

**Wojciech TUTAK**

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, INSTYTUT MASZYN TŁOKOWYCH I TECHNIKI STEROWANIA

**Interpretacja wyników pomiaru prędkości przepływu ładunku w komorze spalania tłokowego silnika spalinowego**

Dr inż. Wojciech TUTAK

Jest adiunktem w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej. Zainteresowania naukowe to badania eksperymentalne i modelowanie procesów cieplno-przepływowych w cylindrze silnika tłokowego.



e-mail: tutak@imc.pcz.czest.pl

**Streszczenie**

W opracowaniu przedstawiono interpretację wyników pomiaru prędkości przepływu ładunku w komorze spalania tłokowego silnika spalinowego. Analizie poddano wpływ metody opracowania wyników pomiaru prędkości przepływu na uzyskane wyniki parametrów opisu pola prędkości w komorze spalania silnika tłokowego.

**Słowa kluczowe:** pomiar, pole prędkości, komora spalania.

**Interpretation of measurement results of flow velocity in the ICE combustion chamber****Abstract**

The paper presents measurement results of flow field of fresh charge in the combustion chamber of the internal combustion engine. Possibilities of interpretation results of flow velocity measurement in combustion chamber of internal combustion engine are presented in the paper. The data handling method of flow velocity measurement result influence on obtained turbulence field in combustion chamber parameters are analyzed. The results of research show that non-repeatability of flow velocity in the combustion chamber have influence on description of turbulence parameters.

**Keywords:** measure, flow field, combustion chamber.

**Spis oznaczeń:**

- $U$  - chwilowa prędkość przepływu,
- $\bar{U}$  - średnia prędkość przepływu,
- $\hat{U}$  - średnia prędkość przepływu dla pojedynczego cyklu,
- $\hat{U}$  - fluktuacja prędkości średniej,
- $E$  - sygnał napięciowy,
- OWK - obrót wału korbowego
- ZZP - zewnętrzne zwrotne położenie,
- $u$  - fluktuacja prędkości,
- $\tilde{u}_\sigma$  - odchylenie standardowe prędkości od prędkości średniej,
- $c_m$  - średnia prędkość tłoka,
- $\varphi$  - kąt obrotu wału korbowego,
- $i$  - numer cyklu.

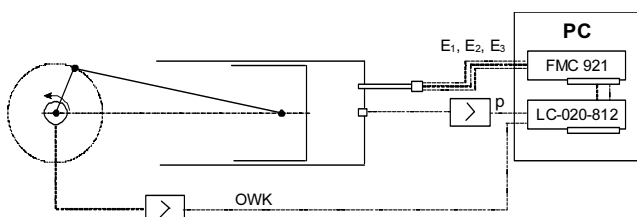
**1. Wstęp**

Poznanie pola prędkości w komorze spalania silnika tłokowego jest jednym z kluczowych zagadnień ciągle pozostających w kręgu zainteresowań badaczy jak i konstruktorów. Przygotowanie ładunku do spalania, na jakości którego ma głównie wpływ ruch ładunku w cylindrze silnika tłokowego, decyduje o jakości spala-

nia a przez to ma bezpośredni wpływ na zawartość toksycznych składników w spalinach. Mimo niewątpliwych postępów w tworzeniu coraz bardziej rozwiniętych modeli matematycznych opisujących pole prędkości przepływu, modeli turbulencji, modeli wymiany ciepła, to nadal podstawowym źródłem informacji o przepływach ładunku w cylindrze silnika tłokowego są badania eksperymentalne. Jedynym źródłem takich informacji może być eksperyment. Ze względu na skomplikowaną formę pola przepływu w cylindrze silnika tłokowego należy zwrócić uwagę na sposób interpretacji wyników pomiaru. W literaturze często spotyka się zaniedbywanie niepewności prędkości przepływu w kolejnych cyklach pracy silnika przy określaniu parametrów pola prędkości i pola turbulencji.

