К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ СФЕРЫ И КОНУСА

Коломиец А. Ф., Пастернак Д. Н., Несмеянова Е. А.
(каф. НГ и ИГ, ДонНТУ, г. Донецк)

В статье изучен один из способов построения линии пересечения сферы и прямого кругового конуса. Способ основан на следующих положениях. Сечение сферы плоскостью, проходящей через ее центр, суть большая окружность. При вращении ее вокруг линии уровня, проходящей через центр сферы, до положения, параллельного плоскости проекций, она совпадает с контуром проекции сферы. Плоскость, проходящая через вершину конуса, рассекает его по прямолинейным образующим.

Рассмотрим сущность способа на конкретном примере. Задана сфера с центром *O* и прямой круговой конус с осью $l \perp \Pi_1$. Центр *O* и ось *l* лежат во фронтальной плоскости (рис. 1). Последнее допущение дает возможность решить задачу, используя только фронтальную проекцию.

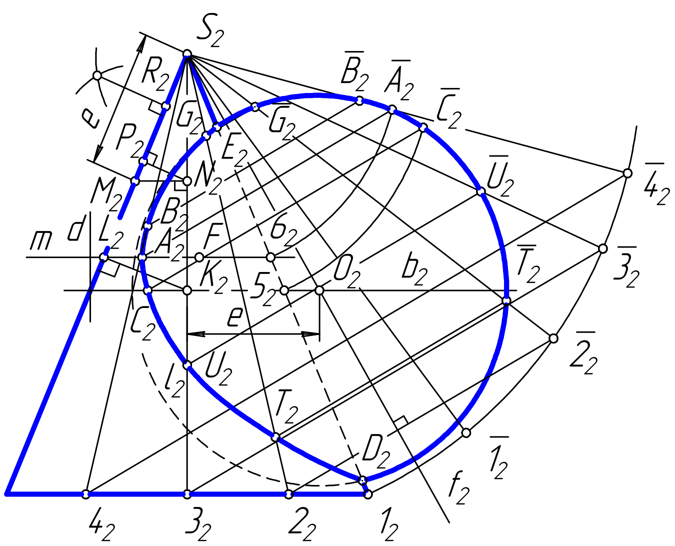


Рис.1. Линия пересечения сферы и конуса

Проведем фронталь $f(f_2)$ через вершину *S* и центр *O*. Любая плоскость проходящая через *f* , рассечет сферу по большой окружности, а конус по прямолинейным образующим. Точки пересечения полученных линий будут принадлежать искомой линии пересечения. Построим две случайные точки *T* и *G* лини пересечения. Проведем образующую $S2(S_2 2_2)$. Пусть плоскость Σ, проходящая через *f*, пересечет конус по этой образующей. Сферу она пересечет по большой окружности. Ее проекция не построена. Повернем образующую *S2* вокруг фронтали *f* до положения $S_2\overline{2}_2$, параллельного Π_2. Точку $\overline{2}_2$ можно построить, найдя натуральную величину радиуса вращения. Такой путь графически трудоемкий. Длины всех образующих конуса одинаковы. Поэтому концы образующих в повернутом положении будут находиться на окружности *n* радиуса $S_2 1_2$. Следовательно точка $\overline{2_2}$ окажется на пересечении дуги *n* и проекции траектории, идущей из точки 2_2 перпендикулярно f_2. Повернутое положение сечения сферы плоскостью Σ совпадает с проекцией контура сферы. Отмечаем точки $\overline{T_2}, \overline{G_2}$. Обратным вращением находим проекции T_2, G_2. На рисунке построена ещё одна точка U_2, лежащая на $S_2 3_2 = l_2$. Из точки 3_2 проведена проекция траектории точки *3* перпендикулярно f_2 до пересечения с *n* в точке $\overline{3_2}$. Проводим $S_2\overline{3_2}$. Отмечаем точку $\overline{U_2}$ пересечения $S_2\overline{U_2}$ и проекции контура сферы. Обратным вращением находим U_2. Аналогично можно построить любое количество точек, соединив которые лекальной линией, получим фронтальную проекцию искомой линии пересечения.

Для повышения точности построений найдем опорные точки линии пересечения. На фронтальной проекции их будет пять. Две из них $D(D_2)$, $E(E_2)$ находятся на пересечении проекций контурных образующих. Третья точка $C(C_2)$ лежит на уровне экватора $b(b_2)$ сферы. Через точку 5_2 проводим дугу радиусом $S_2 5_2$ до пересечения с проекцией контура сферы в точке $\overline{C_2}$. Обратным вращением находим C_2. Четвертая точка $A(A_2)$ – крайняя. Касательная прямая в точке A_2 к проекции линии пересечения будет вертикальна. Линия пересечения конуса и сферы – пространственная кривая 4-го порядка. Ее плоскость симметрии параллельна Π_2. Поэтому на Π_2 линия пересечения спроецируется кривой 2-го порядка – в данном случае параболой. Точка A_2 будет ее вершиной. Она расположена на так называемой средней линии *m* [1], которая является осью параболы. Ось *m* строится следующим образом. Отмечаем точку $K_2 = l_2 \cap b_2$.Из точки K_2 проводим перпендикуляр K_2L_2 к проекции контурной образующей конуса. Получим точку L_2. Через L_2 проводим *m* перпендикулярно l_2. Выделяем точку 6_2. Проводим дугу радиусом $S_2 6_2$ до пересечения с проекцией контура сферы в точке $\overline{A_2}$. Обратным вращением находим A_2. На линии *m*, как на оси лежит фокус (точка *F*) параболы. Его можно построить так. Замеряем отрезок O_2K_2 и откладываем его на проекции контурной образующей от точки S_2. Получим точку M_2. Из M_2 проводим перпендикуляр M_2N_2 к l_2. Из точки N_2 строим перпендикуляр N_2P_2 к проекции контурной образующей. Отрезок S_2P_2 равен параметру *p* параболы. Разделив его пополам в точке R_2, замеряем отрезок S_2R_2 и откладываем его от точки A_2 вправо. Получим фокус *F*. На таком же расстоянии слева расположена директриса *d*. Пятая опорная точка B_2 является точкой касания проекции образующей конуса к проекции линии пересечения. Она строится следующим образом. Через S_2 проводим касательную $S_2\overline{4_2}$ к окружности в точке $\overline{B_2}$. Из точки $\overline{4_2}$ проводим проекцию точки *4* до пересечения с основанием конуса в точке 4_2. На проекции $S_2 4_2$, будет расположена искомая точка B_2.

Все построенные опорные точки будут опорными и для горизонтальной проекции лини пересечения. На горизонтальной проекции будут по две точки *A* и *A’*, *B* и *B’*, *C* и *C’*, симметричные относительно общей плоскости симметрии конуса и сферы. Точки *C* и *C’* разделяют линию пересечения на две части – верхнюю, видимую, и нижнюю, невидимую на горизонтальной проекции.

Как частный случай изученного способа вытекает построение точек пересечения прямой со сферой. На рис. 2 изображено построение точек *M*, *N* пересечения прямой *l* со сферой. Через центр *O* проведена горизонтальная прямая *h*, пересекающая прямую *l* в точке *A*. Прямая *l* и горизонталь *h* задают плоскость *Σ*. Она рассечет сферу по большой окружности *m*. На пересечении *m* и *l* находятся искомые точки *M*, *N*. Вокруг горизонтали *h* поворачиваем плоскость *Σ* вместе с *m* и *l* до положения уровня. Прямая *l* повернута с помощью случайной точки *B*. Повернутое положение $\overline{m}_1$ окружности *m* совпадает с горизонтальной проекцией k_1 контура сферы. Отмечаем точки пересечения $\overline{M}_1, \overline{N}_1$ линий $\overline{l}_1, \overline{m}_1$. Обратным вращением находим M_1, N_1 и M_2, N_2 на исходных проекциях.

