

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH
Łódź, 12 – 14 maja 1999 r.

Waldemar Oleksiuk, Jadwiga Janowska
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki,
Politechnika Warszawska

**DOŚWIADCZALNE BADANIA TRIBOLOGICZNE
WYBRANE PROBLEMY METODOLOGICZNE**

SŁOWA KLUCZOWE:

planowanie badań doświadczalnych, obiektywność pomiarów, opracowanie wyników pomiarów

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono wybrane problemy metodologiczne związane z przeprowadzaniem badań doświadczalnych

WSTĘP

Istnieje opinia, którą podzielają autorzy niniejszego referatu, że największe zaufanie do wyników badań doświadczalnych mają osoby nie zajmujące się takimi badaniami np. teoretycy, obliczeniowcy, zaś najmniejsze - osoby, które te badania przeprowadzały same. Z czego to wynika? Zapewne z tego, że doświadczalnicy wiedzą jak trudno zrealizować oczekiwane warunki pracy badanych elementów i ile metrologicznych błędów wnoszą przeprowadzone pomiary. Sprawa komplikuje się dodatkowo, jeżeli badania prowadzone są np. metodami przyspieszonymi lub w warunkach istotnie różniących się od warunków rzeczywistej pracy. Pojawia się więc wtedy problem możliwości i sposobu przetransponowania tych wyników do sytuacji odpowiadającej rzeczywistości.

Stosunkowo rzadko w tribologicznej literaturze publikowane są wyniki pomiarów łącznie z oszacowanymi błędami a prawie zawsze brak jest przy tych wynikach dostatecznych informacji o stanowisku badawczym i sposobie przeprowadzania badań. Być może wynika to z potrzeby ograniczenia objętości publikacji a być może - z niedoceniań tych informacji dla jednoznaczności i wiarygodności prezentowanych badań. Brak pełnych informacji o badaniach to duża niedogodność, gdyż uniemożliwia powtórzenie doświadczeń i zweryfikowanie

uzyskanych wyników badań a przez to przedstawionych wyników nie można uznać za w pełni wiarygodne.

Jest wręcz prawidłowością, że badania tribologiczne analogicznych elementów prowadzone przez różnych badaczy dają odmienne wyniki. Kiedyś podejmowaliśmy próby zweryfikowania, znalezionych w publikacjach, wyników konkretnych badań. Dotyczyło to min. oporów ruchu łożysk ślizgowych i toczyń oraz wartości współczynników tarcia tworzyw sztucznych współpracujących z metalowymi bębenkami regulatorów cierno-odśrodkowych. Badania przeprowadzane były na stanowiskach w naszych laboratoriach naukowo-dydaktycznych. Okazało się, że uzyskane wyniki w wielu przypadkach znacznie odbiegały od wyników z literatury. Nie uzasadnia to oczywiście opinii, że nasze wyniki były bardziej poprawne a inne nie, lub odwrotnie. Oznacza to prawdopodobnie tylko to, że badania różniły się warunkami ich prowadzenia oraz, że były realizowane na odmiennych stanowiskach badawczych.

Jesteśmy przekonani, że wiarygodność badań doświadczalnych również zaufanie do uzyskiwanych wyników można zwiększyć, jeżeli badania będą przeprowadzone poprawnie metodologicznie i jeżeli prezentowane wyniki będą uzupełniane informacjami o błędach oraz o sposobie przeprowadzonych badań.

Dlaczego tak się dzieje, że badacze dość powszechnie nie doceniają potrzeby prowadzenia badań zgodnie z teorią eksperymentu. Przyczyn zapewne należy szukać w trudnej do przezwyciężenia tradycji, w braku przygotowania metrologicznego badacza z dziedziny pomiarów oraz z braku praktycznych recept dotyczących np. szacowania niepewności pomiarów, rozkładów statystycznych, wnioskowania statystycznego, analizy regresji, planowania badań.