**2. Stanowisko badawcze**

Badania eksperymentalne przeprowadzono na jednocylindrowym silniku spalinowym S320 o prędkości obrotowej 1000 obr/min, stopień sprężania 8.5. Pomiary prowadzono przy pełnym otwarciu przepustnicy. Silnik spalinowy wyposażony był w obce źródło napędu w postaci silnika elektrycznego. Badania zostały przeprowadzone na silniku napędzanym bez doprowadzenia paliwa. Jako metodę pomiarową wybrano termooanemometryczną metodę pomiaru prędkości. Metoda ta była wykorzystywana w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania do pomiarów w cylindrze silnika tłokowego [4, 6]. W Instytucie są wieloletnie tradycje wykorzystywania tej metody pomiarowej, powstało wiele opracowań oraz algorytmów obliczeniowych. Prowadzono badania wpływu warunków występujących w cylindrze silnika na sygnał termooanemometryczny [4].



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego  
 $E_1, E_2, E_3$  – sygnały termooanemometryczne,  $p$  – sygnał ciśnienia,  
 OWK – kąt obrotu wału korbowego

Fig. 1. Measurement system diagram  
 $E_1, E_2, E_3$  – thermooanemometric signals,  $p$  – pressure signal,  
 OWK – crank angle

Główne elementy toru pomiarowego:

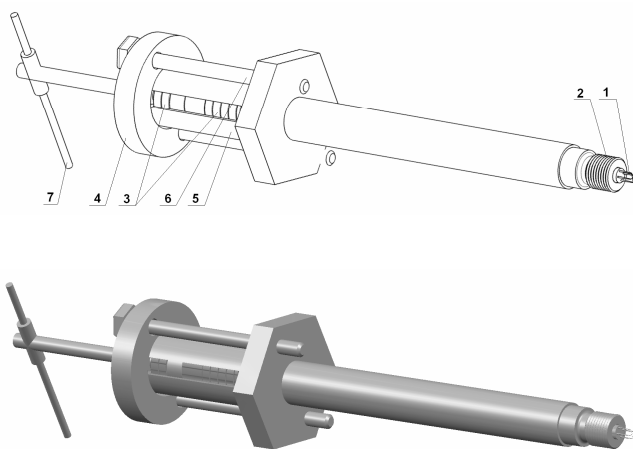
- specjalistyczna karta termooanemometryczna FMC 921 (Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie),
- sondy termooanemometryczne wraz z uchwytem do mocowania w gniazdach świecowych, (projekt własny, wykonanie Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie),
- piezoelektryczny czujnik ciśnienia - Kistler SN 6061,
- wzmacniacz ładunku - Kistler 5011,
- cyfrowy przetwornik kąta obrotu wału korbowego silnika - Kistler CAM 2611,
- oscyloskop - HAMEG HM 203-7,
- karta 12-bitowego, ośmiokanałowego przetwornika analogowo-cyfrowego - AMBEX LC-020-812,
- program "LCTXR" do rejestracji cyfrowej.

Prowadzono jednoczesną rejestrację dwóch sygnałów termooanemometrycznych oraz dwóch sygnałów pozwalających określić ciśnienie w cylindrze badanego silnika. Do pomiaru prędkości

przepływu ładunku wykorzystano czujnik termooanemometryczny w układzie X o włóknach wzajemnie prostopadłych. W zestawie pomiarowym wykorzystano specjalistyczną komputerową kartę anemometryczną FMC 921 przystosowaną do posiadanych czujników. Zastosowanie takiego zestawu pomiarowego pozwoliło na gromadzenie i przetwarzanie danych bezpośrednio w komputerze PC. Algorytm obliczeniowy mógł być realizowany programowo na podstawie zarejestrowanych sygnałów. Układ pomiarowy oparty na karcie FMC 921 został sprzęgnięty z komputerową kartą do akwizycji danych LC-020-812. Było to wymuszone koniecznością jednoczesnej zsynchronizowanej rejestracji sygnałów termooanemometrycznych oraz sygnału z czujnika ciśnienia i znacznika kąta obrotu wału korbowego.

