

P O L S K A A K A D E M I A N A U K

I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

**TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF
FLUID-FLOW MACHINERY**

PRACE

I N S T Y T U T U M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

97



GDAŃSK 1993

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machines

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH * HENRYK JARZYNA * JERZY KRZYŻANOWSKI
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ * WŁODZIMIERZ J. PROSNAK
JÓZEF ŚMIGIELSKI * ZENON ZAKRZEWSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EDITORIAL COMMITTEE

EUSTACHY S. BURKA (REDAKTOR NACZELNY – EDITOR-IN-CHIEF)
JAROSŁAW MIKIELEWICZ
EDWARD ŚLIWICKI (REDAKTOR – EXECUTIVE EDITOR) * ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
ul. Gen. Józefa Fiszera 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621,
tel. (0-58) 41-12-71 wew. 141, fax: (0-58) 41-61-44,
e-mail: tjan@imppan.imp.pg.gda.pl

ISBN 83-01-94115-2
ISSN 0079-3205

JAN SIKORA¹, OLGIERD OLSZEWSKI¹

Przykłady efektywnego wykorzystania teorii eksperymentu w doświadczalnych badaniach urządzeń laboratoryjnych i technologicznych

Czas i koszt doświadczalnych badań obiektów technicznych o stochastycznym charakterze można istotnie zmniejszyć przez stosowanie współczesnej teorii eksperymentu. W artykule przedstawiono przykłady praktycznego wykorzystania statystycznych metod planowania doświadczeń do identyfikacji modelu matematycznego urządzeń laboratoryjnych i technologicznych. Eksperymenty eliminujące oparte na zasadzie bilansu losowego i analiza wykresów rozproszenia zostały użyte do wykrycia cech konstrukcyjnych i czynników operacyjnych istotnie wpływających na charakterystyki maszyny badawczej łożysk ślizgowych. Plan doświadczenia drugiego rzędu o symetrii obrotowej, tzw. plan rotalny zastosowano do wyznaczenia regresyjnego modelu procesu produkcji taśmy łożyskowej bezsmarowej oraz do optymalizacji procedury jej wytwarzania. Problem bieżącej kontroli jakości produktu finalnego rozwiązano za pomocą testu opartego na zasadach analizy sekwencyjnej Walda.

1. Wprowadzenie

Stosowanie zasad współczesnej teorii eksperymentu w empirycznych badaniach obiektów o stochastycznym charakterze jest obecnie uważane za nieodzowny atrybut poprawności metodologicznej. Zaplanowanie badań bez znajomości tych zasad narazić może badacza albo na znaczne wydłużenie czasu badań i związane z tym koszty, albo na uzyskanie wyników na podstawie których niemożliwy, lub co najmniej utrudniony, będzie miarodajny ilościowy opis wieloczynnikowego obiektu badań.

W Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Gdańskiej stosuje się planowanie badań doświadczalnych i statystyczne metody opracowywania i analizy wyników pomiarów w prawie wszystkich projektach badawczych od połowy lat sześćdziesiątych. W pracy przedstawiono kilka wybranych przykładów takich badań.

¹Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

Działalność naukowa Katedry w znacznej mierze dotyczy konstrukcji i weryfikacji doświadczalnej prototypów unikatowych maszyn badawczych oraz linii technologicznych specjalistycznych elementów maszyn. Celem badań jest w tym przypadku identyfikacja obiektu badań i zachodzących w nim zjawisk przez wyznaczenie modelu matematycznego umożliwiającego optymalizację cech konstrukcyjnych lub parametrów technologicznych obiektu oraz predykcję jego charakterystyk. Model ten w znacznej liczbie przypadków jest formułowany – a prawie zawsze weryfikowany – na podstawie eksperymentu. Stąd ma on najczęściej charakter stochastyczny ze względu na dużą liczbę potencjalnie istotnych zmiennych, spośród których tylko nieliczne są sterowalne i mogą być ujęte w doświadczeniu czynnym.

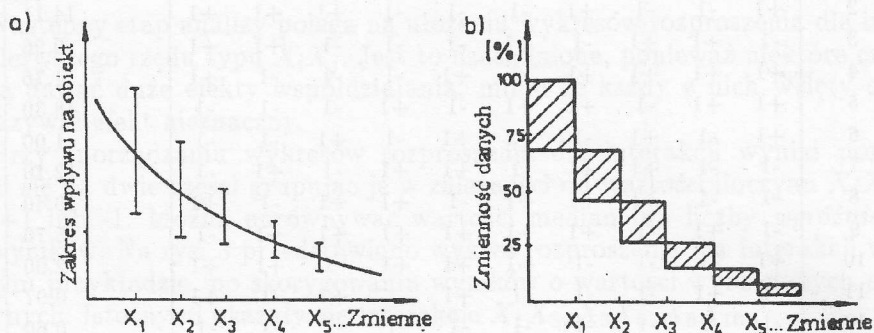
2. Przykład wykorzystania eksperymentów eliminujących w badaniach maszyn

Zasadnicze trudności związane z wyznaczeniem matematycznego modelu obiektu polegają na:

- ustaleniu zmiennych niezależnych X_i , od których w istotny sposób zależy działanie obiektu i od których będzie zależał model,
- przyjęciu odpowiedniej postaci funkcji aproksymującej wyniki doświadczeń,
- optymalnym zaplanowaniu eksperymentu, aby uzyskać żądaną zgodność modelu z obiektem przy możliwie jak najmniejszych nakładach – miarą tych nakładów jest najczęściej liczba prób.

