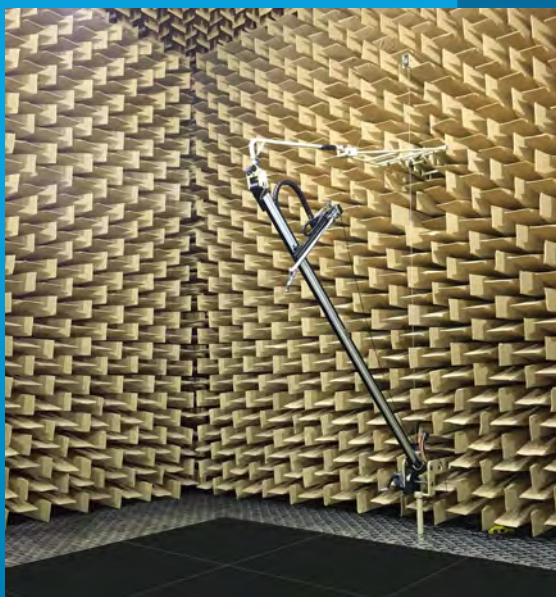


MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M90

Leszek Radziszewski

**ASPEKTY TEORETYCZNE POMIARÓW
WIBROAKUSTYCZNYCH W ZASTOSOWANIACH
PRAKTYCZNYCH**



Kielce University of Technology

Kielce 2017

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M90

Leszek Radziszewski

**ASPEKTY TEORETYCZNE POMIARÓW
WIBROAKUSTYCZNYCH W ZASTOSOWANIACH
PRAKTYCZNYCH**

Kielce 2017

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M90

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE – BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

prof. dr hab. inż. Tomasz Lech STAŃCZYK

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Wojciech BATKO

dr hab. inż. Grzegorz SZYMAŃSKI

Redakcja

Irena PRZEORSKA-IMIOŁEK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

Zdjęcie na okładce

Komora bezechowa Katedry Mechaniki i Wibroakustyki
w Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie,
autor Tadeusz Kamisiński

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2017

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana
czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakiegokolwiek sposób:
elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem
na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-01-0

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
tel./fax 41 34 24 581
e-mail: wydawca@tu.kielce.pl
www.wydawnictwo.tu.kielce.pl

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i symboli	5
Wprowadzenie	9
1. Tor pomiarowy do oceny sygnałów wibroakustycznych	13
1.1. Tor pomiarowy	13
1.2. Czujniki pomiarowe	14
1.3. Piezoelektryczne przetworniki inercyjne	18
1.4. Piezoelektryczne przetworniki siły	26
1.5. Piezoelektryczne przetworniki ciśnienia	33
1.6. Przetworniki piezoelektryczne do pomiarów emisji akustycznej	37
1.7. Mikrofony	43
1.8. Niepewność pomiarów	45
2. Analiza ciśnień spalania w cylindrze silnika o zapłonie samoczynnym oraz wtrysku paliwa	51
2.1. Analiza stanu wiedzy dotyczącej niepewności pomiarów ciśnień	51
2.2. Badania eksperymentalne ciśnień	52
2.3. Wyniki badań eksperymentalnych ciśnień	56
2.4. Statystyczna analiza wyników badań ciśnień	67
2.5. Analiza niepewności wyników pomiarów ciśnień	75
2.6. Deskryptory ciśnienia w cylindrze silnika	80
2.7. Modelowanie zmian ciśnienia	99
2.8. Modelowanie rozpoznawania gatunku paliwa	109
3. Monitorowanie hałasu komunikacyjnego	115
3.1. Stacje monitorujące hałas komunikacyjny w Kielcach	115
3.2. Analiza stanu wiedzy dotyczącej niepewności pomiarów hałasu komunikacyjnego	118
3.3. Wyniki pomiarów poziomu dźwięku w roku 2013	120
3.4. Wyniki pomiarów poziomu dźwięku w roku 2014	141
3.5. Wyniki pomiarów poziomu dźwięku w roku 2015	151
3.6. Analiza wyników pomiarów równoważnego poziomu dźwięku	160
4. Podsumowanie	171
Literatura	173
Streszczenie	183
Summary	184

