РАЗДЕЛ «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

УДК 519.6

КАРМАЗІНА В.В., к.фіз.-мат.н, професор
ХУДА Ж.В., к. фіз.-мат. н, доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

ПРО ВІДНОВЛЕННЯ СПЛАЙНАМИ КРИВИХ–РОЗВ'ЯЗКІВ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

Вступ. Для використання апроксимації побудови наближеного розв'язку задач, що моделюють коливальні процеси з різного роду граничними та крайовими умовами, отримані і достатньо ефективно використовуються: покрокові методи (типу Рунге-Кутта); методи, що засновані на різницевих схемах або рядами; методи типу Ритца-Гальоркіна; методи поліноміальної апроксимації; скінченнорізницеві методи; метод сплайн-коллокації та ін. У їх розвиток великий внесок зробили О.А.Самарський, А.М.Тіхонов, В.С.Рябенький та багато інших. Основною проблемою використання сплайн-методів залишається невисока точність отриманого наближеного розв'язку. Питанням підвищення точності сплайн-розв'язку крайових задач приділялось багато уваги в роботах В.Л.Мірошніченко, С.Б.Стечкина, Ю.М.Субботіна, А.О.Лігуна та багатьох інших. Цій проблемі присвячені ряд робіт Худої Ж.В., в яких розроблено сплайн-методи ідентифікації параметрів моделі, яка описує параметричний коливальний процес при заданих початкових умовах, якщо параметри моделі є неперервними функціями або функціями, що мають скінчене число розривів першого роду [1, 2].

Постановка задачі. Залишається актуальним питання побудови алгоритмів відновлення сплайнами кривих, які є розв'язками крайових задач з використанням можливостей програм Microsoft Office. В даній роботі ці питання вивчаються на прикладі задачі Коші, яка є моделлю параметричного коливального процесу лінійної динамічної системи другого порядку.

Розглядається задача Коші для лінійного диференціального рівняння другого порядку із змінними коефіцієнтами, що характеризують стан динамічного об'єкту:

$$y'' + p(x)y' + q(x)y = f(x)\,, \tag{1}$$

$$y(0) = y_0, \quad y'(0) = y'_0\,, \tag{2}$$

де $p(x)$, $q(x)$, $f(x)$ – двічі неперервно диференційовані функції.

Будемо шукати наближений розв'язок задачі (1), (2) у вигляді кубічного сплайна $S_3(x)$ з вузлами на сітці Δ. Сплайн $S_3(x)$ – це кубічний сплайн, який є лінійною комбінацією B-сплайнів.

Результати роботи. Введемо на інтервалі $[a',b']$ розбиття Δ: $a' = x_0 < x_1 < ... < x_N = b'$. Припустимо, що вузли сплайнів і вузли колокації співпадають в точках x_i. Параметри рівняння (1) не мають особливостей.

Використовуємо відомі асимптотичні розвинення першої і другої похідних інтерполяційного кубічного сплайна у вузлах розбиття

$$S''_{3,N}(y*, x_i) = y''_i - \frac{h^2}{12} y_i^{(4)} + \frac{h^4}{360} y_i^{(6)} + O(h^6), \quad i = 0,\overline{N}\,, \tag{3}$$

$$S'_{3,N}(y*, x_i) = y'_i - \frac{h^4}{180} y_i^{(5)} + O(h^6), \quad i = 0,\overline{N}\,, \tag{4}$$

тоді при $h \to 0$

$$y_i'' = S_{3,N}''(y*, x_i) + \frac{h^2}{12} y_i^{(4)} + O(h^4), \quad i = 0, \overline{N}, \tag{5}$$

$$y_i' = S_{3,N}'(y*, x_i) + O(h^6), \quad i = 0, \overline{N}. \tag{6}$$

Щоб отримати схему підвищеної точності відновлення кривих розв'язку (1) та (2) сплайн-методом розв'язується «підправлена» задача, тобто коефіцієнти рівняння (1) замінюємо на виправлені коефіцієнти. Тоді задача з ідентифікованими параметрами має вигляд:

$$(1 + \eta h^2) y'' + (p + \alpha h^2) y' + (q + \beta h^2) y = f - \theta h^2, \tag{7}$$