Kluczowym problemem jest tu rozwiązanie pierwszej z wymienionych trudności, ponieważ od wymiaru k przestrzeni, w jakiej ma być określony model, zależy właściwe zaplanowanie doświadczeń oraz stopień złożoności poszukiwanej funkcji. Właściwy wybór zmiennych powinien być zatem dokonany na etapie badań wstępnych, aby umożliwić racjonalne uproszczenie modelu. Rozwiązanie praktyczne tego problemu opiera się na idei rozpoczynania doświadczeń z modelem stosunkowo rozbudowanym (duża liczba k zmiennych, aby nie pominąć któregoś z czynników istotnych) i polega na możliwie szybkim eliminowaniu z doświadczeń – a więc i z modelu – tych zmiennych, których wpływ jest nieistotny. Badania, których celem jest wyselekcjonowanie czynników istotnych, są w literaturze nazywane badaniami rozpoznawczymi [1], doświadczeniami odsiewającymi lub eliminującymi [2,3]. W artykule przyjęto je nazywać eksperymentami eliminującymi EE od popularnego w literaturze anglosaskiej określenia *screening experiments* [4]. Sytuacja uzasadniająca potrzebę takich doświadczeń występuje wówczas, gdy mechanizm badanego zjawiska lub procesu nie jest dokładnie znany, zaś posiadane wiadomości merytoryczne o obiekcie nie pozwalają na jednoznaczne wyselekcjonowanie czynników istotnych spośród dużej liczby zmiennych, które mogą potencjalnie wpływać na obiekt.

Przykładem praktycznego wykorzystania zasad EE są badania optymalizacyjne maszyny badawczej łożysk ślizgowych opisane przez Majewskiego i Sikorę [5]. Wstępny etap tych badań przeprowadzono według programu tzw. bilansu losowego. W metodzie tej zakłada się, że jeżeli czynniki, od których zależy przebieg procesu, ułoży się według malejącego wkładu wnoszonego przez nie, to otrzyma się krzywą malejącą o charakterze wykładniczym (rys. 1).



Rys. 1. Uporządkowanie czynników według: a) malejącego wpływu ich średnich wartości, b) malejącego udziału w wariancji obiektu

Zadaniem badacza, który nie wie z góry jak należy uszeregować czynniki, polega na odtworzeniu tej kolejności na podstawie wyników eksperymentu. Zmienne położone w prawej części wykresu powinny być zaliczone do pola szumów, na tle którego można wyodrębnić istotne efekty położone w lewej części wykresu.

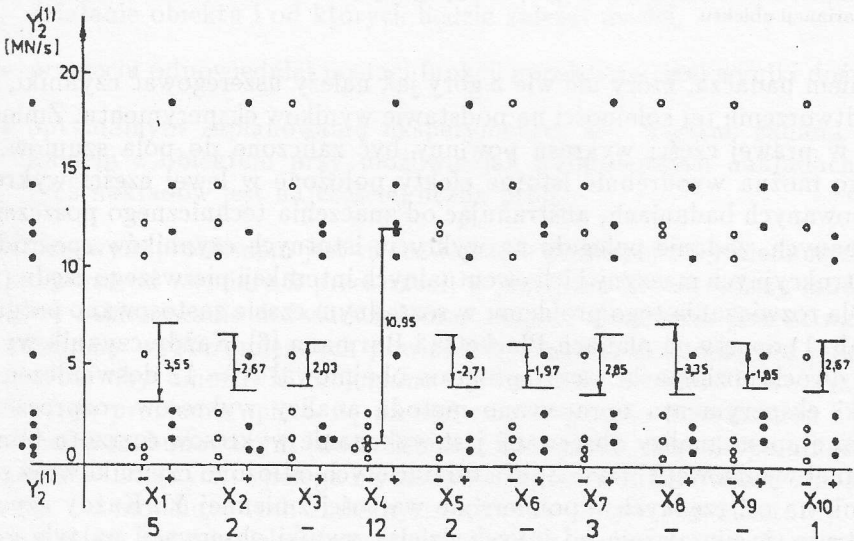
W cytowanych badaniach, abstrahując od znaczenia technicznego poszczególnych zmiennych, zadanie polegało na wykryciu istotnych czynników spośród 10 cech konstrukcyjnych maszyny i ich ewentualnych interakcji pierwszego rzędu (jest ich 45). Dla rozwiązania tego problemu w rozsądnym czasie zastosowano program badań (tab. 1) oparty na planach Placketta i Burmana [6]. Każdy czynnik występował na dwóch poziomach, a cały program obejmował $N = 12$ doświadczeń.