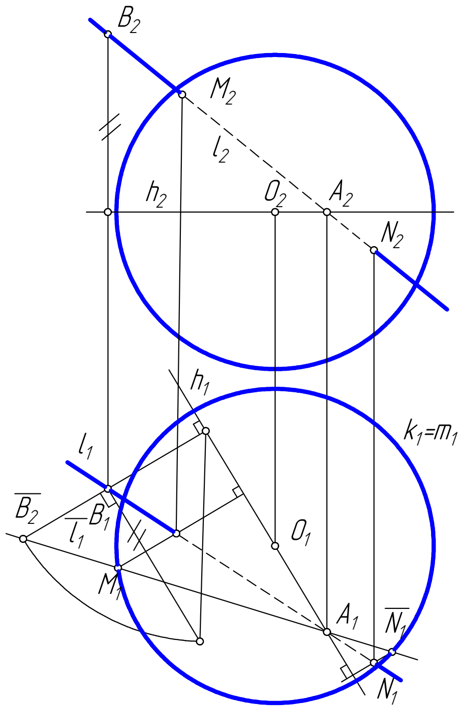


Рис. 2. Точки пересечения сферы и прямой

Рассмотренный способ построения линии пересечения сферы и конуса и точек пересечения сферы и прямой является наиболее простым и точным.

Список литературы: 1. Глазунов Е. А. О проекции линии пересечения двух поверхностей второго порядка, имеющих общую плоскость симметрии // Труды Московского семинара по начертательной геометрии и инженерной графике. – М.: Гос. изд–во “Советская наука”, 1958. – С. 35 – 69. **2**. Колотов С. М. Об использовании геометрических мест в начертательной геометрии // Вопросы теории и практики начертательной геометрии. – К.: Киевский инженерно-строительный институт, 1960. – С. 3 – 12.

ВИПУКЛІСТЬ ЕРМІТОВА КУБІЧНОГО СПЛАЙНУ

Ольховиченко Н.Г., Порохня А.В. *(каф. НГ і ІГ, ДонНТУ, г. Донецьк, Україна)*

Робота присвячена визначенню умов випуклості ермітова кубічного сплайну, а також умов збереження характеру змін другої похідної функції у вузлових точках сплайну.

При розв'язанні практичних задач проектування поверхонь лопаток вентиляторів шахтного провітрювання з'являється необхідність інтерполяції функції з фіксованими значеннями першої похідної у вузлових точках. Така задача може бути розв'язана за допомогою ермітова кубічного сплайну [1].

Нехай у вузлах сітки $\Delta : a = x_0 < x_1 < \cdots x_N = b$ задані значення функції $f(x)$ і її похідної $f^/(x)$. $f_i = f(x_i)$, $f_i^/(x) = f^/(x_i)$, i =0,1…N.

Ермітовим кубічним сплайном називають функцію S(x), яка задовольняє вимогам:

1. На кожному відрізку $\lfloor x_i, x_{i+1} \rfloor$ $S(x) = A_{i0} + A_{i1}(x - x_i) + A_{i2}(x - x_i)^2 + A_{i3}(x - x_i)^3$,

2. $S(x_i) = f_i$, $S^/(x_i) = f_i^/$, $i = 0, \cdots, N$.

Для обчислення коефіцієнтів A_{i0}, A_{i1}, A_{i2} та A_{i3}, при кожному i маємо систему рівнянь

$$S(x_i) = f_i\ ,\ S(x_{i+1}) = f_{i+1},\ S^/(x_i) = f_i^/\ ,\ S^/(x_{i+1}) = f_{i+1}{}^/ .$$

Розв'язав цю систему, отримаємо на $\lfloor x_i, x_{i+1} \rfloor$

$$S(x) = \varphi_1(t) f_i + \varphi_2(t) f_{i+1} + \varphi_3(t) h_i f_i^/ + \varphi_4(t) h_i f_{i+1}^/,$$

де $\varphi_1(t) = (1-t)^2(1+2t)$, $\varphi_2(t) = t^2(3-2t)$, $\varphi_3(t) = t(1-t)^2$,

$\varphi_4(t) = -t^2(1-t)$, $h_i = x_{i+1} - x_i$, $t = (x - x_i)$.

Ця формула зручна для теоретичних досліджень. Для практичного обчислення сплайну у точках $x \in \lfloor x_i, x_{i+1} \rfloor$ більш вигідно, з точки зору кількості арифметичних операцій, слідуючи формули.

$$S(x) = f_i + (x - x_i)\left[f_i^/ + t(B + tA) \right],$$

де $A = -2(f_{i+1} - f_i)/h_i + (f_{i+1}^/ + f_i^/)$, $B = -A + (f_{i+1} - f_i)h_i - f_i^/$.

В практичних задачах часто бувають відомі тільки значення функції f_i у вузлових точках, а значення перших похідних $f_i^/$ у вузлових точках не відомі. Найбільш простим виходом з такої ситуації з'являється використання замість точних значень похідної деяких значень, що аппроксимують $f_i^/$. Побудуємо таку апроксимацію на основі роздільних різниць D_i, які запишемо у вигляді

$$D_i = \lambda_i \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}} + \mu_i \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i}, \quad i = 1,2,\ldots,N-1,$$

$$D_0 = (1+\mu_1)\frac{f_1 - f_0}{h_0} - \mu_2 \frac{f_2 - f_1}{h_1},$$

$$D_N = -\lambda_{N-1} \frac{f_{N-1} - f_{N-2}}{h_{N-2}} + (1-\lambda_{N-1})\frac{f_N - f_{N-1}}{h_{N-1}},$$

де $\mu_i = h_{i-1}(h_i + h_{i-1})^{-1}, \quad \lambda_{i=1} = 1 - \mu_i.$

$S(x)$ належить класу C^1. Друга похідна, у загальному випадку, розривна у вузлах сітки Δ. При інтерполяції функції часто буває необхідно зберегти деякі її якісні характеристики. Наприклад, коли $f(x)$ - випукла униз функція ($f^{//}(x)$ >0), то природно вимогати, щоб сплайн теж був випуклим униз. Друга похідна кубічного многочлену на кожному відрізку $\lfloor x_i, x_{i+1} \rfloor$ є лінійною функцією, тому $S^{//}(x) \geq 0$, коли усі другі похідні у вузлових точках додатні $S^{//}(x) = M_i \geq 0$.

Другі похідні у вузлових точках обчислюються за формулами

$$M_i = \frac{6(f_{i+1} - f_i)}{h_i^2} - \frac{2f_{i+1}^{/}}{h_i} - \frac{4f_i^{/}}{h_i}, \tag{1}$$

$$M_{i+1} = -\frac{6(f_{i+1} - f_i)}{h_i^2} + \frac{4f_{i+1}^{/}}{h_i} + \frac{2f_i^{/}}{h_i}. \tag{2}$$

Нехай $f(x)$ є функцією, що зростає. Перші похідні запишемо у вигляді

$$f_i^{/} = \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} - \delta_i,$$

$$f_{i+1}^{/} = \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + k_{i+1}\delta_i, \text{ де } k_i > 0, \quad \delta_i > 0. \tag{3}$$

Підставимо їх у формули (1) і (2).

$$M_i = \frac{4\delta_i - 2k_{i+1}\delta_i}{h_i}; \quad M_{i+1} = \frac{4k_{i+1}\delta_i - 2\delta_i}{h_i}.$$

Із умови $M_i \geq 0$ отримаємо - $k \leq 2$; із умови $M_{i+1} \geq 0$ отримаємо - $k \geq 0{,}5$.

Коли $M_i \geq M_{i+1}$, $k \leq 1$, коли $M_i \leq M_{i+1}$, $k \geq 1$.