де $\eta_i, \alpha_i, \beta_i, \theta_i$ – поправки, які обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} &\beta_i = \mu_i (q_i' p_i - q_i''); \qquad \theta_i = \mu_i (p_i f_i' - f_i''), \qquad (i \ge 1) \\ &\eta_i = \mu_i (p_i^2 - 2p_i' - q_i); \quad \alpha_i = \mu_i (p_i q_i + p_i p_i' - p_i'' - 2q_i'); \\ &\mu_1 = \frac{1}{6}; \quad \mu_2 = \frac{2}{3}; \quad \mu_3 = \mu_4 = \ldots = 1. \end{aligned} \tag{8}$$

Розв'язок рівнянь (1), (2) будемо шукати у вигляді сплайну

$$S_3(x) = \sum_{i=-1}^{\infty} C_i B_3\left(\frac{x}{h} - i\right), \quad x \in [0, nh], \quad n \in N, \tag{9}$$

де $B_3\left(\frac{x}{h} - i\right)$ – нормований кубічний B-сплайн.

Застосуємо класичний сплайн-колокаційний метод до задачі (7). Після використання відомих значень B-сплайну та його похідних у вузлах розбиття розв'язання задачі може бути зведено до розв'язання наступної системи відносно коефіцієнтів сплайну (9):

$$\begin{cases} C_{-1} + 4C_0 + C_1 = 6y_0, \\ C_1 - C_{-1} = 2hy_0', \\ C_1 - 2C_0 + C_{-1} = h^2 \left(f_0 - q_0 y_0 - p_0 y_0'\right), \\ (1 + \eta_i \frac{h^2}{12}) \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{h^2} + (p_i + \alpha_i \frac{h^2}{12}) \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h} + \\ + (q_i + \beta_i \frac{h^2}{12}) \frac{C_{i+1} + 4C_i + C_{i-1}}{6} = (f_i + \theta_i \frac{h^2}{12}) \end{cases} \quad i = 1, \overline{N-1}. \tag{10}$$

Розв'язання системи (10) може бути зведено до наступної схеми обчислення коефіцієнтів сплайну (9):

$$\begin{aligned} &C_0 = y_0 - \frac{h^2}{6}(f_0 - q_0 y_0 - p_0 y_0'), \\ &C_1 = y_0 + hy_0' + \frac{h^2}{3} y_0'', \\ &C_{i+1} = K_i \cdot C_i - M_i \cdot C_{i-1} + R_i, \quad (i \ge 2), \end{aligned} \tag{11}$$

де

$$K_i = \frac{2 + \frac{1}{6}\eta_i h^2 - \frac{2}{3} q_i h^2 - \beta_i \frac{h^4}{18}}{1 + \frac{p_i h}{2} + \frac{q_i h^2}{6} + \frac{\eta_i h^2}{12} + \frac{\alpha_i h^3}{24} + \frac{\beta_i h^4}{72}},$$

$$M_i = \frac{1 - \frac{1}{2} p_i h + \frac{1}{6} q_i h^2 + \frac{1}{12}\eta_i h^2 - \frac{1}{24}\alpha_i h^3 + \frac{1}{72}\beta_i h^4}{1 + \frac{p_i h}{2} + \frac{q_i h^2}{6} + \frac{\eta_i h^2}{12} + \frac{\alpha_i h^3}{24} + \frac{\beta_i h^4}{72}}, \qquad i = 1, \overline{N}. \tag{12}$$

$$R_i = \frac{f_i h^2 + \frac{1}{12}\theta_i h^4}{1 + \frac{p_i h}{2} + \frac{q_i h^2}{6} + \frac{\eta_i h^2}{12} + \frac{\alpha_i h^3}{24} + \frac{\beta_i h^4}{72}},$$

де $\eta_i, \alpha_i, \beta_i, \theta_i \quad (i \ge 1)$ мають вигляд (8).