Przygotowując niniejszy referat sięgnęliśmy ponownie do podstawowej literatury tribologicznej i na tej podstawie stwierdzamy, że zaplanowany przez nas temat nie jest oryginalny. Uwagi, które chcieliśmy tu przedstawić, są bowiem profesjonalnie wyłożone np. w znanej zapewne wszystkim Trybologii Hebdy i Wachala [2]. Są tam podrozdziały dotyczące planowania tribologicznych badań doświadczalnych oraz opracowania wyników badań (estymacji wartości oczekiwanej, analizy wariancji, testów zgodności).

W związku z powyższym postanowiliśmy zmienić koncepcję referatu. Rezygnujemy z przedstawienia konkretnych sposobów planowania badań czy ze sposobów praktycznego opracowania wyników eksperymentu a chcemy skupić się głównie na argumentach, które być może przekonają eksperymentatorów do bardziej rygorystycznego przestrzegania zaleceń metodologicznych dotyczących prowadzenia własnych badań oraz pozwolą racjonalniej oceniać prezentowane w literaturze wyniki badań innych.

Mimo zmiany koncepcji referatu część z zasygnalizowanych tu uwag będzie uszczegółowiona i będzie miała podkreślony aspekt praktyczny w drugim, zadeklarowanym przez nas referacie.

PLANOWANIE BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Przed przystąpieniem do badań doświadczalnych należy najpierw przekonać siebie i zleceniodawców, że badania te są niezbędne. Być może, że część wymaganych informacji o zachowaniach interesujących nas elementów, zespołów czy całych urządzeń można byłoby zdobyć inną drogą np. dzięki badaniom symulacyjnym. Badania te, pomimo pewnych mankamentów, są tańsze, szybciej przyniosą wyniki, nie stwarzają praktycznie ograniczeń np. co do zakresów przyjmowanych parametrów do badań.

W przypadku uznania, że badania doświadczalne są jednak konieczne, warto bardzo dokładnie przeanalizować wszystkie aspekty tych badań. Jest to bardzo ważne ze względu na ich koszt i pracochłonność.

Badania doświadczalne powinny dostarczyć wyczerpujących odpowiedzi na uprzednio postawione pytania. Istotne jest uzyskanie tych odpowiedzi odpowiednio prędko i możliwie najmniejszym kosztem. Na ocenę kosztów wpływają jednak nie tylko koszty aparatury, pracy badaczy itd. lecz także ilość i jakość uzyskanych informacji. Im informacje te będą pełniejsze a ich ilość i jakość będą większe, tym koszty badań będą uznane za mniejsze.

Aby zwiększyć prawdopodobieństwo uzyskania sukcesu w badaniach należy zwrócić m.in. uwagę na problematykę planowanie badań.

Planowanie ma głównie na celu:

- zmniejszenie pracochłonności prowadzenia badań,
- dobór takiej metody zbierania danych, aby nadawały się do opracowania statystycznego, czyli stanowiły reprezentatywną próbę populacji umożliwiającą wnioskowanie o całości badań,
- takie pokierowanie eksperymentem, by dał wynik obarczony możliwie małymi błędami.

Łatwo wykazać, że nie zawsze racjonalne jest prowadzenie tzw. badań wyczerpujących, polegających na wykonaniu pomiarów wszystkich elementów populacji. Ale przy tym zwykle uważa się, że próba nie powinna być zbyt mała (w zbiorowości statystycznej za małą licznosc próby uważa się $10 \leq n < 30$), gdyż czym mniejsza jest próba tym większa będzie wariancja (błąd), ponieważ bezpośrednio zależy ona od licznosci próby.

