

Joachim J. OTTE

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

## NOWE UJĘCIE ZAGADNIENIA

### MODELOWANIA CHARAKTERYSTYK PRACY MASZYN WIRNIKOWYCH

### PRZEDSTAWIONE NA PRZYKŁADZIE WENTYLATORA PROMIENIOWEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono koncepcję modelowania charakterystyk pracy przepływowych maszyn wirnikowych wykorzystującą współczesne metody badań doświadczalnych takie jak programowanie badań, metody optymalizacji, analiza statystyczna.

Najważniejszym elementem koncepcji jest odpowiedni dobór funkcji aproksymujących charakterystyki pracy, których postać powinna odzwierciedlać fizykalną istotę zjawisk przepływu. Identyfikację parametrów modelu uzyskuje się w wyniku rozwiązania zadania optymalizacyjnego w oparciu o zbiór danych pomiarowych. Szczegóły koncepcji przedstawiono na przykładzie modelowania charakterystyk pracy wentylatora promieniowego.

## 1. Wstęp

1.1. Zasadniczym celem badań aerodynamicznych maszyn wirnikowych (a w tym i wentylatorów promieniowych) jest określenie charakterystyk (statycznych) pracy. Osiągnięty wysoki poziom (sprawności, koncentracji mocy itp.) w budowie tych maszyn został uzyskany przez daleko już idące poznanie mechanizmów przepływu zachodzących wewnątrz maszyny. Tryb badań polegający na rozczłonkowaniu piętrzących się tu problemów uzasadniany jest ograniczonymi zdolnościami percepcyjnymi człowieka, jego możliwościami gromadzenia i analizy informacji oraz również racjami ekonomicznymi.

Mimo niewątpliwie dużych osiągnięć w dziedzinie aerodynamiki maszyn wirnikowych, w dalszym ciągu otwarta jest jednak sprawa obliczania ich charakterystyk pracy. Napotkać można nawet sądy, wątpiące o możliwości osiągnięcia praktycznych i dokładnych metod rozwiązania tego zagadnienia.

1.2. Poznając w coraz drobniejszych szczegółach istotę zjawisk przepływu zdobywany duże ilości informacji. Niemniej w dużym procencie informacje te są tracone wskutek zbytnej selektywności analizy wyników czy też wskutek ograniczonej zdolności kojarzenia faktów przez człowieka. Takim przykładem marnotrawienia ciężko zdobytych informacji mógłby być fakt, gdyby ktoś po przebadaniu kilkudziesięciu wentylatorów stwierdził jedynie, że ze wzrostem wartości kąta łopatkowego  $\beta_2$  wzrasta liczba ciśnienia  $\psi$ .

Wiele informacji jest straconych wskutek niepełnego ich opracowania lub też specjalnego "utajnienia" w sprawozdaniach lub publikacjach. Przykładem jest tu często spotykany w publikacjach fakt podawania bezwymiarowych charakterystyk pracy wentylatorów

$$\{\psi, \vartheta, \lambda\} = f(\varphi)$$

z pominięciem liczby Reynoldsa.

Innym przykładem kamuflowania informacji jest przedstawianie charakterystyk w formie względnej

$$\left\{ \frac{\psi}{\psi_0}, \frac{\vartheta}{\vartheta_0}, \frac{\lambda}{\lambda_0} \right\} = f\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right),$$

co często ma miejsce w prospektach firmowych.

1.3. W klasycznym ujęciu prowadzenia badań sprowadza się do wyznaczania wpływu jednej wielkości niezależnej (lub najwyżej kłku wielkości niezależnych) na zależną wielkość wynikową. Tworzenie coraz bardziej szczegółowych modeli obejmujących coraz większą liczbę zmiennych powoduje, że klasyczna koncepcja badań bazująca na determinizmie przyczyn i skutków staje się nie do przyjęcia. Wynika to z następujących konstatacji:

- liczba wszystkich kombinacji wartości zmiennych niezależnych przekroczyła możliwości realizacji doświadczeń,
- nie wszystkie zmienne niezależne mogą być badane oddzielnie,
- na wynik badań mogą mieć wpływ czynniki niemierzalne lub po prostu nieznane.

