

ANALYTICAL MODELING, RESEARCH AND CONTROL OF PHYSICAL LABORATORY FESTO-MODEL INSTALLATION OF TECHNOLOGY-part 2 (synthesis)

АНАЛИТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ФИЗИЧЕСКИ ЛАБОРАТОРЕН FESTO-МОДЕЛ НА ТЕХНОЛОГИЧНА ИНСТАЛАЦИЯ-част 2 (синтез на управление)

Emil Nikolov, Nina Nikolova, Boris Grasiani

Technical University Sofia; 8, Kliment Ohridski str., Sofia-1000, Bulgaria, FA, DIA
 nicoloff@tu-sofia.bg; ninan@tu-sofia.bg; bgrasiani@tu-sofia.bg

Abstract: The work proposed analytical modeling the processes in laboratory pneumatic FESTO-model. The characteristics of the proposed analytical model are simulated and analyzed. Systems for control of laboratory installation are synthesized. Designing control systems are modeled and their performance is analyzed. Is confirmed and proven their efficiency.

Keywords: analytical modeling, analysis of the characteristics, synthesis of control systems and analysis of performance

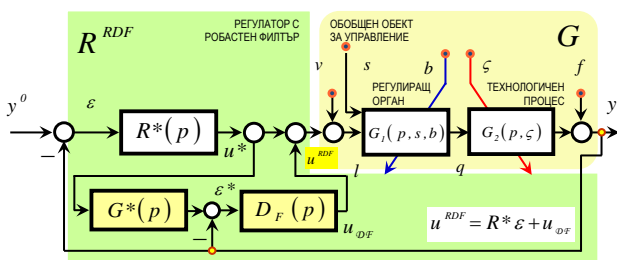
ВЪВЕДЕНИЕ

Настоящата разработката е представена в две неразделни части. Първата представя резултатите от моделирането и анализа на *FESTO*-модела. Настоящата е втората част, в която целта е синтезът на системи за управление на *FESTO*-модела. Решени са задачите за: проектиране на системи за управление, анализа на тяхното качество.

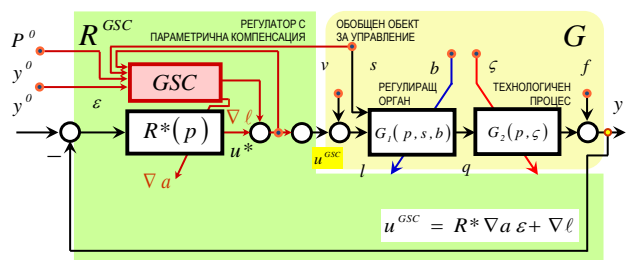
КОНФИГУРАЦИИ НА СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЛАБОРАТОРЕН FESTO-МОДЕЛ

Известни са [14] *RDF*-системите за управление с условна обратна връзка (фиг.2) и *GSC*-системите с параметрична компенсация (фиг.3). Те се отличават от класическите системи с *PID*-регулатор [16] ÷ [22], [26] по структурните разширения с номинален модел G^* и робастен филтър D_F (фиг.2) или по наличието на *GSC*-алгоритмичен модул, формиращ компенсационните променливи $\nabla \ell$ и ∇a . Ефективното противодействие на вътрешни структурно-параметрични смущения ζ на робастните *RDF*-системи с вътрешен номинален модел G^* на обекта G