Jeżeli będą nas interesowały rozbudowane badania (zostały uprzednio przyjęte licznosci: elementów populacji, wymaganych prób, zmienianych cech itp.) to liczba badań będzie iloczynem powyższych licznosci. Zwykle jest to bardzo duża liczba i z tego powodu badania muszą być pracochłonne chociaż rzadko kiedy rzeczywiście potrzebne aż w tak wielkiej liczbie. Badania te z konieczności trzeba więc ograniczać. Gdybyśmy to zrobili bez metodologicznego uzasadnienia, słusznie narazimy się na zarzut arbitralności, zaś zaplanowanie eksperymentu pozwala odeprzeć taki zarzut, gdyż zasady planowania wynikają z teorii badań doświadczalnych i poprawność ich można udowodnić.

Problem planowania eksperymentu jest szczególnie istotny przy próbie różnicowania w badaniach czynników traktowanych jako istotne i nieistotne. Warto pamiętać, że nawet bezpośrednio mierzona wielkość fizyczna, jest wielkością losową, nie jest wielkością niezależną. Uznaje się, że zależy ona od tzw. czynników istotnych i nieistotnych [5]. Czynniki istotne są to czynniki mające wpływ na wyniki pomiarów. Dzielimy je na kontrolowane, o dużym wpływie na wyniki pomiarów i na niekontrolowane. Te ostatnie czynniki mają prawdopodobnie wpływ na wyniki pomiarów, lecz nie potrafimy go zidentyfikować albo wiemy jedynie, że ten wpływ jest nieznaczny a więc przy wymaganej czy osiągalnej dokładności pomiarów czynniki te można byłoby pominąć.

Czynniki nieistotne wynikają zwykle z rozrzutu parametrów technologicznych związanych z przygotowaniem próbek. Nazwa ta jest nieco myląca, gdyż nie zawsze wpływ ich jest pomijalny. Potwierdzają to również nasze doświadczenia. Stwierdziliśmy np. że tribologiczne cechy panewek łożysk ślizgowych wykrawanych z blachy zależą od tego z którego arkusza a nawet z którego fragmentu arkusza blachy były wykrawane; mniejsze rozrzuty przy pomiarze współczynnika tarcia były w przypadku panewek wykrawanych z jednego arkusza blachy a jeszcze mniejsze, gdy były na arkuszu usytuowane obok siebie.

O ile czynnikom istotnym, kontrolowanym, przeznaczamy w planowaniu doświadczenia dużą uwagę, to zapewne z obawy przed dalszym rozbudowaniem eksperymentu, pozostałe czynniki nie zawsze są analizowane i uwzględniane. Teoria eksperymentu uważa to jednak za błąd. Można spotkać się nawet ze stwierdzeniem, iż wyniki uzyskane w warunkach, gdy na którymkolwiek z etapów badań naukowych celowo nie są zmieniane czynniki nieistotne, jest

doświadczeniem tendencyjnym. Wydaje się więc, że planowanie eksperymentu, umożliwiające zajęcie się większą gamą czynników dzięki racjonalnemu ograniczeniu badań, jest sposobem rozwiązania zasygnalizowanego problemu.

Nie powinno się jednak za wszelką cenę minimalizować liczby prowadzonych badań. Badania prowadzone na szerszej próbie pozwalają nieraz na dokonywanie interesujących odkryć naukowych, zaczynających się od stwierdzenia, że czynniki dotychczas uznawane za nieistotne okazują się istotnymi.

OBIEKTYWNOŚĆ POMIARÓW

W praktyce zawsze okazuje się, że wyniki kolejnych pomiarów nie są identyczne, gdyż są obciążone różnymi błędami. Wynik końcowy zależy nie tylko od średniej wartości ale również od rozrzutu wartości składowych i ich błędów. Wynik będzie tym lepszy (obciążony mniejszym błędem statystycznym) im lepsze będą zbieżności kolejnych wyników pomiarów. To wie każdy eksperymentator i jest on w naturalny sposób zainteresowany w uzyskaniu możliwie najkorzystniejszych wyników. Zapewne z tego względu daje się nieraz zaobserwować [4], że podświadomie może on tak dobierać warunki eksperymentu, aby uzyskać mniejszy rozrzut wyników; wtedy jednak badania stają się tendencyjne.

