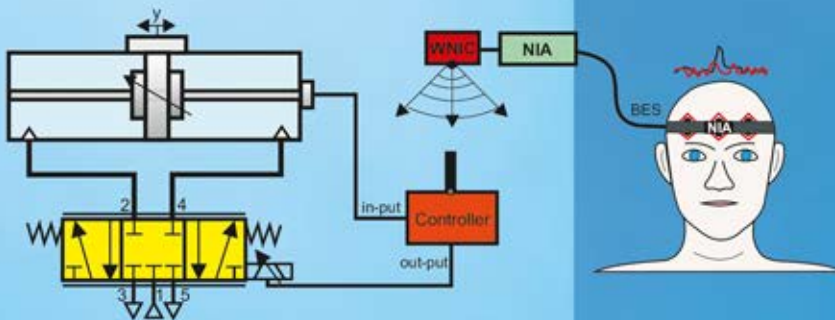


MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY

M89

Ryszard Dindorf, Jakub Takosoglu, Piotr Woś

DEVELOPMENT OF PNEUMATIC CONTROL SYSTEMS

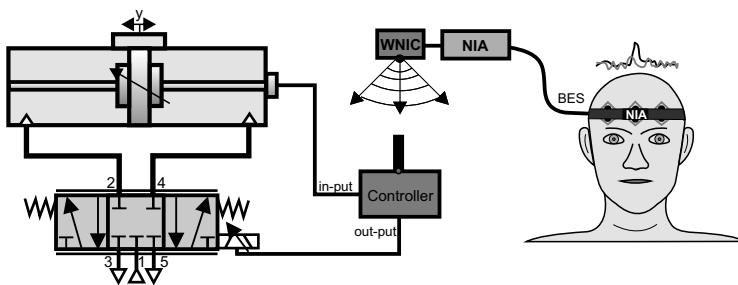


Politechnika Świętokrzyska

Kielce 2017

Ryszard Dindorf, Jakub Takosoglu, Piotr Woś

DEVELOPMENT OF PNEUMATIC CONTROL SYSTEMS



MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M89

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE – BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

prof. dr hab. inż. Tomasz Lech STAŃCZYK

Autorzy rozdziałów

Ryszard DINDORF – 1.1-1.4, 1.6, 3.1, 4, 5.1, 5.2.1

Jakub TAKOSOGLU – 1.5, 2

Piotr WOŚ – 3.2, 3.3, 5.2.2, 5.2.3

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Andrzej MILECKI

dr hab. inż. Zbigniew KAMIŃSKI

Redakcja

Aneta STARZYK

Projekt okładki

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2017

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 978-83-63792-91-6

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

TABLE OF CONTENTS

Preface	5
1. CONVENTIONAL PNEUMATIC CONTROL SYSTEMS	7
1.1. Introduction	7
1.2. Air compressors	9
1.3. Pneumatic actuators	10
1.4. Pneumatic valves	15
1.5. Basic pneumatic circuits	20
1.5.1. Basic rules of creating diagrams of pneumatic circuits	22
1.5.2. Direct control	26
1.5.3. Indirect control	29
1.5.4. Semi-automatic and automatic control	31
1.5.5. Control with logic and special valves	35
1.6. Basic pneumatic control systems	37
1.6.1. Pneumatic control system	37
1.6.2. Electro-pneumatic control system	40
2. DESIGN AND CONTROL OF PNEUMATIC SYSTEMS – POSITIONAL CONTROL OF PNEUMATIC SERVO DRIVES	43
2.1. Introduction	43
2.2. Mathematical model of electro-pneumatic servo drive	46
2.3. Fuzzy logic controller (FLC)	49
2.4. State-space controller (SSC)	53
2.5. Simulations and experimental tests	56
3. WIRELESS REMOTE CONTROL – PNEUMATIC POSITIONING SYSTEMS	64
3.1. Basic control structure of the pneumatic positioning system	64
3.2. Wireless remote control of electro-pneumatic positioning system	66
3.2.1. Wireless network	66
3.2.2. Wireless controller of electro-pneumatic positioning systems	69
3.2.3. Laboratory test stand	72
3.2.4. Experimental results	73
3.3. Wireless remote control of servo-pneumatic positioning system using biosignals	75
3.3.1. Bioelectric signals	75
3.3.2. Test stand	77
3.3.3. Position control results	81