Literatura

- [1] Acoustic Emission Sensors, Katalog czujników firmy Vallen Systeme GmbH, 2012.
- [2] Adamczak St., Bochnia J., Kaczmarska B., Estimating the uncertainty of tensile strength measurement for a photo cured material produced by additive manufacturing, *Metrology and Measurement Systems*, 21, 3, pp. 553-560, 2014 ISSN: 0860-8229.
- [3] Adrianowicz A., Sobociński R., Niepowtarzalność kolejnych obiegów pracy silnika ZI, *Technika Motoryzacyjna* 1979/7.
- [4] Ambrozik A., Podstawy teorii tłokowych silników spalinowych, Politechnika Warszawska, Warszawa 2012.
- [5] Ambrozik A., Glued Functions-Based Assessment of Interpolation Accuracy of Self-Ignition Engine Real Indicator Diagram, *Solid State Phenomena*, 2012, 180: 261-268.
- [6] Amsden A.A.: KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves. Los Alamos National Laboratory, LA-13313-MS, 1997.
- [7] Arczewski K., Pietrucha J., Szuster J., Drgania układów fizycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008, ISBN 978-83-7814-246-1.
- [8] Arendarski J., Niepewność pomiarów, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [9] Batko W., Bal-Pyrz R., Analysis of stochastic acoustical hazards in environment, *Archives of Acoustics*, Vol. 32, No. 4 (Supplement), pp. 235-245 (2007).
- [10] Batko W., Bal R., Verification of the Calculation Assumptions Applied to Solutions of the Acoustic Measurements Uncertainty, *Archives of Acoustics*, Vol. 39, No. 2, pp. 199-202 (2014), DOI: 10.2478/aoa-2014-0024.
- [11] Batko W., Pawlik P., New Approach to the Uncertainty Assessment of Acoustic Effects in the Environment, *Archives of Acoustics*, Vol. 37, No. 1, pp. 57-61 (2012), DOI: 10.2478/v10168-012-0008-5.
- [12] Batko W., Stępień B., Type A Standard Uncertainty of Long-Term Noise Indicators, *Archives of Acoustics*, Vol. 39, No. 1, pp. 25-36 (2014), DOI: 10.2478/aoa-2014-000.
- [13] Batko W., Ziółko M., Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej, *Problemy inżynierii mechanicznej i robotyki*, Monografie, Kraków 2002.

- [14] Batko W., Bal R., Uncertainty analysis in the assessment of long-term noise indicators, *Archives of Acoustics*, Vol. 31, No. 4 (Supplement), 2006, pp. 253-260.
- [15] Bąkowski A., Ciosmak J., Dziubek T., Grzybek D., Holewa K., Izworski A., Nawrocka A., Radziszewski L., Turek P., Wszółek W., Wybrane zagadnienia analizy sygnałów, modelowania i sterowania w inżynierii mechanicznej i biomedycznej, *Monografie Katedry Automatyzacji Procesów AGH w Krakowie*, Kraków 2014.
- [16] Bąkowski A., Radziszewski L., A statistical analysis of pressure signals for an internal combustion engine, *Problems of maintenance of sustainable technological systems* eds. Liscak St., Niewczas A., vol. IV Automotive engineering and vehicle safety engineering, *Kielce University of Technology*, Kielce 2012, pp. 5-22.
- [17] Bąkowski A., Radziszewski L., Evaluation of the Uncertainty of Selected Parameters that Characterise Diesel Engine Work, *App. Mechanics and Materials*, Vol. 712, 2015, pp. 69-74.
- [18] Bąkowski A., Radziszewski L., Determining selected diesel engine combustion descriptors based on the analysis of the coefficient of variation of in-chamber pressure *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 63, No. 2, 2015, pp. 457-464.
- [19] Bąkowski A., Radziszewski L., Analiza wybranych deskryptorów sygnałów z silnika spalinowego z wykorzystaniem programu R, *Politechnika Świętokrzyska*, Kielce 2015, str. 151, ISBN 978-83-63792-34-3.
- [20] Bąkowski A., Ciosmak J., Izworski A., Orzechowski T., Radziszewski L., Skrobacz Z., Suliga P., Wydrych J., Zach P., Wybrane zagadnienia z analizy sygnałów, *Monografie Katedry Automatyzacji Procesów AGH w Krakowie*, Kraków 2016, ISBN: 978-83-64755-22-4.
- [21] Bąkowski A., Radziszewski L., Żmindak M., Analysis of Selected Pressure Signal Descriptors Used to Control Combustion Engine, *Solid State Phenomena* Vol. 248 (2016), pp. 211-216, doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.248.211 ISSN: 1662-9779, ISSN 1012-0394.
- [22] Bąkowski A., Radziszewski L., Żmindak M., Determining the polytrophic exponent of the process occurring during the working cycle of a diesel, *Procedia Engineering* 136 (2016) 220-226, doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.201, ISSN 1877-7058.
- [23] Beham M., Yu D.L., Modelling a variable valve timing spark ignition engine using different neural networks. *Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering*, 218(D10), 2004, pp. 1159-1171.
- [24] Bendat J.S., and Piersol A.G., *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.