Teoria eksperymentu dostrzega tendencyjność psychologiczną badacza [5]. Mówi się o tendencyjności psychologicznej, gdyż z założenia należy wykluczyć tendencyjność świadomą. Nie do końca wierzyliśmy w tendencyjność psychologiczną badacza. Postanowiliśmy zatem sprawdzić, czy coś takiego istnieje. W tym celu skorzystaliśmy z pomocy studentów, których poprosiliśmy o odczytanie wartości napięcia wskazywanego przez woltomierz wskazówkowy. Wartość tego napięcia była stała i tak ustawiona, że wskazówka przyrządu znajdowała się pomiędzy kreskami; zachodziła więc przy odczycie potrzeba interpolacji. Wcześniej poinformowaliśmy studentów, że mierzone napięcie jest miarą oporów ruchu badanego mechanizmu i że mechanizm ten będzie uznany za lepszy, jeżeli wartości wskazywanego napięcia będą mniejsze. Wszystkie odczytane wartości napięcia zanotowano i obliczono średnią pomiarów. Następnie poproszono inną grupę studentów o dokonanie odczytów wartości tego samego napięcia. Oświadczono im jednak, że nie mała lecz duża wartość napięcia jest cechą pozytywną badanego mechanizmu. Tak jak poprzednio zapisano wszystkie odczyty i obliczono średnią pomiaru. Okazało się, że wyniki napięcia odczytane przez obie grupy różniły się. W obu przypadkach średnia była odchylna w kierunku wartości podanych za korzystniejszej. Nie jest to jeszcze dowód na istnienie tendencyjności psychologicznej obserwatora, lecz być może potwierdza sugestię o jej istnieniu. Tak mało ostre sformułowanie co do wyników przeprowadzonego doświadczenia wynika z obawy przed popełnieniem innego błędu - tendencyjności w ocenie obiektu badań. Aby wyjaśnić o co chodzi przytoczmy literaturowy [5] przykład. Badano wpływ witaminy C na częstość przeziębień studentów. Wykazano, że podawanie witaminy C zmniejszyło zachorowalność studentów o 65,6%. Na tej podstawie można stwierdzić, że wykazano korzystny wpływ witaminy C.

Postanowiono jednak rozszerzyć badania. Podawano drugiej grupie placebo, oświadczając, że jest to witamina C. Uzyskano wtedy także zmniejszenie zachorowalności studentów o 62,7%. Jest to wynik również świadczący o pozytywnym działaniu leku, lecz wyciągnięcie wniosku o istotnej przewadze witaminy C nad placebo byłoby już trudne. Od badacza oczekiwano wyników dotyczących witaminy C. Czy przedstawienie dalszych komentarzy wyników badań jest jego obowiązkiem, czy tylko dobrą wolą?

Można i trzeba zabiegać o zwiększenie stopnia obiektywizmu prowadzonych badań. W tym celu należy zapewnić reprezentatywność próby np. przez losowy wybór próby z populacji. Wtedy przy wnioskowaniu i przy opracowaniu wyników badań będzie można stosować

statystykę matematyczną. Statystykę zresztą trzeba już włączyć na etapie planowania eksperymentu, gdzie należy ustalić poziom istotności i zaplanować metodę weryfikacji tezy.

Uzyskaniu obiektywności badań pomaga prowadzenie ich metodami współczesnymi z wykorzystaniem technik komputerowych. Dzięki zastosowaniu automatycznego sterowania, przetwarzania wyników i ich rejestracji, w dużym stopniu eliminuje się tendencyjność psychologiczną badacza. Poza tym metody te ułatwiają pracę badacza, przyspieszają uzyskanie wyników badań, pozwalają na łatwą ocenę błędów pomiarów zgodnie z prawami metod badawczych oraz na zilustrowanie wyników krzywymi regresji i dyskusję tych wyników. Dzięki technikom komputerowym łatwiej opracować matematyczny model badanych zjawisk czy podejmować analizy optymalizacyjne [1, 3].