Wyniki eksperymentu opracowano metodą analizy wykresów rozproszenia. Pierwszym etapem analizy obserwacji jest wykonanie wykresów rozrzutu pomiarów zmiennej wynikowej Y (rys. 2). Na osi odciętych odłożono czynniki wraz z ich poziomami, na osi rzędnych – pomierzone wartości zmiennej Y . Każdy czynnik X_i rozpatruje się niezależnie od innych dzieląc wyniki obserwacji na tyle grup, na ilu poziomach występuje. Efekty liniowe każdego czynnika ocenia się wizualnie porównując mediany obliczone oddzielnie dla obu poziomów. Niezależnie od tego stosuje się dodatkowe kryterium w postaci liczby punktów *wyróżniających* się, to znaczy punktów, w których zaobserwowana wartość Y wykracza poza ekstremalne wartości Y dla danego czynnika na drugim poziomie. Na rys. 2 liczby tych punktów podano pod symbolem każdej zmiennej. Dla oceny istotności czynników na podstawie liczby punktów *wyróżniających* się, oprócz metody wizualnej, można zastosować nieparametryczny test statystyczny opracowany przez Budne'a [7].

Tablica 1

Macierz planowania dla bilansu losowego według [5]

Numer testu	Badane czynniki										Wynik testu Y
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1.36
2	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	14.11
3	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	0.96
4	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	11.76
5	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	18.30
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1.00
7	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	12.10
8	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	10.40
9	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	5.70
10	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	2.00
11	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	0.97
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.60



Rys. 2. Wykresy rozrzutu dla efektów głównych na podstawie danych wyjściowych [5]

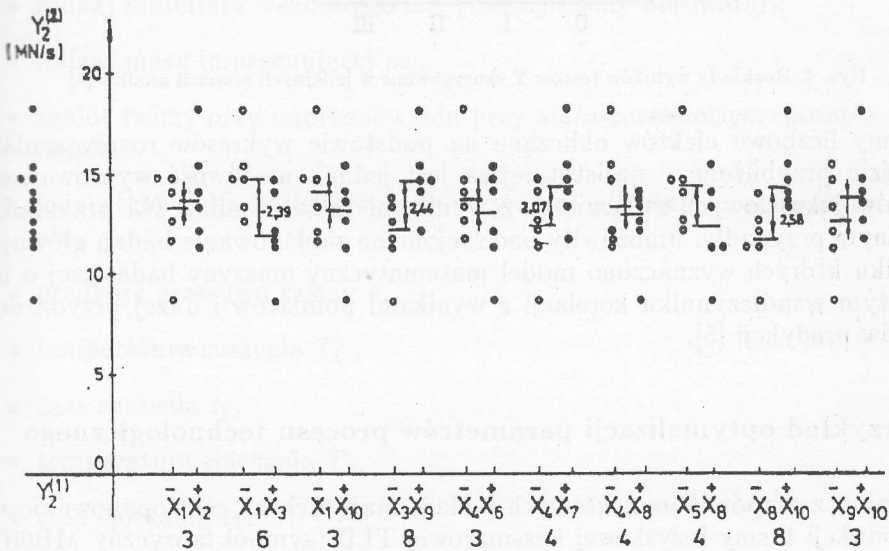
Istotność efektów² liniowych wyznaczonych na podstawie wykresów rozproszenia można zweryfikować statystycznie stosując standardowy aparat matematyczny analizy regresji.

²Pojęcie efektu czynnika jest tu rozumiane w kategoriach analizy czynnikowej jako miara wpływu na wielkość wynikową spowodowaną różnicą poziomów - 1 i + 1 analizowanej zmiennej [8]

Po uznaniu pewnych czynników za istotne można ocenić efekty wnoszone przez nie i dokonać korekty wyników doświadczenia odejmując różnicę median od wyników pomiarów odpowiadających poziomowi $+1$ czynników istotnych. Stwarza się wówczas taką sytuację, jak gdyby nie istniało oddziaływanie tych czynników. W ten sposób można zwiększyć czułość metody i dokładniej zbadać wpływ dalszych czynników analizując skorygowane wykresy rozproszenia w sposób identyczny jak poprzednio. Tego typu eliminację czynników istotnych można powtarzać kilkakrotnie.

Następny etap analizy polega na ułożeniu wykresów rozproszenia dla interakcji pierwszego rzędu typu $X_i X_j$. Jest to uzasadnione, ponieważ niektóre czynniki mogą dawać duże efekty współdziałania, mimo że każdy z nich wzięty osobno, wykazywał efekt nieznaczny.

Przy sporządzaniu wykresów rozproszenia dla interakcji wyniki pomiarów dzieli się na dwie części grupując je w zależności od wartości iloczynu $X_i X_j$ równej $+1$ lub -1 . Można porównywać wartości median lub liczby wyróżniających się wyników. Na rys. 3 przedstawiono wykres rozproszenia dla interakcji w cytowanym przykładzie, po skorygowaniu wyników o wartości wydzielonych efektów głównych. Istotnymi okazały się interakcje $X_1 X_3$, $X_3 X_9$, $X_8 X_{10}$.