- [25] Berlinsky Y. i In., A calibration approach to acoustic emission energy measurement, *J. of NDT*, vol. 10, no 1, 1991, pp. 1-5.
- [26] Bodisco T., Brown R.J., Inter-cycle variability of in-cylinder pressure parameters in an ethanol fumigated common rail diesel engine, *Energy* 52, 2013, pp. 55-65.
- [27] Bohatkiewicz J., Adamaszek P., Biernacki S., *Mapy akustyczne miasta Kielce – aktualizacja 2013*, Ekkom Sp. z o.o., Kraków 2013.
- [28] Brzoska Zb., *Wytrzymałość materiałów*, PWN, Warszawa 1983.
- [29] Cempel Cz., *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989.
- [30] Cervena O., Hora P., Analysis of the conical piezoelectric acoustic emission transducer, *Applied and Computational Mechanics* 2 (2008), pp. 13-24.
- [31] Chłopek Z., Piaseczny L., *Badania procesów szybkozmiennych zachodzących w silniku spalinowym*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 157, Gdynia 2004.
- [32] Chłopek Z., Piaseczny L., *Badania statystycznych właściwości silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 156, Gdynia 2004.
- [33] Chłopek Z., Stasiak P., *Analiza niepewtarzalności sygnału ciśnienia indykowanego silnika spalinowego*, *Silniki Spalinowe* Nr 1/2005.
- [34] Cichy M., *Silniki o działaniu cyklicznym: podstawy teorii i działania*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1989.
- [35] Cordon O., et al., *Genetic fuzzy systems*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2001.
- [36] Crawford F., Fale, PWN, Warszawa 1975.
- [37] Cupiał K., Katolik G., *Modelowanie niepewtarzalności ciśnienia indykowanego w poszczególnych cylindrach silnika gazowego*, *KONES*, Vol. 13, No. 4.
- [38] Ćwik J., Koronacki J., *Statystyczne systemy uczące się*, WNT, Warszawa 2005.
- [39] Decker M. et al., *Controlling a Diesel Engine with Engine Management Based on Structure-Borne Sound*, XX IMEKO World Congress, Republic of Korea 2012.
- [40] Derlecki St., *Metrologia elektryczna i elektroniczna*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010, ISBN 978-83-7283-370-9.
- [41] Dobosz M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001, ISBN 83-87674-29-X.
- [42] Dobrucki A., *Przetworniki elektroakustyczne*, WNT, Warszawa 2007, ISBN 978-83-204-3214-5.
- [43] Dwornicka R., Ferdek U., Kekez M., Kot A., Nawrocka A., Ozga A., Radziszewski L., Romaszko M., Stojek J., *Modelowanie układów dynamicznych*. Katedra Automatyzacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, 2014.

