



## POTRZEBA I METODY POSZUKIWANIA WIEDZY EMPIRYCZNEJ

*prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Polański, Politechnika Krakowska,  
Katedra Obróbki Plastycznej*

Każdy z nas jest obecnie wprost przytłoczony płynącymi zewsząd propozycjami rozszerzania swojej wiedzy i umiejętności. Od promocji różnego rodzaju książek i płyt CD - do licznych kursów, seminariów lub studiów związanych zwykle z pracą zawodową. A nawet edukacji ściśle osobistej typu: *jak pomnożyć własne pieniądze, jak zdobyć kobietę/mężczyznę* itp. A to oznacza, iż musimy dokonywać wyboru; inaczej - mówiąc językiem biznesu - nakłady poniesione na pozyskanie określonej wiedzy powinny stanowić racjonalną inwestycję.

Z powyższych stwierdzeń ogólnych wypływa konkretny wniosek dotyczący **prezentacji programu STATISTICA Planowanie Doświadczeń**. Można go sformułować następująco: *prezentacja winna eksponować potrzebę planowania eksperymentu (doświadczenia) i wykazać przydatność programu STATISTICA. Natomiast rzeczą wtórną są szczegóły użytkowania programu; notabene - w pełni dostępne w istniejącym systemie pomocy elektronicznej.*

### Technonauka i Six Sigma

W gospodarce światowej postępuje, raczej nieuchronny, proces globalizacji. A to wymusza konieczność nieustannego kreowania wszelkiego typu innowacji. Sprzedaje się przede wszystkim to, co - bardzo upraszczając - jest albo *nowe*, albo *tanie*, a jeszcze lepiej jedno i drugie. Obowiązuje przy tym brutalna prawda: *pierwszy bierze wszystko*. Jak na ironię - pozytywnym aspektem walki konkurencyjnej jest rozwój techniki ściśle powiązanej z nauką, tzw. *technonauki*. Imperia od lat kojarzono z podbojami terytorialnymi. Dzisiaj też istnieją imperia, lecz ich potęga nie wynika już wyłącznie z rozległości posiadanego terytorium, a zwłaszcza posiadanych bogactw naturalnych. Współczesne imperia to potęgi gospodarcze, dysponujące zaawansowaną technologią, której wyznacznikiem są licencje typu *know-how*.

A to odmieniło rolę społeczną dziedziny, którą ogólnie można nazwać *nauką*. Nauka, stanowiąca dotychczas raczej hermetyczną dziedzinę - kojarzona z roztargnionym uczonym, całkowicie oderwanym od realiów życia - stała się obiektem szczególnego zainteresowania. Do świątyni *Nauki*, tej najchętniej przez idealistów pisanej przez duże „N”, tłumnie wkroczyli profani. I zaczęli wynosić z niej różne wytwory czystego intelektu,



które w zautomatyzowanych fabrykach przybierały kształt różnych osobliwych rzeczy. A inni chętnie te rzeczy kupowali, gdyż one to właśnie tworzyły wyznaczniki współczesnej cywilizacji. Przykładów wiele: radio, telewizor, telefon, magnetowid, komputer itp. A z ostatniej chwili - komputer multimedialny, telefon komórkowy (najlepiej z opcją WAP - zintegrowany z Internetem, a lada dzień UMTS: telefoniczno-telewizyjna hybryda), samochód z systemem nawigacji satelitarnej, a nawet gadżet w postaci zegarka regulowanego przez radio i wyświetlającego laserowo czas gdzieś na ścianie. Okazało się, że wszystko, co w technice jest nowe, ma najczęściej swoje korzenie w nauce. Spektakularny przykład: 15 marca 1679 r. Gottfried Wilhelm Leibniz tworzy binarny zapis liczb, a ok. 175 lat później George Boole pisze w 1854 roku klasyczne dzieło, czysto naukowe: *An Investigation of the Laws of Thought* - tworzy tzw. algebrę Boole'a, która dzisiaj stanowi fundament współczesnego przemysłu komputerowego. I tak doszliśmy do etapu, gdy naukę skojarzono na trwale z techniką i poczęto w nią inwestować, podobnie jak w każdą inną dziedzinę gospodarki rokującą przyszłe zyski. Może najlepszym przykładem są tu, tak spektakularne, niesłychanie szybkie, a zarazem niejednoznaczne w ocenach moralnych - osiągnięcia w obszarze genetyki. I oczywiście wschodząca gwiazda - *biotechnologia*.