Перевага цієї схеми в тому, що вона має більш високу точність в порівнянні з класичною колокаційною схемою, порядок точності якої, як відомо, $O(h^2)$.

Продемонструємо наведену схему підвищеної точності відновлення кривої розв'язку задачі (1), (2) сплайнами з використанням можливостей програм Microsoft Office, зокрема електронних таблиць.

Нехай задано диференціальне рівняння

$$y'' + \frac{0{,}5}{1+x} \cdot y' - \frac{x}{1+x} \cdot y = -\frac{1{,}5 + x^2 + x^3}{(1+x)^3}$$

з початковими умовами: $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$.

Необхідно знайти розв'язок диференціального рівняння за методом сплайн-колокації підвищеної точності по рівномірному розбиттю на інтервалі [0;2] з кроком $h = 0{,}1$.

Відомо, що $y = \frac{x}{1+x}$ – точний розв'язок. Наведемо алгоритм розв'язання задачі.

Функції $p(x), q(x), f(x)$ задані.

$p(x) = \frac{0.5}{1+x}$ – коефіцієнт при y'; $q(x) = \frac{x}{1+x}$ – коефіцієнт при y;

$f(x) = \frac{1.5 + x^2 + x^3}{(1+x)^3}$ – права частина диференційного рівняння.

Заносимо значення x_i в таблицю Excel та обчислюємо значення p_i, q_i, f_i (табл.1).

Обчислюємо $p'(x), p''(x), q'(x), q''(x), f'(x), f''(x)$ (табл.1):

$$p' = \frac{-0.5}{(1+x)^2}; \qquad p'' = \frac{1}{(1+x)^3};$$

$$q' = \frac{1}{(1+x)^2}; \qquad q'' = \frac{2}{(1+x)^3};$$

$$f' = \frac{2(x+x^2)-4.5}{(1+x)^4}; \qquad f'' = \frac{4x^2+2x+20}{(1+x)^5}.$$

Таблиця 1 – Приклад занесення до таблиці даних та розрахунок похідних

i	x	p	p'	p''	q	q'	q''	f	f'	f''
-1	-0,1									
0	0	0,5	-0,5	1	0	-1	2	-1,5	4,5	20
1	0,1	0,4545	-0,4132	0,751315	-0,09091	-0,82645	1,50263	-1,13524	2,923298	12,56745
2	0,2	0,4167	-0,3472	0,578704	-0,16667	-0,69444	1,157407	-0,89583	1,938657	8,262603
3	0,3	0,3846	-0,2959	0,455166	-0,23077	-0,59172	0,910332	-0,736	1,302475	5,645137
4	0,4	0,3571	-0,2551	0,364431	-0,28571	-0,5102	0,728863	-0,62828	0,879842	3,986434
5	0,5	0,3333	-0,2222	0,296296	-0,33333	-0,44444	0,592593	-0,55556	0,592593	2,897119
6	0,6	0,3125	-0,1953	0,244141	-0,375	-0,39063	0,488281	-0,50684	0,393677	2,159119
7	0,7	0,2941	-0,173	0,203542	-0,41176	-0,34602	0,407083	-0,47486	0,253828	1,645236
8	0,8	0,2778	-0,1543	0,171468	-0,44444	-0,30864	0,342936	-0,45473	0,154321	1,278599
9	0,9	0,2632	-0,1385	0,145794	-0,47368	-0,27701	0,291588	-0,44307	0,082872	1,011268
10	1	0,25	-0,125	0,125	-0,5	-0,25	0,25	-0,4375	0,03125	0,8125
11	1,1	0,2381	-0,1134	0,10798	-0,52381	-0,22676	0,215959	-0,43635	-0,00617	0,66208
12	1,2	0,2273	-0,1033	0,093914	-0,54545	-0,20661	0,187829	-0,43839	-0,0333	0,546411
13	1,3	0,2174	-0,0945	0,08219	-0,56522	-0,18904	0,164379	-0,44275	-0,05289	0,45616
14	1,4	0,2083	-0,0868	0,072338	-0,58333	-0,17361	0,144676	-0,44878	-0,06691	0,384798
15	1,5	0,2	-0,08	0,064	-0,6	-0,16	0,128	-0,456	-0,0768	0,32768
16	1,6	0,1923	-0,074	0,056896	-0,61538	-0,14793	0,113792	-0,46404	-0,08359	0,281449
17	1,7	0,1852	-0,0686	0,050805	-0,62963	-0,13717	0,101611	-0,47264	-0,08806	0,243642
18	1,8	0,1786	-0,0638	0,045554	-0,64286	-0,12755	0,091108	-0,4816	-0,09078	0,21243
19	1,9	0,1724	-0,0595	0,041002	-0,65517	-0,11891	0,082004	-0,49075	-0,09218	0,186435
20	2	0,1667	-0,0556	0,037037	-0,66667	-0,11111	0,074074	-0,5	-0,09259	0,164609