Запишемо δ_{i+1} у вигляді

$$\delta_{i+1} = \frac{f_{i+2} - f_{i+1}}{h_i} - \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} - k_{i+1}\delta_i, \text{ оскільки } \delta_{i+1} > 0, \text{ то}$$

$$\delta_i < \frac{f_{i+2} - 2f_{i+1} + f_i}{h_i k_{i+1}}.$$ Підставимо цю нерівність у формулу (3).

$$f_i^{/} > \frac{k_{i+1}(f_{i+1} - f_i) - f_{i+2} + 2f_{i+1} - f_i}{h_i k_{i+1}},$$

звідки :

$$k_{i+1} > R_1, \text{ де } R_1 = \frac{2f_{i+1} - f_{i+2} - f_i}{h_i f_i^{/} - f_{i+1} + f_i}.$$

Оскільки $0{,}5 \le k_i \le 1$ коли $M_i \ge M_{i+1}$, то $0{,}5 \le R_1 \le 1$.

Із нерівність $R_1 \ge 0{,}5$ отримаєм

$$f_i^{/} \le R_2, де\ R_2 = \frac{5f_{i+1} - 3f_i - 2f_{i+2}}{h_i}. \qquad (4)$$

Із нерівності $R_1 \le 1$ отримаємо

$$f_i^{/} \ge R_3, \text{ де } R_3 = \frac{3f_{i+1} - 2f_i - f_{i+2}}{h_i}. \qquad (5)$$

Нерівності (4) і(5) сумісні коли

$$R_2 \le f_i^{/} \le R_3. \qquad (6)$$

Оскільки $1 \le k_i \le 2$ коли $M_i \ge M_{i+1}$, то $1 \le R_1 \le 2$.

Із нерівності $R_1 \ge 1$ отримаємо

$$f_i^{/} \le R_3 \ . \qquad (7)$$

Із нерівності $R_1 \le 2$ отримаємо

$$f_i^{/} \ge R_4, де\ R_4 = \frac{4f_{i+1} - 3f_i - 2f_{i+2}}{h_i}. \qquad (8)$$

Нерівності (7) і (8) сумісні коли

$$R_4 \le f_i^{/} \le R_3. \qquad (9)$$

Таким чином, якщо для значень першої похідної $f_i^{/}$, чи їх апроксимацій D_i виконуються умови (6), коли $M_i \ge M_{i+1}$, чи умови (9), коли $M_i \le M_{i+1}$, функція $S^{//}(x) \ge 0$. Коли ці умови не виконуються, функція $S^{//}(x)$ може бути знакозмінною, що призводить до осциляції графіка функції $S(x)$.

Список літератури: 1. Завьялов Ю.С., Квасов В.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн функций. -М. : Наука 1980.-350с.

СИЛОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПРИВОДА МАНІПУЛЯТОРА В ПРОЦЕСІ СВЕРДЛІННЯ

Паліс Ф., Русін В. *(Отто-фон-Геріке-Університет, м.Магдебург, Німеччина),*
Шнейдер А. *(Фраунхофер-інститут, м.Магдебург, Німеччина),*
Вацько В. *(каф. СПУ, ДонНТУ, м.Донецьк, Україна)*

Останнім часом зростає інтерес до автоматизації процесу свердління, а також до виконання його за допомогою роботів-маніпуляторів. Застосування роботів для свердління в атоматизованих технологічних процесах може бути потрібним для таких операцій, як монтаж, демонтаж, утилізація, сервісні операції у медицині [1]; свердління в середовищі, що є небезпечним для життєдіяльності людини [2]; в космічній галузі.

Аналіз процесу свердління і технологічних вимог до нього дозволяють виділити наступні причини, що обумовлюють необхідність конролювати силу контакту між свердлом і матеріалом при свердлінні за допомогою маніпуляторів:

- позиційне регулювання маніпуляторів з високою точністю викликає труднощі, тому що маніпулятори мають, як правило, недостатньо жорстку конструкцію;
- дослідження доводять, що сила контакту між свердлом та матеріалом безпосередньо пов’язана з таким технологічним параметром свердління, як швидкість подання свердла, який має бути контрольованим, тому є сенс у силовому регулюванні;
- сучасні процеси свердління вимагають тримати силу контакту на визначеному рівні;
- сили, що виникають під час контакту, мають не перевищувати допустимих значень, щоб уникнути механічного пошкодження маніпулятора.

Отже, можна говорити про технологічне управління процесом свердління за допомогою регулювання сили подання свердла.

Ця проблема була вже досліджена науковцями. Зокрема, переміщення корпусу шагаючого роботу для реалізації свердління, керовані за допомогою інформації про силу контакту досліджувалися У.Шмукером та А.Шнейдером [3]. Силове управління приводом маніпулятора виконували Г.Алісі та Р.Даніель [1]. В своїй роботі вони застосовували класичні методи для управління маніпулятором PUMA 560 під час реалізації процесу свердління.

Головною метою досліджень щодо силового управління приводом маніпулятора в процесі свердління, що виконувалися в відділі автоматизації Фраунхофер-інститута (м.Магдебург, Німеччина), було знайти алгоритм управління, який найкращим чином був би придатним для регулювання сили подання свердла в процесі свердління. В рамках цієї роботи були розглянені різні методи регулювання сили контакту і вирішено, що для свердління маніпулятором потрібно застосовувати методи, які реалізують активну податливість маніпуляторів. Було знайдено, що найкращим чином для виконання технологічних вимог до свердління пасує позиційне регулювання привода маніпулятора з накладеним контуром регулювання сили (рис. 1). Накладений регулятор сили додає необхідну корекцію положення маніпулятора для утримання сили контакту на постійному рівні. Є також можливість розімкнути контур сили, і тоді привод маніпулятора буде лише позиційно регульованим. Це дозволяє швидко підвести свердло до поверхні, коли відома координата точки контакту.

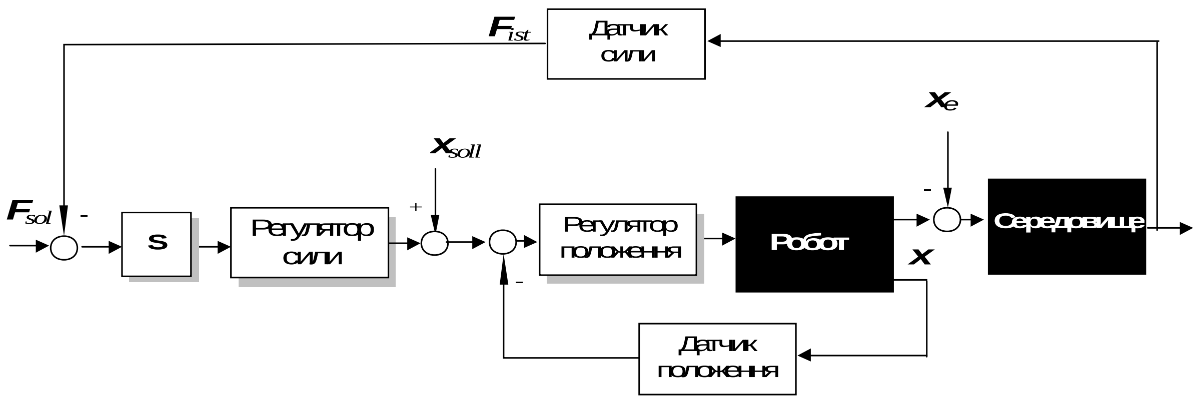
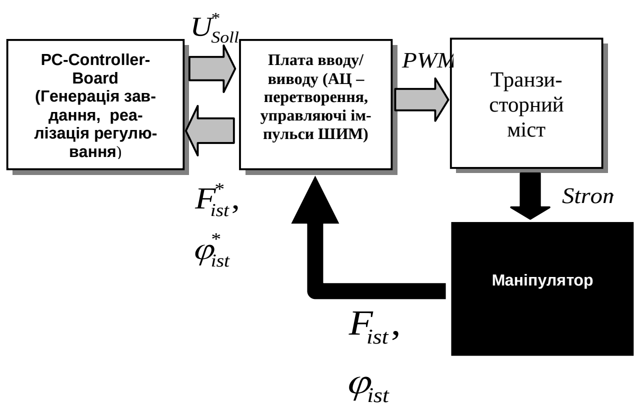


Рис. 1. Структурна схема позиційного регулювання привода з накладеним контуром регулювання сили

Експериментальні дослідження проводилися з маніпулятором шагаючого роботу “Катарина”, що був розроблений в Фраунхофер-інституті. Структура дослідницької установки зображена на рис. 2.