4. BIOINSPIRED PNEUMATRONICS – ARTIFICIAL ARM ACTUATED BY PNEUMATIC MUSCLE ACTUATORS	84
4.1. Hill-based muscle models	84
4.2. Models of pneumatic muscle actuators	89
4.2.1. Static model of pneumatic muscle actuator	91
4.2.2. Biomimetic model of pneumatic muscle actuator	97
4.3. Model of elbow joint actuated by pneumatic muscle actuators	100
5. MEASUREMENT EQUIPMENT – LEAKAGE FLOW RATE MEASUREMENT IN COMPRESSED AIR PIPELINE	107
5.1. Estimating potential energy saving in compressed air systems	107
5.1.1. Energy saving in compressed air systems	107
5.1.2. Methods to calculate the cost of compressed air	110
5.2. Indirect method of leakage flow rate measurement in compressed air pipelines	117
5.2.1. Measurement method	117
5.2.2. Measurement results	122
5.2.3. Leak test instrument LT-I 200	125
References	128
Summary	135
Streszczenie	135

REFERENCES

Chapter 1

- [1.1] Backé W.: *Grundlagen der Pneumatik*, „Umdruck zur Vorlesung“, RTWH, Aachen 1994.
- [1.2] Beater P.: *Pneumatic Drives. System Design, Modelling and Control*, Springer-Verlag, Berlin 2007.
- [1.3] Croser P., Ebel F.: *Pneumatic. Basic level*, Festo Didactic, Denkendorf 2000.
- [1.4] *Hydraulika i pneumatyka. Podręcznik akademicki*, pod red. Dindorfa R., Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2003.
- [1.5] Dindorf R.: *Distributed measurements and control systems for rapid prototyping controllers of fluid power drives*, „Pomiary – Automatyka – Kontrola” 2008, 5.
- [1.6] Dindorf R.: *Fluid power control systems. Academic textbook*, Projekt „Politechnika Świętokrzyska – uczelnia na miarę XXI w.”, Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Kielce 2011.
- [1.7] Dindorf R.: *Napędy pływowe. Postawy teoretyczne i metody obliczania napędów hydrostatycznych i pneumatycznych. Podręcznik akademicki*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2009.
- [1.8] Dindorf R.: *Elastyczne aktulatory pneumatyczne*, monografia M55, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013.
- [1.9] Ebel F., Haser J.: *Pneumatische Antriebe*, Festo Didactic, Denkendorf 2008.
- [1.10] *Improving Compressed Air System Performance a sourcebook for industry*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Washington, DC, 2003.
- [1.11] Jakubaschke O.: *Grundlagen der Pneumatik*, Krausskopf Verlag, Mainz 1978.
- [1.12] *Pneumatic Systems. Basics, Components, Circuits and Cascade Design*, <<http://forums.hydraulicspneumatics.com>>.
- [1.13] *Pneumatic systems. Technological Studies*, <<http://resources.hkedcity.net>>.
- [1.14] Ruppelt E.: *Druckluft-Handbuch*, Vulkan-Verlag, Essen 1998.
- [1.15] Stoll K.: *Pneumatische Steuerungen*, Vogel Fachbuch, Würzburg 1999.
- [1.16] *System Design, Modelling and Control. Directional control valves*, <<http://www.globalspec.com>>.
- [1.17] Takosoglu J.: *Poradnik konstruktora maszyn i urządzeń: konstrukcja maszyn, materiałoznawstwo, normalizacja, wzory i obliczenia*, pod red. Kubalskiego A., Verlag Dashöfer, 2008.
- [1.18] *The Norgren Guide to Specifying Pneumatic Actuators*, Norgren, Lichfield (UK), 2010.

