

РЕЖЕКТИРАЩИ СМУЩЕНИЯТА СИСТЕМИ – ИНВЕРСНИ РЕШЕНИЯ С ФРАКТАЛНИ CLEGG-ОПЕРАТОРИ - ЧАСТ 3

Емил Николов

Резюме: В работата са предложени, изследвани и анализирани структура, методи и алгоритми за проектиране на режектиращи смущенията фрактални *DRC*-системи с *ML-Clegg*-диференциатори. За тяхната разработка са използвани инверсни решения на задачата за синтез с помощта на рационални фрактални *ML-Clegg*-оператори от теорията на обобщеното дробно смятане. Техните потенциални възможности и предимства са доказани. Представени са резултати от пертурбационен и робастен анализ за числен пример.

Ключови думи: фрактални *DRC*-системи, *ML-Clegg*-диференциращи филтри, пертурбационен и робастен анализ на качеството.

DRC-SYSTEMS - INVERS SOLUTIONS WITH FRACTIONAL CLEGG-OPERATORS - PART 3

Emil Nikolov

Abstract: In this work, are proposed, researched and analyzed structure, methods and algorithms for designing of fractional *DRC*-systems with *ML-Clegg*-differentiators. For their development, inverse solutions of the synthesis problem were used with the help of rational fractional *ML-Clegg*-operators from the theory of generalized fractional calculus. Their potentials advantages are proven. Results of perturbation and robust analysis for numerical example are presented.

Key words: fractional *DRC*-systems, *ML-Clegg*-differentiation filters, perturbation and robust quality analysis.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Първите две части на разработката [23, 24] разглеждат: постановката на задача и структурно решение, обобщения аналитичен синтез на *DRC*-системи, аналитичния им синтез при ограничения (рационални решения), числен пример за проектиране на *Clegg-DRC*-система при ограничения; анализ на качеството в параметрически смутен режим и робастен анализ при неопределеност на проектираните (56) ÷ (60) *DRC*- и *Clegg-DRC*-системи (фиг.9, фиг.10) за управление на обект.

Настоящата е третата част на разработката, предлагаща анализ на точността на проектираните *DRC*- и *Clegg-DRC*-системи за управление на обект като количествен параметър на качеството в параметрически смутен режим.

2. ТОЧНОСТ НА CLEGG-DRC-СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Точността на системите (фиг. 10, фиг. 17а) за управление се определя инверсно с помощта на **статичните грешки** (табл. 2, табл. 3) в установен (стационарен) режим (94) ÷ (111) и с **динамичните грешки** (табл. 4) в нестационарен режим на функционирането им (112) ÷ (115). Колкото грешката(ите) на системата(ите) е(са) по-малка(и), толкова точността е по-голяма. В работата е приложен **метод**, основаващ се на анализа и количествена оценка (табл. 2, табл. 3, табл. 4) на преходните характеристики $\varepsilon_{t \rightarrow \infty}(t)$ на системите (фиг. 10, фиг. 17а) при обобщено въздействие $v(t) = [y^0(t) \ v(t)]'$ в стационарен и в нестационарен режим на функциониране по структурите от фиг.17, където F_i са обобщени означения на съответните алгоритъм и обект за управление в системите.

3. ОЦЕНКИ НА ГРЕШКИТЕ В СТАЦИОНАРЕН (УСТАНОВЕН) РЕЖИМ

В контекста на модалните входни въздействия v_i , по определенията (94) ÷ (111), моментът на достигането на стационарния режим се определя за време най-малко пет пъти по-голямо от времето на регулиране на системата(ите). На фиг. 18 са представени резултати от **определянето на количествените оценки на грешките в стационарен (установен) режим** на изследваните номинална ε^* и **Clegg-DRC- $\varepsilon_{\text{DRCML}}^{\beta, \text{Clegg}}$** системи за управление на индустриален обект.

При обобщено въздействие $v_i = [y_i^0 \ v_i]'$ със скокообразно единично изменящи се ($y_i^0 = v_i = a I(t)$) задание y^0 и натоварване v , двете системи (фиг. 10, фиг. 17б) са с нулева стойност на **коэффициента (99) на позиционната грешка** $\varepsilon_p^{\Sigma}(\infty) \equiv 0$. Очевидно че всяка от тях е с ред на астатизъм $\alpha = 1$, като $\varepsilon_p^{\Sigma*}(\infty) \equiv \varepsilon_{\text{DRCML}}^{\Sigma, \beta, \text{Clegg}}(\infty) \equiv 0$.

При $v_i = [y_i^0 \ v_i]'$ с линейно ($y_i^0 = v_i = a t$) изменящи се y^0 и v , анализирани системи (фиг.17.с) са с еднакви стойности-константи на **коэффициенти (105) на скоростната грешка** $\varepsilon_v^{\Sigma}(\infty)$, като $\varepsilon_v^{\Sigma*}(\infty) \equiv \varepsilon_{\text{DRCML}}^{\Sigma, \beta, \text{Clegg}}(\infty) \equiv \text{const}$. Това е така, защото всяка една от двете системи е с ред на астатизъм $\alpha = 1$.

При $v_i = [y_i^0 \ v_i]'$ с параболично ($y_i^0 = v_i = a t^2$) изменящи се y^0 и v , разглежданите системи (фиг. 17г) са с различаващи се стойности на **коэффициента (111) на ускорителната грешка** $\varepsilon_a^{\Sigma}(\infty)$, като $\varepsilon_a^{\Sigma*}(t) > \varepsilon_{\text{DRCML}}^{\Sigma, \beta, \text{Clegg}}(t)$, ($\forall t, t \in [0, \infty]$), но с една и съща стръмност, показана на фиг. 18г с помощта на **производната на ускорителната статична грешка** $d\varepsilon(t)/dt$, като $d\varepsilon_a^{\Sigma*}/dt \equiv d\varepsilon_{\text{DRCML}}^{\Sigma, \beta, \text{Clegg}}/dt$.

грешки в стационарен режим	по задание (C)	по натоварване (V)	по задание и натоварване (Σ)
позиционна (p)	ε_p^C по задание p позиционна	ε_p^V по натоварване p позиционна	ε_p^{Σ} по зад и натов p позиционна
скоростна (v)	ε_v^C по задание v скоростна	ε_v^V по натоварване v скоростна	ε_v^{Σ} по зад и натов v скоростна
ускорителна (a)	ε_a^C по задание a ускорителна	ε_a^V по натоварване a ускорителна	ε_a^{Σ} по зад и натов a ускорителна

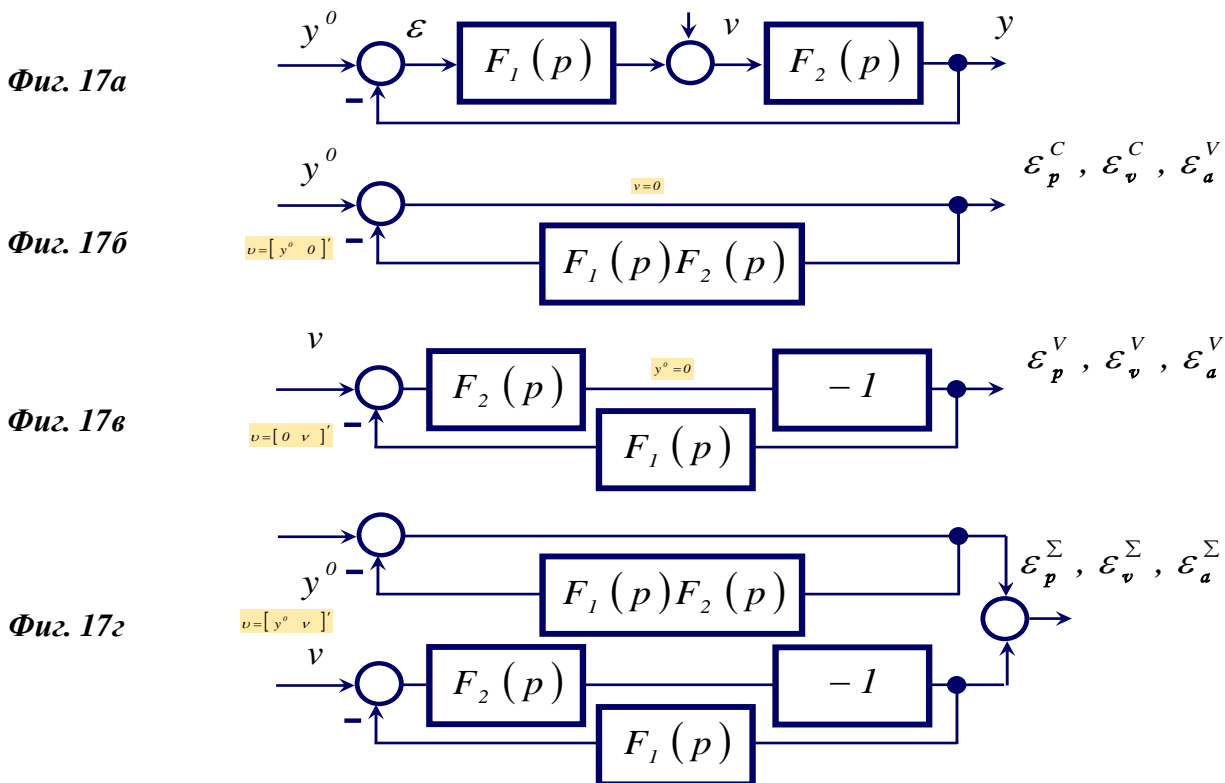
4. ОЦЕНКИ НА ГРЕШКИТЕ В ПРЕХОДЕН (НЕСТАЦИОНАРЕН) РЕЖИМ

На фиг. 19 са представени резултати от *определянето на количествените оценки на ISE-динамичните грешки* (112) в *преходен (нестационарен) режим* на системите (фиг. 10, фиг. 17а). Резултатите от паралелната симулация на моделите на системите илюстрират тяхната реакция на активирана от четири независими генератора входни поредици. Така условията, при които са симуирани моделите на системите, са близки до експлоатационните. Предлагаият *метод* за определяне и количествена оценка (112) ÷ (115) на грешките в нестационарен режим се основава на анализ на преходните характеристики $\varepsilon(t)$ на системите при обобщеното въздействие $v(t)$. Последното гарантира с продължителността си (за време най-малко десетократно пъти по-голямо от времето за регулиране на системите) и параметрите си функциониране на системите в динамичен режим близък до експлоатационния.

Така методът за определяне и количествена оценка на грешките:

- поставя оценяваните системи максимално близо до експлоатационните условия с априорна неопределеност;
- предопределя адекватност на оценката на статичните (94) ÷ (111) и динамичните грешки (112) ÷ (115);
- осигурява едни и същи условия за провеждането на сравнителен анализ на статичната и на динамичната точност на оценяваните системи, отличаващи се единствено по алгоритмите за управление.

Обобщено количествените оценки на грешките (94) ÷ (115) на анализиранияте системи еднозначно определят превъзходството в статичната и динамичната точност в стационарен и нестационарен режим (определяща се с инверсните оценки на грешките) на *Clegg-DRC*-системите за управление.



• грешки в стационарен (установен) режим

ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ v	•• позиционна статична грешка $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_p(t)$ с коэффициент $\varepsilon_p(\infty)$	
по задание $v(t) \equiv y^0(t) = AI(t)$ $v(p) \equiv Y^0(p) = A/p$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_p^c(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{a_0 p^{\alpha+1}}{b_0 + a_0 p^\alpha} \frac{A}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^\alpha}{k + p^\alpha} A$	(94)
	$\varepsilon_p^c(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^\alpha}{k + p^\alpha} \equiv \frac{1}{k+1}, \left(A=1; \alpha=0; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(95)
по натоварване $v(t) \equiv v(t) = AI(t)$ $v(p) \equiv V(p) = A/p$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_p^v(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \frac{A}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} A$	(96)
	$\varepsilon_p^v(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \equiv \frac{-k_2}{k+1}, \left(A=1; \alpha=0; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(97)
по задание и натоварване $v(t) = [y^0(t) v(t)]'$ $y^0(t) \equiv v(t) = AI(t)$ $v(p) = [Y^0(p) V(p)]'$ $Y^0(p) \equiv V(p) = A/p$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_p^\Sigma(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^\alpha - p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} A$	(98)
	$\varepsilon_p^\Sigma(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^\alpha - p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \equiv \frac{1 - k_2}{k+1}, \left(A=1; \alpha=0; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(99)
ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ v	•• скоростна статична грешка $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_v(t)$ с коэффициент $\varepsilon_v(\infty)$	
по задание $v(t) \equiv y^0(t) = At$ $v(p) \equiv Y^0(p) = A/p^2$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_v^c(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{a_0 p^{\alpha+1}}{b_0 + a_0 p^\alpha} \frac{A}{p^2} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^{\alpha-1}}{k + p^\alpha} A$	(100)
	$\varepsilon_v^c(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^{\alpha-1}}{k + p^\alpha} \equiv \frac{1}{k}, \left(A=1; \alpha=1; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(101)
по натоварване $v(t) \equiv v(t) = At$ $v(p) \equiv V(p) = A/p^2$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_v^v(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \frac{A}{p^2} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha-1} k_2}{k + p^\alpha} A$	(102)
	$\varepsilon_v^v(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha-1} k_2}{k + p^\alpha} \equiv -\frac{1}{k}, \left(A=1; \alpha=1; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(103)
по задание и натоварване $v(t) = [y^0(t) v(t)]'$ $y^0(t) \equiv v(t) = At$ $v(p) = [Y^0(p) V(p)]'$ $Y^0(p) \equiv V(p) = A/p^2$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_v^\Sigma(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^{\alpha-1} - p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} A$	(104)
	$\varepsilon_v^\Sigma(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{p^{\alpha-1}}{k + p^\alpha} - \frac{p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \right) \equiv \frac{1 - k_2}{k}, \left(A=1; \alpha=1; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(105)
ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ v	•• ускорителна статична грешка $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_a(t)$ с коэффициент $\varepsilon_a(\infty)$	
по задание $v(t) \equiv y^0(t) = At^2$ $v(p) \equiv Y^0(p) = A/p^3$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_a^c(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{a_0 p^{\alpha+1}}{b_0 + a_0 p^\alpha} \frac{A}{p^3} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^{\alpha-2}}{k + p^\alpha} A$	(106)
	$\varepsilon_a^c(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^{\alpha-2}}{k + p^\alpha} \equiv \frac{1}{k}, \left(A=1; \alpha=2; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(107)
по натоварване $v(t) \equiv v(t) = At^2$ $v(p) \equiv V(p) = A/p^3$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_a^v(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \frac{A}{p^3} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha-2} k_2}{k + p^\alpha} A$	(108)
	$\varepsilon_a^v(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{-p^{\alpha-2} k_2}{k + p^\alpha} \equiv \frac{-k_2}{k} = \frac{-1}{k}, \left(A=1; \alpha=2; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(109)
по задание и натоварване $v(t) = [y^0(t) v(t)]'$ $y^0(t) \equiv v(t) = At^2$ $v(p) = [Y^0(p) V(p)]'$ $Y^0(p) \equiv V(p) = A/p^3$	$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_a^\Sigma(t) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p^{\alpha-2} - p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} A$	(110)
	$\varepsilon_a^\Sigma(\infty) \Leftrightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{p^{\alpha-2}}{k + p^\alpha} - \frac{p^{\alpha+1} k_2}{k + p^\alpha} \right) \equiv \frac{1 - k_2}{k}, \left(A=1; \alpha=2; \lim_{p \rightarrow 0} p^0 = 1 \right)$	(111)

• коэффициентите на грешките в стационарен (установен) режим

		ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ПО ЗАДАНИЕ			ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ПО НАТОВАРВАНЕ			ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ПО ЗАДАНИЕ И НАТОВАРВАНЕ		
		$v = [y^0 \ 0]'$ $\equiv y^0$			$v = [0 \ v]'$ $\equiv v$			$v = [y^0 \ v]'$		
$U =$		$y^0 = I(t)$	$y^0 = t$	$y^0 = t^2$	$v = I(t)$	$v = t$	$v = t^2$	$v = y^0 = I(t)$	$v = y^0 = t$	$v = y^0 = t^2$
		поз.	скор.	уск.	поз.	скор.	уск.	поз.	скор.	уск.
ред на аста- тизма	коэффи- циент на ста- тичната грешка	$\varepsilon_p^c(\infty)$	$\varepsilon_v^c(\infty)$	$\varepsilon_s^c(\infty)$	$\varepsilon_p^v(\infty)$	$\varepsilon_v^v(\infty)$	$\varepsilon_s^v(\infty)$	$\varepsilon_p^\Sigma(\infty)$	$\varepsilon_v^\Sigma(\infty)$	$\varepsilon_s^\Sigma(\infty)$
		$\alpha = 0$	статична система с астатизъм от нулеви ред	$\frac{1}{k+1}$	∞	∞	$-\frac{k_1 k_2}{k+1}$	∞	∞	$\frac{1-k_1 k_2}{k+1}$
$\alpha = 1$	астатична система с астатизъм от първи ред	0	$\frac{1}{k}$	∞	0	$-\frac{1}{k}$	∞	0	$\frac{1-k_1 k_2}{k}$	∞
$\alpha = 2$	астатична система с астатизъм от втори ред	0	0	$\frac{1}{k}$	0	0	$-\frac{1}{k}$	0	0	$\frac{1-k_1 k_2}{k}$

• • грешки в нестационарен (преходен) режим

<p>• • интегрално-квадратична динамична грешка $J_{ISE}(t)$ index ISE (Integral Square Error)</p>	
<p>ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ $v(t) = [y_i^0 \ v_i \ \zeta_i]'$</p>	$J_{ISE}(t) = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \quad (112)$
<p>• • интегрална-абсолютна динамична грешка $J_{IAE}(t)$ index IAE (Integral Absolute Error)</p>	
<p>ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ $v(t) = [y_i^0 \ v_i \ \zeta_i]'$</p>	$J_{IAE}(t) = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt \quad (113)$
<p>• • интегрално-квадратична умножена по време динамична грешка $J_{ITSE}(t)$ index ITSE (Integral Time-multiplied Square Error)</p>	
<p>ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ $v(t) = [y_i^0 \ v_i \ \zeta_i]'$</p>	$J_{ITSE}(t) = \int_0^{\infty} t \varepsilon^2(t) dt \quad (114)$
<p>• • интегрална-абсолютна умножена по време динамична грешка $J_{ITAE}(t)$ index ITAE (Integral Time-multiplied Absolute Error)</p>	
<p>ВХОДНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ $v(t) = [y_i^0 \ v_i \ \zeta_i]'$</p>	$J_{ITAE}(t) = \int_0^{\infty} t \varepsilon(t) dt \quad (115)$

5. АНАЛИЗ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новото и оригинално в тази част на настоящата разработка са:

- систематизация и аналитични дефиниции на видовете грешки;
- метод за определяне и количествена оценка на грешките в стационарен и нестационарен режим;
- еднозначно е определено превъзходството в точността в установен режим на **Clegg-DRC**-системите пред номиналната система чрез количествените оценки на коефициентите на статичните грешки (99), (105), (111) на анализирани системи, като това заключение е аргументирано въз основа на стойностите на коефициентите на позиционните $\varepsilon_p^\Sigma(\infty)$, скоростните $\varepsilon_v^\Sigma(\infty)$ и ускорителните $\varepsilon_a^\Sigma(\infty)$ грешки в стационарен режим на функциониране;
- еднозначно е определено и доказано превъзходството в статичната и динамичната точност в стационарен и нестационарен режим на **Clegg-DRC**-системите за управление с помощта на количествените оценки на грешките (94) ÷ (115) на анализирани системи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Baños, A. Barreiro (2012), Reset Control Systems, in: Advances in Industrial Control, © 2012 Springer, ISBN-10: 144712216X, ISBN-13: 978-1447122166, 348 p.
- [2] A. Baños, J. Carrasco, A. Barreiro (2011), Reset Times-Dependent Stability of Reset Control Systems, IEEE Trans. Autom. Control 56 (1) (2011) pp. 217-223
- [3] C. V. Hollot (1997), Revisiting Clegg Integrators: Periodicity, Stability and IQCs, System Structure and Control, © 1997 IFAC Bucharest, Romania, 1997, pp. 31-38
- [4] Cl. Lorena Garzón-Castro, E. Delgado-Aguilera, J. Alexander Cortés-Romero, E. Tello, G. Mazzanti, Performance of an Active Disturbance Rejection Control on a Simulated Continuous Microalgae Photobioreactor, Computers and Chemical Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.06.006>, ©2018 Elsevier, 117 (2018) 129-144
- [5] Guo Y., Wang Y., Xie L., Zheng J. (2009), Stability Analysis and Design of Reset Systems: Theory and an Application, Automatica, © 2009 Elsevier, Vol 45 (2), pp. 492-497
- [6] J. C. Clegg (1958), A nonlinear Integrator for Servomechanisms, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers 11 (1958), Part II: Applications and Industry, © 1958 IEEE, Volume: 77, Issue: 1, March 1958, pp. 41-42
- [7] Hao An, Qianqian Wu, Disturbance rejection dynamic inverse control of air-breathing hypersonic vehicles, Acta Astronautica, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.022>, © 2018 IAA Published by Elsevier, 151 (2018) 348-356
- [8] Hebertt Sira-Ramírez, Alberto Luviano-Juárez, Eric William Zurita-Bustamante (2017), Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems, A Flatness-Based Approach, © 2017 Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0-12-849868-2, ISBN: 9780128118955; ISBN: 9780128498682, DOI <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01983-6>, 358 p.
<https://www.elsevier.com/books/active-disturbance-rejection-control-of-dynamic-systems/9780128498682>
- [9] Hongyiping Feng, Bao-Zhu Guo, Active disturbance rejection control: Old and New Results, Annual Reviews in Control, <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.05.003>, © 2017 Elsevier, 44 (2017) 238-248

- [10] Kiryakova V. S. (1993), Generalized Fractional Calculus and Applications, © CRC Press; (December 27, 1993), ISBN: 0582219779, 360 p.
- [11] Kiryakova V. S., Srivastava H. M. (1993), Generalized (multiple) Riemann-Liouville Fractional Different-Integrals and Their Use in Univalent Function Theory, In: "Analysis, Geometry and Groups: a Riemann Legacy Volume", © Hadronic Press, Inc., (Florida, USA - ISBN 0-911767-59-2), 1993, part. 1, 191 p.
- [12] Kiryakova V. S. (1994), Generalized Fractional Calculus and Applications, Pitman Research Notes in Mathematics Series No. 301, Longman Scientific and Technical, © Harlow, Essex, 1994, ISBN: 0-470-20777-9, 260 p.
- [13] Kiryakova V. S. (1997), All the Special Functions are Fractional Different-Integrals of Elementary Functions, Journal Physics A: Math. & General, 1997, 30, No 14, Online ISSN: 1361-6447, Print ISSN: 0305-4470, 5085-5103
- [14] M. A. Davó, A. Baños (2016), Reset Control of Integrating Plus Dead Time Processes, Journal of Process Control, © 2016 Elsevier, ISSN: 0959-1524, Vol. 38 (2016) pp. 22-30
- [15] Oustaloup A. (1991), La commande CRONE (commande robuste d'ordre non entier), © Hermès (Traité des Nouvelles Technologies - Série Automatique), Paris, ISBN 2-86601-289-5, ISBN 0989-3571, 495 p.
- [16] Oustaloup A. (1994), La robustesse (analyse et synthèse de commandes robustes), © Hermès (Traité des Nouvelles Technologies - Série Automatique), Paris, ISBN-10: 2866014421, ISBN-13: 978-2866014421, 530 p.
- [17] Oustaloup A. (1995), La dérivation non entière (théorie, synthèse et applications), © Hermès (Traité des Nouvelles Technologies - Série Automatique), Paris, ISBN 2-86601-456-1, ISBN 0989-3571, 508 p.
- [18] Nikolov E. (2004), Fractional Order Control Algorithms and Controllers, Sofia, © 2004 Publishing House of Technical University of Sofia, ISBN 954-438-395-6, 2004, 208 p.
- [19] Nikolov E. (2016), Application of Generalized Fractional Calculus in Inverse Robust Control - part 1, part 2, Journal Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 66, Issue 2, 2016, © 2016 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, pp. 15-34
- [20] Nikolov E. (2018), Clegg-Operators for Integration and Differentiation. Generalized Reset-Control - part 1, part 2, Journal Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 68, Issue 3, 2018, © 2018 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, pp. 47-64
- [21] Nikolov E. (2019), Fractional Order ML Clegg-Operators, Controllers and ML Reset-Control - part 1, part 2, part 3, Journal Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 69, Issue 2, 2019, © 2019 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, pp. 183-210
- [22] Nikolova N., Nikolov E. (2008), ML-Structures in the Repetitive Robust Control Systems, Journal Cybernetics and Information Technologies Journal, © 2008 Bulgarian Academy of Science, ISSN 1311-9702, Vol. 8 (2008), No 1, pp. 44-64
- [23] Nikolov E. (2019), DRC-Systems - Invers Solutions with Fractional Clegg-Operators - part 1, Journal Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 69, Issue 3, 2019, © 2019 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, pp. 47-56
- [24] Nikolov E. (2019), DRC-Systems - Invers Solutions with Fractional Clegg-Operators - part 1, Journal Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 69, Issue 3, 2019, © 2019 Publishing House of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, pp. 57-66

Автор: *Емил Николов*, проф. дтн, Технически Университет-София, Факултет Автоматика, катедра „Автоматизация на Непрекъснатите Производства“, *e-mail: nicoloff@tu-sofia.bg*

Author: *Prof. D.Sc. Emil Nikolov*, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics, department Industrial automation, *e-mail: nicoloff@tu-sofia.bg*