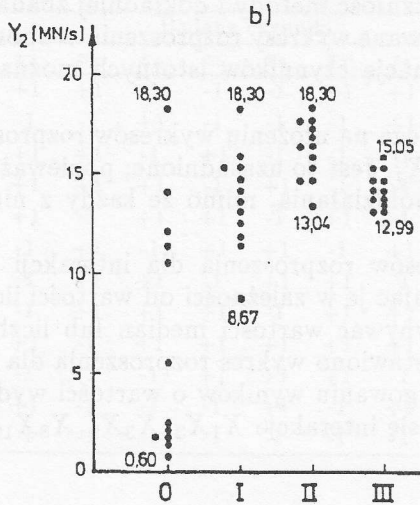


Rys. 3. Wykresy rozproszenia dla wybranych interakcji na podstawie skorygowanych danych [5]

Postępowanie eliminujące czynniki istotne można przerwać w dowolnym momencie, o ile eksperymentator będzie przekonany o tym, że wydzielil czynniki najistotniejsze. Ilościowym kryterium upoważniającym do podjęcia takiej decyzji jest odpowiedni wynik testu F Snedecora, który stosuje się w standardowy sposób.

Miarą efektywności prezentowanej metody może być zmniejszenie rozrzutu

wyników pomiarów osiągnięte w rezultacie kolejnych etapów analizy, przedstawione na rys. 4. Liczba przeprowadzonych eksperymentów była równa 12, podczas gdy realizacja np. pełnego dwupoziomowego doświadczenia czynnikowego dla dziesięciu zmiennych wymagałoby przeprowadzenia 1024 doświadczeń.

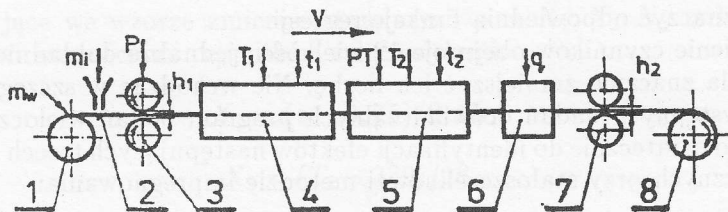


Rys. 4. Rozkłady wyników testów Y skorygowane w kolejnych etapach analizy [5]

Oceny liczbowe efektów obliczane na podstawie wykresów rozproszenia są oczywiście przybliżone – najistotniejsza jest jednak możliwość wyprowadzenia wniosków jakościowych związanych z wynikami takiej analizy. Na przykład, w cytowanym przypadku umożliwiły one racjonalne zaplanowanie badań głównych, w wyniku których wyznaczono model matematyczny maszyny badawczej o bardzo dużym współczynniku korelacji z wynikami pomiarów i dużej przydatności dla celów predykcji [5].

3. Przykład optymalizacji parametrów procesu technologicznego

Jednym z etapów kompleksowych badań, mających na celu opanowanie metod produkcji taśmy łożyskowej bezsmarowej TŁB (symbol fabryczny MB60) w Wytwórni Łożysk Ślizgowych PZL BIMET była doświadczalna identyfikacja stanowiska laboratoryjnego do ciągłego wytwarzania taśmy. Schemat ideowy stanowiska, z zaznaczeniem najważniejszych podzespołów, w których regulowane są parametry technologiczne układu mogące wpływać na jakość produkowanej taśmy, przedstawiono na rys. 5. Celem identyfikacji obiektu badań było takie rozpoznanie procesu wytwarzania taśmy, aby można było nim świadomie i efektywnie sterować dla uzyskania pożądanych cech i właściwości produktu końcowego. W praktyce oznaczało to optymalizację procesu technologicznego realizowanego na stanowisku.



Rys. 5. Schemat stoiska laboratoryjnego do wytwarzania TŁB

1 – bęben z taśmą porowatą, 2 – dozownik masy impregnującej, 3 – walcarka impregnująca, 4 – suszarka, 5 – piec do spiekania, 6 – zespół hartowniczy, 7 – walcarka kalibrująca, 8 – zwijarka taśmy łożyskowej

Zadanie rozwiązano metodą doświadczalną polegającą na wyznaczeniu i zbadaniu modelu matematycznego procesu, dostatecznie dokładnego ze względu na przewidywane zastosowanie techniczne. Model matematyczny był funkcją regresji drugiego rodzaju wyznaczoną za pomocą aparatu statystyki matematycznej.

W przypadku badanego stanowiska laboratoryjnego następujące czynniki mogą wpływać na własności wytwarzanej TŁB:

- rodzaj materiału wsadowego m_w (rodzaj taśmy porowatej),
- rodzaj masy impregnującej m_i ,
- zgniot taśmy przy impregnowaniu przy *stałoszczelinowym* sposobie wytwarzania,
- jednostkowa siła nacisku walców przy *stałosiłowym* sposobie impregnowania,
- prędkość przesuwu taśmy v ,
- temperatura suszenia T_1 ,
- czas suszenia t_1 ,
- temperatura spiekania T_2 ,
- czas spiekania t_2 ,
- pole temperatur w piecu spiekającym PT,
- intensywność hartowni q ,
- wartość szczeliny h_2 między walcami kalibrującymi.