### 3. Konstrukcja sondy termooanemometrycznej

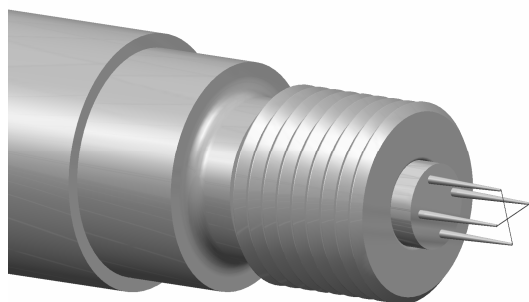
Ze względu na specyficzne warunki panujące w komorze spalania silnika tłokowego zaprojektowano i wykonano, przy współpracy z Instytutem Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie, specjalistyczne sondy oraz uchwyt (rys. 2) umożliwiające umieszczenie czujnika w komorze spalania silnika. Konstrukcja ta pozwala na umieszczenie czujnika sondy na dowolnej głębokości komory spalania. Można dokonać pomiarów w miejscu występowania zapłonu a także wewnątrz komory spalania. Istnieje także możliwość obracania sondy wokół własnej osi, co pozwala na dowolną orientację czujnika w polu przepływu.



Rys. 2. Sonda pomiarowa  
1- czujnik, 2- korpus, 3- podkładki dystansowe, 4- docisk,  
5- tuleja, 6- śruby, 7- wskaźnik

Fig. 2. Measurement probe  
1- probe, 2- body, 3- distance washer, 4- clamp,  
5- sleeve, screw, 7- pointer

Czujnik sondy do pomiaru prędkości przepływu wyposażony jest w dwa włókna rozpięte na wspornikach (rys. 3).



Rys. 3. Widok części pomiarowej sondy  
Fig. 3. View of the measurement part of probe

Uchwyt został wykonany ze stali nierdzewnej. W korpusie (2) znajduje się czujnik (1) umieszczony w rurce o średnicy 6mm. Odległość czujników pomiarowych od czoła głowicy silnika regulowana jest przez odpowiedni dobór podkładek dystansowych (3). Po ustaleniu parametrów geometrycznych czujnik jest blokowany śrubami (6) przez docisk (4). Wskaźnik (7) jest zorientowany równoległe do jednego z włókien pomiarowych, co pozwala na określenie położenia, niewidocznych w czasie pomiarów, czujników w komorze spalania silnika.

### 4. Opracowanie wyników pomiaru

Rejestrację prowadzono dla kolejnych 40 cykli pracy silnika. Na podstawie sygnałów napięciowych  $E_i(\varphi)$  z sond wyznaczono prędkości chwilowe  $U_i(\varphi)$ .

W cylindrze silnika tłokowego występują duże różnice między prędkością chwilową w jednym cyklu a prędkością średnią otrzymaną z uśredniania po całym zbiorze realizacji. Fluktuacja prędkości średniej ma istotny wpływ na obliczaną fluktuację prędkości. Prędkość średnia w kolejnych cyklach pracy silnika zmienia się nie tylko pod względem amplitudy, ale także pod względem fazy.

Turbulentne pole przepływu w cylindrze silnika tłokowego jest przestrzennie niejednorodne i niestacjonarne. Ze względu na niepowtarzalność pola prędkości przepływu w kolejnych cyklach pracy silnika istotnym jest określenie, która część prędkości jest prędkością średnią, a która fluktuacją prędkości. W konwencjonalnym podejściu statystycznym jak do przepływu stacjonarnego prędkość chwilowa zostaje przedstawiona, jako prędkość średnia oraz fluktuacja prędkości. Takie interpretowanie prędkości przepływu w cylindrze silnika powoduje zaniedbanie niepowtarzalności prędkości przepływu w kolejnych cyklach pracy silnika. Element opisu określający stopień niepowtarzalności prędkości przepływu w kolejnych cyklach. Uzyskana w ten sposób fluktuacja prędkości a następnie intensywność turbulencji jest sztucznie zawyżona przez składnik opisujący niepowtarzalność prędkości średniej. Przepływ ładunku w cylindrze silnika należy traktować, jako przepływ niestacjonarny, ze względu na niepowtarzalność prędkości w kolejnych cyklach pracy silnika. Prędkość przepływu zostaje przedstawiona, jako suma trzech składników, prędkości średniej, fluktuacji prędkości średniej oraz fluktuacji prędkości odpowiedzialnej za generację turbulencji. Z takiego zapisu otrzymuje się informację o prędkości średniej, o jej fluktuacji spowodowanej niepowtarzalnością prędkości oraz o charakterze turbulencji.

