kwadratów. Jeszcze w latach 50. powstały specjalne plany doświadczeń, tzw. *plany ortogonalne*, ułatwiające wyznaczanie funkcji aproksymujących wyniki pomiarów. Problem zniknął, gdy powstały programy wspomagające typu DOE (*Design of Experiments*) lub inaczej CADEX (*Computer Aided Design and Analysis of Experiments*); analogiczne do programów typu CAD/CAM/CIM - wspomagających projektowanie i wytwarzanie. Programy te powstają albo jako samodzielne aplikacje, albo też włączane są jako oddzielne moduły znanych programów matematyczno - statystycznych. Najlepszym przykładem jest tu moduł *Planowanie doświadczeń* programu *STATISTICA* (StatSoft).

Można też zaryzykować prognozę dalszego rozwoju teorii eksperymentu. Przede wszystkim: integracja teorii eksperymentu z sieciami neuronowymi i algorytmami genetycznymi. Sieci neuronowe - o topologii optymalizowanej przez algorytmy genetyczne - zapewniają aproksymację neuronową. A to oznacza, iż badacz może zrezygnować z doboru postaci funkcji aproksymującej - na rzecz aproksymacji neuronowej, zapewniającej aproksymację... bez funkcji (zob. tabl. 1). To są rozwiązania, które właściwie mogą już być i są stosowane - np. przy użyciu programu *STATISTICA* zintegrowanego z programem typu *sieć neuronowa*: NEURAL NETWORKS (StatSoft).

Zastosowanie komputerów rozwiązuje dość trudny problem podstawowy polegający na tym, iż współczesna teoria eksperymentu stała się rozległą dziedziną wiedzy. I mówiąc wprost, jej metody oraz stosowany aparat matematyczny czasami przerasta możliwości percepcji badacza, który - zwłaszcza nie będąc matematykiem - nie chce tracić czasu na ich poznawanie. Rozwiązaniem są właśnie systemy komputerowe wspomagające eksperyment.

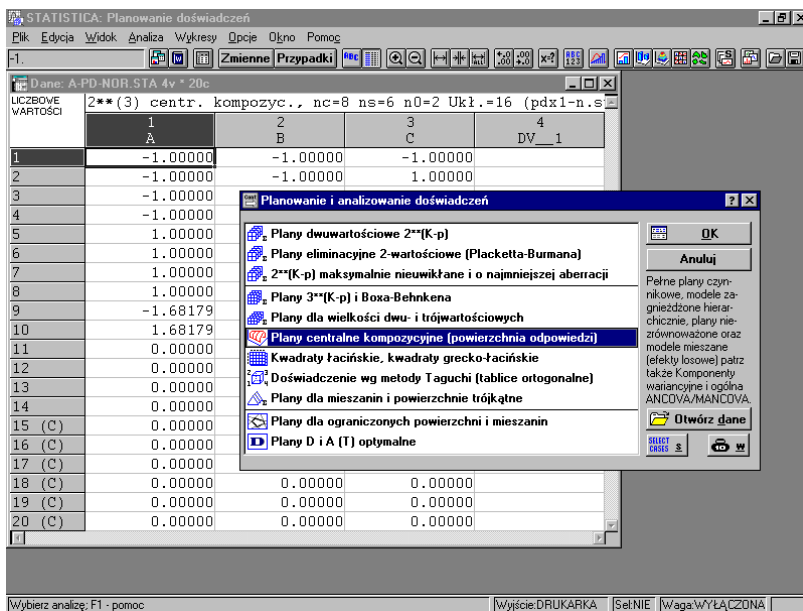
Dzisiaj mają one formę programów grupy DOE. System komputerowy *prezentuje różne plany doświadczenia* - jednak to badacz dokonuje wyboru. Rozwiązaniem przyszłościowym - i to raczej bliskim - jest system ekspertowy wspomagający planowanie

doświadczeń. Systemy ekspertowe stanowiące domenę sztucznej *inteligencji*, lub tzw. *inżynierii wiedzy* znalazły już wiele zastosowań. System ekspertowy wspomagający planowanie doświadczeń będzie działał na zasadzie dialogu z badaczem, a dysponując odpowiednią bazą wiedzy - zaproponuje plan doświadczenia. Albo bazując na klasycznych regułach wnioskowania, albo też posługując się *logiką rozmytą*. Tak czy inaczej badacz koncentrujący uwagę przede wszystkim na merytorycznych aspektach podejmowanego eksperymentu, w toku dialogu z systemem ekspertowym uzyska informację o właściwym planie doświadczenia. A po jego zrealizowaniu system wskaże odpowiednie metody analizy statystycznej wyników.