Wielkości wyjściowe Y stanowią parametry kryterialne taśmy łożyskowej, a mianowicie: umowne wskaźniki zawartości tarflenu w warstwie ślizgowej taśmy [9], mikrotwardość warstwy ślizgowej po kalibrowaniu oraz odporność na zużycie wyznaczana w testowych badaniach tribologicznych. Dla każdej z tych wielkości

można wyznaczyć odpowiednią funkcję regresji.

Zestawienie czynników obejmuje 12 wielkości, jednakże dokładniejsza analiza [10] pozwala znacznie zmniejszyć ich liczbę. Nie wchodząc w szczegóły tej analizy oraz wstępnych badań doświadczalnych program badań wieloczynnikowych ograniczono ostatecznie do identyfikacji efektów następujących trzech parametrów technologicznych przy stałoszczelinowej metodzie impregnowania:

- prędkości przesuwu taśmy v w przedziale od 0,5 do 1 m/min ,
- temperatury spiekania T_z zaimpregnowanej taśmy w przedziale od 300 do 360°C,
- zgniotu z przy impregnowaniu w przedziale od 0 do 0,14 mm .

Podczas badań przyjęto stałą wartość tych parametrów technologicznych, których wpływ został rozpoznany z dostateczną dokładnością w badaniach wstępnych, a w szczególności zgniot przy kalibrowaniu równy 0.15 mm oraz hartowanie taśmy po spieczeniu do temperatury 3°C.

Badane zmienne wyznaczały trójwymiarową przestrzeń czynnikową, której każdy punkt odpowiadał określone mu wariantowi nastaw parametrów technologicznych stanowiska. Badania zrealizowano według centralnego planu rotalnego drugiego rzędu o ramieniu gwiazdowym³ $\alpha = 1,682$ i strukturze wynikającej z zapisu:

$$N = 2^k + 2k + N_0, \quad (1)$$

gdzie $k = 3$ oznacza liczbę badanych czynników, zaś $N_0 = 6$ liczbę powtórzeń w jądrze planu. Pełny eksperyment objął zatem badanie 15 wariantów taśmy, zaś całkowita liczba doświadczeń N wynosiła 20. Każdy egzemplarz taśmy testowano według identycznej procedury obejmującej:

- wyznaczenie wskaźników technologicznych określających zawartość tarflenu,
- badania charakterystyk tribologicznych w standardowym teście na urządzeniu Tribometr PT 1 [11].

Szczegółowe wyniki badań i ich analizę podano w [12]. Najbardziej miarodajną wielkością dla oceny jakości TŁB okazał się wynik pomiaru masowej miary zużycia próbek, który może być wyrażony jako funkcja regresji trzech wymienionych czynników (zmiennych) technologicznych:

$$Y = 3,8221 - 0,3310X_1 - 1,9265X_2 + 0,5306X_3 + 0,2255X_1^2 + 1,819X_2^2 + 0,3634X_3^2 + 0,025X_1X_2 + 0,745X_1, X_3 + 0,820X_2X_3. \quad (2)$$

³Ramię gwiazdne oznacza wyrażoną w jednostkach zmiennych standaryzowanych odległość $2k$ punktów przestrzeni czynnikowej od jądra doświadczenia, zapewniającą rotalność planu badań [8]

Występujące we wzorze zmienne standaryzowane X_1, X_2, X_3 związane są z rzeczywistymi wartościami czynników zależnościami:

$$X_1 = (v - 0,75)/0,15, \quad (3)$$

$$X_2 = (T_2 - 330)/18, \quad (4)$$

$$X_3 = (z - 0,07)/0,04. \quad (5)$$

Po przebadaniu modelu (2) można stwierdzić, że największą odporność TŁB na zużycie uzyskuje się przy następujących wartościach parametrów technologicznych:

- przy prędkości walcowania $v = 0,87 \div 0,9 \text{ m/min}$,
- przy temperaturze spiekania w zakresie $341 \div 344^\circ\text{C}$,
- przy zgncioie podczas impregnowania nie większym niż $0,02 \text{ mm}$.

Wniosek ten jest miarodajny dla zastosowanego materiału wsadowego (typ i struktura brązu porowatego, rodzaj masy impregnującej) oraz ustalonego w badaniach pola temperatury w piecu podczas spiekania. W przypadku zmiany wymienionych parametrów warunki optymalne przebiegu procesu mogą być inne.

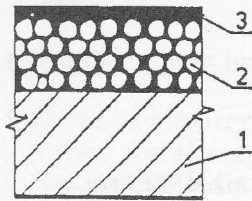
Zastosowana metoda badania wieloczynnikowego za pomocą modelu regresyjnego umożliwiła znaczne zwiększenie wiarygodności identyfikacji obiektu badań w porównaniu do metod klasycznych oraz ocenę interakcji czynników, co ma szczególnie istotne znaczenie w przypadku badania procesów technologicznych z zasady bardzo trudnych do analizowania na drodze teoretycznej.