Techniki komputerowe mogą jednakże wnieść dodatkowe błędy [4, 6]. Wynikają one głównie z:

- przyjętego matematycznego modelu stanowiska badawczego, różniącego się od jego modelu fizycznego,
- przyjętych w komputerze algorytmów przetwarzania informacji,
- użycia nie w pełni przetestowanych programów komputerowych.

Prawdopodobieństwo wystąpienia tych ostatnich błędów zwiększa się wtedy, gdy muszą być tworzone indywidualne programy np. w celu dostosowania urządzeń pomiarowych, sterujących czy przetwarzających informacje, w uruchamianych stanowiskach badawczych.

Za celowe uważamy zwrócenie uwagi na błędy wnoszone przez zastosowanie techniki komputerowej, gdyż istnieje dość powszechna fascynacja tą techniką i chyba nadmierne zaufanie do wyników obliczeń uzyskiwanych tą drogą.

W badaniach bardzo istotna jest powtarzalność i odtwarzalność wyników. Mówimy o odtwarzalności, gdy istnieje zgodność statystyk obliczanych z prób dokonanych w różnych laboratoriach, za pomocą innej aparatury a nawet przy zastosowaniu odmiennych metod pomiarów. Uznaje się nawet, że gwarancją obiektywności pomiarów jest warunek ich odtwarzalności.

OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

Załóżmy, że przeprowadziliśmy badania na reprezentatywnej próbie. Tylko wtedy bowiem będzie można na podstawie tych badań wnioskować o całej populacji. Otrzymaliśmy zatem cały zbiór wyników pomiarów. Na tej podstawie należy teraz obliczyć parametry empiryczne, które nazywa się statystykami. Typową statystyką jest dystrybuanta statystyczna.

W pierwszej kolejności interesuje nas wartość oczekiwana i wariancja pomiarów. Najbardziej wiarygodnym estymatorem (estymacja to szacowanie) wartości oczekiwanej w rozkładzie normalnym jest średnia arytmetyczna. Wyznaczenie jej nie powinno sprawiać żadnych kłopotów.

Następnie należy obliczyć błąd pomiaru, który przyjmuje się jako podwójną lub potrójną wartość wariancji. Estymatory wariancji zależą od tego, czy próba n jest większa czy mniejsza od 30 i wyznacza się z powszechnie znanych zależności.

Błędy pomiarów obliczamy zwykle z dokładnością przynajmniej trzech kolejnych miejsc znaczących a następnie zaokrąglamy, w zasadzie w górę, do jednego lub dwóch miejsc znaczących. Warto pamiętać o uzgodnieniu liczb znaczących wartości średniej i błędu. Poprawny jest zapis $x = 56,23 \pm 0,11$ a niepoprawny np. $x = 56,234 \pm 0,11$ lub $x = 56,23 \pm 0,112$. Zamiast $x = 256330 \pm 360$ lepiej napisać $x = (256,33 \pm 0,36)10^3$, gdyż wtedy nie będzie wątpliwości na temat znaczenia ostatnich zer. W przypadku gdy błąd wynosi $\pm 0,0010$ nie można uznać, że jest on tożsamy z $\pm 0,001$, ponieważ wtedy poprawny zapis $x = 0,2588 \pm 0,0010$ przedstawiony jako $x = 0,2588 \pm 0,001$ byłby niepoprawny.

Zdarza się nieraz, że jakiś wynik pomiaru wyraźnie nie pasuje do pozostałych wyników. Występuje wtedy konieczność podjęcia decyzji o uznaniu tego wyniku za prawidłowy lub nieprawidłowy (obciążony błędem grubym). Można to osiągnąć przez zastosowanie testu istotności. Jednym z podstawowych testów jest test χ^2 (chi kwadrat) pozwala zweryfikować hipotezę, że dystrybuanta rozkładu empirycznego z dokonanej próby należy do klasy dystrybuant rozkładu (normalnego, Poissona i innych), którego dotyczy wnioskowanie.