- [44] Eargle J., *The microphone book*, Oxford 2005, wydanie II, ISBN 02405 1961 2.
- [45] Eitzen D., Wadley H., *Acoustic emission: establishing the Fundamentals*, Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol. 89, no 1, 1984.
- [46] Elghamry, M.H., et al., *Gaseous fuel quality identification for a spark ignition gas engine using Acoustic Emission analysis*, Comadem Proceedings, 1998, pp. 235-244.
- [47] Engel Z., Zawieska W., *Hałas i drgania w procesach pracy: źródła, ocena, zagrożenia*, CIOP-PIB, Warszawa 2010, ISBN 978-83-7373-087-8.
- [48] Evans M., *The use of diffuse field measurements for acoustic emission*, PhD thesis, Imperial College of Science Technology and Medicine, University London 1997.
- [49] Finkelstein L., *Teoria i filozofia pomiaru [w:] Podręcznik metrologii, Podstawy teoretyczne*, red. Sydenham P.H., WKŁ, Warszawa 1988, ISBN 83-206-0681-0.
- [50] Flekiewicz M., Flekiewicz B., Fabiś P., *Engine block vibration level as a tool for fuel recognition*. SAE Technical Paper, 2007.
- [51] Forma M., *Analiza sprawności ogólnej i parametrów ekologicznych silnika dwusuwowego ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa*, Politechnika Krakowska, praca doktorska, Kraków 2011.
- [52] Fraidl G.K., Herzog PL., *Wielostronne korzyści rozwoju technologii hybrydowych silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym*, Silniki Spalinowe, 2007, 46:3-19.
- [53] Gajda J., Szyper M., *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH, Kraków 1998, ISBN 83-909010-5-1.
- [54] Gautschi G., *Piezoelectric sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, ISBN 978-3-642-07600-8, DOI 10.1007/978-3-662-04732-3.
- [55] Guzzella L., Onder Ch., *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*, 2010.
- [56] Hardenberg H.O., Hase F.W., *An empirical formula for computing the pressure rise and delay of a fuel from its cetane number and from the relevant parameters of direct-injection diesel engines*, SAE Technical Paper, 1979.
- [57] Hawryluk B., *Stochastyczny model samochodowego silnika benzynowego w aspekcie stechiometrycznego składu mieszanki paliwowo-powietrznej*, praca doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2001.
- [58] Heywood J.B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York 1988.

- [59] Hiroyasu H., Arai M., Structure of fuel sprays in diesel engines, SAE Paper 900475, 1990.
- [60] Idzior M., Studium optymalizacji parametrów rozpylaczy silników o zapłonie samoczynnym w aspekcie kształtowania ich właściwości użytkowych, Rozprawy Nr 384 Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
- [61] Isermann R., Müller N., Design of computer controlled combustion engines. Mechatronics, 2003, 13.10: 1067-1089.
- [62] ISO 16063, Methods for the calibration of vibration and shock transducers.
- [63] ISO 1996-2:2007 Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels.
- [64] ISO 9612 (2009), Acoustics – Determination of occupational noise exposure – Engineering method.
- [65] ISO/TR 13115:2011(en) Non-destructive testing – Methods for absolute calibration of acoustic emission transducers by the reciprocity technique.
- [66] Jagniatinskis A., Fiks B., Zaporozhets O., Annual Assessment of Transport Noise Using Representative Time Measurements, Procedia Engineering 134 (2016), pp. 301-308.
- [67] Jiang X., Kim K., Zhang S., Joseph Johnson J., Salazar G., High-Temperature Piezoelectric Sensing, Sensors 2014, 14, 144-169; doi:10.3390/s140100144.
- [68] Johnson G., et al., How to deal with fuel found in theater: avl cypress – cylinder pressure based combustion control for consistent performance with varying fuel properties. Proc. of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, Michigan USA, 2012.
- [69] Katalogi firmowe:
- AVL, Piezoelectric pressure transducers for engine test instrumentation, AVL LIST GmbH, Graz, Austria.
 - Brüel & Kjær Condenser microphones and microphones preamplifiers for acoustics measurements, Data handbook 1982.
 - PCB Piezotronic, Microphon handbook.
- [70] Kalogirou S.A., Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. Progress in Energy and Combustion Science, 29, 2003, pp. 515-566.
- [71] Kekez M., Radziszewski L., A genetic-fuzzy system for modelling of selected processes in diesel engine fuelled by biofuels, Biofuel production-Recent developments and prospects, ed. by Marco Aurelio dos Santos Bernardes, pp. 561-576, Croatia 2011 INTECH, ISBN-978-953-307-478-8.
- [72] Kekez M., Radziszewski L., Genetic-fuzzy model of diesel engine working cycle, Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 58, No. 4/2010, p. 665, ISSN 0239-7528, DOI: 10.2478/v10175-010-0071.