Було реалізоване регулювання приводом маніпулятора за допомогою контролера на базі сигнального процесора. Двигун постіного струму маніпулятору живився від керованого контролером перетворювача, який реалізовував широтно-імпульсну модуляцію.

Рис. 2. Загальна побудова дослідницької установки

Маніпулятор зображено на рис. 3.

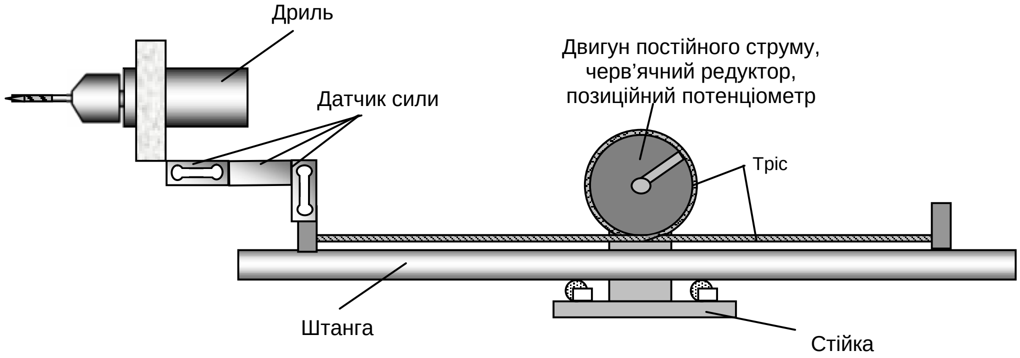
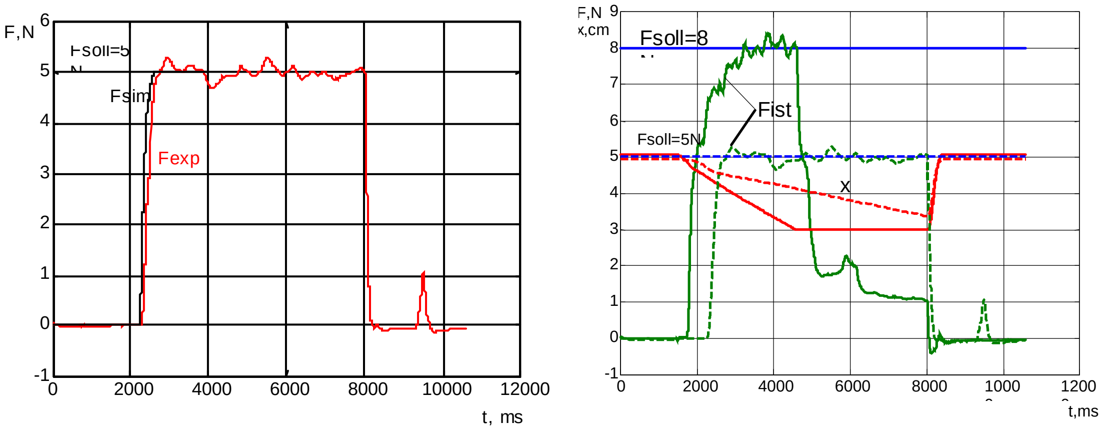


Рис. 3. Загальна побудова маніпулятора

Результати моделювання свердління і практичні результати представлені на рис. 4.



а) б)

Рис. 4. Експериментальні результати регулювання сили подання під час свердління (F – сила, x – переміщення маніпулятора); а) порівняння з результатами моделювання; б) перехідні процеси з різним завданням сили.

В якості силового регулятора був використаний ІП-регулятор, щоб уникнути статичної помилки.

На рис. 4,а порівнюються результати моделювання з практичними. Вони свідчать, що вибрана система регулювання може бути використана для вирішення поставленого завдання. Потрібно відзначити, що в даній системі була виявлена залежність якості перехідних процесів від величини завдання. Тобто регулятор з постійними параметрами може забезпечити задовільні результати лише в обмеженому робочому діапазоні.

Для розширення робочого діапазону було виконане нелінійне регулювання за допомогою фазі-логіки [4]. Система регулювання при цьому залишилася незмінною, а параметри регулятора сили змінювалися за допомогою фазі-адаптації (рис. 5).

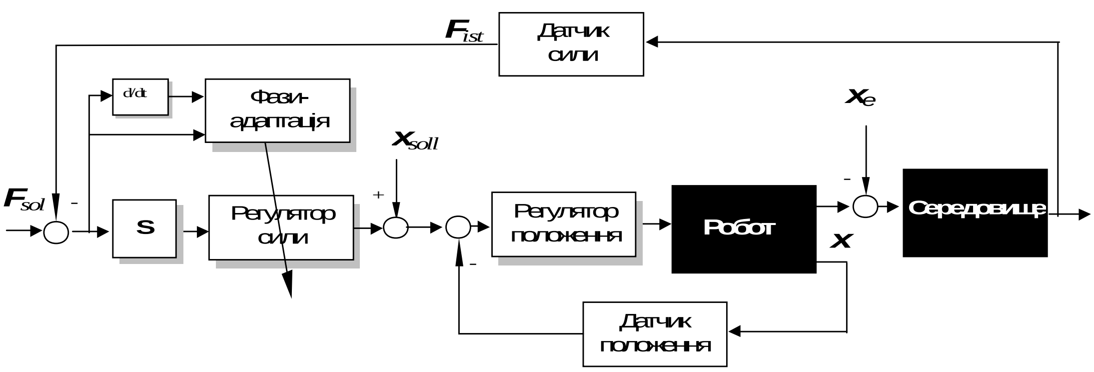


Рис. 5. Нелінійне регулювання сили

Фазі-правила були складені таким чином, щоб на початку перехідного процесу, коли помилка дуже велика, параметри регулятора були на межі стійкості. Зі зменшенням помилки регулювання параметри змінювались, щоб відповідати модульному оптимуму, і в кінці перехідного процесу вони приймали значення, менші за ті, що відповідали модульному оптимуму. Таким чином була зроблена спроба уникнути перерегулювання.

Результати застосування фазі-адаптації представлені на рис. 6.

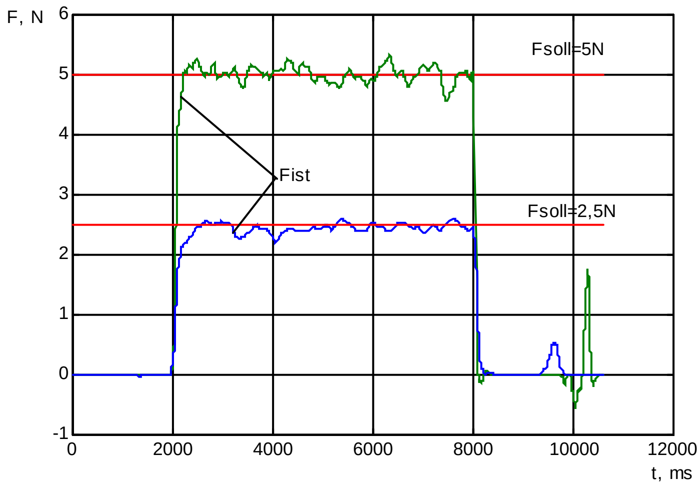


Рис. 6. Застосування фазі-адаптації для покращення якості перехідних процесів при зміні завдання на силу

Спираючись на успішну реалізацію системи управління приводом маніпулятора і приведені експериментальні результати, можна зробити висновок, що процес свердління може бути виконаний за допомогою роботів-маніпуляторів. Досліди показали, що для забезпечення задовільних результатів у широкому диапазоні завдань сили є доречним нелінійне регулювання. У рамках цього була успішно застосована фази-логіка. Має сенс перевірити можливість застосування інших інтелектуальних методів для реалізації нелінійного регулювання, зокрема нейрональних сіток.