Dla uświadomienia sobie barier jakie napotykamy w momencie podjęcia decyzji badań kompletnych (maksymalnej liczby układów wartości zmiennych niezależnych), zapewniających uwzględnienie wszystkich możliwych skojarzeń wartości wszystkich zmiennych niezależnych można dokonać pewnych przeliczeń na przykładzie wentylatora promieniowego. Otóż jeżeli wyszczególni się tu 10 zmiennych niezależnych (cech geometrycznych), z których każda w trakcie badań przyjmie (skromnie biorąc) 10 różnych wartości, to do uzyskania maksymalnej informacji w zdeterminowanym programie badań potrzeba  $N = 10^{10}$  pomiarów. Przyjmując, że pomiar charakterystyki wentylatora trwa 1 godzinę, to wobec tego przeprowadzenie kompletnych badań wymaga

$$T = 10^{10} \text{ h} = 1,14 \cdot 10^6 \text{ lat!}$$

(słownie ponad milion lat) ciągłych pomiarów.

Współczesne zasady realizacji badań bazują na ujęciu probalistycznym wykorzystując do interpretacji wyników metody statystyki matematycznej.

1.4. "Rewolucja informatyczna" jaka zachodzi wskutek wprowadzenia do bieżącej eksploatacji coraz doskonalszych komputerów (systemów komputerowych) prowadzi również do zmian jakościowych w dziedzinie badań. Olbrzymia pojemność pamięci i niesłychana szybkość działania komputera umożliwia zgromadzenie tylu informacji, ile praktycznie rzecz biorąc, jest pożądane i pozwala je przetwarzać dla osiągnięcia określonych celów. Szczególnie wielka rola komputera ma miejsce w analizie wielkiej liczby faktów, które wydają się nieistotne jeśli obserwujemy je każdy z osobna.

1.5. Ogólnie przyjmuje się jako charakterystyki statyczne maszyn wirnikowych zależności sprawności i mocy od strumienia masy; w maszynach roboczych dochodzi jeszcze zależność przyrostu entalpii (przyrostu ciśnienia, stosunku ciśnień) od strumienia masy. Chodzi tu więc o zależności:

$$\begin{aligned}\eta &= f(\dot{m}) \\ N &= f(\dot{m}) \\ \Delta H &= f(\dot{m})\end{aligned}\quad (1)$$

Biorąc pod uwagę w dalszych rozważaniach przykład wentylatora promienionowego można powyższe charakterystyki ująć bezwymiarowo

$$\begin{aligned}\eta &= f(\psi) \\ \lambda &= f(\psi) \\ \psi &= f(\psi)\end{aligned}\quad (2)$$

Dla skrótowego zapisu charakterystyk maszyny przedstawić można jako zbiór

$$F = \{\eta, N, \Delta H\} \quad (3)$$

jak również odpowiednio (dla wentylatorów)

$$F = \{\eta, \lambda, \psi\} \quad (4)$$

## 2. Koncepcja modelowania charakterystyk pracy maszyn wirnikowych

Stwierdzenia przedstawione we wstępie składają się na genezę koncepcji tworzenia modelu matematycznego charakterystyk pracy maszyn wirnikowych bazującej na systemowym ujęciu całego zagadnienia, w którym znaczną rolę odgrywają możliwości obliczeniowe współczesnych maszyn cyfrowych. Na koncepcję tę składają się następujące elementy:

- tworzy się zbiór zmiennych niezależnych mających wpływ na charakterystykę pracy maszyny. W zbiorze tym można wyszczególnić:

- zbiór cech geometrycznych układu przepływowego maszyny  $C_g$ ,
- zbiór cech fizycznych płynu  $C_f$ ,
- zbiór cech kinematycznych strumienia w przekroju wlotowym maszyny wirnikowej  $C_k$ .

