

Marek SZCZUTKOWSKI ¹
Bogdan LIGAJ ²

PROCEDURA SZACOWANIA NIEPEWNOŚCI BADAŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ MATERIAŁÓW STOSOWANYCH W BUDOWIE MASZYN – ZAŁOŻENIA I KLUCZOWE ELEMENTY

Optimalizacja konstrukcji oraz obniżanie kosztów konstruowania wpłynęły na rozwój metod obliczeniowych stosowanych w pracach inżynierskich. Jednym z kryterium projektowania elementów maszyn jest trwałość zmęczeniowa. Niezbędne dane potrzebne do wykonywania obliczeń, dotyczące własności zmęczeniowych materiału, wyznacza się podczas badań doświadczalnych. Wynikiem wymienionych badań jest wykresu Wöhlera opisujący zależność $N = f(S_a)$.

Wyznaczanie wykresu Wöhlera w Laboratorium działającym na zasadach akredytacji oparte jest na procedurze badawczej. Niepewność pomiaru wyników badań trwałości zmęczeniowej zależy od wielu czynników bezpośrednio związanych z realizacją testów.

W pracy przedstawiono założenia i kluczowe elementy procedury szacowania niepewności dotyczącej badań trwałości zmęczeniowej w laboratorium akredytowanym.

MEASUREMENT UNCERTAINTY PROCEDURE OF FATIGUE LIFE OF MATERIALS APPLIED IN MACHINE DESIGN – ASSUMPTIONS AND KEY ELEMENTS

Design optimisation and decreasing of design costs influenced on development of calculation methods applied in engineering works. Fatigue life is one of the criteria for machine design. Data required for calculations connected with material fatigue properties are estimated during experimental tests. Wöhler curve describing the dependence $N = f(S_a)$ is the result of the mentioned tests.

Estimation of Wöhler curve in a laboratory working as an accredited one is based on a test procedure. Measurement uncertainty of fatigue life tests depends on many factors directly connected with the testing procedure.

The paper presents assumptions and key elements of the measurement uncertainty procedure of fatigue life in an accredited laboratory.

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Systemów Technicznych i Ochrony Środowiska, Polska; 85-789 Bydgoszcz; ul. Kaliskiego 7. Telefon: + 48 605 230 754, e-mail: m.szczutkowski@gmail.com

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Polska; 85-789 Bydgoszcz; ul. Kaliskiego 7. Telefon: + 48 52 340-82-53, Fax: + 48 52 340-82-71 e-mail: bogdanj@utp.edu.pl

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ:

- a – współczynnik regresji uzyskany w wyniku obliczeń metodą najmniejszych kwadratów dla funkcji $\hat{y} = ax + b$,
- n – liczba elementów próby,
- t_γ – wartość zmiennej t Studenta odczytana z tablicy tego rozkładu dla n – 2 stopni swobody i dla ustalonego z góry współczynnika ufności $1 - \gamma$,
- x_i, y_i – wartość badanej cechy X lub Y dla losowo pobranej próby n_i ,
- \hat{y}_i – oznacza wartość funkcji (wg równania $\hat{y} = ax + b$) dla określonej wartości x_i .

1. WPROWADZENIE

Jednym z kryteriów projektowania elementów maszyn jest trwałość zmęczeniowa mająca istotne znaczenie w przypadku statków powietrznych i morskich, pojazdów kołowych, itp.. Dobór cech geometrycznych dla poszczególnych części przeprowadza się na podstawie obliczeń, w których wykorzystywany jest wykres trwałości zmęczeniowej Wöhlera. Szczegółowy opis wymienionego wykresu można odnaleźć w pracy [4].

Do wyznaczenia wykresu Wöhlera niezbędne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych w oparciu o dokumenty normatywne odnoszące się do badań metali na zmęczenie [6, 7, 8] lub na podstawie specjalnie przygotowanej do tego celu procedury badawczej.