Список літератури: 1. Schraft R.D., Volz H. Serviceroboter. Innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung. – Berlin: Springer Verlag, 1990. **2**. Alici G., Daniel R.W. Force-control-based robotic drilling in hazardous environments // International Journal of Robotics and Automation, 1996,Vol. 11, No.2.- Pp. 62-73. **3.** Gorinevsky D.M., Schneider A. Yu. Force control in locomotion of legged vehicle over rigid and soft surfaces // International Journal of Robotics Research, 1990, 9/2. – Pp. 4-23. **4.** Palis F., Rusin V. Adaptive impedance control of robot systems with mechanical constraints / 10th International Workshop on Robotics in ALPE-ADRIA-DANUBE REGION, RAAD’61.-Vienna, 2001.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РЕГУЛЮВАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЛАБОРАТОРНІЙ ТЕХНОЛОГІЧНІЙ УСТАНОВЦІ

Ріфеншталь У. *(Отто-фон-Геріке-Університет, м.Магдебург, Німеччина)*
Петрук В.Ф. *(каф. СПУ, ДонНТУ, м.Донецьк, Україна)*
Баннак А. *(Отто-фон-Геріке-Університет, м.Магдебург, Німеччина)*

Комплексна автоматизація технологічного процесу, висока надійність та просте введення в експлуатацію електричних приводів є підставами для подальшого розвитку та виявлення нових галузей їх застосування. При цьому стає дуже важливим розглядання електропривода у сукупності з об’єктом регулювання, а самого привода-не як жорсткого з’єднання двигуна та генератора, проте як еластичної дво- або тримасової механічної системи.

Схематичне зображення тримасової системи показане на рис. 1.

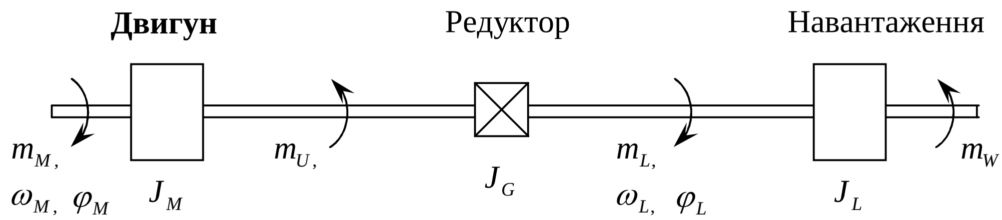


Рис.1. Тримасова механічна система електропривода

Моделювання такої системи передбачає розрахунок та побудову регуляторів швидкості. В рамках цієї роботи поруч із традиційним ПІ-регулятором швидкості було запроваджено й нове досягнення у галузі регулювання електричних приводів – так звані модальні регулятори зі спостерігачами другого та третього виду (Zustandsregler mit dem Beobachter 2.Art, Zustandsregler mit dem Beobachter 3.Art). Ці нові форми модальних регуляторів було впроваджено в Отто-фон-Геріке-Університеті м.Магдебург, вони є

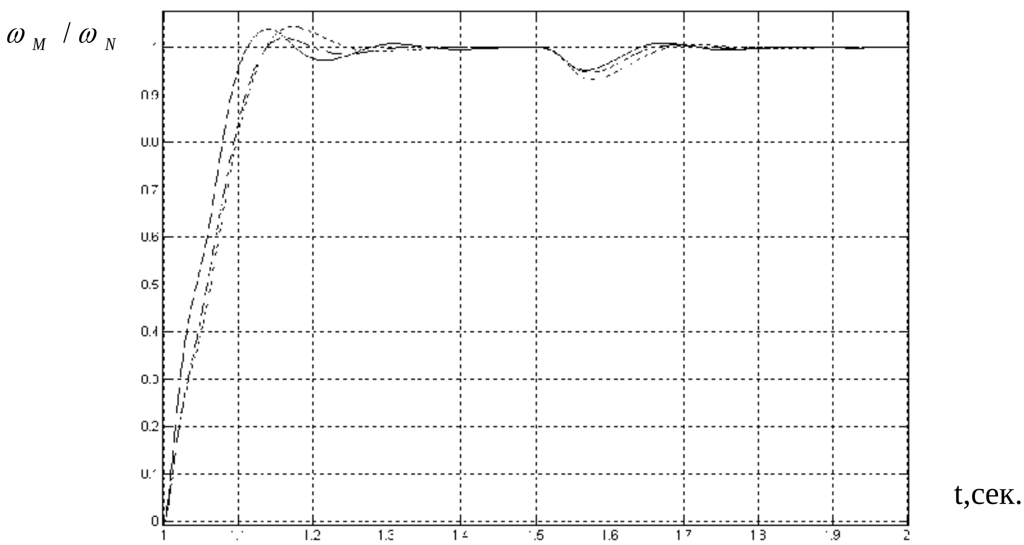


Рис. 2. Реакція системи на типове завдання з різними видами регуляторів (1- ПІ-регулятор, 2-модальний регулятор зі спостерігачем 2 виду, 3-модальний регулятор зі спостерігачем 3 виду).

спрощеними формами традиційного модального регулятора з спостерігачем, але показують при цьому результати не гірші за свого попередника. Рис. 2 надає порівняльну характеристику реакції тримасової системи на керуючий та збурний впливи.

Порівняння надає можливість встановити, що оптимальним з наведених прикладів є регулювання за допомогою модального регулятора зі спостерігачем 2 виду. При цьому перерегулювання становить близько 2 % за керуючим впливом. Суттєвим недоліком нових видів регулювання є те, що оптимізація їх проводилася за керуючим впливом, при цьому перерегулювання за збуренням становить близько 5%.

Надалі промодельовану тримасову систему з модальним регулятором зі спостерігачем 2 виду було за допомогою Real-Time-Workshop-Toolbox (Matlab, The MathWorks, Inc.) та принципом Hardware-in-the-loop-Simulation впроваджено на діючу лабораторну технологічну установку з метою порівняння моделювання з практичними результатами та контролю якості регулювання.

Принцип Hardware-in-the-loop-Simulation оснований на тому, що одна частина приводу є реально побудованою машиною (двигун), проте як інша (машина навантаження або генератор) є модельованою в режимі реального часу. Для поєднання реального привода та моделювання було впроваджено додаткове апаратне забезпечення німецької фірми dSpace GmbH. На лабораторній технологічній установці крізь зміну у часі динамічного моменту в залежності від швидкості обертання приводу за допомогою моделювання було досягнуто певної реакції машини навантаження на двигун. Розрахований момент опору приводу подається у якості завдання на машину навантаження, тобто на модель навантаження, виходом є реальний момент, що передається на вал привода. Структура моделі навантаження зображена на рис. 3.

