

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M112

Sebastian Różowicz

**MODELOWANIE
WYBRANYCH ZJAWISK FIZYCZNYCH
WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADZIE ZAPŁONOWYM
SILNIKÓW SPALINOWYCH
O ZAPŁONIE ISKROWYM**



Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M112

Sebastian Różowicz

**MODELOWANIE
WYBRANYCH ZJAWISK FIZYCZNYCH
WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADZIE ZAPŁONOWYM
SILNIKÓW SPALINOWYCH
O ZAPŁONIE ISKROWYM**

Kielce 2019

MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M112

Redaktor Naukowy serii

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA

dr hab. inż. Jerzy AUGUSTYN, prof. PŚk

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Marian SOIŃSKI

dr hab. inż. Dionizy SANIAWA, prof. UTH w Radomiu

Redakcja

Irena PRZEORSKA-IMIOŁEK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek 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 978-83-65719-54-6

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

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
1. WPROWADZENIE	7
2. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE UKŁADU ZAPŁONOWEGO	18
2.1. Układy zapłonowe z rozdzielaczem zapłonu	18
2.2. Bezrozdzielaczowe układy zapłonowe	23
2.3. Mikroprocesorowe układy zapłonowe	27
3. ZJAWISKA FIZYCZNE WYSTĘPUJĄCE W UKŁADACH ZAPŁONOWYCH	29
3.1. Przerwa prądu w cewce zapłonowej – prawa komutacji	30
3.2. Transformacja impulsu ze strony pierwotnej na wtórną. Sprężenie magnetyczne	32
3.3. Sprężenie magnetyczne w ujęciu pochodnych ułamkowego rzędu	35
3.4. Przewodzenie impulsu wysokiego napięcia	39
3.5. Wyładowanie łukowe na świecy	41
4. MODELOWANIE ZJAWISK FIZYCZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADACH ZAPŁONOWYCH	43
4.1. Zastosowanie pochodnej ułamkowego rzędu do analizy pracy cewki zapłonowej	44
4.2. Zastosowanie pochodnej ułamkowego rzędu do modelowania sprężenia magnetycznego	45
4.3. Przewodzenie impulsu wysokiego napięcia przewodami wysokiego napięcia	49
5. BADANIA LABORATORYJNE UKŁADU ZAPŁONOWEGO	53
5.1. Stanowisko badawcze układów zapłonowych	53
5.2. Laboratoryjne stanowisko badawcze	55
5.3. Badania wyładowania iskrowego na stanowisku eksperymentalnym	56
5.3.1. Badania wpływu prędkości obrotowej silnika na parametry wyładowania iskrowego w układzie zapłonowym z cewką CZ601	57
5.3.2. Badania wpływu prędkości obrotowej silnika na parametry wyładowania iskrowego w układzie zapłonowym z cewką ZS324	59
5.3.3. Badania wpływu szczeliny międzyelektrodowej świecy na parametry wyładowania iskrowego w układzie zapłonowym z cewką CZ601	61
5.3.4. Badania wpływu czasu ładowania cewki zapłonowej na parametry wyładowania iskrowego w układzie zapłonowym z cewką CZ601	63

5.3.5. Badania wpływu czasu ładowania cewki zapłonowej na parametry wyładowania iskrowego w układzie zapłonowym z cewką ZS324	65
5.3.6. Badania wpływu szczeliny na świecy na parametry wyładowania iskrowego w układzie zapłonowym z cewką ZS324	67
5.4. Rezystancja świec zapłonowych	69
6. MODELOWANIE UKŁADU ZAPŁONOWEGO	75
6.1. Model matematyczny układu zapłonowego z rozdzielaczem	77
6.2. Model matematyczny bezrozdzielaczowego układu zapłonowego	78
6.2.1. Model matematyczny z zastosowaniem metody operatorowej	82
6.2.2. Model matematyczny z zastosowaniem metody zmiennych stanu	87
6.2.3. Model układu zapłonowego jako czwórnik	92
7. OCENA WPŁYWU PARAMETRÓW UKŁADU ZAPŁONOWEGO NA WARTOŚĆ NAPIĘCIA NA ŚWIECY	96
7.1. Ocena wrażliwości dla układu czwórników	96
7.2. Przyrostowa ocena wrażliwości w metodzie zmiennych stanu	103
8. BADANIA SYMULACYJNE	104
9. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA MODELU	111
Podsumowanie	113
Bibliografia	116
Streszczenie	129
Summary	131