W powyższym kontekście, przy podkreśleniu praktycznego aspektu procesu badawczego, niezwykle istotna wydaje się wiarygodność przeprowadzanych badań. Laboratorium musi wykazać się kompetencją w realizacji wyżej wspomnianych metod badawczych (znormalizowanych bądź własnych). W praktyce jednak można spotkać się z wieloma problemami. Mogą one dotyczyć m.in. wiarygodności zastosowanej metody, wywiązania się z ustalonych terminów realizacji zleceń, itd.. W tym kontekście często pojawia się pytanie o tzw. walidację czyli udowodnienie zasadności podjętych kroków. W odniesieniu do usług laboratoryjnych pojawiają się wątpliwości o jakości świadczonych usług [15]. Konsekwencją doświadczeń w tym względzie i badań na tą problematykę było opracowanie i wydanie norm z serii ISO 9000, dla których podstawą były zasady kompleksowego zarządzania jakością (ang. Total Quality Management – skrót: TQM). Edycja tych norm i ich ogólnoświatowa popularność spowodowały „wręcz rewolucję“ w świecie zarządzania. Międzynarodowe normy ISO serii 9000 wskazują w jaki sposób producent może zaprojektować, zrealizować i przedstawić system zarządzania jakością. Celem tych norm jest określenie podstaw dla takiego systemu. Wymienione normy posiadają uniwersalną strukturę i można je wykorzystać do zapewnienia jakości w różnych warunkach [14].

Wracając do wspomnianych problemów laboratoriów i starając się odpowiedzieć na pytanie skąd się biorą, adaptując zasady TQM i odnosząc się choćby do zasad ISO 9000, można odpowiedzieć: z niewłaściwego zarządzania jakością (rys. 1).



Rys. 1. Źródła problemów w laboratoriach badawczych [12]

W przypadku laboratoriów badawczych normy ISO serii 9000 mogą jak najbardziej być adaptowane. Kolejnym etapem budowania satysfakcji klienta z świadczonych usług w laboratorium jest wdrażanie zasad w zawartych normie PN-EN ISO 17025:2005 [9]. Uzyskanie akredytacji na zgodność z tą normą jest potwierdzeniem kompetencji badawczych laboratorium. Norma ta poszerza niejako wymagania norm ISO serii 9000 o kompetencje techniczne odnosząc się do zasadniczych działań każdego laboratorium badawczego i wzorującego [13].

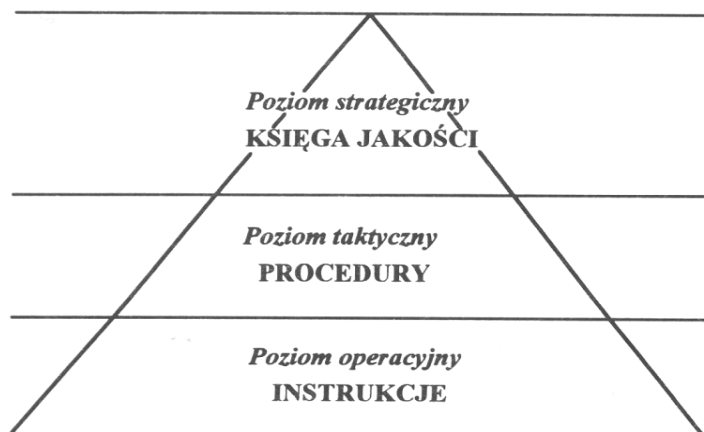
Mając na uwadze wspomniany praktyczny aspekt wyznaczania wykresu Wöhlera przyjęto założenie, że badania odbywać się będą w laboratorium badawczym działającym zgodnie z zasadami akredytacji.

Celem pracy jest przedstawienie założeń stanowiących podstawę procedury szacowania niepewności pomiaru trwałości zmęczeniowej materiałów stosowanych w budowie maszyn.

2. BADANIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ JAKO PROCEDURA BADAWCZA

Dokumentacja występująca w systemie zarządzania laboratorium badawczym jest analogiczna do tej, występującej w dokumentacji przygotowanej do spełnienia wymagań wg ISO 9000. Można porównać ją do piramidy składającej się z trzech poziomów (rys. 2) [1]. Najwyższy z nich określamy jest mianem strategicznego. Udokumentowany jest on w tzw. księdze jakości, która zawiera: politykę jakości, cele dotyczące jakości oraz opis systemu jakości. Drugi poziom reprezentowany jest przez procedury, które opisują taktykę działań wydziałów, funkcji, osób średniego szczebla zarządzania związanych z realizacją ustalonej polityki jakości i celów jakościowych w codziennej pracy przedsiębiorstwa. Z kolei na poziomie operacyjnym odnajdujemy plany jakości i instrukcje dokumentujące

działania na szczeblu wykonawczym pracownika administracji, monter, kontrolera, czy wreszcie co szczególnie istotne dla laboratoriów badawczych, laboranta.



Rys. 2. Struktura dokumentacji w laboratorium badawczym [1]

W przypadku badań zmęczeniowych podkreślić należy znaczenie wyróżnienia procedur badawczych. O ile tzw. procedury ogólne systemu zarządzania odnosiłyby się do działań stricte menadżerskich, tak procedury badawcze (w tym dotycząca badań zmęczeniowych) determinowałaby przebieg poszczególnych prób. W tytule niniejszego rozdziału przyjęto nazwę takiej procedury jako „Badanie trwałości zmęczeniowej”.

Poszczególne jednostki laboratoryjne odnosząc się tak do wymagań normatywnych, jak i Polskiego Centrum Akredytacji jako jednostki akredytującej na terenie Rzeczypospolitej Polski, przyjmują określoną formę dokumentowania (biorąc pod uwagę kwestie dokumentacji elektronicznej jak i tzw. twardych kopii) również mając na uwagę ich stronę graficzną. Pomijając te kwestie ważne wydaje się zdefiniowanie poszczególnych elementów procedury badawczej. I tak zaproponować można następujący układ punktów procedury:

- a) cel procedury,
- b) przedmiot i zakres,
- c) odpowiedzialność,
- d) opis postępowania,
- e) definicje,
- f) dokumenty związane,
- g) załączniki.

Cel procedury można podzielić na dwa podpunkty (biorąc pod uwagę np. realizację tego typu badań w warunkach ośrodka akademickiego): cel praktyczny i cel naukowy. Celem praktycznym badań trwałości zmęczeniowej materiałów i konstrukcji w warunkach obciążeń zmiennych stałoamplitudowych o współczynniku asymetrii cyklu $R=-1$ jest wyznaczenie wykresu zmęczeniowego Wöhlera przedstawiającego zależność liczby cykli

w funkcji amplitudy naprężeń nominalnych S_a . Wyznaczenie wykresu jednak nie może lub nie powinno być celem naukowym. Celem naukowym może być porównanie dwóch lub większej liczby wykresów wyznaczonych dla próbek lub elementów konstrukcyjnych różniących się cechami geometrycznymi lub/i materiałowymi. Wynikiem porównania jest ocena wpływu wybranych czynników na trwałość zmęczeniową.

Przedmiotem procedury powinien być opis kolejnych działań podczas realizacji badań trwałości zmęczeniowej metali. W procedurze tej bazować należy na terminologii i oznaczeniach podanych w polskich normach [6, 7, 8]. W czasach globalizacji odbiorcą wyników może być Zleceniodawca w innego kraju lub n. Stosowne dokumenty należy odpowiednio przywołać w dokumencie.

Zakres procedury powinien obejmować opis m.in.:

- a) warunków badań,
- b) przygotowanie urządzeń pomiarowych,
- c) uruchomienie badań,
- d) przebieg badań,
- e) zakończenie badań,
- f) wykonanie sprawozdania z badań.

Zdefiniowanie odpowiedzialności należy do osób zarządzających laboratorium i o ile osoba prowadząca badanie wydaje się oczywista tak kolejne osoby i stanowiska w tym kontekście zależą od struktury organizacyjnej i precyzyjnego opisu samego badania wraz z potencjalnymi zagrożeniami.