Nie można ignorować faktu, iż oprócz *czystej* nauki, zaspakajającej wrodzoną naturze ludzkiej ciekawość świata, czyli uprawianej wyłącznie w celu poznawczym - istnieje jeszcze prozaiczna, lecz wszechpotężna motywacja wyrażana w kategoriach biznesplanu. Każda innowacja, związana z procesami wytwarzania, może również wymagać badań, których metodologia jest zbieżna z badaniami stricte naukowymi. Tam i tu dąży się do pozyskania wiedzy, czyli określonej informacji, która umożliwi optymalne zaprojektowanie, a następnie wytwarzanie jednego z wielu produktów naszej cywilizacji.

Dobrym przykładem jest nowatorska metoda radykalnej poprawy rentowności firm, określana jako **Six Sigma**. Stanowi ona strategię kompleksową, obejmującą całość procesów wytwórczych, których ważnym elementem jest doskonalenie jakości. I niektórzy mogą być zaskoczeni, iż Six Sigma wymaga, aby osoby odpowiedzialne za jej zastosowanie - zwane *black belts* („czarne pasy”) - znały również metody planowania eksperymentu (DOE - *design of experiments*); zwykle kojarzone dotychczas wyłącznie z badaniami naukowymi.

## Pozyskiwanie wiedzy empirycznej - tradycja galileuszowska

Badania naukowe mogą być różne; tu uwzględnimy tylko jedną formę podziału: *badania teoretyczne i empiryczne*. Oczywiście jest, że są one ze sobą sprzężone: teoria wymaga doświadczalnej weryfikacji, a z kolei szczególny wynik eksperymentu może zrodzić nową teorię naukową. A dobra teoria to wkład w poznanie świata, ale też bardzo już dzisiaj często i bardziej prozaicznie - stanowi fundament aplikacji praktycznych, kreuje innowacje techniczne, a tym samym nasza cywilizacja zostaje wzbogacona o nowy, mniej lub bardziej potrzebny produkt. Każdy z tych produktów wymaga pozyskania pewnej wiedzy, zwłaszcza wiedzy empirycznej, warunkującej jego powstanie. Oczywiście jest też, iż akceptując wprowadzony, umowny podział na badania teoretyczne i badania empiryczne - te drugie są



znacznie bardziej kosztowne. Właśnie ta, stopniowo narastająca, presja redukcji kosztów i czasu trwania badań stała się główną przyczyną powstania nowej dziedziny wiedzy - nazywanej obecnie *teorią eksperymentu*. Teoria eksperymentu nie powstawała - jak wiele innych teorii naukowych - wyłącznie w wyniku, szlachetnego i właściwego ludzkiej naturze, dążenia do poznania otaczającego nas świata. Z nauką ma wiele wspólnego; właściwie służy jej, lecz przyczyny jej rozwoju są bardziej prozaiczne. Pierwsze załączki teorii, czyli tzw. *matematyczne opracowanie wyników pomiarów*, były bezpośrednio powiązane z eksperymentem naukowym. Jednak w miarę komercjalizacji badań empirycznych poważny rozwój teorii eksperymentu ma już głównie ekonomiczne podłoże.

Wiedzę empiryczną uzyskuje się w wyniku realizacji eksperymentów, a eksperymenty trzeba umieć realizować. Innymi słowy, należy opanować tzw. *metodykę badań empirycznych*. Metodyka badań empirycznych - sformalizowana i uzasadniona teoretycznie na bazie statystyki matematycznej, teorii aproksymacji itp. - stanowi zbiór zasad (reguł, wytycznych, ...) dotyczących sposobów postępowania, efektywnych ze względu na określony cel badań empirycznych. Celem badań empirycznych jest - w sensie ogólnym - uzyskanie wiedzy (informacji) o charakterze empirycznym. Informację taką prezentuje się zwykle, w najbardziej skondensowanej, matematycznej postaci - funkcji aproksymujących wyznaczanych na podstawie wyników pomiarów. Można jednak ustalić inne, bardziej zawężone cele badań. Szczególnie celem eksperymentu może być wyeliminowanie wielkości wejściowych o nieistotnym znaczeniu (tzw. badania eliminacyjne) lub ograniczenie badań jedynie do empirycznego wyznaczenia ekstremum (tzw. optymalizacja empiryczna). Metodyka badań empirycznych ma charakter uniwersalny, uwzględniający zróżnicowane modele obiektów badań i różne możliwe cele eksperymentu. Najogólniej rzecz ujmując, można tu wyróżnić pewne podstawowe koncepcje metodyczne. W oderwaniu od dziedziny wiedzy, w obszarze której realizowane są badania empiryczne, można przede wszystkim wyróżnić dwie metody badań. Mają one długoletnią tradycję - powiedzmy o galileuszowskim rodowodzie - a mianowicie: metoda badań kompletnych i metoda badań monoselekcyjnych.