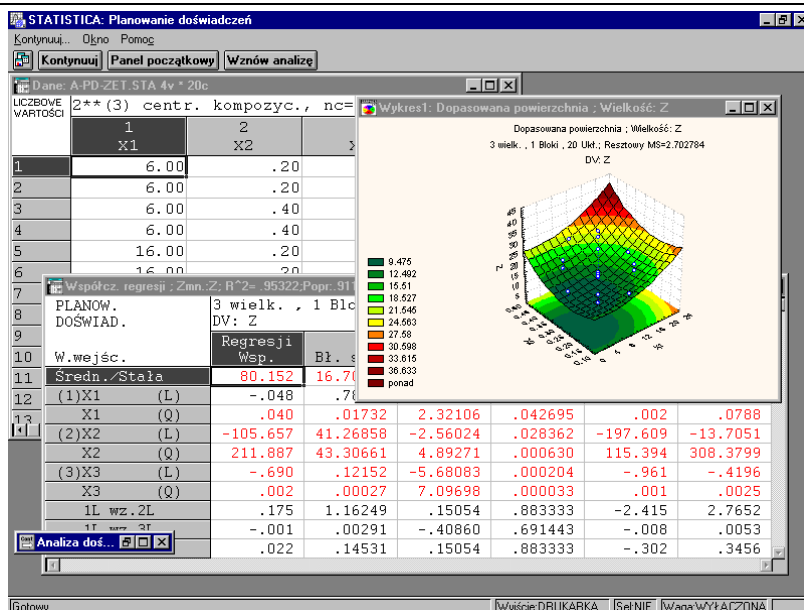
Póki co mamy już jednak programy komputerowe wspomagające, wyjątkowo skutecznie, metody planowania doświadczeń w kreowaniu jakości. Przykład: program *STATISTICA* zawierający moduł *Planowanie doświadczeń*; po jego uruchomieniu prezentowany jest (rys. 2) - szczególnie obszerny i oparty na współczesnej teorii eksperymentu - zbiór różnych rodzajów i odmian planów doświadczeń (a w tym wspomniany już plan centralny kompozycyjny - por. rys. 1).

A gdy już wykonane zostaną - zgodnie z wybranym planem - odpowiednie pomiary to *STATISTICA* prezentuje możliwości analizy wyników pomiarów (rys. 3): wyznaczenie współczynników aproksymującej funkcji jakości, wykonanie odpowiednich wykresów przestrzennych, a nawet - w pewnych przypadkach - ułatwia optymalizację itp.

A my możemy skupić się na tym co najważniejsze - ocenie merytorycznej wyników badań jakości.



**Rys. 2. Program *STATISTICA* prezentuje obszerne zbiory planów doświadczeń (łącznie z doświadczeniami wg metody Taguchi)**



Rys. 3. Program *STATISTICA* wspomaga analizę wyników pomiarów wykonanych wg planu doświadczenia: aproksymacja funkcji i jej wykresy; analiza błędów itp.

## Bibliografia

1. John P.: Statistical Design and Analysis of Experiments. SIAM 1998.
2. Montgomery D.C.: Introduction to Statistical Quality Control. Wiley 1997.
3. Myers R.H., Montgomery D.C.: Response Surface Methodology. Wiley 1995.
4. Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
5. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
6. Thompson J.R., Koronacki J.: Statystyczne sterowanie procesem. Metoda Deminga etapowej optymalizacji jakości. AOW PLJ, Warszawa 1994.
7. Thurow L.C.: Przyszłość kapitalizmu. Wyd. Dolnośląskie, Wrocław 1999.