Zbiór zmiennych niezależnych tworzą takie zmienne, które przyjmują wartości w pewnym sensie niezależnie od wszystkich innych zmiennych.

Zbiór ten zapisać można skrótowo jako:

$$G = \{C_g, C_f, C_k\} \quad (5)$$

- tworzy się zbiór wartości pomiarowych  $F_j$  zmiennej niezależnej. Na zbiór ten składa się  $k$  danych uzyskanych z pomiarów charakterystyk przy każdorazowo określonym zbiorze  $G_j$ , gdzie  $j = 1, 2, \dots, k$ :
- przyjmuje się postać funkcji aproksymującej charakterystyki pracy

$$F = F(G, A), \quad (6)$$

gdzie

$$A = \{a\}$$

jest zbiorem parametrów modelu, który zawarty jest w pewnym zbiorze  $D$  wartości dopuszczalnych, czyli

$$A \in D$$

- obiera się kryterium identyfikacji zbioru parametrów modelu  $A$ . Najczęściej tym kryterium jest suma kwadratów odchyleń wartości odpowiadających sobie wielkości ze zbioru  $F$  i  $F_p$ :

$$S = \sum_{j=1}^k [F_{Pj} - F(G_j, A)]^2 = S(A), \quad (7)$$

Suma kwadratów odchyleń wartości zmierzonych i obliczonych stanowi jednocześnie miarę adekwatności modelu

- rozwiązuje się zadanie optymalizacji polegające na tym, by ze zbioru parametrów modelu

$$A \in D \quad (8)$$

wyznaczyć podzbiór wartości  $A_0$  spełniający warunek

$$S(A_0) = \min. \quad (9)$$

W rezultacie rozwiązania następuje kreacja modelu matematycznego maszyny wirnikowej

- dokonuje się weryfikacji modelu matematycznego. Wykorzystując metody statystyki matematycznej należy przeprowadzić statystyczną ocenę istotności korelacji, sprawdzić nietendencjonalność i niezawodność modelu oraz określić zakres stosowalności. W przypadku negatywnej oceny modelu matematycznego należy zmienić postać funkcji aproksymującej charakterystykę pracy i powtórzyć następne etapy budowy modelu matematycznego maszyny wirnikowej.

## 2.1. Problem doboru postaci funkcji aproksymującej charakterystyki pracy

Dobór odpowiedniej postaci funkcji aproksymującej w dużym stopniu przesądza o dokładności modelu matematycznego. W analizie regresji [1], [2] rozważa się najczęściej klasę wielomianów, których przydatność wynika głównie z ich uniwersalności. Przy założeniach o gładkości funkcji aproksymującej, można przedstawić ją w postaci wielomianu odpowiednio wysokiego stopnia, jednakże liczba występujących tu współczynników (parametrów modelu) stanowi istotną barierę dla realizatora badań. I tak wielomian  $n$  zmiennych  $k$ -tego stopnia ma  $\binom{n+k}{n}$  współczynników, czyli identyfikacja współczynników takiego wielomianu wymaga więc co najmniej  $\binom{n+k}{n}$  pomiarów.

Przykładowo dla umiarkowanej liczby zmiennych niezależnych  $m = 10$  liczba współczynników wielomianu w zależności od przyjętego stopnia  $k$  kształtuje się następująco:

$$m = 10, \quad k = 1; \quad N = 11,$$

$$m = 10, \quad k = 2; \quad N = 66,$$

$$m = 10, \quad k = 3; \quad N = 286.$$

Okazuje się więc, że aproksymacja zbioru wartości pomiarowych  $F_p$  za pomocą wielomianów na całym zbiorze  $G$  jest niezadowolająca z praktycznego punktu widzenia. Ogólnie można stwierdzić, że wielomiany są niezbyt przydatne do globalnej aproksymacji funkcji regresji na całym obszarze jej określoności.