- [1] Abd Alla G.H.: Computer simulation of a four stroke spark ignition engine, *Energy conversion and Management*, vol. 43, no. 8, pp. 1043-1061, 2002.
- [2] Abraham J., Magi V.: GMV, General Mesh Viewer, Los Alamos National Laboratory LA-UR-95-2986, Los Alamos 1995, USA.
- [3] Achleitner E., Berger S., Frenzel H., Klepatsch M., Warnecke V.: Benzin Direkteinspritzsystem mit Piezo-Injektor für strahlgeführte Brennverfahren”, *MTZ* 65 (2004), Nr 5, Niemcy.
- [4] Aguilar Gomez J.F., Bernal J., Rosales L., Cordova T.: Modeling and simulation of Equivalent Circuits in Description of Biological Systems - A Fractional Calculus Approach. *Journal of Electrical Bioimpedance*, vol. 3, 2012, pp. 2-11. Doi: 10.5617/jeb.225.
- [5] Ambrozik A., Ambrozik T., Łagowski P.: Ocena funkcji sklepanych aproksymujących rzeczywisty wykres indykatorowy silnika o zapłonie samoczynnym, zasilanego różnymi paliwami, *Journal of KONES Powertrain and Transport* Vol. 15, No. 3, Warszawa 2008.
- [6] Andrianov D., Manzie C. and Brear M.: Spark ignition engine control strategies for minimising cold start fuel consumption under cumulative tailpipe emissions constraints. *Control Engineering Practice*, 21(8), 2013, pp. 1007-1019.
- [7] Aslam M.S., Raja M.A.Z.: A new adaptive strategy to improve online secondary path modeling in active noise control systems using fractional signal processing approach. *Signal Processing*, Volume 107, February 2015, pp. 433-443.
- [8] Baranowski J., Bauer W., Zagórowska M., Dziwiński T., Piątek P.: Time-domain Oustaloup approximation, Conference Paper, August 2015, Doi: 10.1109/MMAR.2015.7283857 Conference, Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2015 20th International Conference on Międzyzdroje Poland.
- [9] Barua S., Thulasiram R.K., and Thulasiraman P.: High performance computing for a financial application using Fast Fourier Transform, *Euro-Par 2005 Parallel Processing* vol. 24, 2005, pp. 1246-1253.
- [10] Basshuysen R., Schaefer F.: *Internal Combustion Engine. Handbook. Basics, Components, Systems and Perspectives*, SAE International, Warrendale 2004, USA.
- [11] Basshuysen R.: *Gasoline Engine with Direct Injection*, Vieveg & Teubner Verlag, Wiesbaden 2009, Niemcy.
- [12] Basshuysen R.: *Ottomotor mit Direkteinspritzung. Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial*, Vieveg & Teubner Verlag, Wiesbaden 2008, Niemcy.
- [13] Bauer H.: *Gasoline Fuel Injection System K-Jetronic*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart 2000, Niemcy.
- [14] Berkey W.E.: Electrical Measurements on Aircraft-Engine Ignition Circuits, *American Institute of Electrical Engineers, Transactions*, vol. 65, no. 2, 1946, pp. 49-53.

- [15] Boguta A. and Styła S.: The graphic programming using simulation in the SI and CI engine management system. *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 2013, 3, pp. 947-950.
- [16] Bosch R.: GmbH, Automotive Electrics and Automotive Electronics. System and Components, 5th Edition, Bentley Publishers, Cambridge 2007, USA.
- [17] Bosh, van den J., Duijm N.: Outflow and Spray Release, In: *VROM*, Hague, 2005.
- [18] Burgett R.R., Leptich J.M., Sangwan K.V.S.: Measuring the effect of spark plug and ignition system design on engine performance, SAE Paper 720007, 1972.
- [19] Caputo M.: Linear Models of Dissipation Whose Q Is Almost Frequency Independent-II. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 13, No. 5, pp. 529-539, 1967. doi:10.1111/j.1365-246X.1967.tb02303.x.
- [20] Cho N.: Effect of in-cylinder air motion on fuel spray characteristics in a gasoline direct injection engines”, SAE Technical Paper No. 1999-0177, SAE International, Warrendale 1999, USA.
- [21] Cisse Haba T., Loum G.L., Zoueu J.T., Ablart G.: Modeling and dynamics analysis of the fractional-order Buck—Boost converter in continuous conduction mode. *J. Appl. Sci.* 8, 59 (2008).
- [22] Corel S.: Direct Injection Systems for Spark-Ignition and Compression-Ignition Engines, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1999, Niemcy.
- [23] Delli Colli V., Marignetti F.: Traction Control for a PM Axial-Flux In-Wheel Motor, In: *JEE - Journal of Electrical Engineering*, Vol.7, No.4, 2007, ISSN 1582-4594
- [24] Demidowicz R.: Zapłon. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1993, s.37.
- [25] Dowkontt J.: Teoria silników cieplnych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1973.
- [26] Duer S., Duer R., Duer P.: Tor pomiarowy dla systemu diagnozującego układ sterowania silnikiem samochodowym typu Motronic. *Innowacje w motoryzacji dla ochrony środowiska Słupsk*, 2009, s. 79-86.
- [27] Duer S.: Artificial neural network in the control process of object's states basis for organization of a servicing system of a technical objects. *Neural Computing & Applications*. 2012, Vol. 21, No. 1, pp. 153-160.
- [28] Dyszy J.: Wszyscy wtryskują, *Autotechnika Motoryzacyjna* Nr 1-2/2010, s. 10-15, MotoMedia Forum Sp. z o.o., Warszawa 2010.
- [29] Dzieliński A., Sarwas G., Sierociuk D.: Comparison and Validation of Integer and Fractional Order Ultracapacitor Models. *Advances in Difference Equations*, Springer Open Journal, June, 2011. doi: 10.1186/1687-1847-2011-11.
- [30] Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M. and Siemionek E.: Electromagnetic interference in electrical systems of motor vehicles. *Materials Science and Engineering*. IOP Conference Series, 148, 2016.
- [31] Dziubiński M.: *Badania elektronicznych urządzeń pojazdów samochodowych* Wydaw. Naukowe Gabriel Borowski 2004.
- [32] Dziubiński M.: Ecological aspect of electronic ignition and electronic injection system. *Environment engineering V*. CRC Press Taylor and Francis Group, 2016, pp. 299-304.