**Metoda badań kompletnych** - stosowana najczęściej w przypadku doświadczalnego wyznaczenia wpływu jednej wielkości  $x$  (nazywanej obecnie niezależną *wielkością wejściową*) na inną wielkość  $z$  (nazywaną zależną *wielkością wyjściową*). Badaniu podlegał przede wszystkim tzw. *elementarny obiekt badań* o liczbie wielkości wejściowych  $i = 1$ , charakteryzowany zależnością funkcyjną (funkcja jednej zmiennej):

$$z = F(x) = F(x_1) \quad (1)$$

Procedura metodyczna była prosta - zmieniano kolejno wartości  $x \equiv x_1$ , tworzące  $n = n_1$  elementowy zbiór dyskretny na przedziale  $[x_{\min}, x_{\max}] \equiv [x_{1\min}, x_{1\max}]$ . Oczywiście wszystkie inne wielkości - mogące mieć wpływ na wynik eksperymentu - ustalano na wybranym poziomie wartości. Problemem były natomiast wielkości zakłócające pomiary  $\{h\}$  oraz niedokładność metod i aparatury pomiarowej. Stąd eksponowanie procedur określanych jako *matematyczne opracowanie wyników pomiarów*. Powstaje jednak *rachunek/analiza błędów*, a opracowaną przez Legendre'a (1806 r.) i niezależnie przez Gaussa



(1809 r.) *metodę najmniejszych kwadratów* wprowadza się jako pewien standard wyznaczania funkcji aproksymującej wyniki pomiarów. Podobnie postępowano w przypadku nieco większej liczby wielkości wejściowych ( $i > 1$ ), z tym że o ile pomiarów było zbyt dużo, można było po prostu ograniczyć liczbę ich wartości.

Tak powstawały *prawa naukowe*, których obecnie dzieci uczą się w szkole. Jednak gdy nauka zaczęła się rozrastać i dzielić na rozliczne dyscypliny specjalistyczne, a zwłaszcza zbliżać do techniki..., rozpoczęły się trudności. Obiekty badań stawały się bardziej złożone; przede wszystkim wzrosła liczba charakteryzujących je wielkości wejściowych. A w miejsce praw naukowych poczęto wyznaczać również *wzory empiryczne*, łączące w jedną, tzw. *funkcję obiektu badań*, wiele wielkości wejściowych:

$$z = F(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_i) \quad (2)$$

Funkcja obiektu badań stanowi dominujący rezultat analizy statystycznej wyników pomiarów i z reguły ma charakter *funkcji aproksymującej*. Analiza statystyczna - oparta na uniwersalnych procedurach statystyki matematycznej - stanowi z kolei podstawę do analizy merytorycznej odniesionej już do konkretnej dziedziny badań, w obszarze której zrealizowano eksperyment - tak tworzy się *model matematyczny obiektu badań*. Niestety metodykę badań kompletnych zniszczyła *eksplozja kombinatoryczna*. Ogólną liczbę pomiarów  $N$  wykonywanych metodą kompletną określa liczba zestawień różnych wartości wielkości wejściowych  $n$  oraz wymagana liczba powtórzeń pomiarów  $r$  (przypadek:  $r = const$ ):

$$N = r \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k \cdot \dots \cdot n_i \quad (3)$$