Kluczowym elementem przygotowywanego dokumentu wydaje się jednak przebieg samego badania. W oparciu o doświadczenie można stwierdzić, że wyznaczanie wykresu trwałości zmęczeniowej przeprowadza się w następujący sposób:

- a) przygotowanie próbek do badań,
- b) identyfikacja cech geometrycznych próbek,
- c) ustalenie poziomów naprężeń nominalnych S_a - w zakresie zdefiniowanym wyżej,
- d) realizacja badań na maszynie wytrzymałościowej – wynikiem badań jest minimum piętnaście wyników,
- e) sporządzenie wykresu trwałości zmęczeniowej $\log S_a = f(\log N)$, na którym zaznacza się uzyskane wyniki trwałości na każdym z przyjętych poziomów S_a ,
- f) ocena statystyczne wyników badań – wyznaczenie linii regresji dla wyników pomiarów i określenie przedziału ufności (w układzie logarytmicznym linia regresji jest prostą definiowaną równaniem zawierającym współczynnik kierunkowy i wyraz wolny),
- g) naniesienie na wykres prostej opisanej równaniem
- h) wynikiem badań jest współczynnik kierunkowy i wyraz wolny opisujący prostą,
- i) wszystkie dalsze analizy, porównania, odniesienia dotyczą wyznaczonej prostej.

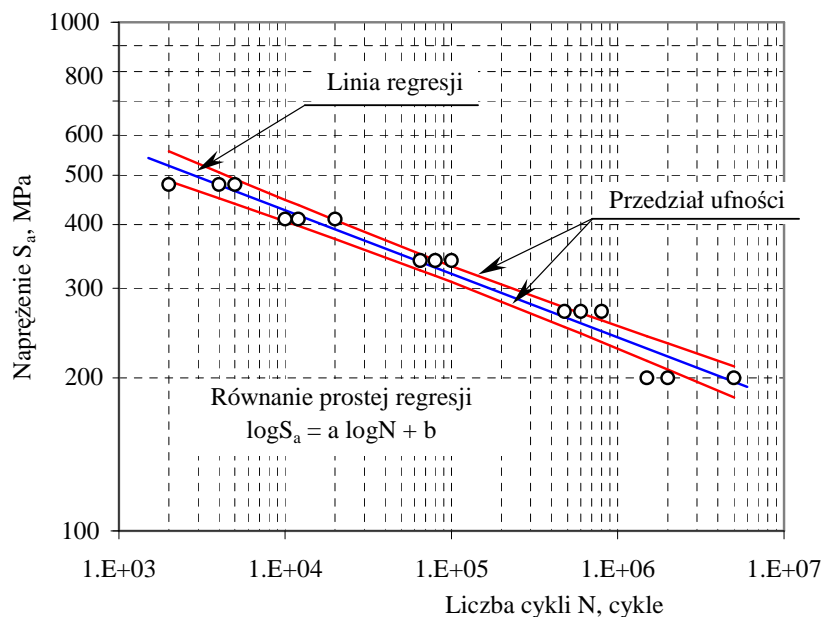
Procedurze badawczej towarzyszyć powinno szereg dokumentów związanych m.in. instrukcja dotycząca przygotowania urządzeń pomiarowych do badań.

3. PROCEDURA SZACOWANIA NIEPEWNOŚCI POMIARU

Wyznaczanie wykresu Wöhlera jest związane z realizacją serii testów. Każdy uzyskany wynik zawiera dwa typy błędów: błąd przypadkowy związany ze zmianami własności

materiału poszczególnych próbek oraz błąd pomiarowy związany z procedurami badawczymi. Z punktu widzenia Laboratorium, które wykonuje badania na podstawie dostarczonych próbek przez Zleceniodawcę, błąd przypadkowy należy pominąć i nie uwzględniać w szacowaniu niepewności. Niepewność pomiaru jest związana z realizacją badań wg określonej procedury. Podczas wykonywania testów laboratoryjnych można zdefiniować następujące źródła niepewności pomiaru związane z:

- pomiarem poziomu obciążenia,
- sposobem sterowania obciążeniem,
- sposobem montażu próbek w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (nieosiowość zadawania obciążenia),
- identyfikacją cech geometrycznych próbek,
- wilgotnością i temperaturą w pomieszczeniach laboratoryjnych,
- temperaturą próbek i zjawiska korozyjne,
- częstotliwością realizacji obciążeń poszczególnych testów zmęczeniowych,
- przyjęciem kryterium zniszczenia,
- procedurą badawczą realizacji badań.