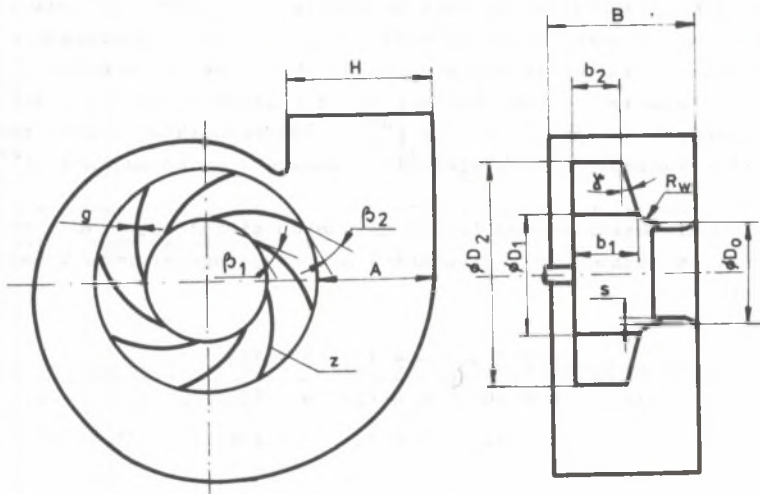
Powyższy sposób, czyli dobór funkcji aproksymującej w postaci wielomianów jest wskazany w przypadku braku jakichkolwiek informacji, o badanym obiekcie. W odniesieniu do maszyn wirnikowych sytuacja jest jednak odmienna, gdyż badania dotyczące mechanizmów przepływu osiągnęły bardzo wysoki poziom szczegółowości. Stąd też funkcje aproksymujące charakterystyki pracy należy budować w oparciu o aktualny stan wiedzy w dziedzinie aerodynamiki maszyn wirnikowych. Szczególnie wiele wnosi tu analiza przepływu płynu lepkiego. Należy tu dodać, że otrzymuje się w ten sposób najczęściej modele nieliniowe względem parametrów.

Również z analizy równań aerodynamiki maszyn wirnikowych jak również z analizy wyników prac badawczych w tej dziedzinie wynikają ograniczenia (reprezentowane w przedstawionej wyżej koncepcji przez zbiór D) jakie nakłada się na zbiór parametrów modelu, aby uzyskać sensowne ich wartości, które by pozwoliły na fizykalną analizę modelu.

### 3. Dyskusja koncepcji na przykładzie modelowania charakterystyk pracy wentylatora promieniowego

#### 3.1. Wyszczególnienie wielkości mających wpływ na pracę wentylatora

Dokonyjąc chociażby tylko pobieżnej analizy wielkości oddziałujących na proces sprężania w układzie przepływowym wentylatora promieniowego (rys. 1) można wyszczególnić zbiór 19 wielkości. Po przeprowadzeniu ana-



Rys. 1. Układ przepływowy wentylatora promieniowego. Wielkości wpływające na charakterystyki pracy wentylatora promieniowego

$D_0$  - średnica wlotowa wirnika,  $D_1$ ,  $D_2$  - średnica krawędzi wlotowych i wylotowych łopatek,  $b_1$ ,  $b_2$  - szerokość wirnika na wlocie i wylocie,  $R_w$  - promień wyoblenia tarczy nakrywającej,  $\phi$  - kąt nachylenia tarczy nakrywającej,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  - kąt wlotowy i wylotowy łopatki,  $z$  - liczba łopatek,  $s$  - wysokość szczeliny przywlotowej,  $g$  - grubość łopatki,  $A$  - rozwarcie spirali,  $B$  - szerokość kolektora spiralnego,  $H$  - wysokość okna wylotowego spirali,  $\omega$  - prędkość kątowa wirnika,  $\rho$  - gęstość czynnika,  $\nu$  - lepkość kinematyczna czynnika,  $\dot{m}$  - strumień masy

lize wymiarowej i sprowadzeniu wszystkich wielkości do postaci bezwymiarowej, a także uwzględnieniu związku geometrycznego między wymiarami wirnika uzyskuje się ostatecznie zbiór 15 zmiennych niezależnych:

$$G = \left\{ \bar{D}_0, \bar{D}_1, \bar{D}_2, \bar{R}_w, \delta, \beta_1, \beta_2, z, \bar{\varepsilon}, \bar{s}, \bar{\lambda}, \bar{B}, \bar{\Pi}, Re_u, \varphi \right\}$$