A to w zastosowaniach praktycznych może już wymagać absurdalnie dużej liczby pomiarów niezbędnych do realizacji badań metodą kompletną; przykład:  $i = 10, r = 3, n_k = n_x = 10$ , skąd  $N = 3 \cdot 10^{10}$  (sic!). Można łatwo obliczyć, że gdyby 1. pomiar trwał tylko godzinę - to czas badań kompletnych można oszacować na ok. 3 mln lat. Nikt nie może też kwestionować, że dla współczesnych obiektów badań (maszyn, innych urządzeń technicznych itp.) są to wartości zbyt duże. Notabene już dla  $i = 4$  wymagana liczba pomiarów wynosi:  $N = r \cdot n = 3 \cdot 10^4 = 30000$ , a tego „nie wytrzyma” żaden biznesplan, w którym koszt i czas badań - wpływający na zwrot nakładów inwestycyjnych na badania - ma znaczenie decydujące.

**Metoda badań monoselekcyjnych (tradycyjna)** powstała i była stosowana po prostu z konieczności. Notabene jest ona nadal jeszcze stosowana, ale już raczej z powodu nieznamości współczesnej teorii eksperymentu. Istotę jej stanowi zastosowanie procedur właściwych elementarnemu obiektowi badań ( $i = 1$ ) w odniesieniu do wielowejsciowego obiektu badań ( $i > 1$ ). Po prostu dokonywano pojedynczego wyboru, tzw. *monoselekcji*, kolejnych wielkości  $x_k$  i badano doświadczalnie, jak na wielkość wyjściową z wpływają zmiany jej wartości. Równocześnie ustalano przy tym wartości wszystkich pozostałych wielkości wejściowych:  $x_{q/m} = const, q = 1, 2, \dots, i; q \neq k, m = 1, 2, \dots, n_k \vee n_q$ .



Można łatwo wykazać, iż metoda badań monoselekcyjnych jest fatalna w skutkach; zwłaszcza w przypadku większej liczby wielkości wejściowych. Całkowicie ignoruje się bowiem interakcje między wielkościami wejściowymi. Wpływ każdej wielkości wejściowej  $x_k$  na wielkość wyjściową  $z$  może przecież zależeć od arbitralnie ustalonych wartości pozostałych wielkości  $x_{q/m}$  ( $q \neq k$ ). Nie otrzymuje się przy tym jednej funkcji obiektu badań, lecz zbiór pojedynczych *funkcji monoselekcyjnych obiektu badań*:

$$z = F_k(x_k), \quad k = 1, 2, \dots, i \quad (4)$$

A to oznacza brak możliwości optymalizacji globalnej i nieprzydatność do sterowania numerycznego. Osiągnięto natomiast poważną redukcję liczby wymaganych pomiarów:

$$N = r[n_1 + (n_2 - 1) + \dots + (n_i - 1)] \quad (5)$$

Przykładowo porównując z badaniami kompletnymi (por. wzór (3)) dla  $i = 10$ ,  $n_k = 10$  oraz  $r = 3$ , otrzymuje się:  $N = 273$  pomiary; przypomnijmy: metoda badań kompletnych wymagała tu absurdalnej liczby  $N = 3 \cdot 10^{10}$  pomiarów! Powstał impas polegający na tym, że metoda badań kompletnych okazała się praktycznie niemożliwa do stosowania ze względu na zbyt dużą liczbę wymaganych pomiarów, a praktycznie możliwa do stosowania - metoda badań monoselekcyjnych nie zapewniała wymaganej informacji przydatnej do optymalizacji i sterowania numerycznego.

## Koncepcje współczesnej teorii eksperymentu

Tradycyjna metodyka badań empirycznych, o galileuszowskim rodowodzie, nie spełniała oczekiwań zawodowych naukowców z ośrodków badawczych. Stopniowo narastająca presja zainicjowała powstanie teorii eksperymentu, od której oczekiwano, iż zapewni uzyskanie poprawnej, tzw. przydatnej w zastosowaniach, doświadczalnej informacji naukowej, przy kosztach ograniczonych do niezbędnego minimum. Nieświadomie przywoływano sentencję L. Boltzmann: *Nie ma nic bardziej praktycznego niż dobra teoria*.