- [73] Kekez M., Radziszewski L., Modelling of pressure in the injection pipe of a diesel engine by computational intelligence, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 0954407011411388, Vol.225, 12/2011, pp. 1660-1670, ISSN: 0954-4070 doi:10.1177/0954407011411388.
- [74] Kekez M., Radziszewski L., Sieci neuronowe i system genetyczno-rozmyty w modelowaniu ciśnienia w przewodzie wtryskowym silnika o zapłonie samoczynnym, *Postępy automatyki i robotyki*, cz. 1, Komitet Automatyki i Robotyki PAN, monografie tom 16, s. 344-354, Politechnika Świętokrzyska 2011, ISBN 978-83-88906-49-7.
- [75] Kekez M., Radziszewski L., Sapietova A., Fuel type recognition by classifiers developed with computational intelligence methods using combustion pressure data and the crankshaft angle at which heat release reaches its maximum, *Procedia Engineering* 136 (2016), pp. 353-358.
- [76] Kleczkowski P., *Percepcja dźwięku*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2013, ISBN 978-83-7464-586-7.
- [77] Kłos Z., *Pomiary elektrometryczne*, WKŁ, Warszawa 2008, ISBN 978-83-206-1686-6.
- [78] Królikowski J., Witczak Z., *Wzorcowe źródła emisji akustycznej [w:] Emisja akustyczna: źródła, metody zastosowania*, red. Malecki I., Ranachowski J., Warszawa 1994, ISBN 83-901945-0-3.
- [79] Kurczyński D., *Wpływ paliw roślinnych i ich mieszanin z olejem napędowym na wskaźniki pracy silnika o zapłonie samoczynnym*, praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2007.
- [80] Kwaśniewski J., *Wprowadzenie do inteligentnych przetworników pomiarowych*, WNT, Warszawa 1993.
- [81] Landau L., Lifszyc J., *Fizyka statystyczna*, PWN, Warszawa 2011, ISBN 978-83-01-16781-3.
- [82] Longwic R., *Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych*, Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
- [83] Longwic R., *Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania*, Politechnika Lubelska 2011, ISBN 978-83-62596-26-3.
- [84] Lotko W., *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami węglowodorowymi i roślinnymi*, WNT, Warszawa 1997.
- [85] Lotko W., *Studium zastosowań paliw alternatywnych w silnikach o zapłonie samoczynnym*, Politechnika Radomska Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, Radom 2000.

- [86] Luja'n J.M. et. al., A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal, *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, pp. 2261-2275 (2010).
- [87] Łagowski P., *Metodyka wyznaczania i ocena wielkości diagnostycznych wykresu indykatorowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*, praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010.
- [88] Madej H., *Metody przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w diagnozowaniu silników spalinowych*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 2010, seria Transport, z. 69.
- [89] Malecki I., Opilski A., *Charakterystyka i klasyfikacja sygnałów EA [w:] Emisja akustyczna: źródła, metody zastosowania*, red. Malecki I., Ranachowski J., Warszawa 1994, ISBN 83-901945-0-3.
- [90] Makarewicz R., *Dźwięk w środowisku*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1994.
- [91] Manthei G., *Characterisation of Acoustic Emission Sensors*, EWGAE 2010 Wiedeń.
- [92] Maurya R.K., et al., Digital signal processing of cylinder pressure data for combustion diagnostics of HCCI engine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36: pp. 95-109.
- [93] Maurya R.K., Agarwal A.K., Investigations on the effect of measurement errors on estimated combustion and performance parameters in HCCI combustion engine, *Measurement* 46 (2013), pp. 80-88.
- [94] Maurya R.K., Agarwal A.K., Statistical analysis of the cyclic variations of heat release parameters in HCCI combustion of methanol and gasoline, *Applied Energy* 89, pp. 228-236 (2012).
- [95] McConnell K., Varoto P., *Vibration Testing: Theory and Practice*, 2008 John Wiley&Sons, ISBN 978-0-471-66651-6.
- [96] Merkisz J., Pielecha J., *Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2014.
- [97] *Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii – GUM 1996*, ISBN 83-906546-0-1.
- [98] Miłek M., *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego 2006, ISBN 83-7481-023-8.
- [99] Mohammad-H., Tayarani-N. and Xin Yao and Hongming Xu, Meta-heuristic Algorithms in Car Engine Design: a Literature Survey *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, Evolutionary Computation, *IEEE Transactions on* (Vol.:19, Issue: 5, pp. 609-629) ISSN: 1089-778X, DOI:10.1109/TEVC.2014.2355174:05 10 2014.