Interpretacja pola prędkości przepływu w cylindrze silnika tłokowego może być realizowana na podstawie analizy pojedynczego cyklu. Z takiej analizy otrzymuje się informację o strukturze przepływu dla pojedynczego obiegu silnika.

#### 4.1. Interpretacja oparta na konwencjonalnym podejściu statystycznym

Wyznaczanie prędkości średniej polega na uśrednianiu chwilowych prędkości z wielu cykli dla chwilowego położenia wału korbowego. W ten sposób wyznacza się prędkość średnią  $\bar{U}(\varphi)$  oraz fluktuację prędkości  $u(\varphi)$  wokół prędkości średniej. Prędkość przepływu można przedstawić, jako sumę prędkości średniej uzyskanej przez uśrednianie po zbiorze wszystkich zarejestrowanych cykli oraz fluktuację prędkości.

$$U(\varphi, i) = \bar{U}(\varphi) + u(\varphi, i), \quad (1)$$

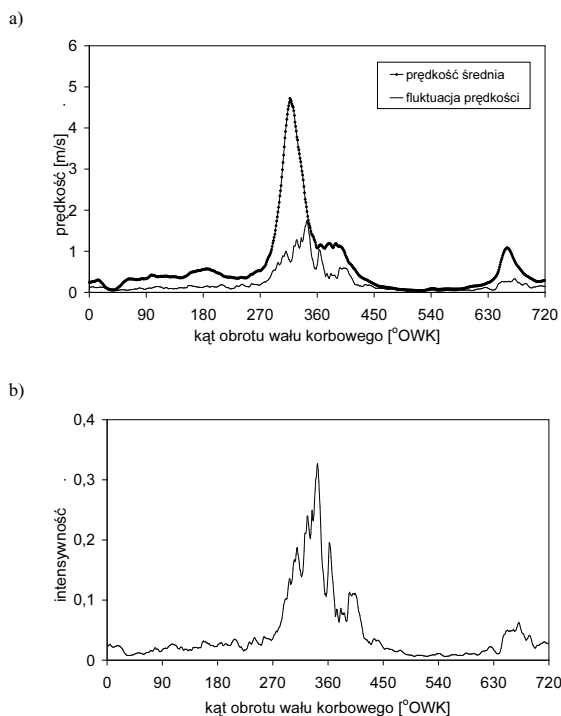
gdzie:

$$\bar{U}(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(\varphi, i). \quad (2)$$

Intensywność turbulencji dla silników tłokowych określa zależność:

$$u' = \frac{\tilde{u}_\varphi}{c_m} \quad (3)$$

Ze względu, że w komorze spalania silnika tłokowego trudno wyznaczyć dominującą prędkość średnią przepływu, dlatego jako prędkość odniesienia do wyznaczenia intensywności turbulencji przyjmuje się średnią prędkość tłoka.



Rys. 4. a) prędkość średnia z uśredniania 40 cykli, b) intensywność turbulencji  
Fig. 4. a) mean velocity obtained by averaging 40 cycles, b) turbulence intensity

Wyznaczona w ten sposób prędkość średnia osiąga maksimum dla położenia tłoka  $40^\circ$  OWK przed ZZP i osiąga wartość 4.7 m/s. Intensywność turbulencji osiąga maksimum dla kąta  $35^\circ$  OWK przed ZZP tłoka. Określona tutaj intensywność turbulencji osiąga wartość 0.33. Ten sposób określania prędkości nie uwzględnia niepowtarzalności prędkości w kolejnych cyklach pracy silnika.