Teoria eksperymentu powstawała stopniowo; jej załączki sięgają korzeniami jeszcze do metody najmniejszych kwadratów, którą adaptowano dla potrzeb eksperymentu. Dopiero jednak R.A. Fisher - angielski statystyk i genetyk tworzy szersze 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. Tradycyjna metodyka badań, tj. badania kompletne i monoselekcyjne pozostawiały badaczowi swobodę wyboru wartości wielkości wejściowych, dla których realizowano eksperyment. Natomiast wyniki pomiarów wartości wielkości wyjściowej analizowano matematycznie *dopiero po przeprowadzeniu eksperymentu*. Teoria eksperymentu odwraca ten porządek - *na samym początku* ustala się plan eksperymentu wynikający z teorii eksperymentu. Plan eksperymentu



zapewnia uzyskanie wymaganej informacji doświadczalnej, przy jednoczesnym znacznym ograniczeniu liczby pomiarów (czas i koszty badań!). Analiza matematyczna (statystyczna) wyników pomiarów pozostaje nadal i wykonywana jest po zakończeniu pomiarów, lecz stosowane metody analizy są ściśle związane z zastosowanym planem eksperymentu.

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* i rozszerza się formalne podstawy matematyczne planowania doświadczeń. W okresie tym powstaje, wyjątkowo skuteczna w zastosowaniach, metoda optymalizacji empirycznej, tzw. *metoda Boxa-Wilsona*. Następny impuls to już prace 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.

Trwa stałe zapotrzebowanie na teorię eksperymentu, wynikające z prostego faktu, iż jej stosowanie obniża i tak bardzo duże koszty badań doświadczalnych. Charakterystyczny jest podtytuł jednej z nowszych prac z zakresu teorii eksperymentu, a mianowicie monografii: R.H. Myers i D.C. Montgomery: *Response Surface Methodology*, o podtytule: *Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Impulsem, o trudnym do przecenienia znaczeniu, stał się rozpoczęty w latach 80. trwały mariaż teorii eksperymentu z komputerem. Tofflerowski *Szok przyszłości* zaowocował **metodami komputerowego wspomaganie eksperymentu**, korzystającymi z oprogramowania CADEX/DOE (akronimy: CADEX - *Computer Aided Design and analysis of Experiments* / DOE - *Design of Experiments*). To, co w epoce przedkomputerowej stanowiło nie tyle trudny, co niezwykle żmudny problem obliczeniowy, obecnie rozwiązuje jedno *kliknięcie* myszą na ekranie komputera. Powstała również, całkowicie nowa, tzw. druga generacja (2GD) planów eksperymentu: na gruncie inteligentnych systemów obliczeniowych (komputerowe sieci neuronowe, algorytmy ewolucyjne) kreowane są *inteligentne plany eksperymentu*.

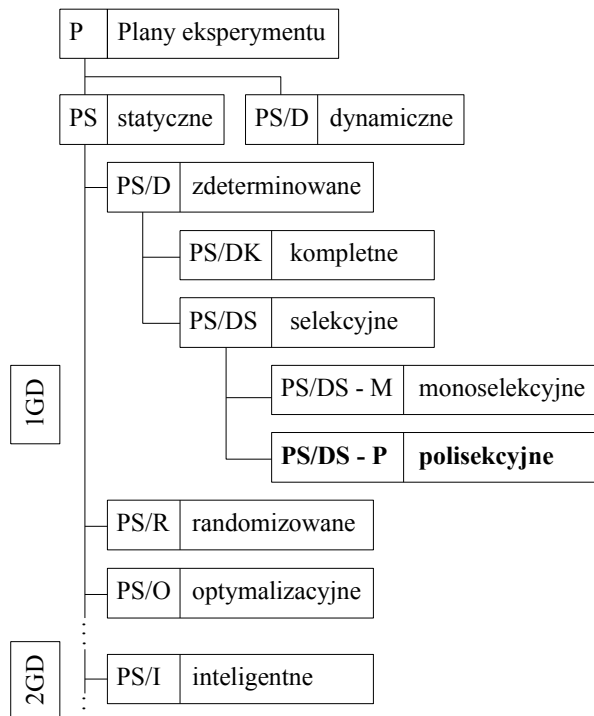
Można wyrazić pogląd, iż przedstawione powyżej fakty uzasadniają potrzebę pozyskiwania wiedzy empirycznej i to z wykorzystaniem metodologii współczesnej teorii eksperymentu.