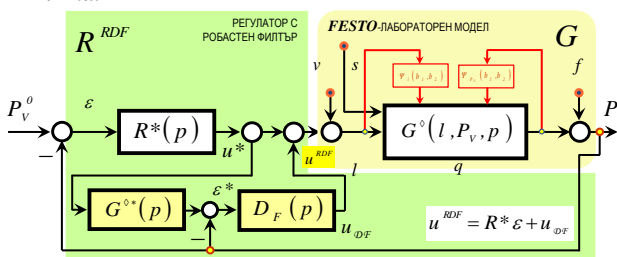
и условна обратна връзка се основава [24] на тяхната конфигурация (фиг.2) с допълнителна адитивна съставяща u_{DF} към u^* . Те съдържат *базов регулатор* $R^* \Leftrightarrow G^*$ (настроен оптимално за априори известния G^* при локален критерий за качество $\sigma = const$) и *робастен D_F -филтър*. Последният формира допълнителната съставяща u_{DF} в управлението u^{RDF} (21). Проектирането на *RDF*-системите се свежда основно до синтеза на *робастните D_F -филтри*. В [14] са представени методи и алгоритми за аналитичен синтез на *D_F -филтрите* (22). Аналитичният им синтез се основава на метода на *балансираното уравнение на устойчивостта* при критерий за оптималност *робастна устойчивост и минимално отклонение от номиналната траектория на параметрически несмутената система*, където G^* (21) е смутеният на най-горна граница модел на обекта G , а R^* (22), (23) е съставен на R^{RDF} алгоритъм.



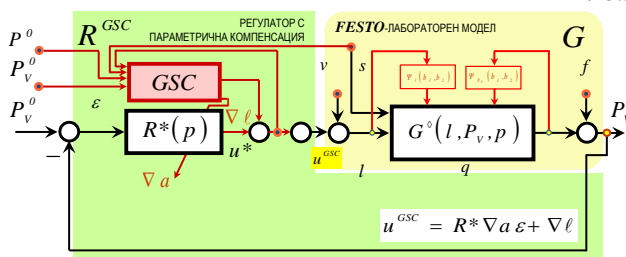
Фиг.12.а.



Фиг.13.а.



Фиг.12.б.



Фиг.13.б.

$$u^{RDF} = u^* + u_{\mathcal{D}_F} = R^* (1 + G^* D_F) y^0 - (R^* (1 + D_F) + \mathcal{D}_F) y = R^* \varepsilon + u_{\mathcal{D}_F} , \quad (21)$$

$$D_F (p) = u_{\mathcal{D}_F} (p) (\varepsilon^* (p))^{-1} = - (R^\# (p) - R^* (p)) (1 + R^* (p) G^* (p))^{-1} , \quad (22)$$

$$R^* (p) \underset{\{\sigma=const\}}{\Leftrightarrow} G^* (p) ; \quad R^\# (p) \underset{\{\sigma=const\}}{\Leftrightarrow} G^\# (p) , \quad (23)$$

$$G^\# (p) = G^* (p) + \Delta G (p) . \quad (24)$$

Алгоритъмът за управление с параметрична компенсация R^{GSC} (фиг.3) реализира [14] с базов регулатор R^* (25) ефективно управление u^{GSC} (26) с помощта на компенсационните променливи $\nabla \ell$ и ∇a при флукутации на ζ , s , b . Първата от тях се определя (синтезира) като решение на *°компенсационното уравнение на параметричния баланс°* (27) при критерий *°постоянна стойност на предавателния коефициент по разход κ_q °* (28) на обобщения обект G . Променливата $\nabla \ell$ е показана с (29), а нейните конкретни стойности, определящи се от вида на PO (линеен или логаритмичен), са показани съответно с (30) и (31). Използвани са следните означения в (27) ÷ (31): k_{s_o} ; k_{l_o} - априори известни предавателни коефициенти на PO в номинална работна точка; P^0 , P_1 , P_2 - достъпни за непрекъснато измерване стойности на работни налягания на флуида през PO , определящи текущата стойност на хидродинамичното натоварване на PO s (32). Втората компенсационна променлива ∇a в структурата на R^{GSC} се определя (синтезира) по (33) като текущо решение на критерия за *°постоянна стойност на*

предавателния коефициент k_y на обекта° (34) на обобщения обект G .