1. Знаходимо допоміжні значення з (8) та (12), які необхідні для розрахунку коефіцієнтів сплайну (табл.2):

2. Використовуючи початкові умови, знаходимо коефіцієнти за формулами (11).

3. На кожному інтервалі $[x_i, x_{i+1}]$ будуємо сплайн за формулою:

$$y(x) = S_3(x) = \frac{1}{6}\left(C_{i+1} + 4C_i + C_{i-1}\right) + \frac{1}{2h}\cdot\left(C_{i+1} - C_{i-1}\right)\cdot\left(x - ih\right) +$$
$$\frac{1}{2h^2}\cdot\left(C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}\right)\cdot(x-ih)^2 + \frac{\Delta^2\left(C_{i+1} - C_i\right)}{6h^3}\cdot\left(x - ih\right)^3 \qquad \text{при } i = \overline{0, N},$$

введемо позначення, де:

$$a = \frac{1}{6}\left(C_{i+1} + 4C_i + C_{i-1}\right),$$

$$b = \frac{1}{2h}\cdot\left(C_{i+1} - C_{i-1}\right)\cdot\left(x - ih\right),$$

$$c = \frac{1}{2h^2}\cdot\left(C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}\right), \qquad d = \frac{\Delta^2\left(C_{i+1} - C_i\right)}{6h^3}.$$

Таблиця 2 – Розрахунок допоміжних коефіцієнтів

μ	η	α	β	Q	Ki	Mi	Ri
0.166667	0.208333	0.208333	-0.41667	-2.95833	1.951215	0.951211	-0.01466
0.666667	0.749311	0.698723	-1.25219	-7.49245	1.956419	0.95552	-0.01116
1	1.034722	0.885417	-1.44676	-7.45483	1.96078	0.959136	-0.00883
1	0.970414	0.7533	-1.13792	-5.14419	1.964492	0.962219	-0.00726
1	0.923469	0.645044	-0.91108	-3.67221	1.967684	0.96487	-0.0062
1	0.888889	0.555556	-0.74074	-2.69959	1.970458	0.967174	-0.00549
1	0.863281	0.480957	-0.61035	-2.03609	1.972892	0.969195	-0.00501
1	0.844291	0.418278	-0.50885	-1.57058	1.975043	0.970981	-0.00469
1	0.830247	0.365226	-0.42867	-1.23573	1.976959	0.972572	-0.0045
1	0.819945	0.320017	-0.36448	-0.98946	1.978676	0.973997	-0.00438
1	0.8125	0.28125	-0.3125	-0.80469	1.980224	0.975282	-0.00433
1	0.807256	0.247813	-0.26995	-0.66355	1.981625	0.976446	-0.00432
1	0.803719	0.21882	-0.23479	-0.55398	1.982901	0.977505	-0.00434
1	0.801512	0.193556	-0.20547	-0.46766	1.984068	0.978473	-0.00438
1	0.800347	0.171441	-0.18084	-0.39874	1.985138	0.979361	-0.00445
1	0.8	0.152	-0.16	-0.34304	1.986123	0.980179	-0.00452
1	0.800296	0.134843	-0.14224	-0.29752	1.987033	0.980935	-0.0046
1	0.801097	0.119646	-0.12701	-0.25995	1.987877	0.981635	-0.00469
1	0.802296	0.106141	-0.11388	-0.22864	1.98866	0.982285	-0.00478
1	0.803805	0.0941	-0.10251	-0.20233	1.98939	0.982891	-0.00487
1	0.805556	0.083333	-0.09259	-0.18004	1.990072	0.983457	-0.00496