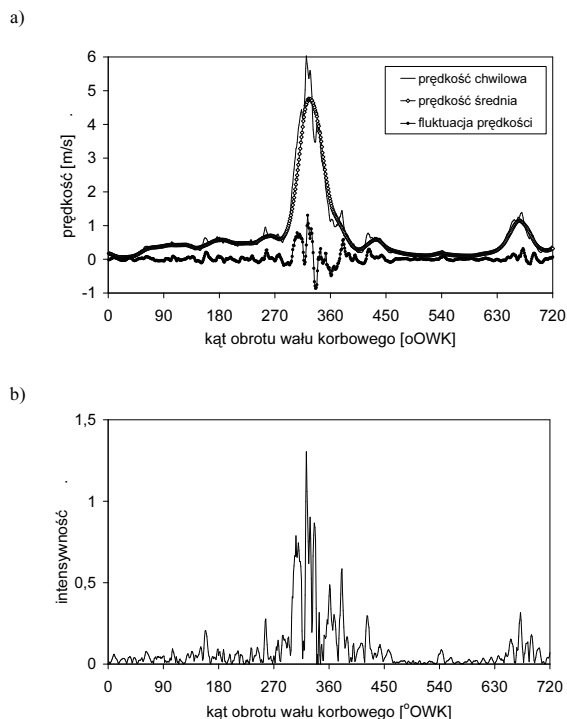
## 4.2. Analiza pojedynczych cykli

Niepowtarzalność kolejnych cykli pracy silnika skłania do analizowania pojedynczych cykli, określania turbulencji dla pojedynczego cyklu. Podejście takie stwarza jednak trudność w określeniu prędkości średniej dla pojedynczego cyklu. Prędkość chwilowa dla pojedynczego cyklu określana jest, jako niestacjonarna prędkość średnia oraz fluktuacja prędkości wokół niej.

$$U(\varphi, i) = \hat{U}(\varphi, i) + u(\varphi, i), \quad (4)$$

Prędkość średnia dla pojedynczego cyklu  $\hat{U}(\varphi, i)$  określana może być przez filtrowanie cyfrowe sygnałów.

Określone parametry pola prędkości przepływu na podstawie jednego cyklu pracy silnika dają informacje o chwilowym stanie pola prędkości przepływu. Dla silnika o średniej prędkości obrotowej 1000 obr/min cykl pracy odbywa się w ciągu 0.125 s. Wniośkowanie o charakterze procesów przepływowch w cylindrze silnika na podstawie informacji zebranych w tak krótkim czasie byłoby zbyt dalekim uogólnieniem.

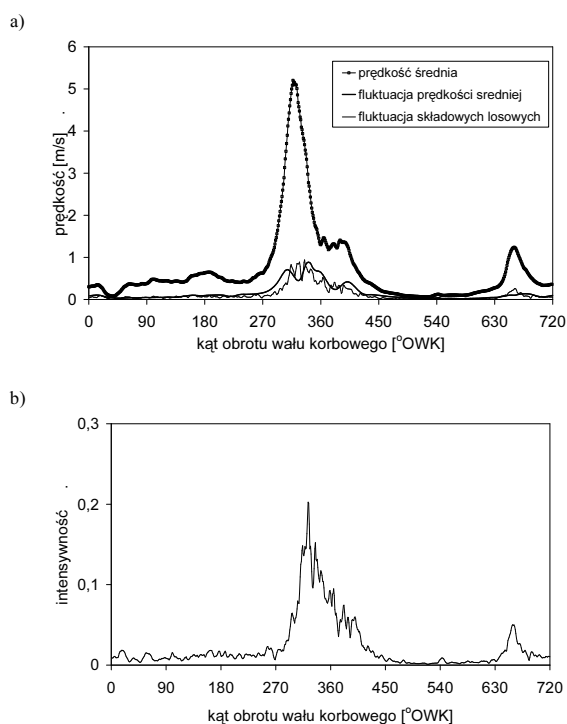


Rys. 5. a) prędkość obliczona dla pojedynczego cyklu, b) intensywność turbulencji  
Fig. 5. a) velocity calculated for single cycle, b) turbulence intensity