## Program STATISTICA wspomaga eksperyment

Dalsze rozumowanie przebiega według następującego schematu:

- ◆ Jeżeli akceptujemy potrzebę pozyskania wiedzy empirycznej, np. stosując strategię Six Sigma, to przystępujemy do realizacji eksperymentu.
- ◆ Jeżeli realizujemy eksperyment - to stosujemy metody współczesnej teorii eksperymentu.
- ◆ Jeżeli stosujemy metody teorii eksperymentu - to wyłącznie z uwzględnieniem komputerowego wspomaganie przez oprogramowanie typu CADEX/DOE, a zwłaszcza polskojęzyczny program *STATISTICA Planowanie Doświadczeń*.

W ten sposób od pytania CZY pozyskiwać wiedzę empiryczną, realizując eksperyment, przechodzimy do pytania JAK realizować eksperyment? I tu należy od razu wyjaśnić: komputerowo wspomagana realizacja eksperymentu stanowi pewną umiejętność, którą należy po prostu opanować. Przede wszystkim należy umieć dokonać *wyboru planu eksperymentu*. Decyzja o wyborze planu eksperymentu ma znaczenie podstawowe i może być utrudniona przez fakt, iż planów tych jest po prostu dużo (rys. 1).



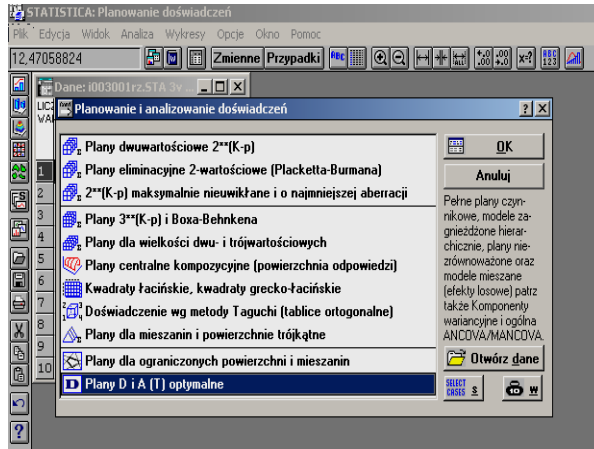
Rys. 1. Podstawowe grupy planów eksperymentu (oznaczenia - Z. Polański: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN 1984).

Przede wszystkim wyróżnia się *plany statyczne*, stosowane do statycznych obiektów badań, i *plany dynamiczne* - odnoszone do dynamicznych obiektów. W grupie planów statycznych wyróżnia się z kolei:

- ◆ *plany zdeterminowane*, których układy determinują ustalone założenia teoretyczne (zwykle dotyczą one związków planu z funkcją aproksymującą),
- ◆ *plany randomizowane* uwzględniające, w różnym stopniu, element losowości; podstawowym celem ich stosowania jest ocena istotności wpływu wielkości wejściowych (badania eliminacyjne),
- ◆ *plany optymalizacyjne* stosowane do wyznaczenia ekstremum funkcji obiektu badań, jednak bez uprzedniego wyznaczenia samej funkcji (optymalizacja empiryczna),
- ◆ *plany inteligentne*, stanowiące nową, tzw. *drugą generację planów eksperymentu* (2GD).