Rys. 3. Przykładowy wykres trwałości zmęczeniowej Wöhlera

Przedstawione punkty wskazują, iż proces szacowania niepewności wyników pomiarów trwałości zmęczeniowej jest niestychnie złożony. Niemożliwa jest pełna identyfikacja optymalnego rozwiązania. Z tego powodu proponuje się przeprowadzenie oceny statystycznej polegającej na określeniu przedziału ufności. Taki sposób prezentacji wyników badań jest powszechnie spotykany w pracach o charakterze naukowym. Między

innymi z tego powodu proponuje się podobną prezentację dla wyników badań objętych zakresem akredytacji.

W kontekście przedstawionych wyżej uwag ocena statystyczna zostanie omówiona na przykładzie wyników badań przedstawionych na rysunku 3. Na wykresie punktami oznaczono wyniki pojedynczych testów zmęczeniowych realizowanych na określonych poziomach naprężeń nominalnych. Ze względu na uproszczenie postaci stosowanych wzorów logarytmowi liczby cykli N będzie odpowiadała zmienna x , natomiast logarytmowi amplitudy naprężeń nominalnych S_a zmienna y .

W przypadku, gdy dwuwymiarowy rozkład X i Y jest normalny lub zbliżony do normalnego, to funkcję regresji możemy uznać za liniową wyrażoną równaniem [2, 3, 5]:

$$y = \alpha x + \beta. \quad (1)$$

Parametry α i β liniowej funkcji regresji muszą przyjmować wartości, które pozwolą na spełnienie warunku

$$E[Y - (\alpha X + \beta)]^2 = \min. \quad (2)$$

Oznacza to, że parametry liniowej funkcji regresji najczęściej szacuje się za pomocą metody najmniejszych kwadratów [2, 3, 5]. Spełnienie niezbędnych warunków pozwala na przedstawienie prostej w postaci równania [2]:

$$\hat{y} = ax + b. \quad (3)$$

Wartości współczynników a i b określa się według wzorów [2, 5]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}, \quad (4)$$

$$b = \bar{y} - a \bar{x}. \quad (5)$$

Estymatory wartości średniej \bar{x} i \bar{y} wyrażają się wzorami [2, 5]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i . \quad (7)$$

Wyznaczone współczynniki a i b opisują prostą regresji zmiennej losowej Y względem X , co zostało przedstawione na rysunku 3.

Wydaje się słuszne przyjęcie, że w Laboratorium Akredytowanym niepewność wyznacza się dla prawdopodobieństwa $\gamma = 0,95$ (zazwyczaj przyjmuje się α , lecz ze względu na wykorzystanie wcześniej wymienionego symbolu zastosowano γ). Przeciętne odchylenie od prostej regresji obliczamy ze wzoru [2]:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} , \quad (8)$$

natomiast przedział ufności dla współczynnika regresji α funkcji regresji (1) oblicza się według wzoru [2]:

$$P \left\{ a - t_\gamma \frac{s_r}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} < \alpha < a + t_\gamma \frac{s_r}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \right\} = 1 - \gamma . \quad (9)$$

Przedstawiony sposób obliczeń pozwala na przedstawienie wyników obliczeń w postaci równania (3), dla której został określony przedział ufności.

Biorąc pod uwagę wymagania klienta związane z procesem konstruowania procedura szacowania niepewności powinna zawierać, oprócz wyników w przedstawionej formie, ilościowe informacje o niepewności pomiarowej określonych czynników związanych z realizacją badań trwałości zmęczeniowej. Podane dane można uzupełnić o niepewności pomiarowe wynikające z nadzoru nad wyposażeniem badawczym i pomiarowym.