- [33] Dziubiński M.: Testing of exhaust emissions of vehicles combustion engines. Environment engineering V. CRC Press Taylor and Francis Group, 2016, 305-310.
- [34] Eriksson L., Andersson I.: An Analytic Model for Cylinder Pressure in a Four Stroke SI Engine, Proceedings of SAE 2002 World Congress, SAE Paper 2002-01-0371, Detroit 2002, USA.
- [35] Eriksson L.: Spark Advance: Modeling and Control, Linköping University, dissertation No. 580, Linköping, 1999.
- [36] Francis Alger II Terrence, Barrett Wade Mangold, Kane Tyler: Dual coil ignition circuit for spark ignited engine, U.S. Patent US 20090126710 A1, May 21, 2009.
- [37] Freeborn T.J., Maundy B., Elwakil A.S.: Measurement of Supercapacitor Fractional-Order Model. Parameters From Voltage-Excited. Step Response. IEEE journal on emerging and selected topics in circuits and systems, Vol. 3, No. 3, 2013.
- [38] Fry M.: Direct injection of gasoline – practical considerations, SAE Technical Paper No. 1999-01-0171, SAE International, Warrendale 1999, USA.
- [39] Fryśkowski B.: Jednolita polaryzacja świec w układach zapłonowych wyposażonych w cewki dwubiegunowe. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017: 76(3) <http://dx.doi.org/10.14669/AM.Vol.76.ART3>.
- [40] Gad R., Gad S., Pawlak A.: System monitorowania decyzyjnego obiektów technicznych, Technika Transportu Szynowego 10/2013.
- [41] Gad S., Gad R., Różowicz S.: Wpływ konfiguracji układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego: Kieks: 2005, 71-76
- [42] Gad S., Jastriebow A. I., Łaskawski M., Słoń G., Zawadzki A.: Symptomowe modele diagnozowania samochodowych urządzeń elektrycznych, V Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów, DIAG'2003. Ustroń 2003.
- [43] Gad S., Jastriebow A., Kałwa D., Słoń G., Łaskawski M.: Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce wyposażenia elektrycznego samochodów, XV Krajowa Konferencja Automatyki, KKA, Warszawa 2005.
- [44] Gad S., Jastriebow A., Kułakowski A.: Modele matematyczne oraz sztuczne sieci neuronowe w diagnostyce urządzeń elektrycznych wyposażenia pojazdów, Materiały Konferencji Diagnostyka 99, Bydgoszcz 1999.
- [45] Gad S., Kułakowski A., Łaskawski M., Jastriebow A.I.: Komputerowy system diagnozowania układu elektrycznego samochodu, V Krajowa Konferencja Naukowa Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe, Wrocław 2003.
- [46] Gad S., Łaskawski M., Jastriebow A.I.: Fuzzy logic models of TSK type in electrical vehicle equipment diagnosing, VIII Konferencja Naukowo – Techniczna Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice, ZKwE'2003, Poznań/Kierz 2003.
- [47] Gad S., Łaskawski M., Słoń G., Jastriebow A.I., Zawadzki A.: Symptom models of diagnostic of motor-car electrical equipment, IFAC Symposium, Advances in Automotive Control, University of Salerno, Italy 2004.
- [48] Gad S., Słoń G., Jastriebow A.: Computer analysis of battery defects diagnosing through artificial neural networks, VII Conf. The Application Of Computers In Electrical Engineering, P. 671-674, Poznań 2002.

- [49] Gad S., Słoń G., Jastriebow A.: Computer diagnosis and identification of selected systems of electrical equipment of cars, In: Proc. of XIV International Conference On Systems Science, Systems Science XIV,, pp. 150-157, Wrocław 2001.
- [50] Gajdeczko B.: Application of two-color particle image velocimetry to a firing production direct-injection stratified-charge engine”, SAE Technical Paper No. 1999-01-1111, SAE International, Warrendale 1999, USA.
- [51] Goulart B.S., Brighenti C., Tomita J.T, and Oliveira A.C.: Technical evaluation of vehicle ignition systems conduct differences between a high energy capacitive system and a standard inductive system, *Acta Scientiarum. Technology Maringá*, v. 36, n. 4, p. 629-634, Oct.-Dec., 2014 Doi: 10.4025/actascitechnol.v36i4.21048.
- [52] Hepburn J.: Engine and aftertreatment modeling for gasoline direct injection, SAE Technical Paper No. 982596, SAE International, Warrendale 1998, USA.
- [53] Herner A, Riehl H.J.: *Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2013, s. 289-307.
- [54] Herner A., Riehl H.J.: *Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych*, Warszawa 2003.
- [55] Hoffmann J.A., Eberhardt E., Martin J.K.: Comparison between air-assisted and single-fluid pressure atomizers for direct injection SI engines via spatial and temporal mass flux measurements, SAE 970630, 1997, USA.
- [56] Hung D.L., Chmiel D.M., and Markle L.E.: Application of an imaging-based diagnostic technique to quantify the fuel spray variations in a direct-injection spark-ignition engine, SAE Technical Paper, No. 2003-01-0062, 2003.
- [57] Ikoma T., Abe S., Sonoda Y., Suzuki H.: Development of V-63.5-liter Engine Adopting New Direct Injection System, SAE Paper2006-01-1259, SAE International, Warrendale 2006, USA.
- [58] Issermann R.: Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. *Annual Reviews in Control*, 29(1), 2005, pp. 71-75.
- [59] Jakubaszek A.: Borgward Goliath GP 700E - Historia małego Goliatha, *Auto Świat* Nr 19/2007, s. 46, Axel Springer Polska Sp. z o.o. Warszawa 2007.
- [60] Jalloul A., Jelassi K., Melchior R. and Trigeassou J-C.: Fractional modelling of rotor skin effect in induction machines, *Proceedings of the FDA'10. The 4th IFAC Workshop Fractional Differentiation and its Applications*. Badajoz, Spain October 18-20 (Eds: I. Podlubny, B.M. Vinagre Jara, YQ. Chen, V.Feliu Battle, I. Tejado Balsera). ISBN 9788055304878.
- [61] Jamrozik A., Cupiał K.: Modelowanie powstawania tlenku azotu w silniku ZI z dzieloną komorą spalania, *Archiwum spalania* Vol. 4/2004, Polski Instytut Spalania, Warszawa 2004.
- [62] Juda Z., Marek W.: Mikroprocesorowy, jednopunktowy układ zasilania wtryskowego w wersji Politechniki Krakowskiej. Zasilanie wtryskowe – Systemy i sterowanie, Praca zbiorowa. Wyd. PRO-MO, Kraków 1994.
- [63] Kaczorek T., Rogowski K.: *Fractional Linear Systems and Electrical Circuits*, Białystok University of Technology, Białystok 2014.

- [64] Kakuhou A.: LIF visualization of in-cylinder mixture formation in a direct-injection SI engine, Materiały konferencyjne, 4th International Symposium COMODIA 98, Kyoto 1998, Japonia.
- [65] Kasedorf J.: Układy wtryskowe i katalizatory. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1998.
- [66] Kedzia R., Okoński A.: Układy paliwowe systemów wtryskowych silników z zapłonem iskrowym, Poradnik Serwisowy Nr 1/2002, Instalator Polski, Warszawa 2002.
- [67] Khovanskii A.N.: The application of continued fractions and their generalizations to problems in approximation theory, Noordhoff, The Netherlands, 1963.
- [68] Kneba Z., Makowski S.: Zasilanie i sterowanie silników Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 2004.
- [69] Kochersberger K., Hyde K.W., Emsen R., Parker R.G.: An Evaluation of the 1910 Wright Vertical Four Aircraft Engine, AIAA-2001-3387, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston 2001, USA.
- [70] Kono et al.: Investigation on ignition ability of composite spark inflowing mixtures, 20th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1984.
- [71] Konopiński M.: Elektronika w technice motoryzacyjnej, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
- [72] Kowalewicz A.: Wybrane zagadnienia samochodowych silników spalinowych, Wydanie 2, poprawione i uzupełnione, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- [73] Kozaczewski W.: Uwarstwienie mieszanki uzyskiwane bezpośrednim wtryskiem benzyny, Journal of Kones, Vol. 7, No. 1-2, Warszawa 2000.
- [74] Krebs R., Stiebels B., Spiegel L., Pott E.: FSI – Ottomotor mit Direkteinspritzung im Volkswagen Lupo, 21. International Vienna Motor Symposium Wiedeń 2000, Austria.
- [75] Krishna B.T.: Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey, Signal Processing 91(2011) pp. 386-426.
- [76] Kubiak P., Zalewski M.: Pracownia diagnostyki pojazdów samochodowych Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2012.
- [77] Kuhlitz D.: Journal of Bosch History. Supplement 2, Robert Bosch GmbH, Corporate Communications, Stuttgart 2005, Niemcy.
- [78] Kurdziel R.: Podstawy elektrotechniki. WNT, Warszawa 1973.
- [79] Kuwahara K.: Intake-port design for Mitsubishi GDI engine to realize distinctive incylinder flow and high charge coefficient, SAE Technical Paper No. 2000-01-218, SAE International, Warrendale 2000, USA.
- [80] Lee Y., Pae S., Min K., Kim E.: Prediction of knock onset and the autoignition site in spark ignition engines, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Volume 214, Number 7 / 2000, Professional Engineering Publishing, Londyn 2000, Wielka Brytania.
- [81] Leonard R., Gerhardt J.: Direct Injection – From Vision to Reality, 27. International Vienna Motor Symposium, Wiedeń 2006, Austria.

- [82] Li B., Zhao Y., Sun P.: The Study of Ambient Condition on the Performance of Marine Diesel Engine, In: Journal of Harbin Engineering University, Vol. 27/2006.
- [83] Liu Yaqin.: Engine ignition coil reliability analysis mechanical engineers, 2010(8):153
- [84] Luft S.: Podstawy budowy silników. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [85] Maćkowski J.: Obiegi czterosuwowych silników o zapłonie iskrowym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.
- [86] Maly R.: Spark ignition: Its physics and effect on the IC process, Fuel economy in road vehicle powered by spark ignition engines, Springer, 1984.
- [87] Markovich G., Skolnick M., and Core M.: A new methodology for isolating and diagnosing inconsistencies in image matching as applied to the analysis of 2-d electrophoretic gels Applications of Computer Vision, vol. 73, pp. 197-204, 1992.
- [88] Marushak Y., Kopchak B.: Analiza modeli całkowania i różniczkowania ułamkowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 292, Elektrotechnika 34, (2/2015), pp. 213-222.
- [89] Merkisz J.: Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1995.
- [90] Mitianiec W.: Wtrysk paliwa w silnikach dwusuwowych małej mocy, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią. Polska Akademia Nauk. Kraków 1999.
- [91] Morris S.W.: The evaluation of performance enhancing fluids and the development of measurement and evaluation techniques in the Mitsubishi GDI Engine, SAE Technical Paper No. 1999-01-1496, SAE International, Warrendale 2000, USA.
- [92] Mysłowski J.: Pojazdy samochodowe. Doładowanie silników. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [93] Nakanishi K.: Application of a new combustion concept to direct injection gasoline engine, International Vienna Motor Symposium Vol. 1/2000, Wiedeń 2000, Austria.
- [94] Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe, Tom I, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
- [95] Niziński S.: Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
- [96] Niziński S.: Eksploatacja obiektów technicznych, ITeE, Radom 2002.
- [97] Ocioszyński J.: Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych, Warszawa 2008.
- [98] Osamura H.: Development of long life and high ignitability iridium spark plug. In: Seoul 2000 FISITA world automotive congress, Paper number F2000A144, Korea: 2000.
- [99] Ostalczyk P.: Zarys rachunku różniczkowo-całkowego ułamkowych rzędów, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2008.
- [100] Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., Nanot, F.M.: Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, I, Volume: 47 Issue: 1, Jan. 2000, pp. 25-39.