- [100] Monnier T., Dia S., Godin N., Zhang F., Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors by the Method of Reciprocity, Theoretical and Experimental Considerations, *Journal of Acoustic Emission*, 2012, 30, pp. 152-166.
- [101] Nawojczyk M., *Przewodnik po statystyce dla socjologów*, SPSS Polska, Kraków 2002.
- [102] Niewczas A., *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*, WNT, Warszawa 1998.
- [103] Niewczas A., Koszałka G., *Niezawodność silników spalinowych – wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
- [104] Nowakowski J., *Model cyklu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym i jego zastosowanie do doboru parametrów regulacyjnych*, Rozprawy naukowe ATH Nr 15, Bielsko-Biała 2005.
- [105] Nowicki A., *Ultradźwięki w medycynie*, Warszawa 2010.
- [106] Osiecki J., Ziemia S., *Podstawy pomiarów drgań mechanicznych*, PWN, Warszawa 1968.
- [107] Ozimek E., *Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, WNT, Warszawa 2002.
- [108] QUINLAN, Ross. Data mining tools See5 and C5.0. 2012. Available from: <http://www.rulequest.com/see5-info.html>.
- [109] Pha P.X., Bodisco T.A., Ristovski Z.D., Brown R.J., Masri A.R., The influence of fatty acid methyl ester profiles on inter-cycle variability in a heavy duty compression ignition engine, *Fuel* 116 (2014), pp. 140-150.
- [110] Piotrowski J., *Pomiary, czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, WNT, Warszawa 2012, ISBN 978-83-63623-4.
- [111] PKN ISO/IEC Guide 99:2007, Warszawa 2010.
- [112] PN-EN ISO 9612, *Akustyka: Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas, metoda techniczna*, Warszawa 2011, ISBN 978-83-266-8002-1.
- [113] Polanowski S., *Studium metod analizy wykresów indykatorowych w aspekcie diagnostyki silników okrętowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej nr 169, Gdynia 2007.
- [114] Program produkcji wersja 8.0 ZEPWN Marki.
- [115] *Przewodnik, Wyrażanie niepewności pomiaru*. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.
- [116] Przysucha B., Batko W., Szelać A., Analysis of the Accuracy of Uncertainty Noise Measurement, *Archives of Acoustics* Vol. 40, No. 2, pp. 183-189 (2015), DOI: 10.1515/aoa-2015-0020.