4. Przykład zastosowania analizy sekwencyjnej w kontroli jakości

Kontrola jakości wyrobów polega na badaniu, czy cechy i parametry elementu wylosowanego z badanej populacji mieszczą się w wyznaczonych granicach tolerancji. Zagadnienie to stanowi przypadek szczególny bardziej ogólnego problemu rozstrzygnięcia o tym, czy analizowany proces lub obiekt jest istotnie lepszy lub gorszy od innego, przyjętego za wzorcowy. Wnioskowanie sprowadza się najczęściej do zweryfikowania odpowiedniej hipotezy statystycznej na podstawie określonej, zwykle ograniczonej, liczby danych doświadczalnych.

Podstawowym problemem metodologicznym w doświadczalnej kontroli jakości jest taka organizacja eksperymentu, aby liczebność próby, umożliwiającą podjęcie miarodajnej decyzji, była minimalna. Optymalnym rozwiązaniem jest stosowanie testów sekwencyjnych, w których liczebność próby nie jest ustalona z góry, lecz uzależniona od całego przebiegu losowania i badania. Przykładem zastosowania takiej procedury jest badanie jakości taśmy łożyskowej bezsmarowej MB60 produkowanej w Wytwórni Łożysk Ślizgowych PZL BIMET.

Taśma MB60 jest półfabrykatem o wielowarstwowej budowie (rys. 6) służącym do wykonania panwi i tulei łożyskowych stosowanych w węzłach ślizgowych nie wymagających smarowania. Jakość taśmy zależy od wielu czynników związanych zarówno z procesem technologicznym, jak i przygotowaniem materiału wsadowego. Niektóre parametry technologiczne nie podlegają ciągłej kontroli podczas produkcji. Ponadto możliwy jest znaczny rozrzut własności materiału wsadowego, w przeważającej mierze wytwarzanego poza WŁŚ BIMET. Z tych względów konieczna jest wyrównoważona kontrola bieżącej produkcji taśmy dla zapewnienia żądanej wysokiej jakości wyrobu.



Rys. 6. Budowa taśmy łożyskowej bezsmarowej; 1 – taśma stalowa, 2 – warstwa brązu porowatego, 3 – masa impregnująca

Dotychczasowe badania wykazały, że jakość taśmy może być najbardziej miarodajnie oceniona na podstawie wyników testów tribologicznych odpowiednio przygotowanych próbek. Badania takie są dość kosztowne i czasochłonne, zrozumiałe jest zatem dążenie do ograniczenia liczby doświadczeń do minimum, przy zachowaniu odpowiednio wysokiego poziomu ufności przeprowadzanej oceny.

Testowanie charakterystyk tribologicznych próbek taśmy MB60 prowadzone jest na urządzeniu Tribometr PT. Szczegóły dotyczące stanowiska badawczego, postaci konstrukcyjnej próbek oraz metodyki testu badawczego przedstawiono w [10].

Podstawę oceny każdej próbki taśmy stanowią:

- wynik pomiaru zużycia próbki (ubytek masy) podczas testu,
- wartość współczynnika tarcia zarejestrowana podczas badań,
- temperatura w strefie tarcia przy końcu testu.

Jako poziom odniesienia przy ocenie jakości taśmy MB60 z bieżącej produkcji przyjęto charakterystykę taśmy bezsmarowej DU renomowanej firmy Glacier. Taśma ta została przebadana w laboratorium Katedry Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Gdańskiej. Celem weryfikacji jakości taśmy krajowej było sprawdzenie, czy wartość średnia zużycia oraz oporów ruchu dla badanej serii produkcyjnej nie jest większa od wartości tych wielkości dla taśmy wzorcowej DU. Stwierdzenie, że wymienione parametry są większe, oznacza dyskwalifikację badanej serii produkcyjnej. Hipoteza zerowa w prezentowanej procedurze orzeka więc, że badana taśma krajowa jest, pod względem właściwości tribologicznych, co najmniej równorzędna taśmie wzorcowej.

Procedurę badania jakości taśmy oparto na zasadach sekwencyjnego testu ilorazowego opracowanego przez Walda [13]. Metoda postępowania polega na przeprowadzeniu kolejno następujących operacji:

1. Badanie tribologiczne wylosowanej próbki taśmy na Tribometrze PT.

2. Porównanie wyników pomiaru z granicznymi wartościami kontrolnymi D i G (rys. 6) i w zależności od położenia skumulowanej wartości wyników Σy podjęcie jednej z następujących decyzji:
- W przypadku uzyskania w danej próbie wyniku leżącego poniżej dolnej wartości granicznej testu ($\Sigma y < D$) badanie należy zakończyć. Badana taśma jest równorzędna lub lepsza od wzorcowej, a ryzyko błędnego wniosku nie przekracza α_1 .
 - W przypadku uzyskania wyniku leżącego powyżej górnej wartości granicznej G ($\Sigma y > G$), weryfikację należy zakończyć. Badana taśma jest gorsza od wzorcowej z ryzykiem błędu nie przekraczającym α_0 .
 - Jeżeli wynik leży w przedziale pomiędzy wartościami granicznymi ($D \leq \Sigma y \leq G$) sytuacja jest nierozstrzygnięta i badania należy kontynuować.
3. Badanie następnej próbki taśmy i po zsumowaniu wyniku otrzymanego wyniku pomiaru z poprzednimi powtórzenie analizy według punktu 2. Górne i dolne wartości kontrolne oblicza się za pomocą wzorów:

$$G = \frac{\sigma^2}{d} \ln \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_0} + \left(y_w + \frac{d}{2} \right) m, \quad (6)$$

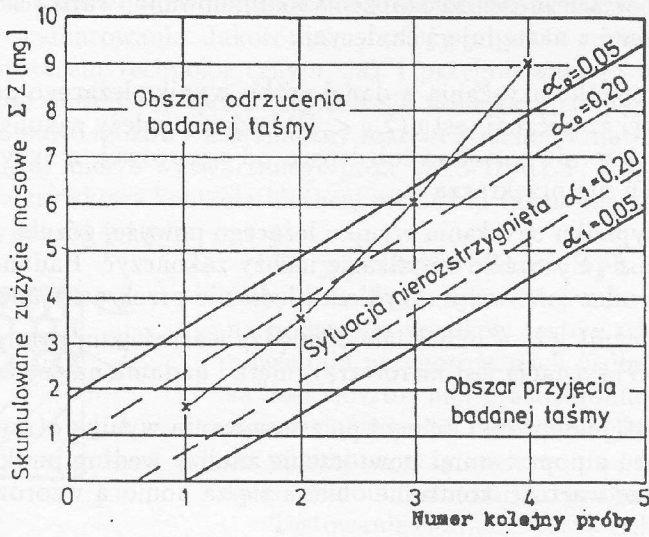
$$D = -\frac{\sigma^2}{d} \ln \frac{1 - \alpha_0}{\alpha_1} + \left(y_w + \frac{d}{2} \right) m, \quad (7)$$

gdzie

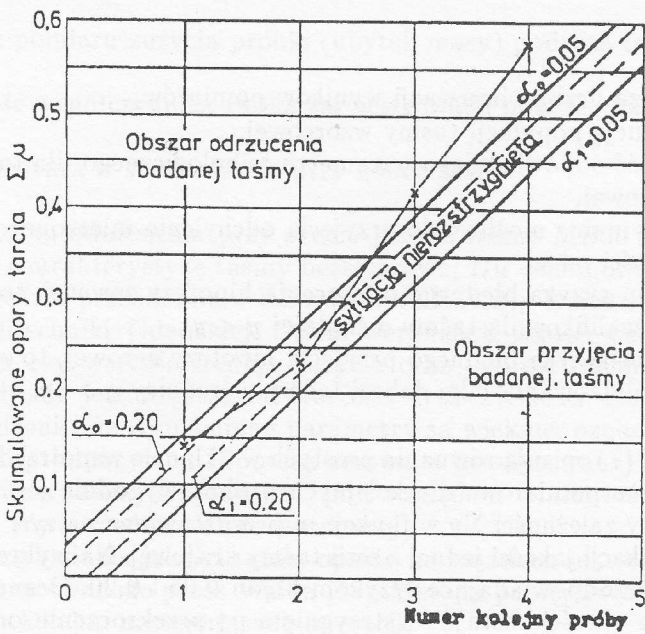
- m – oznacza liczbę obserwacji wyników pomiarów,
- σ^2 – wariancję populacji taśmy wzorcowej,
- y_w – wartość odpowiedniego parametru tribologicznego dla taśmy wzorcowej,
- d – maksymalne możliwe do przyjęcia odchylenie mierzonej wielkości od y_w ,
- α_0 – poziom ryzyka błędnego odrzucenia hipotezy zerowej, to znaczy, zdyskwalifikowania taśmy o średniej $y < y_w$,
- α_1 – poziom ryzyka błędnego przyjęcia hipotezy zerowej, to znaczy zakwalifikowania jako dobrej taśmy o średnicy $y > (y_w + d)$.

Zależności (6) i (7) opisują równania prostych w układzie współrzędnych $m, \Sigma y$ ($m \in N$), stąd dane pomiarowe dla kolejnych próbek wygodnie jest analizować graficznie. Wykresy zależności Σy w funkcji m przedstawiono na rys. 7 i 8 wraz z przykładem weryfikacji jakości jednej z serii taśmy krajowej. Na wykresach naniesiono linie graficzne odpowiadające ryzykom błędu 0,05 i 0,20. Ocena jakości na żądanym poziomie ufności zostaje rozstrzygnięta po przekroczeniu odpowiedniej górnej lub dolnej linii granicznej.