- [101] Pacholski K.: Elektryczne i elektroniczne wyposażenie pojazdów samochodowych. Część 2. Wyposażenie elektroniczne, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [102] Parchański J.: Miernictwo elektryczne i elektroniczne, Warszawa 2012.
- [103] Patton R. and Chen J.: Design methods for robust fault diagnosis. Control system Robotics and Automation, 26, 2005.
- [104] Payri R., Salvador F., Manin J. and Viera A.: Diesel ignition delay and lift-off length through different methodologies using a multi-hole injector, Applied Energy, 162(15), 2016, pp. 541-550.
- [105] Peng G., Li Y.: Fuzzy neural network in fault diagnosis of automobile engine electronic ignition system application, automotive Technology, 2011(3), pp. 47-50.
- [106] Pomykański Z.: Elektrotechnika samochodów, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
- [107] Postrzednik S., Żmudka Z.: Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [108] Praca zbiorowa: Sterowanie silników o zapłonie iskrowym. Zasada działania. Podzespoły. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2013. Seria: Informatory Techniczne Bosch.
- [109] Praca zbiorowa: Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym - Bosch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- [110] Pulkrabek W.: Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, In: Pearson Prentice Hall, Plateville, 2003.
- [111] Ramsay F.R.F. and Nethercot W.: Engine ignition faults, and a new method of diagnosis and location during running, Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering, vol. 93, no. 36, pp. 629-635, 1946.
- [112] Reif K.: Fundamentals of Automotive and Engine Technology, DOI 10.1007/978-3-658-03972-1_7, Springer Fachmedien Wiesbaden 2014.
- [113] Robinet C., Andrzejewski J., Higelin P.: Cycle-to-cycle variation study of an si engine fired by spark plug and a non conventional device. SAE paper 972986: 1997.
- [114] Rohit M., Rohit K.: Modelling and simulation of spark ignition engines, International Journal of Advancements in Research & Technology, Volume 3, Issue 5, May-2014.
- [115] Różowicz A., Deląg M., **Różowicz S.**: Weryfikacja badań eksperymentalnych w bezrozdzielaczowych układach zapłonowych, Logistyka, nr 6, s. 2933-2940.
- [116] Różowicz A., **Różowicz S.**, Deląg M.: Model bezrozdzielaczowego układu zapłonowego, Logistyka, 2009, 6/2009.
- [117] **Różowicz S.**, Zawadzki A.: The use of differential geometry methods for linearization of nonlinear electrical circuits with multiple-inputs and multiple-outputs (MIMO), Electrical Engineering 2018 DOI: 10.1007/s00202-018-0746-0.
- [118] **Różowicz S.**, Deląg M.: Komputerowe metody wyznaczania parametrów układu zapłonowego, Archiwum Motoryzacji, 2008, 3-4/2008, s. 175-184.

- [119] **Różowicz S.**, Tofil. Sz.: The influence of impurities on the operation of selected fuel ignition systems in combustion engines, Archives of Electrical Engineering, Vol.65 Issue: 2 (2016), pp. 349-360.
- [120] **Różowicz S.**, Włodarczyk M., Zawadzki A.: Wave parameters of symmetrical two-port networks containing elements of fractional order, Sandomierz IEEE 2016 DOI: 10.1109/CPEE.2016.7738742.
- [121] **Różowicz S.**, Zawadzki A.: Przewody zapłonowe silników spalinowych jako obwody o parametrach rozłożonych, SPETO 2017, s. 41-42.
- [122] **Różowicz S.**, Zawadzki A.: Weryfikacja eksperymentalna propagacji sygnału w przewodach zapłonowych silników spalinowych, SPETO 2018, s. 39-40.
- [123] **Różowicz S.**: Analiza układu zapłonowego przy pomocy opracowanego modelu matematycznego rozwiązanego metodą operatorową, Logistyka 4/2014, s. 1112-1117.
- [124] **Różowicz S.**: Analiza wpływu zmiany napięcia akumulatora na wartość wyładowania iskrowego, Logistyka, 6/2011.
- [125] **Różowicz S.**: Influence of fuel impurities on the consumption of electrodes in spark plugs, OPEN PHYSICS Vol.16 Issue: 1, (2018), pp. 57-62.
- [126] **Różowicz S.**: Metody diagnozowania elementów układu zapłonowego, Logistyka 4/2014 s.1118-1124.
- [127] **Różowicz S.**: Model bezstykowego bezrozdzielaczowego układu zapłonowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej nr 43: 2005, 143-148.
- [128] **Różowicz S.**: Model matematyczny układu zapłonowego do analizy wpływu wybranych parametrów strony pierwotnej na wartość energii wyładowania iskrowego w pojazdach samochodowych, Logistyka 3/2014, s. 5467-5476.
- [129] **Różowicz S.**: The effect of different ignition cables on spark plug durability. Przegląd elektrotechniczny Volume: 94 Issue: 4, (2018), pp. 191-195.
- [130] **Różowicz S.**: Wpływ rezystancji przewodów wysokiego napięcia na wartość energii wyładowania iskrowego, Logistyka, 2010, nr 6, s. 2905-2908.
- [131] Rychter T., Teodorczyk A.: Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
- [132] Rychter T., Teodorczyk A.: Teoria silników tłokowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [133] Schäfer I., Krüger K.: Modelling of lossy coil using fractional derivatives, J. Phys. D:Appl. Phys. 41 (2008), pp. 1-8.
- [134] Scherenberg H.: Der Erfolg der Benzin-Einspritzung bei Daimler-Benz, Motorische Zeitschrift (MTZ) 22, Nr 7/1961.
- [135] Schneehage G., tłumacz: Trzeciak K.: Czujniki układu sterowania silnika w praktyce warsztatowej, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2012.
- [136] Schneehage G.: Czujniki układu sterowania silnika, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.
- [137] Scholten I.: 2.2 L Ecotec Direct from Opel – gasoline direct injection, International Vienna Motor Symposium, Vol. 1/2000, Wiedeń 2000, Austria.