4. Для порівняння наближеного розв’язку з точним відомим розв’язком обчислюємо значення точного розв’язку в стовпчику поряд із значеннями сплайну. Точність наближення дає їх різниця.

Таблиця 3 – Визначення коефіцієнтів C_i та S_3

Ci	i	x	S3	y(x)	a	b	c	d	x-ih	|S3-y(x)|
-0.10667	-1									
0.003333	0	0	0	0	0	0.01	-0.0001	8.20837E-07	0	0
0.093333	1	0.1	0.090821	0.090909	0.090821	0.008246	-7.53749E-05	5.76462E-07	0	8.82536E-05
0.168258	2	0.2	0.166322	0.166667	0.166322	0.006912	-5.8081E-05	4.15098E-07	0	0.000344343
0.231567	3	0.3	0.230046	0.230769	0.230046	0.005875	-4.56281E-05	3.04246E-07	0	0.000722989
0.28575	4	0.4	0.284534	0.285714	0.284534	0.005053	-3.65007E-05	2.28013E-07	0	0.001180594
0.332633	5	0.5	0.331645	0.333333	0.331645	0.004392	-2.96603E-05	1.74188E-07	0	0.001688565
0.373584	6	0.6	0.37277	0.375	0.37277	0.003851	-2.44347E-05	1.35307E-07	0	0.002230042
0.409649	7	0.7	0.408969	0.411765	0.408969	0.003403	-2.03754E-05	1.06652E-07	0	0.002795371
0.441637	8	0.8	0.441065	0.444444	0.441065	0.003027	-1.71759E-05	8.51552E-08	0	0.003379476
0.470191	9	0.9	0.469704	0.473684	0.469704	0.002709	-1.46212E-05	6.87709E-08	0	0.003980281
0.495821	10	1	0.495402	0.5	0.495402	0.002437	-1.25581E-05	5.61037E-08	0	0.004597737
0.518939	11	1.1	0.518576	0.52381	0.518576	0.002203	-1.0875E-05	4.61826E-08	0	0.005233213
0.539882	12	1.2	0.539565	0.545455	0.539565	0.001999	-9.4895E-06	3.83197E-08	0	0.005889105
0.558927	13	1.3	0.558649	0.565217	0.558649	0.001821	-8.33991E-06	3.20194E-08	0	0.006568586
0.576304	14	1.4	0.576058	0.583333	0.576058	0.001664	-7.37933E-06	2.69193E-08	0	0.007275445
0.592205	15	1.5	0.591986	0.6	0.591986	0.001524	-6.57175E-06	2.27508E-08	0	0.008013995
0.606792	16	1.6	0.606596	0.615385	0.606596	0.0014	-5.88923E-06	1.93125E-08	0	0.008789012
0.620201	17	1.7	0.620024	0.62963	0.620024	0.001288	-5.30985E-06	1.64513E-08	0	0.009605713
0.632548	18	1.8	0.632387	0.642857	0.632387	0.001187	-4.81631E-06	1.40496E-08	0	0.010469745
0.643932	19	1.9	0.643785	0.655172	0.643785	0.001094	-4.39482E-06	1.20164E-08	0	0.011387198
0.654437										
0.664134										

5. Будуємо наближений сплайн розв'язок та точний розв'язок за допомогою Мастера диаграмм (рис.1.)