СИНТЕЗ НА СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЛАБОРАТОРЕН *FESTO*-МОДЕЛ

За автоматичното управление на основната регулируема величина P_v на физическия лабораторен *FESTO*-модел на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация, илюстриран с номиналния G^{0*} и смутения на най-горна граница $G^{0\#}$ аналитични модели (35), (36), са синтезирани:

- класическа *PID*-система с регулатор R^* (37);
- робастна *RDF*-система с условна обратна връзка (фиг.12.b) с управление u^{RDF} (21), конфигурирана с R^* (37), $R^\#$ (38) и робастен филтър D_F (39);
- параметрически компенсационна *GSC*-система за управление (фиг.13.b) с u^{GSC} (26), конфигурирана с базов регулатор R^* (37) и компенсационни променливи $\nabla \ell$, ∇a (40).

$$R^* (p) \underset{\{\sigma=const\}}{\Leftrightarrow} G^* (p) , \quad (25)$$

$$u^{GSC} = R^* \nabla a \varepsilon + \nabla \ell , \quad (26)$$

$$(k_{l_o} (\Delta l + \nabla \ell) + k_{s_o} (\Delta s + \nabla s)) / dl = (k_{l_o} \Delta l + k_{s_o} \Delta s) / dl , \quad (27)$$

$$\kappa_q (\nabla \ell) = (\partial q / \partial l) \Delta l + (\partial q / \partial s) \Delta s = const , \quad (28)$$

$$\nabla \ell = - k_{s_o} k_{l_o}^{-1} \nabla s , , \quad (\nabla s = s_{i-1} - s_i) , \quad (29)$$

$$\nabla \ell_{lin} = 0,5 (l^{-2} - 1) l^3 s^{-1} \nabla s , \quad (30)$$

$$\nabla \ell_{log} = 0,5 (e^{2n(l-1)} - 1) (n s e^{2n(l-1)})^{-1} \nabla s , \quad (31)$$

$$s = (1 + (P^0 - P_1) (P_1 - P_2)^{-1})^{-1} , \quad (\nabla s = s_{i-1} - s_i) , \quad (32)$$

$$\nabla a = (dy/dl)^{-1} \approx (\Delta y / \Delta l)^{-1} , \quad (\Delta y = y_{i-1} - y_i ; \Delta l = l_{i-1} - l_i) , \quad (33)$$

$$k_y (\nabla a) = (\partial y / \partial l) \Delta l + (\partial y / \partial s) \Delta s = const , \quad (34)$$

$$G^{0*} = 0,4 (0,5 p + 1)^{-1} , (s^* = 0,00315 = const) , \quad (35)$$

$$G^{0\#} = 0,725 (1,3125 p + 1)^{-1} , (s^\# = 0,085 = const) , \quad (36)$$

$$R^* = 8 (0,3125 p + 1) (0,3125 p)^{-1} (0,5 p + 1) (0,01 p + 1)^{-1} , (R^* \underset{\{\sigma=const\}}{\Leftrightarrow} G^{0*}) , \quad (37)$$

$$R^\# = 12 (0,9125 p + 1) (0,9125 p)^{-1} (0,5 p + 1) (0,01 p + 1)^{-1} , (R^\# \underset{\{\sigma=const\}}{\Leftrightarrow} G^{0\#}) , \quad (38)$$

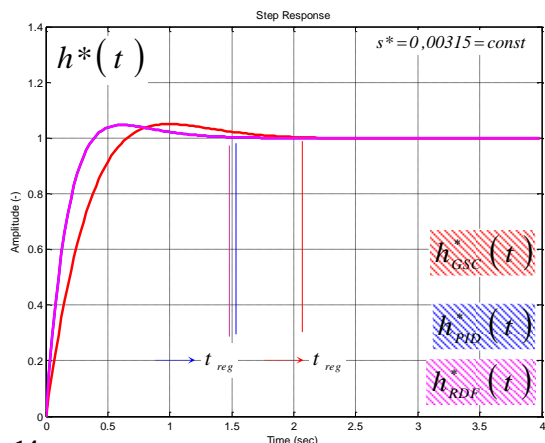
$$D_F = - (R^\# (p) - R^* (p)) (1 + R^* (p) G^{0*} (p))^{-1} , \quad (39)$$

$$\nabla \ell_i = -0,5 (l^{-2} - 1) l^3 s^{-1} \nabla s_i ; \quad \nabla a_i = c_o^* (d y_i / d \ell_i)^{-1} , \quad (40)$$