Chapter 2

- [2.1] Olszewski M.: *Sterowanie pozycyjne pneumatycznego napędu siłowego*, Prace Naukowe – Mechanika, z. 191, OWPW, Warszawa 2002.
- [2.2] *Positioning system. Smart Positioning Controller SPC200-Manual*, FESTO, 1999.
- [2.3] Takosoglu J.: *Poradnik konstruktora maszyn i urządzeń: konstrukcja maszyn, materiałoznawstwo, normalizacja, wzory i obliczenia*, pod red. Kubalskiego A., Verlag Dashöfer, 2008.
- [2.4] Takosoglu J., Dindorf R., Łaski P.: *Pneumatic positioning system of electro-pneumatic servo-drive* [in:] *Transfer of innovation to the interdisciplinary teaching of mechatronics for the advanced technology needs*, ed. by Macha E., Robak G., 2009.
- [2.5] Yager R.R., Filev D.P.: *Podstawy modelowania i sterowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [2.6] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [2.7] Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
- [2.8] Takosoglu J.E., Dindorf R.F., Łaski P.A., *Rapid prototyping of fuzzy controller pneumatic servo-system*, “International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2009, 40(3–4), pp. 349–361.
- [2.9] Takosoglu J., Dindorf R., Łaski P. et al., *Positioning of electro-pneumatic servo-drive with direct displacement and velocity transducer*, “Acta Mechanica et Automatica” 2010, 4(1), pp. 86–91.
- [2.10] Takosoglu J.E., Dindorf R.F., Łaski P.A., *Fuzzy logic positioning system of electro-pneumatic servo-drive* [in:] *Robot Manipulators, Trends and Development*, ed. by Jimenez A., Al Hadithi B.M., In-Tech, Croatia 2010, pp. 298–320.
- [2.11] Takosoglu J.E., Łaski P.A., Blasiak S., *A fuzzy logic controller for the positioning control of an electro-pneumatic servo-drive. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I, “Journal of Systems and Control Engineering”*, 226(10), pp. 1335–1343.

Chapter 3

- [3.1] *Brain Wave Signal (EEG)*, NeuroSky, 2009.
- [3.2] *Catalogue: Axis controllers SPC200*, Festo, 2014.
- [3.3] Charfi W., Masmoudi M., Derbel F.: *A layered model for wireless sensor networks Systems*, SSD’2009 – Systems, Signals and Devices, 6th International Multi-Conference.
- [3.4] Dindorf R., Mazur S., Woś P.: *Serwonapęd elektropneumatyczny sterowany biosygnalami*, „Hydraulika i Pneumatyka” 2013, 3.

- [3.5] Dindorf R., Woś P.: *Wireless remote control of electro-pneumatic positioning system*, "Hidraulica" 2015, No. 2.
- [3.6] Dindorf R., Woś P.: *Brain computer interface for wireless remote control*, MCSB'2015 – International Conference Cybernetic Modelling of Biological Systems, 14–15 May 2015 Kraków, DOI: 10.1515/bams-2015-0011.
- [3.7] Dye M., McDons R., Ruff A.: *Network Fundamentals. CCNA Exploration Companion Guide*, Cisco Press, Indianapolis (Indiana) 2008.
- [3.8] Fairclough S.H., Gilleade K., Nack L.E., Mandryk R.L.: *Brain and body interfaces: Designing for meaningful interaction*, The ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Vancouver 2011.
- [3.9] Gnanayutham P., George J.: *Inclusive design for Brain Body Interfaces* [in:] *Foundations of Augmented Cognition*, ed. by Schmorow D.D., Reeves L.M., Springer Verlag, 2007.
- [3.10] Hagedoorn H.: *OCZ NIA Review – Neural impulse actuator*, available at: <<http://www.guru3d.com/articles-pages/ocz-nia-review-neural-impulse-actuator,1.html>>.
- [3.11] Kaniusas E.: *Biomedical Signals and Sensors I. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*, Springer Verlag, Berlin 2012.
- [3.12] Lewis W.: *LAN Switching and Wireless. CCNA Exploration Companion Guide*, Cisco Press, Indianapolis (Indiana) 2008.
- [3.13] Mazur S., Dindorf R., Woś P.: *Wireless control of the electro-pneumatic servo drive* [in:] *Information Systems Architecture and Technology. System Analysis Approach to the Design, Control and Decision Support*, Wrocław 2012.
- [3.14] Mazur S., Dindorf R., Woś P.: *System komunikacji bezprzewodowej w sterowaniu serwonapędów elektropneumatycznych*, „Pneumatyka” 2012, 2.
- [3.15] Mazur S., Dindorf R., Woś P.: *Control of the electro-pneumatic servo drive using biosignals*, "Hydraulika a Pneumatika" 2013, No. 1–2, Slovakia.
- [3.16] Mazur S., Dindorf R., Woś P.: *Remote control of the electro-pneumatic servo drive using biosignals*, "Technical Transactions, Mechanics", Z. 1-M, 2013.
- [3.17] Meyer D.: *TCP/IP versus OSI*, "Journals & Magazines" 1990, Vol. 9.
- [3.18] Mindang B.: *Core Technology and Analysis of 802.11N*, ICEICE'2011 – International Conference on Electric Information and Control Engineering IEEE, 2011.
- [3.19] Peltron Katalog, <http://www.peltron.pl/przetworniki_przemieszczen1-ang.html>.
- [3.20] Prede G., Schulz D.: *Servopneumatics*, Festo, Denckendorf 2002.
- [3.21] Reynolds B., Waechter A.: *Brain computer interfacing using the Neural Impulse Actuator. A usability and statistical evaluation*. California Polytechnic State University, 2009.
- [3.22] *SMC Electro Pneumatic Proportional Valve*, series VEP.
- [3.23] *Technical product documentation of the positioner Type A706*, Controlmatica ZAP-PNEFAL.