Metoda analizy sekwencyjnej wymaga formalnie wykonywania kolejnych prób



Rys. 7. Analiza sekwencyjna wyników badań zużycia próbek taśmy bezsmarowej



Rys. 8. Analiza sekwencyjna wyników badań oporów tarcia próbek taśmy bezsmarowej

tak długo, dopóki nie zostanie spełniona zależność $\Sigma y < D$ lub $\Sigma y > G$. Można wobec tego wyrazić obawę, że proces ten może okazać się nieskończony. Udowodniono jednak [13], że rozstrzygnięcie zawsze nastąpi, a metoda sekwencyjna okazała się praktycznie bardzo efektywnym sposobem rozwiązywania problemu kontroli jakości.

5. Podsumowanie

Podstawową zaletą przedstawionych metod organizowania badań eksperymentalnych i analizy ich wyników jest znaczne zmniejszenie liczby doświadczeń koniecznych do wyłonienia istotnych czynników, optymalizacji ich wartości lub miarodajnej oceny ilościowej i jakościowej. W przypadku cytowanego przykładu zastosowania metody bilansu losowego możliwe było zidentyfikowanie istotnych zmiennych spośród 10 czynników i ich 45 interakcji za pomocą zaledwie 12 eksperymentów. Metoda analizy sekwencyjnej opisana w roz. 3 pozwoliła na opracowanie niezwykle oszczędnej procedury sprawdzania jakości serii produkcyjnych taśmy bezsmarowej. Jak się okazało po jej wdrożeniu, dla podjęcia miarodajnych decyzji o przyjęciu lub odrzuceniu taśmy wystarczy przebadać co najwyżej cztery jej próbki (!). Wreszcie badanie linii technologicznej za pomocą planów rotalnych i wyznaczona funkcja regresji umożliwiły efektywne sterowanie złożonym procesem technologicznym.

Efektywność wykorzystania proponowanych metod teorii eksperymentu przy identyfikacji modeli matematycznych obiektów mechanicznych została wielokrotnie potwierdzona praktycznie podczas realizacji wielu projektów badawczych.

Pracę dostarczono 1993.12.15

Literatura

- [1] Polański Z.: *Zagadnienia metodologii i metodyki badań naukowych*, Materiały IV Szkoły Tribologicznej, WITPiS, 1976, 7 ÷ 6.
- [2] Nalimow W.W., Czernowa N.A.: *Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych*, WNT, Warszawa 1967.
- [3] Olszewski O., Sikora J.: *O pewnych szczególnych zastosowaniach teorii eksperymentu w badaniach tribologicznych*, Zag. Ekspl. Masz., 29(1994), z. 1.
- [4] Kleijnen J.P.C.: *Screening designs for poly factor experimentation*, Technometrics, Vol.17(1975), no 4, 487 ÷ 93.
- [5] Majewski W., Sikora J.: *Experimental design in mathematical modeling of technical objects*, Zag. Ekspl. Masz., t. 26(1991), z. 2-3.

- [6] Plackett R.L., Burman J.P.: *The design of optimum multifactorial experiments*, Biometrika, Vol. 33(1946), 305 ÷ 325.
- [7] Budne T.A.: *The application of random balance design*, Technometrics, vol 1(1959), no 2, 139 ÷ 155.
- [8] Mańczak K: *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa 1976.
- [9] Sikora J., Majewski W.: *Analiza związków korelacyjnych pomiędzy wskaźnikami technologicznymi i tribologicznymi jakości taśmy łożyskowej bezsmarowej*, Materiały Konferencji KONES'87, Lublin – Kazimierz Dolny 1987, 313 ÷ 320.
- [10] Sikora J., Olszewski O., Kłopotcki J.: *Optymalizacja parametrów procesu wytwarzania taśmy łożyskowej bezsmarowej na podstawie badania jakości taśmy i jej własności tribologicznych*, Praca badawcza nr 850421, Politechnika Gdańska, KKiEM, Gdańsk 1985.
- [11] Łubiński T., Olszewski O., Pasiński J.: *Urządzenie do badania tarcia*, Patent PRL nr 95008.
- [12] Sikora J., Olszewski O.: *Optymalizacja parametrów procesu wytwarzania taśmy łożyskowej bezsmarowej*, Materiały Konferencji KONES'87, Lublin – Kazimierz Dolny 1987, 321 ÷ 328.
- [13] Wald A.: *Sequential analysis*, J. Wiley, New York 1947.

Effective Application of Experimental Design Theory to Investigation of Laboratory Devices and Product Engineering Processes

Summary

Experimental investigation of technical objects of a stochastic nature can be made cheaper and less time-consuming by using methods of the contemporary theory of experiments. Some practical examples of application of statistical experimental design to the identification of mathematical model of laboratory devices and product engineering processes, are described. Random balance screening experiments and scatter diagram analysis have been used to reveal the design features and operating factors that substantially influence the characteristics of a slide bearing test machine. The second-order rotatable design of experiments and the response surface method were employed to determine the regression model of the manufacturing process of the self-lubricating bearing tape and to optimise its crucial parameters. A problem of the current quality control of the process product has been solved by means of the test based on the principles of the Wald sequential analysis.