- [117] Radziszewski L., Analiza współoddziaływania fali mechanicznej silnej nieciągłości z czujnikiem piezoelektrycznym, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej – monografie, studia, rozprawy nr 37, Kielce 2003.
- [118] Radziszewski L., O kalibracji przetworników do emisji akustycznej, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 54, 1995 Kielce, s. 111-122.
- [119] Radziszewski L., Kaski sportowe: metody badania i oceny właściwości ochronnych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2016, ISSN 0239-6386.
- [120] Radziszewski L., Kekez M., Application of a genetic-fuzzy system to diesel engine pressure modeling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(1-4), 2010, pp. 1-9, DOI 10.1007/s00170-009-2080-1.
- [121] Redel-Macias M.D., et al., Noise prediction of a diesel engine fueled with olive pomace oil methyl ester blended with diesel fuel”, Fuel 98, pp. 280-287 (2012).
- [122] Różycki A., Identification method of knock combustion In two fuel combustion ignition engine, KONES 2008, vol. 15, No 4.
- [123] Rychter T., Teodorczyk A., Teoria silników tłokowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [124] Schiefer M., Bono R., Sill R., Improved low frequency accelerometer calibration, Proceedings of the IMAC-XXVII, Orlando, 2009 Society for Experimental Mechanics Inc.
- [125] Scruby C., Drain L., Laser ultrasonics, Adam Hilger, Bristol 1990.
- [126] Skubis T., Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004, ISBN 83-7335-242-2.
- [127] Sobczyk M., Statystyka aspekty praktyczne i teoretyczne, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2006.
- [128] Stelmasiak Z., Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2003.
- [129] Szymański G., Tomaszewski F., Diagnostics of automatic compensators of valve clearance in combustion engine with the use of vibration signal, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 68-69, 2016, pp. 479-490.
- [130] TEIXEIRA, L.S.G., et al., Multivariate calibration in Fourier transform infrared spectrometry as a tool to detect adulterations in Brazilian gasoline. Fuel, 2008, 87: 346-352.
- [131] Tumański Sł., Technika pomiarowa, WNT, Warszawa 2013, ISBN 978-83-63623-76-0.
- [132] Valencia, F., et al., Ignition quality of residual fuel oils. Journal of maritime research: JMR, 2005, 2.3: 77-96.

- [133] Valentini G., Masull F., Ensembles of learning machines [in:] Neural Nets. Springer Berlin Heidelberg, 2002, p. 3-20.
- [134] Wang W., et al., Fuzzy ignition timing control for a spark ignition engine. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 214(D3), 2000, pp. 297-306.
- [135] Wiciak J., Wybrane zagadnienia redukcji drgań i dźwięków strukturalnych, AGH, Kraków 2008.
- [136] Willems, F., et al., Cylinder pressure-based control in heavy-duty EGR diesel engines using a virtual heat release and emission sensor. SAE Paper, 2010.
- [137] Wisłocki K., Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [138] Wołek M., Metrologia przemysłowa: zagadnienia wybrane, wyd. 3, Uniwersytet Śląski, Katowice 1979, ISBN 83-906546-0-1.
- [139] Wong P.K., et al., Engine idle-speed system modelling and control optimization using artificial intelligence. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 224(1), 2010, pp. 55-72.
- [140] Wszolek T., Kłaczyński M., Effect of traffic noise statistical distribution on $L_{\text{aeq,T}}$ measurement uncertainty, Archives of Acoustics 31, 4 (Supplement), pp. 311-318 (2006).
- [141] Yoon M, et al., A method for combustion phasing control using cylinder pressure measurement in a CRDI diesel engine. Mechatronics, 2007, 17.9: 469-479.
- [142] Zakrzewski J., Kampik M., Sensory i przetworniki pomiarowe, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013, ISBN 978-83-7880-052-1.
- [143] Zimmermann R., Pomiary naprężeń i drgań metodami elektrycznymi, PWT Warszawa 1959.

Streszczenie

ASPEKTY TEORETYCZNE POMIARÓW WIBROAKUSTYCZNYCH W ZASTOSOWANIACH PRAKTYCZNYCH

Zagadnieniem badawczym rozważanym w pracy jest analiza niepewności pomiarów zaburzeń akustycznych przetwornikami piezoelektrycznymi lub mikrofonami. Przystawione zostały zasady budowy przetworników zawierających czujniki piezoelektryczne służące do pomiarów drgań, siły, ciśnienia oraz emisji akustycznej, jak również analiza ich modeli mechanicznych. Omówiono też budowę mikrofonów do pomiarów ciśnienia akustycznego oraz zasady wyznaczania niepewności standardowej pomiarów metodą typu *A* oraz *B*.