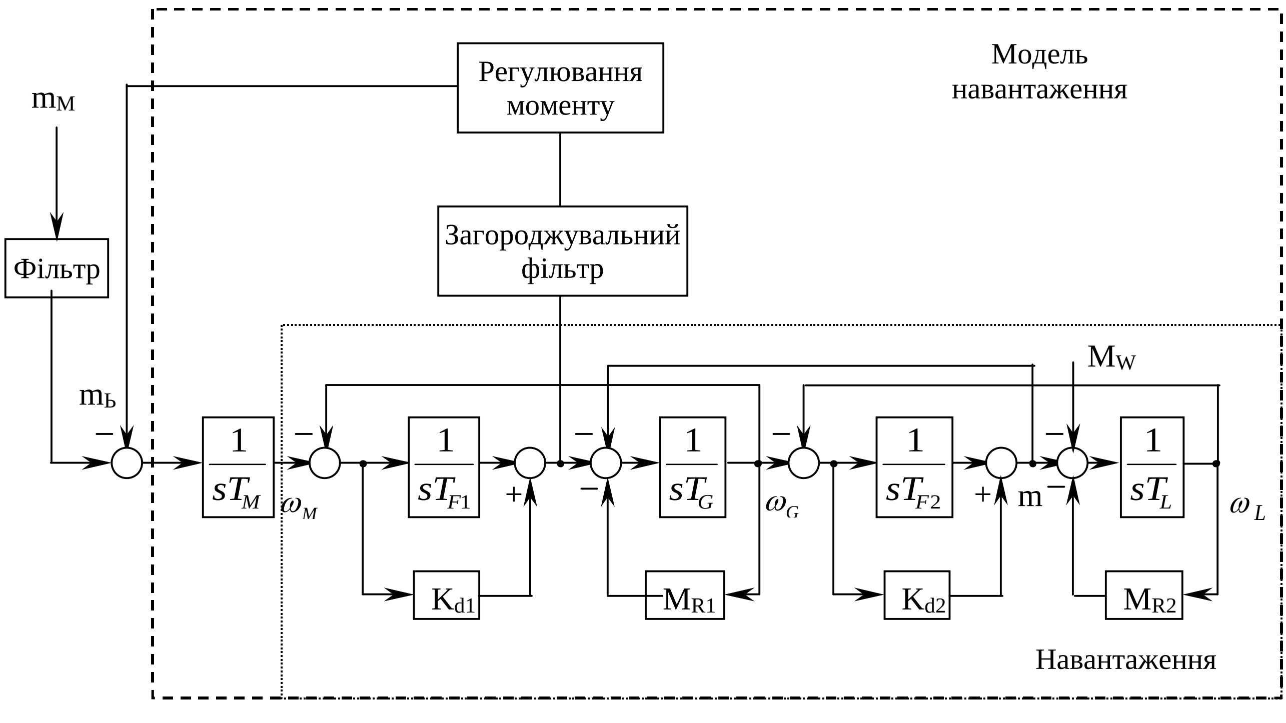


Рис. 3. Модель навантаження тримасової системи за принципом Hardware-in-the-loop-Simulation

На рис. 4 наведено порівняльні результати тримасової системи, що була промодельована з реальною тримасовою системою, побудованою за принципом Hardware-in-the-loop-Simulation. В обох випадках був запроваджений модальний регулятор зі спостерігачем 2 виду, результатом є реакція системи на керуючий та збурний впливи.

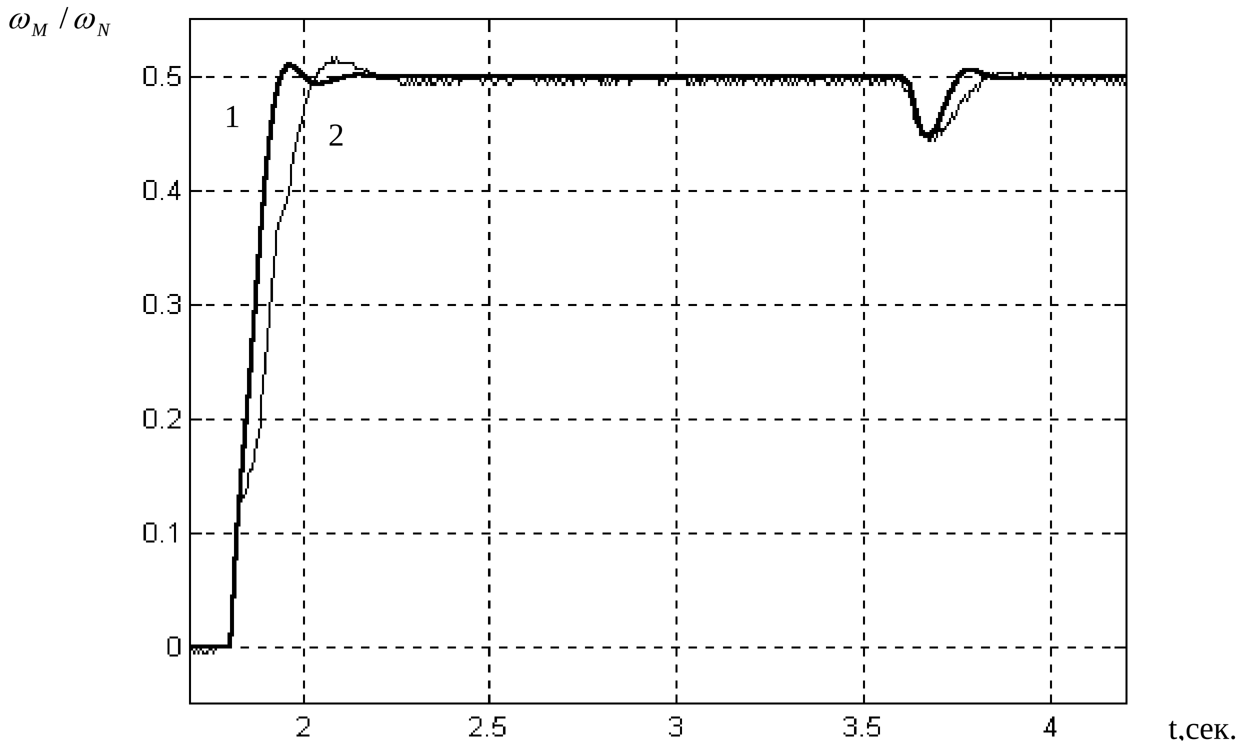


Рис. 4. Порівняльна характеристика реакції тримасової системи з реакцією реальної системи, побудованої за принципом Hardware-in-the-loop-Simulation на керуючий та збурний впливи (1- промодельована система, 2-реальна система)

На рис. 4 чітко видно, що в процесі пуску системи остання знаходиться під впливом однієї з двох її резонансних частот, а саме 10,4 Гц. Невелика нестабільність в статичному режимі пов’язана з проблемою багатократного цифро-аналогового- та аналогово-цифрового-перетворення.

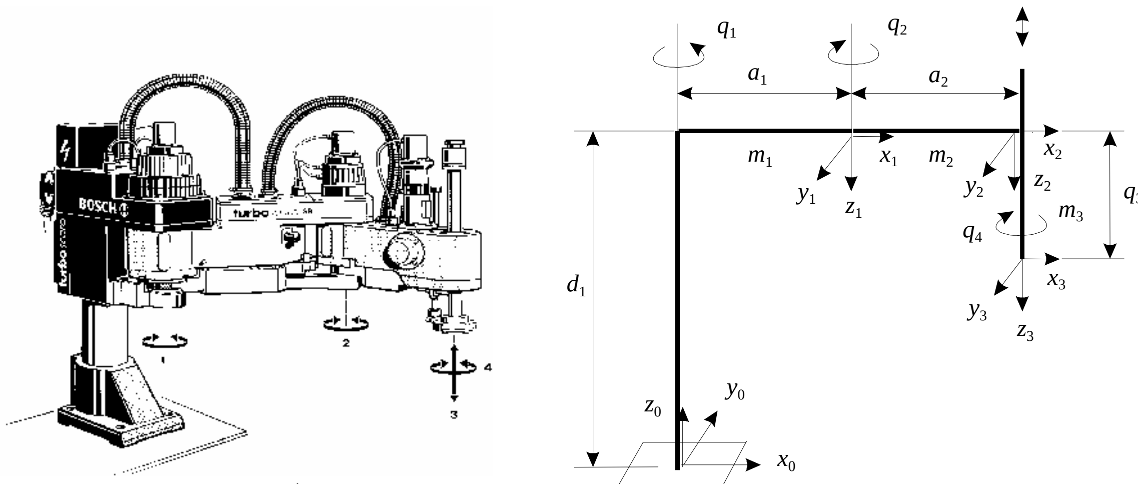
Список літератури: 1. Riefenstahl U.: Elektrische Antriebstechnik. Stuttgart-Leipzig, B.G. Teubner, 2000. 2. Schröder D.: Elektrische Antriebe **2.** Berlin Heidelberg, SpringerVerlag, 1995. **3.** Schütte F., Bünte A., Grotstollen H.: Hardware-in-the-loop-Simulation elektro-mechanischer Systeme, Universität-Gesamthochschule Paderborn, FB 14, Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik, Padeborn, 2000. **4.** Vöckel E.: Optimierung drehzahlgeregelter elektrischer Antriebe mit drehelastischer Mechanik, MSR, Berlin, 1987. **5.** Föllinger O.: Regelungstechnik, Heidelberg: Hütig Verlag, 1990.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ РОБОТОТЕХНИКИ