Значення найбільшого відхилення точного розв'язку від наближеного складає 0,0011387.

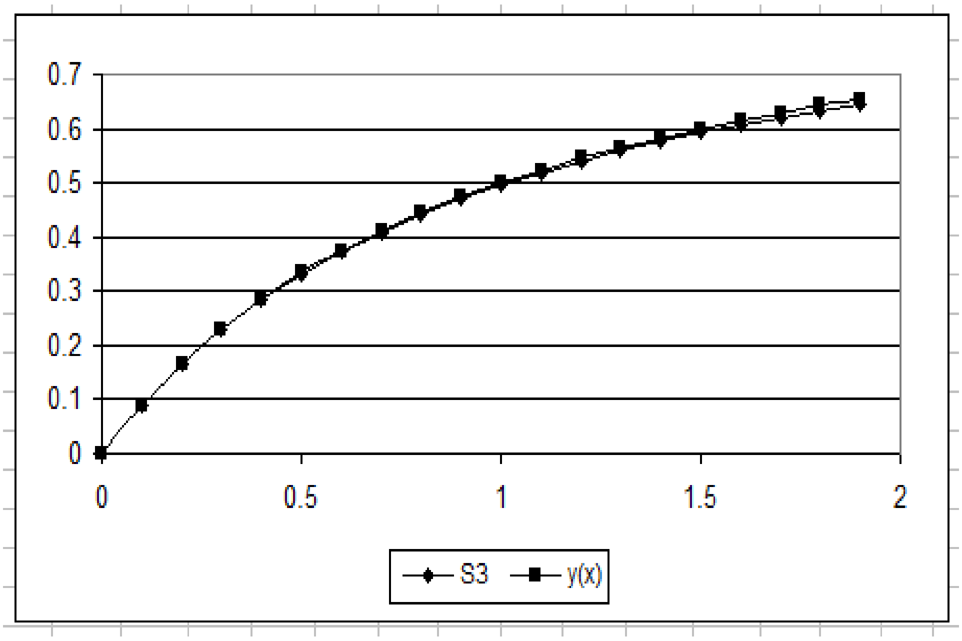

Рисунок 1 – Побудова точного розв'язку диференціального рівняння та сплайну

Обчислені коефіцієнти C_i дозволяють отримати значення відновленого розв'язку в будь-якій точці. Кожен інтервал $[x_i, x_{i+1})$ також розіб'ємо на інтервали з кроком 0,02 і для кожного нового значення із інтервалу обчислюємо $S_3(x), y(x)$.

Таблиця 4 – Побудова відновленого розв'язку задачі (1), (2) сплайнами в точках $x \in [x_i, x_{i+1})$