## 4.3. Analiza z uwzględnieniem niepowtarzalności kolejnych cykli

Prędkość chwilowa przepływu dla danego cyklu może być przedstawiona, jako suma prędkości średniej wszystkich cykli, fluktuacji prędkości średniej oraz fluktuacji losowej składowej prędkości.

$$U(\varphi, i) = \bar{U}(\varphi) + \hat{U}(\varphi, i) + u(\varphi, i), \quad (5)$$



Rys. 6. a) prędkość obliczona dla 40 cykli, b) intensywność turbulencji  
Fig. 6. a) velocity calculated for 40 cycles, b) turbulence intensity

Ten sposób interpretacji pola przepływu w komorze spalania silnika daje informacje o rzeczywistym charakterze procesów przepływowych zachodzących w komorze spalania silnika tłokowego.

## 5. Podsumowanie

Zaniedbanie niepowtarzalności prędkości przepływu ładunku w kolejnych cyklach pracy silnika powoduje zawyżenie wartości intensywności turbulencji. Przy nieuwzględnieniu niepowtarzalności prędkości w skład składowej fluktuacji prędkości wchodzi także składowa opisująca fluktuację prędkości średniej w kolejnych cyklach pracy silnika. Wydaje się, że analizowanie pola prędkości pojedynczego cyklu pracy silnika jest także celowe, ponieważ daje to wyobrażenie o zjawiskach przepływowych występujących w cylindrze bez ich uśredniania. Analiza prędkości dla wielu cykli pracy silnika daje wiarygodne wyniki przy przedstawieniu prędkości, jako sumy prędkości średniej wszystkich cykli, fluktuacji prędkości średniej oraz fluktuacji losowej składowej prędkości. Dla silnika tłokowego istotnym jest uzyskanie odpowiedniego stopnia turbulencji ładunku w chwili zapłonu, ponieważ w tym czasie następuje formowanie się jądra zapłonu, które to decyduje o dalszej propagacji płomienia w komorze spalania. O jakości jądra zapłonu decydują procesy przepływowe zachodzące bezpośrednio przed inicjacją zapłonu, dlatego badania

przepływowe prowadzi się zazwyczaj na silniach napędzanych bez doprowadzenia paliwa.

## 6. Literatura

- [1] Elsner J.W.: Turbulencja przepływów. PAN, Warszawa 1987.
- [2] Elsner J.W., Drobniak S.: Metrologia turbulencji przepływów. PAN Wrocław 1995.
- [3] Catania A.E., Mittica A.: Extraction techniques and analysis of turbulence quantities from in-cylinder velocity data. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 111, 1989.
- [4] Mirkowski J., Tutak W.: Wymiana ciepła między cienkimi, elektrycznie grzanymi drucikami a cieczą przy małych liczbach Reynoldsa. Miesięcznik Naukowo-Techniczny Pomiary Automatyka Kontrola, 5/98, str.173-176.
- [5] LCTX – Gruca M. Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Politechnika Częstochowska.
- [6] Mirkowski J.: The use of hot-wire anemometry in the studies of flows within the combustion engine cylinder. MOTOAUTU'95, Sofia 1995.