### 3.2. Zbiór wartości pomiarowych charakterystyk pracy

Jednym z podstawowych problemów, jest tu pytanie o liczebność zbioru wartości pomiarowych  $F_n$ . Rozstrzygnięcie to zależy w dużej mierze od relacji pomiędzy racjami ekonomicznymi a wymogami informatywności programu badań.

Innymi słowy należy tu zdecydować co jest lepsze: zaoszczędzić 500.000 zł, czy np. zmniejszyć dokładność modelu matematycznego o 2%. Umiejętność właściwego programowania doświadczeń jest właśnie tą umiejętnością, która pozwala na znalezienie rozsądnego kompromisu między informacją uzyskaną w wyniku badań doświadczalnych a czasem i kosztem ich realizacji [3].

Jest rzeczą oczywistą, że przemysł często nie potrzebuje pełnego modelu matematycznego, stąd też oczywiście należy się liczyć z trudnościami w realizacji pełnego programu badań i w związku z tym, w odniesieniu do wentylatorów promieniowych, można zaproponować tworzenie zbioru  $F_p$  poprzez gromadzenie (na bieżąco) wyników pomiarów charakterystyk wentylatorów zbudowanych i przebadanych dla aktualnie innych celów. W związku z powiększaniem się w ten sposób zbioru wartości pomiarowych, należałoby oczywiście co pewien czas na nowo uaktualniać parametry modelu.

### 3.3. Problem doboru funkcji aproksymującej charakterystyki pracy wentylatora

W zakresie teoretycznego opracowania modelu największe trudności skupiają się na następujących zagadnieniach [4]:

- wyznaczenie teoretycznej charakterystyki pracy wentylatora,
- usystematyzowanie charakterystyk fizycznych zjawiska przepływu w tym głównie dokonanie analizy efektów dysypacyjnych przepływu w poszczególnych elementach układu.

Szczególnie wiele uwagi poświęca się współcześnie metodom szacowania energii rozproszonej w układzie przepływowym maszyn wirnikowych, o czym świadczy duża liczba prac w tym zakresie [4], [5]. Koncepcja doboru funkcji aproksymującej powinna uwzględniać fakt, że układ przepływowy wentylatora promieniowego składa się z jednoznacznie wyodrębnionych elementów. Można przyjąć, że każdy z tych elementów wnosi swój własny wkład w bilans strat energii. Jakkolwiek z drugiej strony można być również przekonany, że ma miejsce pewne wzajemne oddziaływanie strat w poszczególnych elementach, to jednak założenie, że efekty tego oddziaływania w bilansie strat są odpowiednio małe, pozwala z powodzeniem stosować tu zasadę superpozycji.

### 3.4. Zagadnienie identyfikacji parametrów modelu

Problem identyfikacji zbioru parametrów modelu  $A$  sprowadza się do rozwiązania zadania programowania nieliniowego z ograniczeniami, przy warunku by suma (7) kwadratów odchyień wartości zmierzonych i obliczonych osiągnęła wartość minimalną. Metody rozwiązywania tego typu zagadnień są szeroko potraktowane w książkach [6], [7].

Pewną sprawdzoną [8] propozycją w odniesieniu do modelowania charakterystyk pracy wentylatorów promieniowych jest ujęcie kryterium (7) w postaci dwuczłonowej:

$$S = \sum_{j=1}^k [\varphi_{P_j} - \varphi(G_j, A)]^2 + \sum_{j=1}^k [\psi_{P_j} - \psi(G_j, A)]^2, \quad (10)$$

Kryterium powyższe wynika stąd, że przy modelowaniu charakterystyk  $\varphi = \varphi(G, A)$  oraz  $\psi = \psi(G, A)$  oparto się na wspólnym modelu strat przepływu.