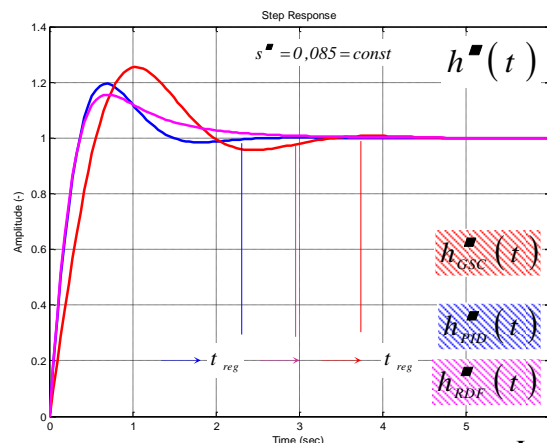
АНАЛИЗ НА КАЧЕСТВОТО В НОМИНАЛЕН И СМУТЕН ПАРАМЕТРИЧЕН РЕЖИМ

Проектираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи (37) ÷ (40) за управление на *FESTO*-модела на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация са моделирани. Резултатите от симулацията на моделите - времевите и честотните характеристики за затворените (h_i) и за отворените (W_i) *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи са показани на фиг.14, фиг.15. Те са визуализирани в номинален (35) параметричен режим ($G \hat{=} G^{0*}$) и в смутен параметричен режим (36) ($G \hat{=} G^{0\#}$). Използвани са следните:

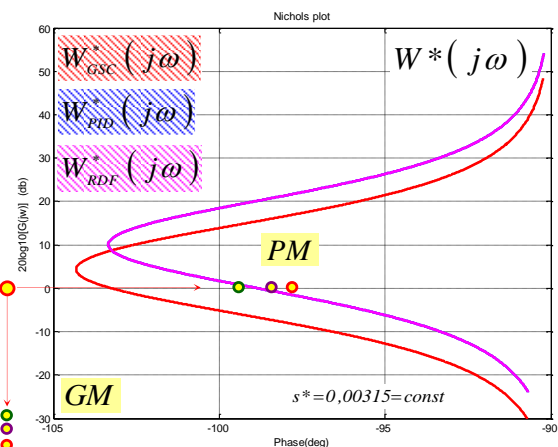
- индекси за системите: класическа *PID*-система, робастна *RDF*-система с условна обратна връзка (фиг.12), па-



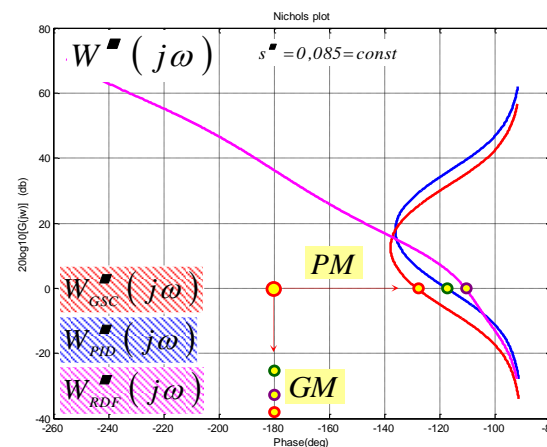
Фиг.14.a.



Фиг.14.b.



Фиг.15.a.



Фиг.15.b.

РОБАСТЕН АНАЛИЗ

Изследвано е влиянието на априорната неопределеност върху устойчивостта на проектираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи в предварително указан диапазон на репараметризация и/или на реструктуриране в модела на управлявания обект. В изследването са използвани следните методи за робастен анализ.

- **Метод на честотния Nyquist-анализ** по характеристиките на отворените системи, резултатите от които са представени на фиг.16. В този случай анализираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи са с робастна устойчивост *RS* за целия диапазон Π (41) на вариациите ΔG , тъй като множеството $\pi(j\omega)$ (42) (визуализирано като кръг с окръжност π^0 (41)), не обхваща $(-1, j0)$ точката за нито една стойност на честотата ω в диапазона $\omega \in [0, \infty)$. Това е възможно само в случаите, за които разстоянието от коя и да е точка $\omega = \omega_i$ на $\pi(j\omega)$, определено с

раметрически компенсационната *GSC*-система (фиг.13),

- означения: h_i - преходни функции на затворените, W_i - честотни характеристики на отворените системи.

Анализът на качеството в номинален (фиг.14 и фиг.15) **параметричен режим** потвърждава, че *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системите:

- удовлетворяват критерия за **критично аperiодичен процес** (σ), като е предоставена възможност да се отчетат графически времената за регулиране t_{reg} , определящи бързодействието (фиг.14);

- са устойчиви, като е предоставена възможност да се отчетат графически запасите им по модул и по фаза (фиг.15);
- удовлетворяват предявените изисквания за качество в задачата за синтез.

$|1 + G(\omega_i)R(\omega_i)|$, до точката $(-1, j0)$ е по-голямо от радиуса $r^0(\omega_i)$ (43). Необходимите и достатъчни условия за постигане на робастна устойчивост *RS* (45) на *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи са изпълнени. Определени са:

- запасите на робастна устойчивост (фиг.18) k_{MSOL} (46)
- запасите на робастно качество (фиг.19) k_{MPOL} (47) на анализираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи, където функциите чувствителност e и допълнителна чувствителност η на системите са показани с (48) и (49), а v (50) е интегралното обобщено смущение.

- **Метод за робастен анализ по характеристиките на чувствителността** (48) на затворените (фиг.17) системи. Анализираните системи са робастно устойчиви *RS* и с робастно качество *RP*, тъй като са изпълнени изискванията (51), (52).

$$\Pi(j\omega) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta G(j\omega): |G^\diamond(j\omega) - G^{\diamond*}(j\omega)| \leq \bar{\ell}_a(\omega), (\omega \in [0; \infty)) \\ \Delta G(j\omega): |G^\diamond(j\omega) - G^{\diamond*}(j\omega)| |G^{\diamond*}(j\omega)|^{-1} \leq \bar{\ell}_m(\omega), (\bar{\ell}_m(\omega) = \bar{\ell}_a(\omega) |G^{\diamond*}(j\omega)|^{-1}) \end{array} \right\} \quad (41)$$

$$\pi(j\omega) \in W(j\omega), (\omega \in [0; \infty)) \quad (42)$$

$$r^o(\omega_i) = |l_a(\omega_i)R(\omega_i)| = |l_m(\omega_i)R(\omega_i)G^{\diamond*}(\omega_i)| \quad (43)$$

$$\pi^o(j\omega) = \left\{ \begin{array}{l} Re^o(\omega_i) = Re^*(\omega_i) + r(\omega_i) \cos \Omega, (\Omega \in [0, \infty)) \\ Im^o(\omega_i) = Im^*(\omega_i) + r(\omega_i) \sin \Omega, (\Omega \in [0, \infty)) \end{array} \right\} \quad (44)$$

$$RS(\omega) \Rightarrow |1 + G^{\diamond*}(\omega)R(\omega)| > |G^{\diamond*}(\omega)R(\omega)| \bar{\ell}_m(\omega), (\forall \omega, \omega \in [0, \infty)) \quad (45)$$

$$k_{MSOL}(\omega) = r^o(\omega) |1 + R(j\omega)G^*(j\omega)|^{-1} \leq 1, (\forall \omega, \omega \in [0, \infty)) \quad (46)$$

$$k_{MPOL}(\omega) = (|1 + R(j\omega)G^*(j\omega)| - r^o(\omega)) |1 + R(j\omega)G^\blacksquare(j\omega)|^{-1} \leq 1, (\forall \omega, \omega \in [0, \infty)) \quad (47)$$

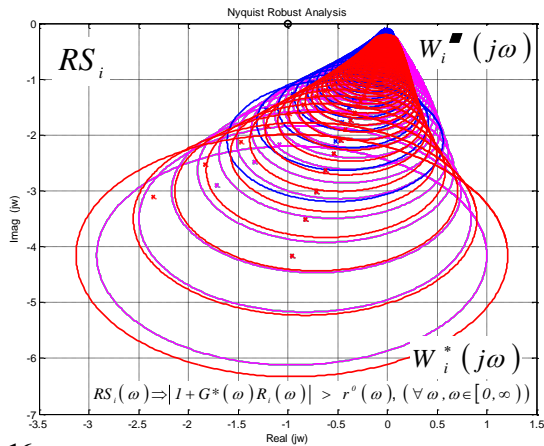
$$e(\omega) = (1 + R^*(\omega)G^{\diamond*}(\omega))^{-1} \equiv \Phi_{y^o_e}(\omega), (e(\omega) = 1 - \eta(\omega)) \quad (48)$$

$$\eta(\omega) = R^*(\omega)G^{\diamond*}(\omega)(1 + R^*(\omega)G^{\diamond*}(\omega))^{-1} \equiv \Phi_{y^o_y}(\omega), (\eta(\omega) = 1 - e(\omega)) \quad (49)$$

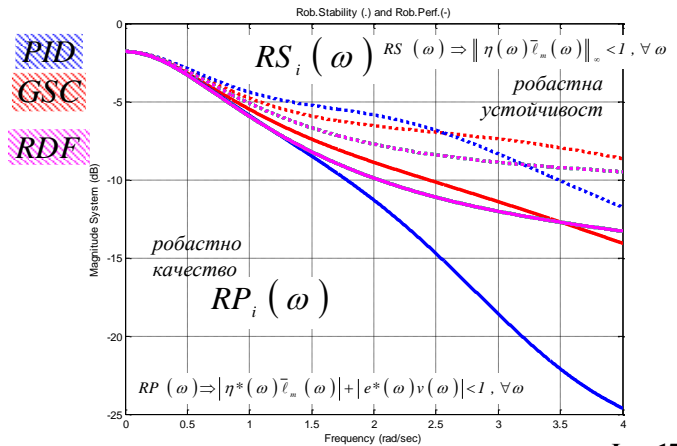
$$v = v(v, \xi, f) \quad (50)$$

$$RS(\omega) \Rightarrow \|\eta(\omega)\bar{\ell}_m(\omega)\|_\infty < 1, (\forall \omega, (\omega \in [0; \infty)) \quad (51)$$

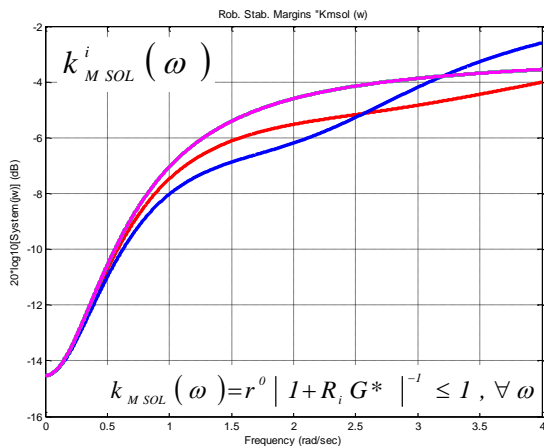
$$RP(\omega) \Rightarrow |\eta^*(\omega)\bar{\ell}_m(\omega)| + |e^*(\omega)v(\omega)| < 1, (\forall \omega, (\omega \in [0; \infty)) \quad (52)$$



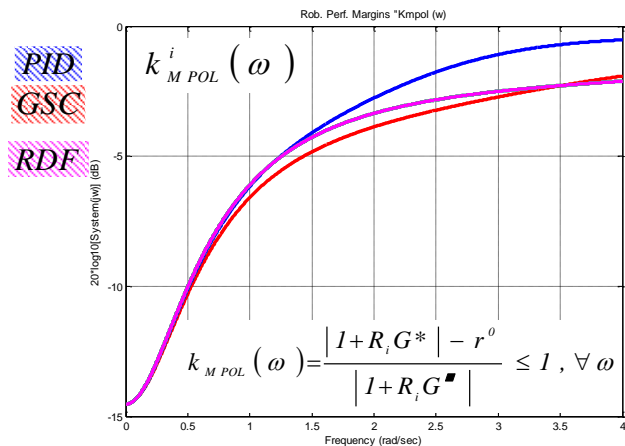
Фиг.16.



Фиг.17.



Фиг.18.



Фиг.19.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведеното изследване потвърждават ефективността на синтезираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи за управление на физическия лабораторен *FESTO*-модел на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация.

Анализът на качеството в номинален и в смутен параметричен режим, както и робастният анализ на качеството в условията на априорна неопределеност са доказателство за ефективността на синтезираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи.

Новото и оригинално, представено в разработката, се определя с това, че:

- е предложено аналитично и структурно описание на процесите в лабораторния физически *FESTO*-модел на технологична въздухоподготвителна пневматична инсталация, което се характеризира със *структурна зависимост по входната променлива l и по изходната променлива P_v* , нестационарно диференциално уравнение (16), нестационарна предавателната функция (17);
- са проектирани *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи за управление на физическия лабораторен *FESTO*-модел;
- е анализирано качеството в номинален и смутен параметричен режим на проектираните системи;
- са доказани робастните свойства на проектираните *PID*-, *RDF*-, *GSC*-системи за управление на физическия лабораторен *FESTO*-модел.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Hamzehloo, P.G. Aleiferis (2016), *Gas dynamics and flow characteristics of highly turbulent under-expanded hydrogen and methane jets under various nozzle pressure ratios and ambient pressures*, International Journal of Hydrogen Energy, © 2016 Elsevier B.V., ISSN: 0360-3199, 41 (2016) 6544-6566
- [2] Ahmad Athif Mohd Faudzi, Khairuddin bin Osman, M.F. Rahmat, Numan Din Mustafa, M. Asyraf Azman, Koichi Suzumori (2012), *Controller Design for Simulation Control of Intelligent Pneumatic Actuators (IPA) System*, Procedia Engineering, © 2012 Elsevier B.V., ISSN: 1877-7058, 41 (2012) 593-599
- [3] Andrew Parr (2011), *Actuators, Chapter 5 in Hydraulics and Pneumatics*, © 2011 Elsevier B.V., doi:10.1016/B978-0-08-096674-8.00005-7, pp. 117-147
- [4] Andrew Parr (2011), *Air Compressors, Air Treatment and Pressure Regulation, Chapter 3 in Hydraulics and Pneumatics*, © 2011 Elsevier B.V., doi:10.1016/B978-0-08-096674-8.00003-3, pp. 51-73
- [5] Andrew Parr (2011), *Control Valves, Chapter 4 in Hydraulics and Pneumatics*, © 2011 Elsevier B.V., doi:10.1016/B978-0-08-096674-8.00004-5, pp. 117-147
- [6] Andrew Parr (2011), *Fundamental Principles, Chapter 1 in Hydraulics and Pneumatics*, © 2011 Elsevier B.V., doi:10.1016/B978-0-08-096674-8.00001-X, pp. 1-29
- [7] Andrew Parr (2011), *Hydraulic Pumps and Pressure Regulation, Chapter 2 in Hydraulics and Pneumatics*, © 2011 Elsevier B.V., doi:10.1016/B978-0-08-096674-8.00002-1, pp. 31-49
- [8] Andrew Parr (2011), *Process Control Pneumatics, Chapter 7 in Hydraulics and Pneumatics*, © 2011 Elsevier B.V., doi:10.1016/B978-0-08-096674-8.00007-0, pp. 169-188
- [9] Anton Strahilov, Felix Damrath (2015), *Simulation of the behavior of pneumatic drives for virtual commissioning of automated assembly systems*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, © 2015 Elsevier, ISSN: 0736-5845, 36 (2015) 101-108
- [10] Felix Damrath, Anton Strahilov, Thomas Bär, Michael Vielhaber (2015), *Experimental Validation of a Physics-based Simulation Approach for Pneumatic Components for Production Systems in the Automotive Industry*, Procedia CIRP, © 2015 Elsevier, ISSN: 1877-7058, 31 (2015) 35-40
- [11] Ingenuin Gasser, Martin Rybicki (2013), *Modelling and simulation of gas dynamics in an exhaust pipe*, Applied Mathematical Modelling, © 2013 Elsevier B.V., ISSN: 0307-904X, 37 (2013) 2747-2764
- [12] Kaiji Sato, Yusuke Sano (2014), *Practical and intuitive controller design method for precisionpositioning of a pneumatic cylinder actuator stage*, Precision Engineering, © 2016 Elsevier B.V., ISSN: 0141-6359, 38 (2014) 703-710
- [13] Nikolov E. (2003), *Control Instrumentations - part II (control algorithms, intelligent actuator, noise reduction control valves)*, Sofia, © 2003 Publishing House of Technical University of Sofia, II-nd Edd., ISBN 954-438-336-6, 2003, 296 p.
- [14] Nikolov E. (2003), *Applied Methods for Process Control - part I (frequency methods and systems with robust performances)*, Sofia, © 2003 Publishing House of Technical University of Sofia, II-nd Edd., ISBN 954-438-334-4, 2003, 358 p.
- [15] Oleg B. Malyshev (2012), *Gas dynamics modelling for particle accelerators*, Vacuum, © 2013 Elsevier B.V., ISSN: 0042-207X, 86 (2012) 1669-1681
- [16] Paul Harris, Sean Nolan, Garret E. O'Donnell (2014), *Energy optimisation of pneumatic actuator systems in manufacturing*, Journal of Cleaner Production, © 2014 Elsevier, ISSN: 0959-6526, 72 (2014) 35-45
- [17] Peter R.N. Childs (2014), *Pneumatics and Hydraulics, Chapter 18 in Mechanical Design Engineering Handbook*, © 2014 Elsevier B.V., 2014, ISBN: 978-0-08-097759-1, pp. 735-759
- [18] Puneet Mishra, Vineet Kumar, K. P. S. Rana (2015), *An online tuned novel nonlinear PI controller for stiction compensation in pneumatic control valves*, ISA Transactions, © 2015 Elsevier B.V., ISSN: 0019-0578, 58 (2015) 434-445
- [19] Puneet Mishra, Vineet Kumar, K.P.S. Rana (2014), *A novel intelligent controller for combating stiction in pneumatic control valves*, Control Engineering Practice, © 2014 Elsevier B.V., ISSN: 0967-0661, 33 (2014) 94-104
- [20] S. M. Carvalho, C. A. R. P. Baptista, M. S. F. Lima (2016), *Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems*, International Journal of Fatigue, © 2016 Elsevier, ISSN: 0142-1123, 90 (2016) 47-56
- [21] Xiang Gao, Zheng-Jin Feng (2005), *Design study of an adaptive Fuzzy-PD controller for pneumatic servo system*, Control Engineering Practice, © 2005 Elsevier B.V., ISSN: 0967-0661, 13 (2005) 55-65
- [22] Yung-Tien Liu, Tien-Tsai Kung, Kuo-Ming Chang, Sheng-Yuan Chena (2013), *Observer-based adaptive sliding mode control for pneumatic servo system*, Precision Engineering, © 2013 Elsevier, ISSN: 0141-6359, 37 (2013) 522-530
- [23] Герц Е. В. (1969), *Пневматические приводы*, изд. Машиностроение, Москва 1969, стр.359
- [24] Драганов Б. (1979), *Хидро и пневмоавтоматика*, ДИ Техника, София 1979, стр.308

[25] Ибрагимов И.А., Н.Г. Фарзана, Л.В. Илясов (1984), *Элементы и системы пневмо-автоматики*, изд. Высшая школа, Москва 1984, стр.543

[26] Ключев А.С., Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский (1980), *Проектирование систем автоматизации технологических процессов*, Изд. Энергия, Москва 1980, стр.511

[27] Прусенко В. С. (1987), *Пневматические системы автоматического регулирования технологических процессов*, изд. Машиностроение, Москва 1987, стр.359

[28] Хаджийски М. (1989) [3], *Автоматизация на технологични процеси в химическата и металургична промишленост*, София, © 1989 ДИ Техника, 518 стр.