- [138] Šebök M.: Investigation of electrical properties of sensors and non-electrical quantities, In: PhD thesis, University of Zilina, 2007.
- [139] Sendyka B., Noga M.: Determination of optimal fuel mass relation dosed by a dualinjector fuel system in a spark ignition engine, *Silniki Spalinowe 2009-SC2*, PTNSS-2009-SC-123, PTNSS, Bielsko-Biała 2009.
- [140] Sendyka B., Noga M.: Modeling of Dynamic Fuel Flow Rate of High-Pressure Injector for DISI Engine, *Silniki Spalinowe 2009-SC2*, PTNSS Kongres – 2009 Opole, PTNSS-2009-SC-124, PTNSS, Bielsko-Biała 2009.
- [141] Serdecki W.: *Badania silników spalinowych*. Laboratorium, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [142] Shi X., Ren G., Li J.: Fault diagnosis method research of aircraft ignition system based on waveform image matching, *Procedia Engineering*, vol.15, pp. 2527-2532. 2011.
- [143] Shi Xudong, Li Hongguang, Wang Ruowen and Xu Meng: Modeling and Simulation of Aviation Engine Ignition Spark Frequency Disorder, *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, 2015, 9, 193-199.
- [144] Šimko, M., Chupáč, M.: The theoretical synthesis and design of symmetrical delay line with surface acoustic wave for oscillators with single-mode regime of oscillation, In: *Przegląd elektrotechniczny Electrical Review*, Vol. 88, 2012, No. 12A, pp. 347-350.
- [145] Sochan A.: Dobór parametrów pracy silnika spalinowego o zapłonie iskrowym z obiegiem Atkinsona w hybrydowym układzie napędowym, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, promotor: prof. dr hab. inż. Bronisław Sendyka, Kraków 2008.
- [146] Stan C.: *Direct Injection Systems for Spark-Ignition and Compression- Ignition Engines*, SAE International, Warrendale 1999, USA.
- [147] Stone C., Brown A., Beckwith P.: Cycle-by-cycle variations in spark ignition engine combustion – part II: modeling of flame kernel displacements as a cause of cycle-by-cycle variations. SAE paper 960613: 1996.
- [148] Stone C.R., Mineche, Steele A.: *Pomiar i modelowanie energii układu zapłonowego i jego wpływu na osiągi silnika*, 1989, doi.org/10.1243/PIME.
- [149] Swett C.: Spark ignition of flowing gases, I – energies to ignite propane-air mixtures in pressure range of 2 to 4 inches mercury absolute, *Research Memorandum*, National Advisory Committee for Aeronautics, 1949.
- [150] Szulborski A.: *Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- [151] Tadeusiewicz M.: *Teoria obwodów*, Cz. II, PŁ, Łódź 1990.
- [152] Tan Benzong: Auto waveform and data blocks analysis mechanical industry press, 2009(1):63-82.
- [153] Tarimer J.A., Arslan S., Guwen M.E.: Investigation for Losses of M19 and Amorphous Core Mate-rials Asynchronous Motor by Finite Elements Methods, *Elektronika i Elektrotechnika*, Doi: 10.5755/j01.eee.18.9.2797, ISSN: 1392–1215, 2012, Vol 18, No. 9 (125), pp. 15-18.

- [154] Tarimer JA., Guwen ME., Arslan S.: Computer Aided Design of An Electromagnetic Ignition Coil For High Speed Benzene Engines, *Przegląd elektrotechniczny*, pe.org.pl/articles/2011/2/51.pdf, ISSN: 0033-2097, R. 87 NR 2/2011, pp. 230-236.
- [155] Tatschl R.: PDF modeling of stratified-charge SI engine combustion, SAE Technical Paper No. 981464, SAE International, Warrendale 1998, USA.
- [156] Teodorczyk A., Jarnicki R.: Modelowanie numeryczne procesów spalania przy użyciu programu KIVA, *Archiwum spalania* Vol. 2/2002, Polski Instytut Spalania, Warszawa 2002.
- [157] Teodorczyk A., Wysga P.: Symulacje komputerowe procesów spalania w silnikach tłokowych”, II Krajowe Sympozjum, Komputerowe systemy wspomagania prac inżynierskich w przemyśle i transporcie, Zakopane 1998.
- [158] Thiele M., Selle M., Riedel U., Warnatz J.: A detailed Two-Dimensional Numerical Study of Spark Ignition Including Ionization, SAE Paper 2002-01-1110, Warrendale 2002.
- [159] Thiele M., Selle S., Riedel U., Warnatz J., Maas U.: Numerical simulation of spark ignition including ionization, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1177-1185, Pittsburgh 2000.
- [160] Thulasiram R.K. and Thulasiraman P.: Performance evaluation of a multithreaded fast Fourier transform algorithm for derivative pricing, *The Journal of Supercomputing*, vol. 26, no. 1, pp. 43-58, 2003.
- [161] Tian L., Li X. and Liu C.: Design of fault diagnosis system for aircraft engine ignition component, *Journal of Civil Aviation University of China*, vol. 31, no. 4, pp. 6-9, 2013.
- [162] Traistaru A., Sora I.: Real time estimation of Li-ion battery resistance used in the automotive industry, In: *JEE - Journal of Electrical Engineering*, Vol.10, No.4, 2010, ISSN 1582-4594.
- [163] Tropina A.A., Vovk Y.G.: Advanced ignition system for internal combustion engines, *Laser Ignition Conference* April 2015, DOI: 10.1364/LIC.2015.P1A.1.
- [164] Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.
- [165] Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002 Bosch R., tłumaczenie: Michał Szatyński.: *Mikroelektronika w pojazdach samochodowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [166] Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [167] Tsuji N., Sugiyama M., Abe S.: Der neue 3.5L V6 Benzinmotor mit dem innovativen stöchiometrischen Direkteinspritzsystem D-4S, 27. Internationales Wiener Motorensymposium, Austria 2006.
- [168] Tutaj J.: Sterownik wtrysków paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa, *Konmot – Autoprogress* 2008, *Czasopismo Techniczne*, z. 7-M/2008, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.