### 3.5. Zagadnienie dokładności modelu matematycznego

Jako kryterium dokładności metody obliczeniowej brane są zawsze wyniki pomiarów, czyli innymi słowy badamy rozbieżność charakterystyki obliczeniowej i charakterystyki pomiarzonej  $\delta_{CH}$ . Poprawność metody obliczeniowej jest zachowana, gdy różnica  $\delta_{CH}$  nie przekracza pewnej odchyłki dopuszczalnej  $\varepsilon$ , czyli

$$\delta_{CH} \leq \varepsilon \quad (11)$$

Zauważmy teraz, że nie mamy stuprocentowej pewności, co do geometrii rzeczywistej maszyny, co wynika z odchyłek (tolerancji) technologicznych, błędów wykonawstwa, braku kontroli wymiarowej itp. Mamy więc taką sytuację, że obliczenia charakterystyki prowadzimy dla geometrii układu odbiegającej od rzeczywistej. W tym momencie występuje odchyłka  $\delta_G$  wynikająca z różnicy charakterystyk obliczonych dla geometrii rzeczywistej i przyjętej jako rzeczywista.

Następną odchyłką, którą można tu wyróżnić jest błąd pomiaru charakterystyk rzeczywistych  $\delta_P$ . Na wielkość tej odchyłki wpływają stosowane metody pomiarowe, stosowane przyrządy pomiarowe oraz, co jest niemniej ważne, rzetelność prowadzenia pomiarów.

Jeżeli wyobrazimy sobie teraz sytuację taką, że mamy bezbłędnie określoną geometrię maszyny rzeczywistej, dla której przeprowadziliśmy bezbłędne pomiary, to występująca w tym momencie różnica pomiędzy charakterystyką pomiarową a obliczeniową jest błędem metody obliczania charakterystyk  $\delta_N$ .



Można więc zapisać, że

$$\delta_{CH} = f(\delta_M, \delta_G, \delta_P). \quad (12)$$

Biorąc pod uwagę, że występują tu odchyłki względne, w grubym przybliżeniu można założyć liniowe ich złożenie, czyli

$$\delta_{CH} \cong \delta_M + \delta_G + \delta_P. \quad (13)$$

Tworzona według koncepcji przedstawionej w niniejszej pracy metoda obliczania charakterystyk weryfikowana będzie w oparciu o dostępne odpowiednio dokładne wyniki pomiarów maszyn modelowych. Ujmując to nieco inaczej można powiedzieć, że charakterystyki pomiarowe będą stanowiły podstawę do identyfikacji modelu matematycznego metody obliczeniowej. W tej sytuacji, przeprowadzając podobną analizę w stosunku do odchyłki określającej błąd metody  $\delta_M$  jak poprzednio w stosunku do  $\delta_{CH}$ , okazuje się, że zachodzi

$$\delta_M = f(\delta_{TM}, \delta_{GM}, \delta_{PM}), \quad (14)$$

gdzie:

$\delta_{TM}$  - błąd modelu matematycznego,

$\delta_{GM}$  - odchyłka technologiczna, błąd wykonawstwa itp. maszyny modelowej,

$\delta_{PM}$  - błąd pomiaru charakterystyk maszyn modelowych.