4. PODSUMOWANIE

Wykres trwałości zmęczeniowej Wöhlera budowany jest na podstawie serii testów zmęczeniowych, które w rezultacie zostają aproksymowane prostą opisaną równaniem $\hat{y} = ax + b$. Współczynnik kierunkowy i wyraz wolny w równaniu prostej zależy od sposobu zaplanowania badań, czyli od procedury realizacji testów. W warunkach Laboratorium Akredytowanego taka procedura jest udokumentowana i objęta nadzorem. Jej zapisy zapewniają, że badania zostaną przeprowadzone zgodnie z przyjętymi zasadami dla wszystkich testów. Wpływ na wartości wyżej wymienionych współczynników prostej mają czynniki związane z procedurą realizacji badań. Zaliczyć do nich należy m.in.: kryterium zniszczenia obiektu badań (pojawienie się pęknięcia czy całkowite pęknięcie próbki), sposób określania zakresu zmienności naprężeń S_a oraz wyboru określonych poziomów obciążeń w czasie badań i inne związane z prowadzeniem testów.

Istotne zatem jest, aby procedura badawcza dotycząca oceny trwałości zmęczeniowej zawierała algorytm postępowania doboru wymienionych czynników.

Kluczowym elementem wyznaczania wykresu Wöhlera jest realizacja pojedynczych prób. Każdy wynik, który znacząco odbiega od wartości średniej dla populacji istotnie wpływa na wartość współczynników kierunkowego prostej opisującej wykres. Konsekwentnie więc, po odpowiednim przygotowaniu procedury badawczej, należy zaprojektować procedurę szacowania niepewności pomiaru jako kolejnego elementu procesu badawczego. Proponuje się, aby procedura związana z szacowaniem wyników badań trwałości zmęczeniowej zawierała sposób określenia niepewności pomiaru pojedynczego testu oraz wartość przedziału ufności dla współczynnika kierunkowego prostej opisującej wykres.

Przyjęty sposób postępowania wymaga walidacji. Weryfikacja przyjętych założeń zostanie przedstawiona w kolejnych publikacjach autorów.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bagiński J.: *Systemy jakości wg serii norm ISO 9000, Seria: Zarządzanie przez Jakość. Doskonalenie jakości w firmach prywatnych i państwowych*. TQM Bellona, Warszawa 1993.
- [2] Greń J.: *Statystyka matematyczna – modele i zadania*, Warszawa, PWN 1984.
- [3] Klonecki W.: *Elementy statystyki dla inżynierów*, Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1996.
- [4] Kocańda S., Szala J.: *Fundamentals of fatigue calculations, (in Polish)*, Warszawa, PWN 1997.
- [5] Koronacki J., Mielniczuk J.: *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2001.
- [6] Polska norma: *Badanie metali na zmęczenie - Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób*, PN-H-04325:1976.
- [7] Polska norma: *Badanie metali na zmęczenie - Próba zginania*, PN-H-04326:1976.
- [8] Polska norma: *Badanie metali na zmęczenie - Próba osiowego rozciągania - ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych*, PN-H-04327:1974.
- [9] Polska norma: *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących*, PN-EN ISO 17025:2005.
- [10] Polska norma: *Systemy zarządzania pomiarami. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego*, PN-EN ISO 10012:2004.
- [11] Praca zbiorowa: *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*. Główny Urząd miar.
- [12] Strona internetowa: http://www.polqm.ca/powerpoint/history_qm.ppt, 2010.
- [13] Szczutkowski M.: *Walidacja metod badawczych w laboratorium akredytowanym. Część I. Podstawowe zagadnienia*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna nr 2, 2009.
- [14] Szczutkowski M.: *Zastosowanie zasad TQM w laboratoriach badawczych poddających się procesowi akredytacji*, X Międzynarodowa Konferencja „TQM Stymulatorem innowacyjności”, 2008.
- [15] Szczutkowski M., Bromberek F.: *Rola kierownika ds. jakości w uczelnianym laboratorium badawczym zarządzanym zgodnie z zasadami TQM*, XI Konferencja „Innowacyjność i jakość – wyznaczniki sukcesu”, 2010.