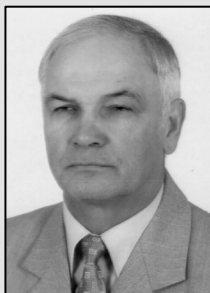
Artykuł recenzowany

## NOMINACJE PROFESORSKIE

### Michał LISOWSKI

Prezydent Rzeczypospolitej Polskiej decyzją z dnia 22 października 2007 r. nadał tytuł profesora nauk technicznych **dr. hab. inż. Michałowi Lisowskiemu**, profesorowi nadzwyczajnemu Politechniki Wrocławskiej

**Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski** urodził się 16 maja 1943 roku. W roku 1962 po ukończeniu Technikum Energetycznego we Wrocławiu rozpoczął studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Po ich ukończeniu w 1968 r. rozpoczął pracę w Instytucie Metrologii Elektrycznej na stanowisku asystenta, awansując w 1970 r. na starszego asystenta. W 1975 r. obronił rozprawę doktorską i został przeszerogowany na stanowisko adiunkta. W roku 1990 uzyskał stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie naukowej *elektrotechnika*, w zakresie *metrologii elektrycznej*. W roku 1995 r. przeniósł się do Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, gdzie nadal pracuje. W latach 1995 ÷ 2007 r. dodatkowo pracował w Oddziale Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego Instytutu Elektrotechniki we Wrocławiu, gdzie pełnił obowiązki kierownika Pracowni Pomiarów i Diagnostyki. W 1998 r. został powołany na stanowisko profesora nadzwyczajnego.



Na dorobek naukowy **prof. dr hab. inż. Michała Lisowskiego** składa się ponad 100 opublikowanych prac w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz w materiałach konferencji krajowych i zagranicznych, 2 monografie, podręcznik i skrypt oraz 7 patentów. Przed habilitacją zajmował się on pomiarami kompensacyjnymi napięcia i prądu przemiennego, precyzyjnymi rezystorami oraz aparaturą do pomiarów niskich temperatur i podatności magnetycznej nadprzewodników wysokotemperaturowych. Opracował mostki z indukcyjnymi dzielnikami napięcia do pomiaru indukcyjności wzajemnej czujników podatności magnetycznej. Z tej tematyki opublikował monografię habilitacyjną.

Po uzyskaniu stopnia doktora habilitowanego opracował, w ramach projektu badawczego, system pomiarowy do badania wła-

ściwości magnetycznych nadprzewodników wysokotemperaturowych. Później rozszerzył jego zakres pracy na badania właściwości elektrycznych tych nadprzewodników. Zajmował się również analizą przetwarzania czujników indukcyjnych do pomiarów podatności magnetycznej nadprzewodników wysokotemperaturowych. Z tej tematyki był promotorem 2 rozpraw doktorskich.

Chcąc wyeliminować problemy z kontaktami doprowadzenia prądu do nadprzewodnika wysokotemperaturowego w roku 2001 podjął prace badawcze nad nową metodą bezkontaktową pomiarów prądów krytycznych. Z tej tematyki był promotorem obronionej rozprawy doktorskiej.

Od 1995 r. zajmuje się również diagnostyką materiałów elektrotechnicznych, głównie dielektrycznych. Z tej tematyki w latach 2001 ÷ 2003 kierował projektem badawczym. W wyniku tych prac opracował wytyczne pomiarów rezystywności i przenikalności elektrycznej, które uwzględniają wpływ ładunku przestrzennego w badanej próbce i kontakt elektrod z próbką. Zaproponował istotne zmiany merytoryczne w międzynarodowych normach, dotyczących metod pomiarów rezystywności skrośnej i powierzchniowej oraz przenikalności elektrycznej. Ponadto zajmował się zagadnieniami z zakresu normalizacji, metrologii prawnej akredytacji laboratoriów badawczych i wzorujących, certyfikacji i oceny zgodności.

Po habilitacji opublikował 69 prac naukowych. Na jego dorobek w zakresie kształcenia kadry naukowej składa się promotorstwo 3 rozpraw doktorskich, 5 recenzji prac doktorskich, recenzja monografii habilitacyjnej i wykłady dla słuchaczy Studium Doktoranckiego z zakresu normalizacji, prawa technicznego, ochrony własności intelektualnej i niepewności pomiarów.

Prowadzi wykłady z podstaw metrologii, metrologii elektrycznej, systemów pomiarowo-diagnostycznych i monitorujących, czujników, prawa inżynierskiego i ochrony własności intelektualnej.