Postępując analogicznie jak w przypadku relacji (13) można napisać

$$\delta_M \cong \delta_{TM} + \delta_{GM} + \delta_{PM}. \quad (15)$$

Ostatecznie zaś odchyłka pomiędzy charakterystyką obliczeniową a charakterystyką rzeczywistą wentylatora promieniowego zależna jest od wszystkich innych odchyłek w następującym związku

$$\delta_{CH} \cong \delta_{TM} + \delta_{GM} + \delta_{PM} + \delta_G + \delta_P. \quad (16)$$

Analizując relację (15) stwierdzić można, że błąd metody obliczeniowej  $\delta_M$  w dużym stopniu zależy od rzetelności wykonawstwa maszyny modelowej, dokładności określenia jej cech geometrycznych i dokładności pomiarów, które powinny być przeprowadzone zgodnie z zasadami przewidzianymi w Polskiej Normie dla pomiarów laboratoryjnych. Podstawowym zadaniem w niniejszej pracy będzie takie opracowanie modelu matematycznego metody obliczeniowej, aby

$$\delta_{TM} \ll \delta_{GM} + \delta_{PM}. \quad (17)$$

Celem powyższej analizy było zwrócenie między innymi uwagi na zależność pomiędzy dokładnością tworzonej metody obliczeniowej a dokładnością danych eksperymentalnych.

#### 4. Wnioski

Przedstawiona koncepcja modelowania charakterystyk pracy maszyn wirnikowych opiera się na współczesnych osiągnięciach metodyki badań doświadczalnych. Realizacja tej koncepcji w pracy [8], w odniesieniu do modelowania charakterystyk wentylatorów promieniowych, wykazała pełną jej przydatność i pozwoliła uzyskać, mimo niezbyt rozbudowanej postaci funkcji aproksymujących, bardzo obiecujące wyniki. Należy sądzić, że przedstawiona w niniejszym artykule procedura postępowania stanie się skutecznym narzędziem pozwalającym z powodzeniem dochodzić do globalnego modelu matematycznego maszyny nawet przy bardzo dużej liczbie zmiennych niezależnych.

Jest rzeczą oczywistą, że przedstawiona koncepcja modelowania może być zastosowana do modelowania charakterystyk pracy takich elementów układu przepływowego jak palisady profili, wieńce łopatkowe i stopnie maszyn wirnikowych.

#### LITERATURA

- [1] Benjamin J.R., Cornell C.A.: Rachunek prawdopodobieństwa statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT, Warszawa 1977.
- [2] Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
- [3] Polański Z.: Metodyka badań doświadczalnych. Politechnika Krakowska, Kraków 1978.
- [4] Otte J.J.: Analiza strat układu przepływowego wentylatora promieniowego. Inst.Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Gliwice 1982.
- [5] Tuliszka E.: Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. WNT, Warszawa 1976.
- [6] Zangwill W.I.: Programowanie nieliniowe. WNT, Warszawa 1974.
- [7] Himmelblau D.: Prikladnoje nieliniejnije programowanije. Moskwa 1975.
- [8] Danielczok S.: Analiza strat i optymalizacja geometrii wentylatorów promieniowych. Praca dyplomowa wykonana pod kierunkiem J. Otte. Gliwice 1981.

Recenzent: doc, dr inż. Jerzy Roszkowski

НОВЫЙ ПОДХОД К ВОПРОСАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РОТОРНЫХ МАШИН

## Р е з ю м е

В статье представлено концепцию моделирования рабочих характеристик турбомашин использующую современные методы экспериментальных испытаний таких как планирование эксперимента, оптимизационные методы и статистический анализ.

Важнейшим элементом, согласно этой концепции является выбор аппроксимирующих функции рабочих характеристик, которых форма должна отражать физическую суть явлений течения. Идентификацию параметров модели проводится в итоге решения задачи оптимизации на основе множества измерительных данных.

Подробности метода представлено на примере моделирования рабочих характеристик радиального вентилятора.

A NEW APPROACH TO THE MODELLING OF WORKING CHARACTERISTICS  
FOR TURBOMACHINES PRESENTED USING A CENTRIFUGAL FAN AS AN EXAMPLE

## S u m m a r y

A method of working characteristics modelling for turbomachines using modern methods of experimental studies like planning of experiments, optimization techniques and statistical analyses is proposed. The essential problems lie in a proper choice of approximation functions for working characteristics according to physical phenomena of a flow. Model parameters identification is based on a solution of the optimization problems using observation data. Centrifugal fan characteristics are modelled as an example.