Скляренко Е. Г. *(каф. СПУ, ДонНТУ, г.Донецк, Украина)*
Аксентий В. В. *(каф. СПУ, ДонНТУ, г.Донецк, Украина)*

В последние годы среди специалистов в области теории автоматического управления наметился подъем интереса к новым нетрадиционным подходам, объединенным общей целью интеллектуализации систем управления. Свойственные человеку приемы мышления реализуются при этом на базе генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей. Каждое из направлений имеет специфические области применения и является мощным инструментом для решения определенного круга задач. Интегрируя же эти подходы, можно выйти на качественно новый уровень создания интеллектуальных систем.

Объектом исследований данной работы является численный метод преобразования координат в системах регулирования роботами с помощью искусственных нейронных сетей. Основная цель исследований – проверить возможность использования генетических алгоритмов для оптимизации структуры нейросетей на примере преобразования координат в системе управления SCARA-роботом, см. рис 1.



а) б)

Рис. 1. Структура (а) и системы координат (б) SCARA-робота

В робототехнике представляет интерес преобразование декартовых координат схвата робота $\boldsymbol{p}$ и возможно его ориентации $\boldsymbol{R}$ в угловые координаты положения сочленений $\boldsymbol{q}$, которое называется обратным кинематическим преобразованием координат или обратной задачей кинемати [1]:

$$\boldsymbol{q} = T^{-1}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{R}) . \quad (1)$$

Общий подход для аналитического решения обратной задачи кинемати не известен. Поэтому для каждого робота должно быть найдено собственное решение, которое даже для такого простого робота как SCARA является достаточно сложным. В этом случае приобретает актуальность идея использования нейросетей [2] для нахождения решения путем обучения.

В случае рассматриваемого робота SCARA обратная задача кинематики состоит в нахождении угловых координат (q_1, q_2) положения сочленений по декатровым координатам положения схвата (x, y) в системе координат $X_0Y_0Z_0$, см. рис. 1б. Координата z схвата однозначно определяет q_3, а ориентация схвата при известных q_1 и q_2 дает возможность определить легко q_4 .

Нейронная сеть, которая использовалась для преобразования координат,- это многослойный персептрон с двумя входами, двумя выходами и двумя скрытыми слоями. Нейроны в скрытых слоях имеют тангенс-сигмоидные передаточные функции. Выходной слой содержит два линейных нейрона, чтобы не ограничивать значения выходных переменных. Таким образом, структура нейросети имеет представленный на рис. 2 вид.

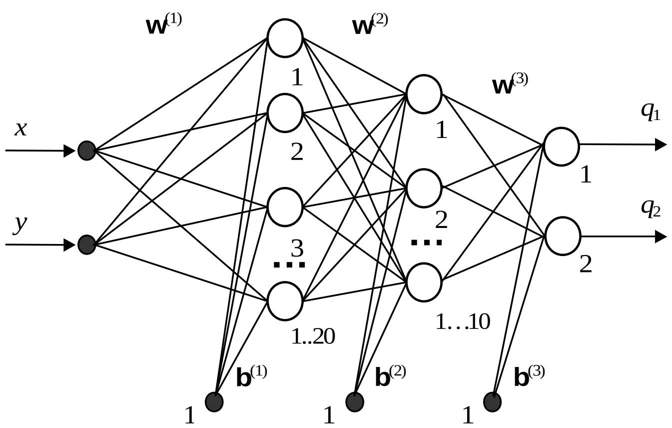


Рис. 2. Многослойный перцептрон для определения координат сочленений

Обычно на практике методом пробных тренировок подбирают такое число нейронов в скрытых слоях нейросети, которое обеспечивает требуемую среднеквадратичную ошибку тренировки сети при надежности ее сходимости. Полный перебор всех возможных комбинаций очень трудоемок и зачастую не возможен. В данном случае был выполнен перебор варьированием числа нейронов в первом слое от одного до двадцати и во втором - от одного до десяти, см. на рис. 3. Это позволит оценить результаты, представленные ниже.

Для нахождения оптимальной структуры нейросети можно использовать генетический алгоритм (ГА) [3], который является универсальным инструментом оптимизации. Оптимальность сети должна характеризоваться как минимальностью ошибки тренировки, так и минимальностью используемых нейронов. Для определения соотношения между этими величинами была введена следующая формула показателя качества:

$$\square_i = 10^{-2} \cdot e_i^{-1} \cdot n_i^{-2} , \tag{2}$$

где $\square_i$ – приспособленность ***i***-ой особи (оптимальность сети),
e_i – среднеквадратичная ошибка тренировки ***i***-ой сети,
n_i – общее количество нейронов в обоих скрытых слоях ***i***-ой сети.