Chapter 4

- [4.1] Caldwell V., Tsagarakis V.: *Biomimetic actuators in prosthetic and rehabilitation applications*, "Technology and Health Care" 2002, No. 10.
- [4.2] Dindorf R.: *Static and dynamic models of pneumatic muscle actuator*, Proc. The 18th International Conference on Hydraulics and Pneumatics, 30.09.–01.10.2003 Prague (Czech Republic),
- [4.3] Dindorf R.: *Modelling of artificial musculotendon system using pneumatic actuators*, "Bio-Algorithms and Med-Systems" 2005, Vol.1, No.1/2.
- [4.4] Dindorf R.: *Virtual model of bionic arm actuated by pneumatic muscle actuator*, „Pneumatyka” 2007, 1.
- [4.5] Dindorf R.: *Napędy płynowe. Postawy teoretyczne i metody obliczania napędów hydrostatycznych i pneumatycznych. Podręcznik akademicki*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2009.
- [4.6] Dindorf R.: *Models of artificial arm actuated by pneumatic muscle actuators*, "Bio-Algorithms and Med-Systems" 2010, Vol. 6, No. 12.
- [4.7] Dindorf R.: *Modelling of artificial arm actuated by pneumatic muscle actuators*, "International Journal of Applied Mechanics and Engineering" 2010, Vol. 15, No. 3.
- [4.8] Dindorf R.: *Elastyczne aktulatory pneumatyczne*, monografia M55, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013.
- [4.9] Hill A.V.: *The heat of shortening and the dynamic constants of muscle*, Proc. R. Soc. London B 126, 1938.
- [4.10] Gerschutz M.J.: *Dynamic pneumatic muscle actuator control system for an augmented orthosis*, doctor thesis, Wright State University, Dayton-Ohio (USA) 2008.
- [4.11] Katalog Fluidic Muscle DMSP/MAS, <<https://www.festo.com>>.
- [4.12] Katalog Shadow Air Muscle. Shadow Robot Company, <<http://www.shadowrobot.com>>.
- [4.13] Klute G.K., Czerniecki, J.M., Hannaford B.: *Artificial muscles: actuators for biorobotic systems*, "International Journal of Robotics Research" 2002, No. 4.
- [4.14] Mountjoy K.: *Use of a Hill-based muscle model in the fast orthogonal search method to estimate wrist force and upper arm physiological parameters*, master thesis, Queen's University Kingston, Ontario (Canada) 2008.
- [4.15] Phillips C.A., Repperger D.W., Neidhard-Doll A.T., Reynolds D.B.: *Biomimetic model of skeletal muscle isometric contraction: I. An energetic-viscoelastic model for the skeletal muscle isometric force twitch*, "Research" 2005, Vol. 24, No. 4, University of Nebraska, Lincoln.
- [4.16] Reynolds D.B., Repperger D.W., Phillips C.A., Bandry G.: *Modeling the dynamic characteristics of pneumatic muscle*, "Annals of Biomedical Engineering", 31.
- [4.17] Smagt P., Groen F., Schulten K., *Analysis and control of a rubber-tuator arm*, Biol. Cybernetics, Vol. 75, 2003.

- [4.18] Shin D., Khatib O., Cutkosky M.: *Design methodologies of the hybrid actuation approach for human-friendly robot*, Proc. IEEE international conference on Robotics and Automation, 12–17 May 2009, Kobe (Japan).
- [4.19] Zalahak G.I.: *Modeling muscle systems and energetics* [in:] *Multiple Muscle Systems. Biomechanics and Movement Organization*, ed. by Winters J.M., Woo S., Springer-Verlag, New York, 1990.