- [169] Urbanowicz M., Maziarz A.: Diagnostyka elektronicznych układów samochodowych. Journal of Modern Technologies In Transport Nr 1/2010. Wydawnictwo Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna, Szczecin 2010.
- [170] Urbanowicz M., Maziarz A.: Wpływ wybranych parametrów na proces spalania mieszanek. Journal of Modern Technologies In Transport Nr 1/2010. Wydawnictwo Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna, Szczecin 2010.
- [171] Urbanowicz M.: Badanie baterijnego układu zapłonowego o zmiennej przekładni cewki zapłonowej. Eksploatacja Silników Spalinowych, 14/2004. Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2006.
- [172] Urbanowicz M.: Kształtowanie charakterystyki zewnętrznej silnika spalinowego poprzez zmianę parametrów elektrycznych układu zapłonowego. Autobusy 10/2013.
- [173] Urbanowicz M.: Przebieg procesu ładowania świecy zapłonowej przed przeskokiem iskry. Journal of Modern Technologies In Transport Nr 2/2011. Wydawnictwo Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna, Szczecin 2011.
- [174] Urbanowicz M.: Wpływ parametrów wewnętrznych na pracę baterijnego układu zapłonowego. Eksploatacja Silników Spalinowych, 12/2004. Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2004.
- [175] Van Nieuwstadt M.: Heat release regressions for GDI engines”, SAE Technical Paper No. 2000-01-0956, SAE International, Warrendale 1998, USA.
- [176] Vorperian V.: A fractal model of anomalous losses in ferromagnetic materials, IEEE Trans.MAG-28 (1992) pp. 1277-1283.
- [177] Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [178] Waltner A., Lückert P., Schaupp U., Rau E., Kemmler R., Weller R.: Future Technology of the Spark Ignition Engine: Spray-guided Direct Injection with Piezo Injector, 27. International Vienna Motor Symposium, Wiedeń 2006, Austria.
- [179] Wang Z., Ding H., Ma X., Xu H. and Wyszynski M.: Ultra-high speed imaging study of the diesel spray close to the injector tip at the initial opening stage with split injection. Applied Energy, 163, 2016, pp. 105-117.
- [180] Welter A., Unger H., Hoyer U., Brünner T., Kiefer W.: Der neue aufgeladene BMW Reihensechszylinder Ottomotor, 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006.
- [181] Wiak S.: Mechatronika tom II (praca zbiorowa), rozdz.7. Mechatronika pojazdowa., Łódź 2010, ISBN: 978-83-60434-85-7.
- [182] Wirth M.: Gasoline DI engines in Europe. Achievements and future concepts for fuel economy and emissions, ARO/ERC Engine Symposium, Madison 1998, USA.
- [183] Wiśniewski S.: Podstawy termodynamiki silników spalinowych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1963.
- [184] Włodarczyk M., Zawadzki A., **Różowicz S.**: Fractional models of selected combustion engine ignition systems, Przegląd Elektrotechniczny: doi:10.15199/48.2016.04.08 4/2016, s. 30-33.
- [185] Wu B., Lin L., and Cai C.: The diagnosis system of mechanical fault based on LabVIEW platform and its application, In: 3rd International Conference on Intelligent Information Technology Application, 2009, pp. 322-325.

- [186] Xu M., Yin Y., Xia Y.: Research on Modeling and Faults Diagnosis of Aeroengine Ignition System, The Open Automation and Control Systems Journal, 2014, 6, pp. 885-893.
- [187] Yang C.S., Park S.K. and Mi C.: Comprehensive Modeling of Automotive Ignition Systems, Automotive Electronics and Systems Reliability 2007.
- [188] Yu S., Tan Q., Ives M., Liu M.: Parametric Analysis of Ignition Circuit Components on Spark Discharge Characteristics, SAE Technical Paper 2016-01-1011, 2016.
- [189] Zając P.: Silniki pojazdów samochodowych. Podstawy budowy oraz główne zespoły i układy mechaniczne, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009.
- [190] Zawadzki A., **Różowicz S.**: Application of input – state of the system transformation for linearization of some nonlinear generators, International Journal of Control, Automation and Systems (2015) 13(3):1-8 : DOI 10.1007/s12555-014-0026-3.
- [191] Zawadzki A., **Różowicz S.**: Badania elementów układu zapłonowego jako obwodu o stałych rozłożonych, XXXIX IC-SPETO 2016.
- [192] Zawadzki A., Włodarczyk M.: CFE method-utility analysis of the approximation of reverse Laplace transform of fractonal order, IC SPETO- 2015, pp.45-46.
- [193] Zawadzki A.: Application of local coordinates rectification in linearization of selected parameters of dynamic nonlinear systems. COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. Vol. 33 Iss: 5, 2014, pp. 1819-1830.
- [194] Zellat M., Desoutter G., Abouri D., Desportes A., Hira J.: A new spark model for SI engine in STAR-CD: The Imposed Stretch Spark Ignition Model - Concept and preliminary validations to SI-GDI combustion, CD-adapco, 203-213 avenue Paul Vaillant Couturier, BOBIGNY, 93000, FRANCE.
- [195] Zhang H., Wang D., Liu K.: Automotive electronic control engine ignition energy control and test. Agricultural machinery Journal, 2009(12):19-22.