Ci	i	x	S3	y(x)	a	b	c	d	x-ih	|S3- y(x)|
-0.10667	-1									
-0.10667	-1									
-0.10667	-1									
-0.10667	-1									
-0.10667	-1									
0.003333	0	0	0	0	0	1	-1	0.820837341	0	0
0.003333	0	0.02	0.019607	0.019608	0	1	-1	0.820837341	0.02	1.27644E-06
0.003333	0	0.04	0.038453	0.038462	0	1	-1	0.820837341	0.04	9.00487E-06
0.003333	0	0.06	0.056577	0.056604	0	1	-1	0.820837341	0.06	2.64727E-05
0.003333	0	0.08	0.07402	0.074074	0	1	-1	0.820837341	0.08	5.38054E-05
0.093333	1	0.1	0.090821	0.090909	0.090821	0.824625	-0.753748798	0.576462149	0	8.82536E-05
0.093333	1	0.12	0.107016	0.107143	0.090821	0.824625	-0.753748798	0.576462149	0.02	0.000126405
0.093333	1	0.14	0.122637	0.122807	0.090821	0.824625	-0.753748798	0.576462149	0.04	0.00017028
0.093333	1	0.16	0.137709	0.137931	0.090821	0.824625	-0.753748798	0.576462149	0.06	0.00022167
0.093333	1	0.18	0.152262	0.152542	0.090821	0.824625	-0.753748798	0.576462149	0.08	0.00028037
0.168258	2	0.2	0.166322	0.166667	0.166322	0.691169	-0.580810153	0.41509762	0	0.000344343
0.168258	2	0.22	0.179917	0.180328	0.166322	0.691169	-0.580810153	0.41509762	0.02	0.000411164
0.168258	2	0.24	0.193066	0.193548	0.166322	0.691169	-0.580810153	0.41509762	0.04	0.000482025
0.168258	2	0.26	0.205791	0.206349	0.166322	0.691169	-0.580810153	0.41509762	0.06	0.000557985
0.168258	2	0.28	0.218111	0.21875	0.166322	0.691169	-0.580810153	0.41509762	0.08	0.000638793

Висновки. Розроблені метод та алгоритм відновлення розв'язку диференціального рівняння при заданих початкових умовах реалізовано за допомогою засобів Microsoft Excel. Наведений алгоритм є ефективними та зручним у застосуванні. Він реалізує метод підвищеної точності, який дає можливість підвищення ступеня адекватності наближеного розв'язку точному. До того ж наближений розв'язок знаходиться відразу в усій області визначення рівняння в аналітичному вигляді, що дозволяє отримати значно більшу інформацію про точний розв'язок і є зручним для будь-якого дослідника при розв'язанні прикладних задач.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дронов С.Г. О сплайн-схеме повышенной точности решения задачи Коши / Дронов С.Г., Худая Ж.В. // Приближение функций и суммирование рядов. – Днепропетровск. – 1992. – С.29-38.
2. Худая Ж.В. О параметризации почти интерполяционных в среднем параметрических сплайнов, описывающих замкнутые кривые / Худая Ж.В., Свириденко Н.Н. // Днепродзержинск, 1992. – 12с. – Деп. в УкрИНТЭИ 03.12.92., №1900 – Ук-92.

Надійшла до редколегії 07.12.2011.

УДК 004.031.43:681.5:658.5(078)

ЛИТВИН А. И., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

СОЗДАНИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ

Введение. Ключевыми элементами системы тренинга в рамках динамического тренажера (ДТ) являются наглядность технологического процесса (ТП) и представление его как совокупности объектов управления (ОУ). Причем, для ДТ как модельной системы управления ТП и ОУ важно сохранять все управленческие функции, свойственные реальным автоматизированным системам управления (АСУ).

Оптимальными средствами реализации подобного подхода являются инструментальные системы разработки, прежде всего SCADA-системы.

Постановка задачи. В рамках создания ДТ для ТП необходимо разработать понятный и наглядный графический интерфейс автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора/диспетчера с сохранением всех ключевых функций производственных АСУ.

В качестве примера ТП и ОУ рассматривается парогенератор барабанного типа, для которого реализованы элементы ДТ.

Результаты работы. Котельный агрегат (парогенератор) включает барабан, топку, пароперегреватель и хвостовые поверхности нагрева (для простоты схемы не показаны) (рис.1). Основной показатель качества работы парогенератора – давление пара за котлом, основное возмущение – колебания нагрузки. Поэтому, основная задача при автоматизации котельного агрегата – регулирование давления пара на выходе котла.

Эта задача решается с помощью каскадной автоматизированной системы регулирования (АСР) давления пара за котлом (поз.1). Промежуточная регулируемая величина – давление пара в барабане, регулирующее воздействие – расход топлива.