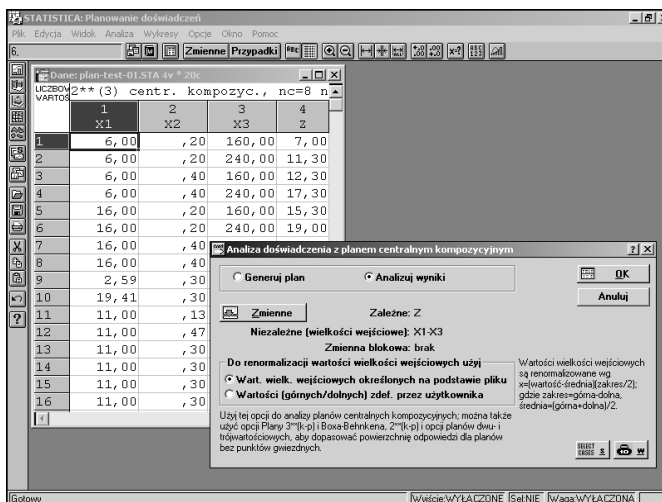


Szczególnie rozpowszechnione są plany zdeterminowane, stanowiące podstawę współczesnej teorii eksperymentu. Obejmują one szereg poszczególnych typów planów, łącznie z tradycyjnymi *planami kompletnymi* (realizacja metody badań kompletnych) i *planami monoselekcyjnymi* (metoda badań monoselekcyjnych). Najbardziej eksponowane są jednak tzw. *plany poliselekcyjne*, których większość zawarta jest w programie *STATISTICA Planowanie Doświadczeń*. A to znakomicie ułatwia dokonanie wyboru: program kolejno prezentuje plany eksperymentu, a my wybieramy najbardziej odpowiedni (rys. 2). Innymi słowy, rzecz zostaje sprowadzona do właściwego kliknięcia [OK]; akcentuje się tu słowo: *właściwego!*



Rys. 2. Program *STATISTICA* prezentuje listę planów eksperymentu - wybór należy do badacza.

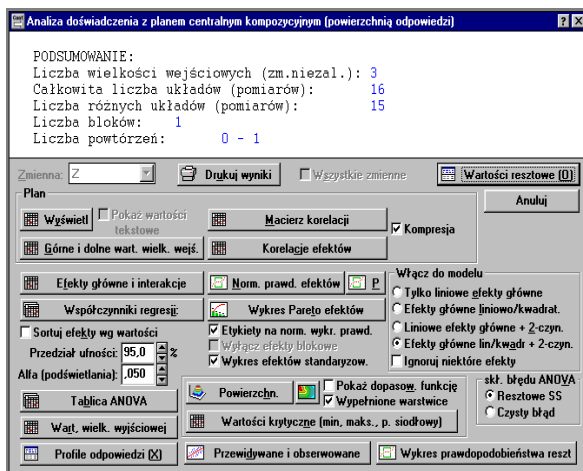
Następny etap to realizacja pomiarów, np. pomiary parametrów jakości w Six Sigma lub każde inne. Wyniki pomiarów - wykonanych zgodnie z planem eksperymentu - wprowadzamy do programu *STATISTICA* (rys. 3) i przystępujemy do *analizy wyników pomiarów*.



Rys. 3. Plan eksperymentu z wynikami pomiarów - przygotowany do analizy wyników.

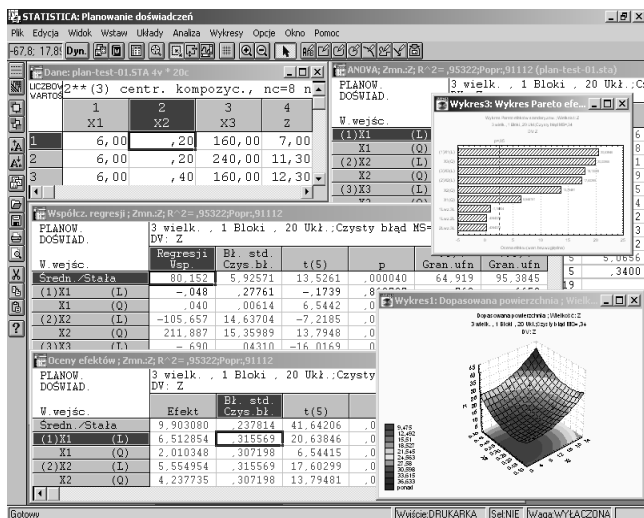


Komputerowe wspomaganie analizy wyników pomiarów zrealizowanych na podstawie planu eksperymentu zapewnia trudne do przecenienia efekty. Należy przede wszystkim podkreślić rozległy zakres możliwych analiz, połączony z opcją ich natychmiastowej realizacji (rys. 4).



Rys. 4. Program *STATISTICA* - szczególnie rozległe możliwości komputerowo wspomaganiej analizy wyników eksperymentu.

Komputer szybko liczy, ale to *badacz wskazuje, co ma liczyć*, i co ważniejsze, musi umieć właściwie odczytać i zinterpretować wyniki obliczeń, a to nie zawsze jest łatwe (zob. rys. 5 - sic!).



Rys. 5. Wybrane elementy analizy wyników eksperymentu - program *STATISTICA*.

Umiejętność stosowania wspomaganých komputerowo metod planowania i analizy eksperymentu stanowi po prostu warunek efektywnego pozyskania wiedzy empirycznej.