MODELOWANIE WYBRANYCH ZJAWISK FIZYCZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W UKŁADZIE ZAPŁONOWYM SILNIKÓW SPALINOWYCH O ZAPŁONIE ISKROWYM

W prezentowanej pracy przedstawiono nowe podejście do zagadnienia modelowania bezrozdzielaczowych układów zapłonowych. Opracowano modele matematyczne układów zapłonowych jako systemu rozpatrywanego w całości. Analiza przeprowadzona została przy pomocy wielu metod matematycznych stosowanych do analizy stanów nieustalonych w obwodach elektrycznych, tj.: metodą klasyczną, operatorową oraz metodą z zastosowaniem zmiennych stanu. Zastosowanie tych metod wymagało dodatkowych założeń wynikających z praw komutacji – głównie prawa ciągłości prądu w cewce indukcyjnej, co spowodowało pewne różnice w porównaniu z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentu. W związku z tym w dalszej kolejności przeprowadzono oddzielnie modelowanie zjawisk fizycznych zachodzących w układzie zapłonowym, dzięki czemu uzyskano większą zgodność z wynikami doświadczalnymi. Rozpatrując nagłą przerwę prądu w cewce, można uzyskać napięcie w postaci impulsu Diraca. Takiego przebiegu nie otrzyma się eksperymentalnie z powodu nieidealnego łącznika. Dobrym rozwiązaniem okazało się zastosowanie rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu, które pozwoliło na uwzględnienie pomijanych zjawisk towarzyszących przerwaniu prądu w cewce poprzez dobór odpowiedniego niecałkowitego rzędu pochodnej i przedstawienie impulsu Diraca w postaci „rozmytej”, co znacznie przybliżyło rozwiązanie do danych eksperymentalnych. Także zastosowanie tego rodzaju pochodnej do sprzężenia magnetycznego pozwoliło na uwzględnienie strat powstałych przy transformacji napięcia ze strony pierwotnej na wtórną cewki zapłonowej. Zastosowanie rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu do analizy zjawisk w układzie zapłonowym jest nowatorskie i wymaga dalszych badań. Zjawisko transmisji impulsu napięcia poprzez przewody wysokiego napięcia (w najnowszych rozwiązaniach układu zapłonowego problem ten nie występuje, ponieważ cewka zapłonowa jest umieszczona bezpośrednio na świecy) również wymaga osobnego potraktowania. Krótki czas narastania tego impulsu generuje harmoniczne o wysokich częstotliwościach, o takich długościach fali, które są porównywalne z długością przewodów wysokiego napięcia, co wymusza stosowanie teorii linii długich do analizy tego zjawiska.

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na ocenę wpływu poszczególnych parametrów układu zapłonowego na parametry wyładowania iskrowego. Wszystkie wyniki uzyskane w symulacjach numerycznych zostały zweryfikowane poprzez liczne badania eksperymentalne na obiektach rzeczywistych.

Summary

MODELLING OF SELECTED PHYSICAL PHENOMENA OCCURRING IN THE IGNITION OF SPARK-IGNITION ENGINES

The work presents a new approach to the problem of solid ignition distribution modelling. The author developed mathematical models of ignition systems considering them as complete structures. The analysis was based on mathematical methods used to analyse the transient states of electrical circuits, that is, the classical method, the operator method, and the method using state variables. The application of the above-mentioned methods required making some additional assumptions resulting from commutation principles, in particular, from the continuity of current in the induction coil, which caused some differences between simulation and experimental results. Next, physical phenomena taking place in the ignition system were separately modelled, and much better compliance with the experimental results was obtained. In the case of a sudden interruption of the current in the coil, we can obtain voltage in the form of a Dirac pulse. This could not be done experimentally due to a non-ideal connector. A good solution was the use of fractional differential calculus, which allowed us to consider the omitted phenomena accompanying the interruption of the current in the coil, by choosing the appropriate fractional order of the derivative and presenting the Dirac pulse in a "fuzzy" form. This made the solution much closer to the experimental data. Also, the use of this kind of derivative for magnetic coupling allowed us to take into account losses resulting from the transformation of voltage from the primary to the secondary winding of the ignition coil. The use of fractional differential calculus for the analysis of phenomena in the ignition system is innovative and requires further research. The phenomenon of voltage impulse transmission through high-voltage cables (in the latest solutions of the ignition system this problem does not occur, because the ignition coil is placed directly on the ignition plug) also requires a separate analysis. The short rise time of the impulse generates harmonics at high frequencies with wavelengths comparable to the length of high voltage cables. Consequently, the use of long transmission line theory is necessary to analyse the phenomenon. Computer simulations allowed us to assess the effect of particular ignition system parameters on spark discharge ones. All the results obtained in numerical simulations were verified by numerous experiments conducted on real objects.