Otrzymane wyniki, dla zwiększenia komunikatywności, przedstawia się zwykle na płaszczyznach będących np. przekrojami przestrzeni wielowymiarowych. Sposób przedstawienia bywa różny i dostarcza informacji o różnej szczegółowości. Spotyka się min. następujące formy:

- zbiór punktów na płaszczyźnie,
- zbiór punktów połączonymi prostymi odcinkami (powstaje krzywa łamana),
- zbiór punktów z zaznaczonym zakresem rozrzutu, lub wyznaczonym błędem,
- zbiór punktów oraz poprowadzony orientacyjny wykres obrazujący graficzny przebieg funkcji ciągłej utworzonej przez te punkty,
- zbiór punktów, wykres ciągłej funkcji i równanie tej funkcji czyli równanie tzw. krzywej regresji,
- -zbiór punktów, wykres i równanie krzywej regresji oraz krzywe określające od dołu i od góry zakres zmienności wyników badań.

Można oczywiście spotkać jeszcze inne modyfikacje sposobów przedstawienia uzyskanych wyników. Łatwo zauważyć, że natężenie informacji nie jest w wyszczególnionych sposobach jednakie. Czym więcej będzie tych informacji tym badania stają się bardziej wiarygodne i łatwiejsze do odtworzenia.

ZAKOŃCZENIE

Badania doświadczalne są czasochłonne i kosztowne. Jeżeli decydujemy się na ich prowadzenie, to należy zadbać o metodologiczną poprawność ich prowadzenia, aby uzyskane wyniki dostarczały możliwie dużo użytecznych informacji. Wydaje się, że w badaniach tribologicznych niezbyt często realizowane są podstawowe etapy procesu badawczego prowadzące do zwiększenia obiektywności i wiarygodności badań. Chodzi to o planowanie eksperymentu, wyczerpującą ocenę błędów, metodyczne przedstawienie wyników pomiarów i ich analizę. Jednym z powodów tego stanu jest zapewne brak w literaturze szczegółowych recept poprawnej realizacji powyższych etapów. Mamy nadzieję, że wkrótce sytuacja poprawi się. Na Wydziale Mechatroniki PW prowadzony jest bowiem na ten temat wykład, bardzo dobrze oceniany przez słuchaczy, oraz jest opracowana książka.

My zaś zachęcamy do baczniejszego zwrócenia aspekt uwagi na metodologiczny badań już dzisiaj, zaś niniejszy referat ma na celu dostarczenie argumentów przemawiających za pozytywną reakcją na nasze zachęty.

LITERATURA

1. Borucki B., Pawłowski J.: Wieloparametrowa aproksymacja wielomianowa metodą optymalizacyjną D-F-P na przykładzie opracowania wyników badań tachografu do pojazdów szynowych. Polit. Koszalińska. Materiały z XVI Konferencji Polioptymalizacji i CAD'98
2. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, WNT Warszawa 1980

3. Janowska J.: Wpływ metody wyznaczania krzywych Stribecka na ich przebieg w badaniach miniaturowych łożysk ślizgowych. Praca doktorska. Politechnika Warszawska 1996 r.
4. Łączkowski R.: Mity i zagrożenia komputeryzacji. Pomiary, Automatyka, Kontrola Nr.11/96
5. Teoria pomiarów. Praca zbiorowa pod red. H. Szydlowskiego. PWN Warszawa 1981
6. Wierciak J.: Wpływ metody badawczej na wyniki wyznaczania charakterystyk mikrosilnika prądu stałego. Praca doktorska. Politechnika Warszawska 1995 r.

EXPERIMENTAL TRIBOLOGICAL INVESTIGATIONS - SELECTED METHODOLOGICAL PROBLEMS

ABSTRACT

Selected problems concerning methodology of experimental investigations of tribological systems are discussed.

Recenzent: Jan Burcan