Chapter 5

- [5.1] Bertoldi P., Elle M.: *The European Motor Challenge Programme Catalogue 2003 to 2009*. European Commission, DG JRC, Institute for Energy, Brussels 2009.
- [5.2] Bhatia A.: *Compressors and Compressed Air Systems*, “Continuing Education and Development”, New York (USA).
- [5.3] Compressed Air Compendium – Boge Compressed Air Systems. <<http://www.boge.com>>.
- [5.4] Dindorf R.: *Energooszczędne sterowanie układami pneumatycznymi*, „Pneumatyka” 2007, 2.
- [5.5] Dindorf R.: *Ocena możliwości oszczędzania energii w systemach sprężonego powietrza*, „Energetyka” 2010, 1.
- [5.6] Dindorf R.: *Możliwości oszczędzania energii w systemach sprężonego powietrza*, „Napędy i Sterowanie” 2010,10.
- [5.7] Dindorf R.: *Estimating potential energy savings in compressed air systems*, “Procedia Engineering” 2012, No. 39C.
- [5.8] Dindorf R., Woś P.: *Measurement methods of compressed air leakage for pneumatic system*, “Hydraulica a Pneumatica” 2012, 3.
- [5.9] Dindorf R., Woś P., Mazur S.: *Pośrednie metody pomiaru przecieków sprężonego powietrza*, „Hydraulika i Pneumatyka” 2012, 3.
- [5.10] Dindorf R., Mazur S., Woś P.: *Nowe metody pomiaru przecieku w systemach sprężonego powietrza*, „Pomiary – Automatyka – Kontrola” 2013, 6.
- [5.11] Dindorf R., Woś P.: *Przetworniki i układy pomiarowe w systemach hydraulicznych i pneumatycznych*, monografia M63, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2014.
- [5.12] Dindorf R., Woś P.: *Metoda pośrednia pomiaru przecieku w instalacji sprężonego powietrza*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 38, 2014.
- [5.13] Dindorf R., Woś P.: *Indirect method of leakage flow rate measurement in compressed air pipelines*, “Applied Mechanics and Materials”, Trans Tech Publications, Vol. 630, Switzerland 2014, <10.4028/www.scientific.net/AMM.630.288>.
- [5.14] Dindorf R., Woś P.: *Mobilne urządzenie do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacjach sprężonego powietrza*, „Hydraulika i Pneumatyka” 2015, 4.
- [5.15] *Estimate Your Compressed Air Cost*. US DOE – Industries of the Future Workshops Supplemental Worksheet, Illinois Industries of the Future Program, Chicago (USA).

- [5.16] Kaya K., Phelan P., Chau D., Sarac HI: *Energy conservation in compressed-air systems*, “International Journal of Energy Research” 2002, No. 26.
- [5.17] Marshall R.: *Compressed Air System Leaks. Best Practices to Compressed Air. Compressed Air Challenge*, US DOE.
- [5.18] Radgen P., Blaustein E.: *Compressed Air Systems in the European Union*, Fraunhofer ISI, Feldbach 2010.
- [5.19] *The European Motor Challenge Programme. Compressed Air Systems Module*, European Commission, Directorate-General Energy and Transport, Brussels 2003.

DEVELOPMENT OF PNEUMATIC CONTROL SYSTEMS

Summary

The monograph consists of five independent chapters presenting concisely a wide range of knowledge relating to the development of the pneumatic control systems. The individual chapters devoted to the conventional pneumatic control systems, design and control of pneumatic servo-systems, wireless remote control of pneumatic systems, bioinspired pneumatronics and automatic measurement of leakage flow rate in compressed air pipeline contain the results of the research conducted by the authors. The result of research the positional control of pneumatic servo drives and wireless remote control of pneumatic positioning systems using biosignals are given. They also deal with artificial arm actuated by pneumatic muscle actuators and the measurement equipment of leakage flow rate in compressed air pipeline.

ROZWÓJ PNEUMATYCZNYCH SYSTEMÓW STEROWANIA

Streszczenie

Monografia składa się z pięciu niezależnych rozdziałów prezentujących zwięźle szeroki zakres wiedzy dotyczącej rozwoju pneumatycznych systemów sterowania. Poszczególne rozdziały dotyczące konwencjonalnych pneumatycznych systemów sterowania, projektowania i sterowania systemów serwopneumatycznych, zdalnego bezprzewodowego sterowania systemów pneumatycznych, bioinspirowanej pneumatroniki i automatycznego systemu pomiarowego natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza zawierają wyniki badań prowadzonych przez autorów. Zaprezentowano wyniki badań sterowania pozycyjnego serwonapędów pneumatycznych, bezprzewodowe zdalnego sterowania pozycyjnego systemu pneumatycznego z użyciem biosygnali, sztucznego ramienia uruchamianego pneumatycznymi aktuatorami mięśniowymi i urządzenia pomiarowego natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza.