SAT-9.3-1-HP-06

Study Dependence on Natural Frequencies of the Pressure Pipeline in Hydraulic System – Part II

Miroslav Petrov, Krasimir Ormandzhiev, Hristofor Lazarov

Изследване зависимостта на собствените честоти на нагнетателен тръбопровод в хидравлична задвижваща система – част II

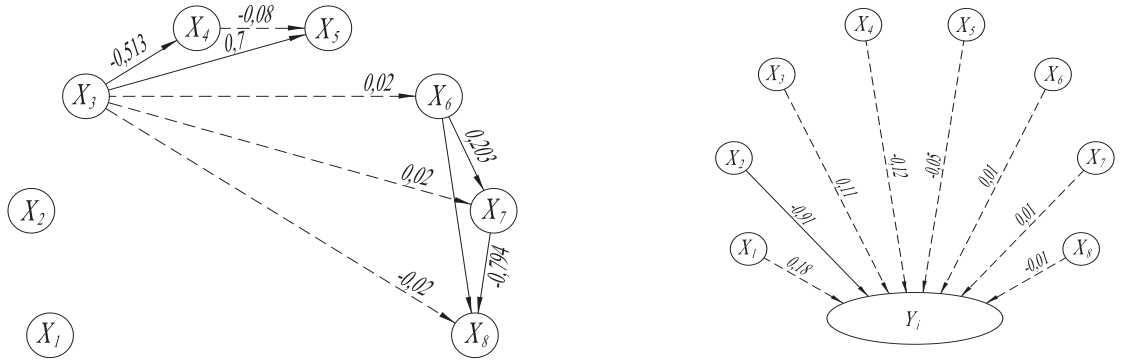
Мирослав Петров, Красимир Орманджиев, Христофор Лазаров

Study Dependence on Natural Frequencies of the Pressure Pipeline in Hydraulic System – Part II: *The article dealt with regression models of natural frequencies pressure pipeline in hydraulic system as a function of strongly influencing factors: length of straight sections, radius of curvature and angle between the straight sections. The plan of the experiment and deduced regression models are presented in tables. The results of the studies are presented in graphical form.*

Key words: *natural frequency, hydraulic system, pressure pipeline, regression model.*

Взаимно корелационна граф

На фиг. 1 е представена диаграмата на корелационната матрица за връзката между управляващите фактори и целевите функции за хидравличната задвижваща система от част I.



Фиг.1. Таблични стойности на R - критерия, избрани при ниво на значимост α и брой степени на свобода ν_s=318, R_{TAB}= 0.195 (при α=0.05), R_{TAB}= 0.254 (при α=0.01), R_{TAB}= 0.321 (при α=0.001)

За един конструктивен елемент, какъвто се явява и разглеждания тръбопровод, освен, че основно трябва да отговаря на предявените стандартни изисквания, към него е желателно да бъде създадададен бърз инженерен метод, за подбор на тръбопровод с такива характеристики, че да е възможно още на ниво проектиране да се избягват областите на диапазона, на собствените честоти на тръбопровода с работните честоти на елементите явяващи се източници на принудени трептения.

Тъй като предишни разработки в тази област Част I на настоящата статия показват доказано слабо влияние на материалните характеристики: $E_{тр.}$ – Модул на линейна еластичност; $\mu_{тр.}$ – коефицент на Поасон; $\rho_{тр.}$ – плътност; $B_{фл.}$ - обемна еластичност на флуида; $\rho_{фл.}$ - плътност на флуида, както и влияниевто на температурата в диапазона t = 15 ÷ 80 [°C] върху материалните характеристиките, а от там върху собствените честоти е удачно да се търсят други параметри влиещи, на собствените честоти, като в случая за такива са подбрани геометрични

комбинации от размери.

Методика за изграждане на план на натурен експеримент

Изграждането на плана на експеримента се базира на провеждане на числени експерименти в средата на ПП Cosmos/M реализиращ МКЕ.

Използван е параметричен 3D модел - крайни елемени: SOLID с приложени характеристики на използваните материали по литературни данни.

Променливи параметри - управляващи фактори и диапазон на изменението им:

$x_1=(\ell_1)$ - 0,5 ÷ 1 [m] – дължина на първи линеен участък, използвана стъпка 0,25 [m];

$x_2=(\alpha, °)$ - ъгъл между линейните участъци 10°, 45°, 75° и 90°;

$x_3=(R, m)$ – радиус на закръгление 0,2 ÷ 0,8 [m], използвана стъпка 0,2 [m];

$x_4=(\ell_2, m)$ – дължина на втори линеен участък, използвана стъпка 0,25 [m];

Константни величини за тръбопровода необходими за анализиране на модела и материални характеристики за тръбопровод са от мед марка М1 по литературни данни:

$\delta_{тр.}$ = 0.001 [m] - дебелина на тръбата;

$E_{тр.} = 118{,}1.10^9 - t[°C].40.10^6$,[Pa] - модул на линейна еластичност

$\mu_{тр.}$ – коефицент на Поасон: $\mu_{тр.}$ = 0,33;

$\rho_{тр.}$ – плътност на материала: $\rho_{тр.}$ = 8600 [kg/m^3];

Константни величини за флуида необходими за анализиране на модела и материални характеристики по литературни данни:

$B_{фл.} = 2{,}1.10^{9.(-0.002.(t-t0))}$,– обемна еластичност на флуида;

$\rho_{фл.} = 880-880.7^{-4.(t-t_0)}$ [kg/m^3] - плътност на флуида;

За температурозависимите характеристики е използвана работна температура при установен режим на работа: t_0=15[°C], t = 50 [°C] – за извършване на анализа;

Използваният модел е запънат в двата края. За получаване на резултатите е приложен класически анализ за определяне на собствените честоти.

Целеви функции:

$Y_1= f_1$ [Hz] – първа собствена честота; $Y_2= f_2$ [Hz] – втора собствена честота; $Y_3= f_3$ [Hz] – трета собствена честота.

Резултати от извършения числен експеримент по МКЕ е приведен в таб. 1.

Таблица 1.

№	ℓ_1	α	R	ℓ_2	f_1	f_2	f_3
-	m	°	m	m	Hz	Hz	Hz
1	0.5	10	0.2	0.5	45.57	126.45	244.76
2	0.5	10	0.2	0.75	29.63	81.76	160.31
3	0.5	10	0.2	1	20.82	57.13	112.71
4	0.75	10	0.2	0.5	29.63	81.76	160.31
5	0.75	10	0.2	0.75	20.73	57.56	111.56
6	0.75	10	0.2	1	15.35	42.47	82.94
7	1	10	0.2	0.5	20.82	57.13	112.70
8	1	10	0.2	0.75	15.35	42.47	82.94
9	1	10	0.2	1	11.80	32.76	63.53
10	0.5	45	0.2	0.5	32.69	100.67	176.38
29	0.5	90	0.2	0.75	15.66	50.14	95.58
30	0.5	90	0.2	1	12.46	34.76	76.06
31	0.75	90	0.2	0.5	15.66	50.14	95.58
32	0.75	90	0.2	0.75	11.15	39.78	65.76
33	0.75	90	0.2	1	8.78	29.70	53.14
34	1	90	0.2	0.5	12.46	34.76	76.06
…	…	..	…	…	…	…	…
51	0.75	45	0.4	1	10.40	30.96	57.83
52	1	45	0.4	0.5	13.97	38.15	79.57
53	1	45	0.4	0.75	10.40	30.96	57.83
54	1	45	0.4	1	8.18	25.20	44.31
55	0.5	75	0.4	0.5	17.33	55.00	104.01
56	0.5	75	0.4	0.75	12.90	39.97	76.74
57	0.5	75	0.4	1	10.27	29.46	60.81
58	0.75	75	0.4	0.5	12.90	39.97	76.74
59	0.75	75	0.4	0.75	9.63	31.68	56.67
60	0.75	75	0.4	1	7.69	24.70	45.47
61	1	75	0.4	0.5	10.27	29.46	60.81
62	1	75	0.4	0.75	7.69	24.70	45.47
63	1	75	0.4	1	6.13	20.62	35.52
64	0.5	90	0.4	0.5	14.61	46.51	91.11
65	0.5	90	0.4	0.75	11.04	34.75	67.29
66	0.5	90	0.4	1	8.90	26.23	53.14
67	0.75	90	0.4	0.5	11.04	34.75	67.29
68	0.75	90	0.4	0.75	8.33	27.76	51.07
69	0.75	90	0.4	1	6.72	22.04	40.91
70	1	90	0.4	0.5	8.90	26.23	53.14
…	…	..	…	…	…	…	…
103	0.75	90	0.6	0.5	8.26	25.46	50.75
104	0.75	90	0.6	0.75	6.50	20.69	40.54
105	0.75	90	0.6	1	5.34	17.02	32.86
106	1	90	0.6	0.5	6.76	20.31	40.35

107	1	90	0.6	0.75	5.34	17.02	32.86
108	1	90	0.6	1	4.39	14.44	27.09
109	0.5	10	0.8	0.5	37.61	104.27	202.34
110	0.5	10	0.8	0.75	25.34	69.96	137.02
111	0.5	10	0.8	1	18.24	50.11	98.78
…	…	..	…	…	…	…	…
139	0.75	90	0.8	0.5	6.44	19.49	39.64
140	0.75	90	0.8	0.75	5.21	16.12	32.83
141	0.75	90	0.8	1	4.36	13.57	27.03
142	1	90	0.8	0.5	5.35	16.09	32.10
143	1	90	0.8	0.75	4.36	13.57	27.03
144	1	90	0.8	1	3.65	11.64	22.82

Получени регресионни модели

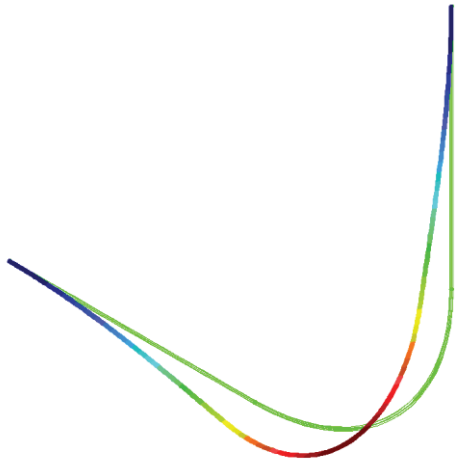
Изведените регресионни модели от III степен са от вида:

$$Y_i=b_{0,0,0}+b_{0,0,1}.x_1+ b_{0,0,2}.x_2+ b_{0,0,3}.x_3+ b_{0,0,4}.x_4+ b_{0,1,1}.x_1^2 +b_{0,1,2}.x_1.x_2 +b_{0,1,3}.x_1.x_3 +b_{0,1,4}.x_1.x_4 +b_{0,2,2}.x_2^2 +b_{0,2,3}.x_2.x_3 +b_{0,2,4}.x_2.x_4 +b_{0,3,3}.x_3^2 +b_{0,3,4}.x_3.x_4 +b_{0,4,4}.x_4^2 +b_{1,1,1}.x_1^3 +b_{1,1,2}.x_1^2.x_2 +b_{1,1,3}.x_1^2.x_3 +b_{1,1,4}.x_1^2.x_4 +b_{1,2,2}.x_1.x_2^2 +b_{1,2,3}.x_1.x_2.x_3 +b_{1,2,4}.x_1.x_2.x_4 +b_{1,3,3}.x_1.x_3^2 +b_{1,3,4}.x_1.x_3.x_4 +b_{1,4,4}.x_1.x_4^2 +b_{2,2,2}.x_2^3 +b_{2,2,3}.x_2^2.x_3 +b_{2,2,4}.x_2^2.x_4 +b_{2,3,3}.x_2.x_3^2 +b_{2,3,4}.x_2.x_3.x_4 +b_{2,4,4}.x_2.x_4^2 +b_{3,3,3}.x_3^3 +b_{3,3,4}.x_3^2.x_4 +b_{3,4,4}.x_3.x_4^2 +b_{4,4,4}.x_4^3.$$

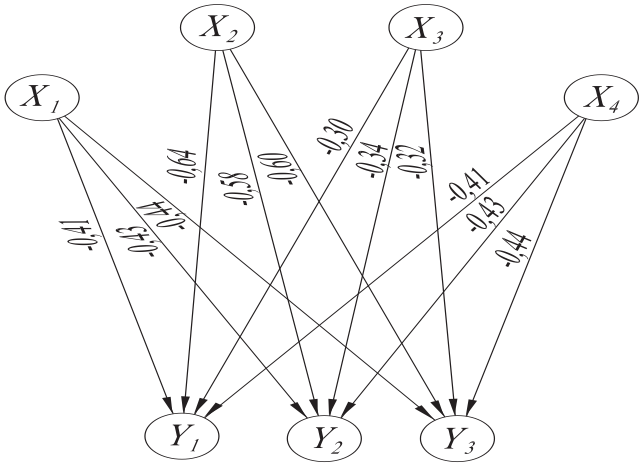
Независима променлива $x_i.x_j$	Коеф. -	$Y_1=f_1$ Hz	$Y_2= f_2$ Hz	$Y_3= f_3$ Hz
Свободен член	b_0	+153.6157	+470.8116	+802.3309
x_1	b_1	-0.44166	-124.7895	-297.3073
x_2	b_2	-1.431501	-3.502345	-7.199402
x_3	b_3	-86.597	-280.9313	-453.2607
x_4	b_4	-228.6657	-677.4498	-862.9402
x_1^2	b_{11}	-216.4133	-513.511	-716.7194
$x_1.x_2$	b_{12}	+1.290938	+3.315473	+6.469971
$x_1.x_3$	b_{13}	+79.40034	+262.9451	+419.8477
$x_1.x_4$	b_{14}	+152.2524	+560.997	+764.1632
x_2^2	b_{22}	+0.004687	+0.0120169	+0.0273357
$x_2.x_3$	b_{23}	-0.578174	-1.969314	-3.401747
$x_2.x_4$	b_{24}	+1.288032	+3.308859	+6.459186
x_3^2	b_{33}	+34.38095	+114.5471	+183.4576
$x_3.x_4$	b_{34}	+80.40088	+265.3781	+423.3192
x_4^2	b_{44}	+99.35762	+251.1302	+65.62521
x_1^3	b_{111}	+123.8046	+308.4165	+470.1549
$x_1^2.x_2$	b_{112}	-0.255366	-0.8162801	-1.328499
$x_1^2.x_3$	b_{113}	-22.12733	-39.46795	-138.5796
$x_1^2.x_4$	b_{114}	-28.14921	-107.095	-144.7935
$x_1.x_2^2$	b_{122}	-0.002566	-0.0061214	-0.0132691
$x_1.x_2.x_3$	b_{123}	+0.072265	+0.3315043	+0.5578799
$x_1.x_2.x_4$	b_{124}	-0.581391	-1.305899	-2.885262
$x_1.x_3^2$	b_{133}	-15.8233	-56.60126	-82.86474
$x_1.x_3.x_4$	b_{134}	-24.06911	-151.4521	-89.12588
$x_1.x_4^2$	b_{144}	-28.13457	-107.0349	-144.8506
x_2^2	b_{222}	-0.000005	-0.00002	-0.0000447
$x_1^2.x_3$	b_{223}	+0.002442	+0.0062555	+0.0119101
$x_2^2.x^4$	b_{224}	-0.00256	-0.006106	-0.0132359
$x_1.x_3^2$	b_{233}	+0.149648	+0.5401525	+0.8754619
$x_1.x_3.x_4$	b_{234}	+0.071748	+0.3300477	+0.5563958
$x_1.x_4^2$	b_{244}	-0.253671	-0.8124388	-1.323071
x^3	b_{333}	-6.68792	-20.41367	-38.72289
$x_3^2.x_4$	b_{334}	-16.11836	-57.35595	-83.83627
$x_3.x_4^2$	b_{344}	-22.57099	-40.51334	-140.1691
x_4^3	b_{444}	-16.48604	-31.30517	+122.6971
Ср. проц. грешка	%	2,75	2,82	2,62
R	-	0.998631	0.998301	0.998502
$F> F_{таб.}$	-	1168.06>1,45	941.15>1,45	1067.46>1,45

Забележка: Моделите са изведени при степени на свобода $v_1=34$, $v_2=109$ и ниво на значимост $\alpha=0,05$. (R) е значим при $F > F_{TB}$.

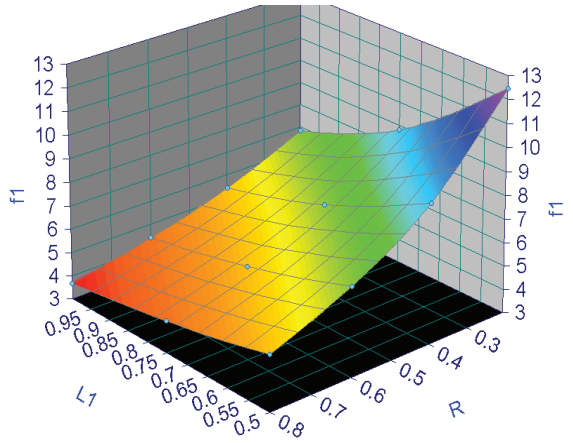
На фиг. 2, 3, 4, 5, 6 и 7 са представени резултатите от числения експеримент.



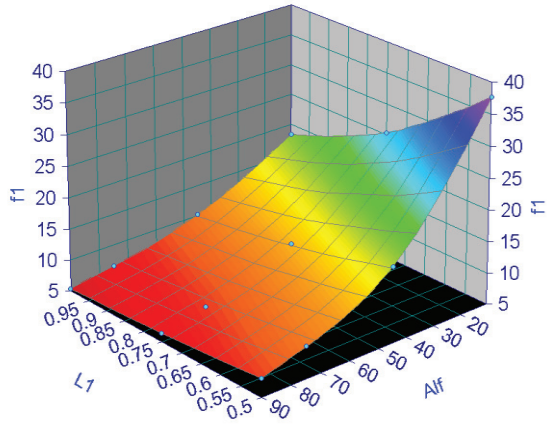
Фиг. 2 Първа собствена честота и форма за числен експеримент № 144: f_1 = 3,65 Hz при ℓ_1=1 m, α=90°, R=0,8 m, ℓ_2=1 m.



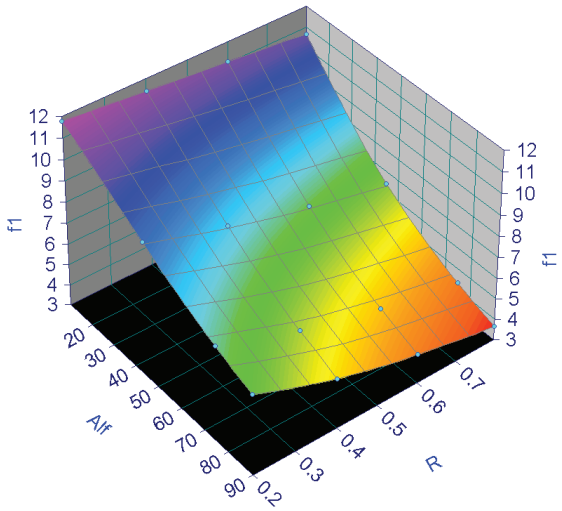
Фиг. 3 Взаимно корелационен граф. Таблични стойности на R - критерия, избрани при ниво на значимост α и брой степени на свобода ν_s= 142. R_{TAB}= 0.195 (при α=0.05); R_{TAB}= 0.254 (при α=0.01); R_{TAB}= 0.321 (при α=0.001).



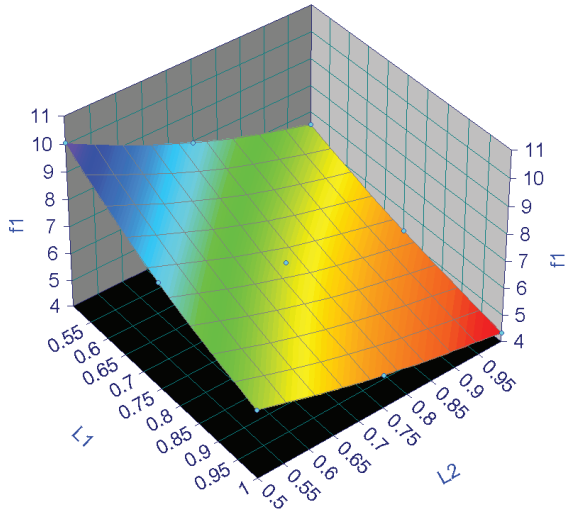
Фиг. 4 Зависимост f_1=f_1(ℓ_1[m],R[m])[Hz] при α=90° и ℓ_2= 1 m.



Фиг. 5 Зависимост f_1=f_1(ℓ_1[m], α[°]) [Hz] при R=0,8[m] и ℓ_2= 0,5 m.



Фиг. 6 Зависимост f_1=f_1(α[°], R[m]) [Hz] при ℓ_1=1[m] и ℓ_2= 1 m.



Фиг. 7 Зависимост f_1=f_1(ℓ_1[m], ℓ_2[m]) [Hz] при α=75° и R=0,8 [m].

ИЗВОДИ

От анализа на получените математически модели може да се направят следните:

Изводи относно част I:

- Математическите модели отчитат материала, от който е изработена тръбата чрез материалните характеристики E и μ, като в параметричния модел се пресмятат промените на модула на еластичност така и настъпилите промени във флуида в следствие на изменение на температурата преди да се приложат в анализа по МКЕ.
- Взаимно корелационната матрица показва, че материалните хар-ки на тръбата нямат мощността да влияят достатъчно силно върху собствените честоти на тръбата.
- Анализирано е и е изследвано влиянието, на силно влияещи размери, дължина и дебелина на тръбопровода, както и материални характеристики върху собствените честоти, използувайки числени експерименти по Метода на крайните елементи.

Изводи относно част II:

- Математическите модели отчитат геометричните размери в диапазоните на изменение зададени в методиката, и са валидни за изследвания материал с посочените по горе характеристики, от който е изработена тръбата. В параметричния модел се пресмятат промените на модула на еластичност така и настъпилите промени във флуида в следствие на изменение на температурата в установен работен режим.
- Анализирано е и е изследвано влиянието на геометричните размери на тръбопровода, силно влияещи върху собствените честоти, използувайки числени експерименти по Метода на крайните елементи.

Общи изводи и приноси:

- Изведени са адекватни математически модели с необходимата точност за инженерната практика даващи зависимостта на изходните величини: първите три собствени честоти и основни размери на тръбопровода в работни условия.
- Средната процентна грешка на предсказаните стойности се движи в границите 4,96÷5,14% за част I и в 2,62÷2,82% за част II за различните модели, което напълно удовлетворява изискванията за точност на решенията в инженерната практика.
- Коефициентите на множествена корелация имат високи и значими стойности, което показва, че е направен правилен избор на структурата на моделите и са включени силно влияещи фактори за двете части на разработката;
- За всички получени регресионни модели е изпълнено условието за адекватност при ниво на значимост α=0,05, което показва, че предсказаните стойности по моделите съответстват на получените от числените експерименти и могат да бъдат използувани за прогнозиране на: собствените честоти.

Литература

[1] Орманджиев К., Х. Лазаров, М. Райкова, Н. Стефанов, Моделиране на динамичните процеси в следяща електрохидравлична система при промяна температурата на работния флуид, НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ - 2013, том 52, серия 1.2, Русе, 2013, стр. 97 – 101.

[2] Орманджиев К., М. Петров, Х. Лазаров, Влияние на температурата на работния флуид върху собствената честота на електрохидравлична следяща система, НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ, том 54, серия 1.2, Русе, 2015, стр. 253-258.

[3] Петров М., К. Орманджиев, Х. Лазаров, Изследване зависимостта на собствените честоти на нагнетателен тръбопровод в хидравлична задвижваща система – част I, Научна конференция РУ'2016, 28 – 29 октомври, 2016, (за печат)

[4] AL-Assady A., A. Hassan, M. Talib, J. AL-Khafaji, Design and Analysis of Electro-Hydraulic Servo System for Speed Control of Hydraulic Motor, Journal of Engineering, Number 5, Volume 19, May 2013, Baghdad.

[5] Basmenj A., A. Sakhavati, Jafarghafuri, PID Controller Design Forposition Control of Electrohydraulic Actuators Using Imperialist Competitive Algorithm, Indian J. Sci. Res., 1(1), 2014, pp. 775-779.

[6] Gold P., A. Schmidt, H. Dicke, J.Loos, C.Assmann, Viscosity-Pressure-Temperature Behaviour of Mineral and Synthetic Oils, Journal of Synthetic Lubrication, 18-1 (2001), 51-79.

[7] Hassan J., Saif Yousif Ibrahim, An Experimental Study Into The Effect Of Temperature And Pressure on The Hydraulic System, Eng. & Tech. Jurnal, Vol.27, No.14, Mechanical Engineering Department, University of Technology – Baghdad, 2009.

[8] Jovanovic M., Nonlinear Control of an Electrohydraulic Velocity Servosystem, Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK May 8-10, 2012.

[9] Knezevic D., V. Savic, Mathematical Modeling of Changing of Dynamic Viscosity, as a Function of Temperature and Pressure, of Mineral Oils for Hydraulic Systems, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering Vol. 4, No 1, 2006, pp. 27 – 34.

[10] Ormandzhiev K., Transient Processes in Electro-Hydraulic Follow-up System with Long Pressure Pipelines, 30th SEM HIPNEF 2006, May 24 - 26, Vrnjacka Banja, 2006, pp. 123 – 130.

[11] Shafiabadi M., M. Jahanshahi, A. Bidaki, Feedback Error Learning using Laguerre-based Controller to Control the Velocity of an Electro Hydraulic Servo System, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(10), 2012, pp. 222-230.

[12] Xu M., B. Jin, G. Chen, J. Ni, Speed-Control of Energy Regulation Based Varible-Speed Electrohydraulic Drive, Strojniski vestnik – Journal of Mechanical Enginneering 59(2013)7-8, pp. 433-442.

[13] Джонов, Ц., Ив. Ангелов, М. Петров. Математическо моделиране на механичните характеристики на стоманите, монография, Печатна база при ТУ-Габрово, Габрово, 1995.

[14] Cosmos/M Finite Element Analysis System - User Guide - (Vol. 1), SRAC, 1994.

[15] Cosmos/M The Basic System, SRAC, 1994.

[16] Cosmos/M Advanced Modules, SRAC, 1994.

За контакти:

Доц. д-р инж. Красимир Христов Орманджиев, Катедра "Енергийна техника", Технически университет – Габрово, e-mail: khormandzhiev@abv.bg

Докладът е рецензиран.