Obiektem badań jest silnik o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim – Perkins AD3.152 UR. Silnik w czasie badań pracował w warunkach stacjonarnych i zasilany był paliwem mineralnym oraz biopaliwami. Przeprowadzono analizę statystyczną wyników pomiarów wybranych deskryptorów ciśnienia w cylindrze oraz ciśnienia w przewodach wtryskowych tego silnika. Wykazano, że w określonych warunkach pracy silnika istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów otrzymanych wyników z rozkładem normalnym. Wyznaczono niepewność standardową analizowanych deskryptorów. Zaproponowano wykorzystanie współczynnika zmienności odchylenia standardowego ciśnienia do analizy pracy silnika. Uzyskane wartości niepewności pomiarów tego współczynnika potwierdziły możliwość stosowania go w celach diagnostycznych oraz do sterowania pracą silnika. Zbudowano modele genetyczno-rozmyte GFSm zmian ciśnienia w cylindrze oraz ciśnienia wtrysku w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Przeprowadzono analizę możliwości rozpoznawania gatunku paliwa wtryskiwanego do cylindra, wykorzystując w tym celu deskryptory sygnału ciśnienia.

Analizie statystycznej poddano też wyniki pomiarów hałasu komunikacyjnego drogowego, rejestrowanego przez dwie stacje monitorujące w Kielcach, w latach 2013-2015, w zależności od dnia tygodnia i pory doby, tj. z podziałem na: doby, noce, dni oraz wieczory. Wskazano na różnice między wynikami równoważnego poziomu dźwięku wyznaczanego przez każdą z tych stacji. Analizując wartości median równoważnego poziomu dźwięku oraz uwzględniając niepewność pomiaru dla wyszczególnionych pór doby, zauważono, niezależnie od stacji pomiarowej, następujące różnice: między porą dzień-noce – około 6 dB, między porą dzień-wieczory – około 2 dB, między porą wieczory-noce – około 4 dB. Porównując wyniki pomiarów zarejestrowane przez te dwie stacje, zauważono, oprócz różnic między wartościami median, różnice między wartościami niepewności pomiarów. Analizując rozkłady statystyczne zarejestrowanego równoważnego poziomu dźwięku w latach 2013-2015 dla całej doby wykazano, że istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności otrzymanych wyników z rozkładem normalnym. Wykazano też, iż dla niektórych dni tygodnia i określonej pory podstaw takich nie ma.

S u m m a r y

THEORETICAL ASPECTS OF VIBROACOUSTIC MEASUREMENTS IN PRACTICAL APPLICATIONS

The issue under consideration in this publication is the analysis of the uncertainty that exists in measurements of acoustic disturbances performed with piezoelectric transducers or microphones. In addition to the design of converters based on piezoelectric sensors for measuring vibrations, force, pressure and acoustic emission and to the analysis of their mechanical models, the readers are provided with the design of microphones for measuring acoustic pressure. Type *A* and Type *B* evaluations of standard uncertainty are explained and discussed.

The studies were focused on Perkins AD3.152 UR diesel engine operating under stationary conditions and powered with mineral fuels and biofuels. The results of the measurements of selected descriptors of the pressure in the cylinder and injection pipes were subjected to statistical analysis. It was demonstrated that under certain conditions of operation, there was sufficient evidence to reject the null hypothesis that the distribution of the results obtained was normal. Standard uncertainty of the descriptors under analysis was determined. The authors proposed to use the coefficient of variation of pressure in the analysis of engine operation. The measurement uncertainties obtained for this coefficient confirmed its suitability for diagnostic purposes and for engine work control. The genetic fuzzy approach was used to construct the models of changes in the in-cylinder pressure and in the injection pressure as a function of crank angle. Pressure signal descriptors were used to analyse possible fuel type recognition options for the fuel injected into the cylinder.

Statistical analysis was also used for the measurement results of road traffic noise recorded by two noise monitoring stations in Kielce between 2013 and 2015, split into 24h periods, nights, days and evenings. The differences between the equivalent sound levels registered by each station were indicated. Analysis of the equivalent sound level median, taking into account measurement uncertainty for the times of the 24h interval, showed the following differences independent of the monitoring station: about 6 dB between daytime and nighttime, about 2 dB between daytime and evenings, and about 4 dB between evenings and nighttime. The comparison of data recorded by both stations revealed different values of measurement uncertainties in addition to the differences between the medians. Analysis of statistical distributions of the recorded equivalent sound levels in the period 2013 to 2015 for the 24h interval indicated sufficient evidence to reject the null hypothesis that the distribution of the results obtained was normal. There were no grounds to reject it for some of the days of the week and times of the 24h intervals.