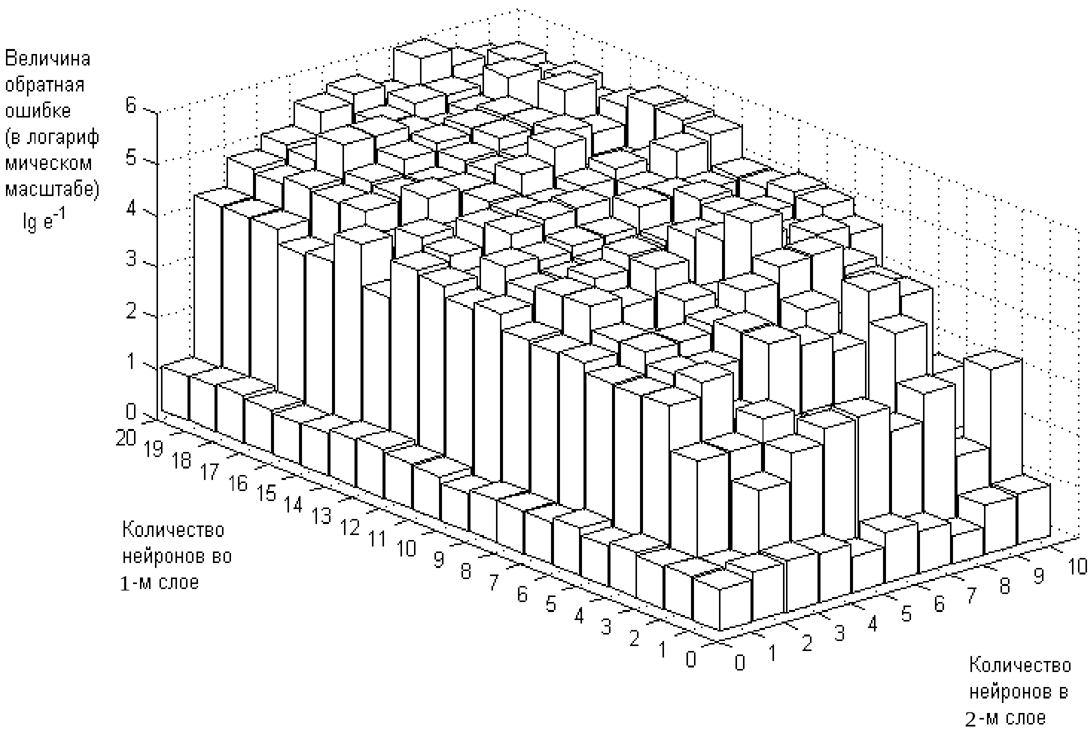


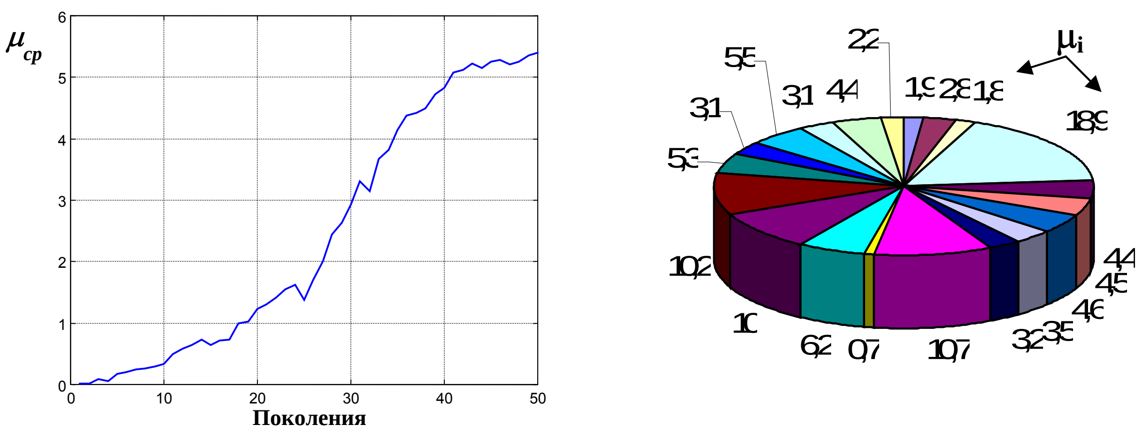
Рис. 3. Результаты тренировки нейросетей

В используемом ГА были сделаны также следующие установки:

- величина популяции – 20 особей;
- число поколений – 50;
- область поиска – 200 нейронных сетей

(1..20 нейронов в первом слое, и 1..10 нейронов – во втором).

Результат работы генетического алгоритма представлен на рис. 4.



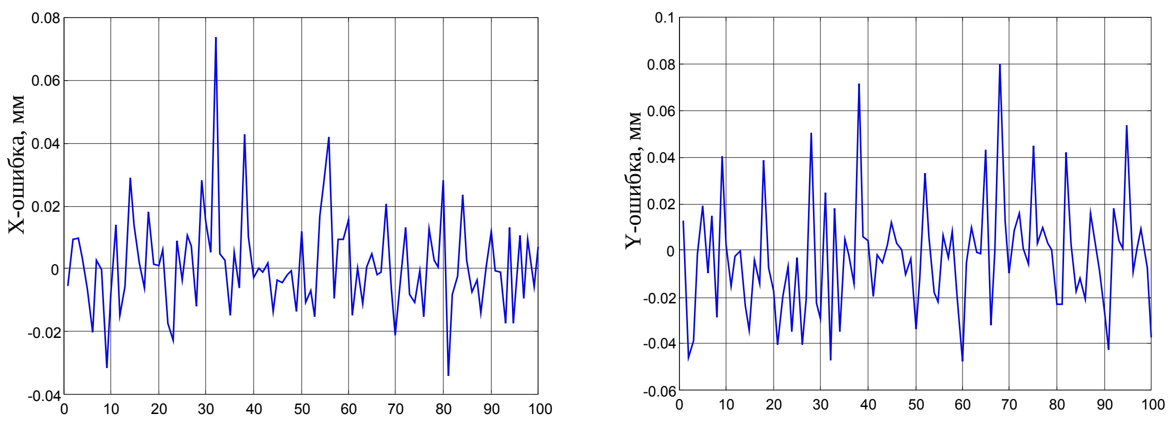
а) **б**)

Рис. 4. Кривая изменения средней приспособленности сетей в процессе работы ГА (**а**) и круговая диаграмма конечного поколения (**б**)

В круговой диаграмме для конечного поколения, см. рис. 4б, величина сектора соответствует процентному отношению показателя качества соответствующей сети к суммарному показателю качества всей популяции. Оптимальная нейронная сеть с показателем качества 18,3 имеет по 7 нейронов в скрытых слоях. Работа данной оптимизированной сети характеризуется следующими показателями:

- среднеквадратичная ошибка $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ рад,
- среднее отклонение результирующих точек от задаваемых в декатровой системе координат менее 0,1 мм, см. рис. 5.

Данные показатели удовлетворяют требованиям к работе SCARA-робота. Для определения среднего отклонения результирующих точек от задаваемых в декатровой системе координат на входы нейросети подавались случайные координаты $(\tilde{x}, \tilde{y})_i$. Сеть генерировала при этом значення координат осей $(q_1, q_2)_i$. Последние преобразовывались с помощью точных аналитических выражений прямой кинематики робота в позиции $(x,y)_i$ и сравнивались с заданными координатами $(\tilde{x}, \tilde{y})_i$.



а) б)

Рис. 5. X-ошибка (а) и y-ошибка (б) при обратном преобразовании координат для ста тестовых точек

Полученные результаты показывают, что величины ошибок, которые возникают при инверсном преобразовании координат, незначительны. Это подтверджает принципиальную возможность реализации кинематического преобразования координат в робототехнике с помощью нейронных сетей и их оптимизации с помощью генетическимих алгоритмов.

Список литературы: 1. Фу К., Гонсалес Р., Ли, К. Робототехника, пер. с англ.- М.: Мир, 1989, ISBN 5-03-000805-5. **2.** Wloka D. et al. Anwendungsstand Künstlicher Neuronaler Netze in der Robotik. In Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik. Hrsg. Hafner, S. München, Wien: Oldenburg, 1994, 48-73, ISBN 3-486-22878-1. **3.** Schoeneburg E. Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategie: Eine Einfuerung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. – Bonn; Paris; Reding, Mass: Addison-Wesley, 1996, 488 s, ISBN 3-89319-493-2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКАРНОГО СТАНКА С АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Хорхордин А.В., Горобец И.А., Болейко В.В. *(ДонНТУ, Донецк)*

Разработка адаптивной системы управления металлорежущим станком [1,2] затруднительна без описания его динамических характеристик. С целью описания динамических характеристик токарного станка авторами были проведены специальные экспериментальные исследования. Проведем анализ полученных экспериментом реализаций. При этом предположим, что объект управления описывается уравнением третьего порядка, поэтому он может быть описан линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами следующего вида:

$$a_3\frac{d^3y(t)}{dt^3}+a_2\frac{d^2y(t)}{dt^2}+a_1\frac{dy(t)}{dt}+y(t)=x(t) \tag{1}$$

Этому дифференциальному уравнению соответствует передаточная функция 3-го порядка:

$$W(s)=\frac{k}{a_3p^3+a_2p^2+a_1p+1}; \tag{2}$$

где a_1, a_2, a_3 – постоянные коэффициенты;

$y(t)=\frac{y_{вых}(t)}{y_{вых}(\infty)}$, $y_{вых}(0)=0$ – приведенное к единице отклонение регулируемой величины в безразмерном виде;

$x(t)=\frac{x_{вх}(t)}{x_{вх}(\infty)}$ – приведенное к единице возмущающее воздействие в безразмерном виде;

Определим неизвестные коэффициенты a_i, b_i используя специальную систему уравнений:

$$\begin{cases} a_1=F_1+b_1; \\ a_2=F_2+b_2+b_1F_1; \\ a_3=F_3+b_3+b_2F_1+b_1F_2. \end{cases} \tag{3}$$

Параметры F_i, входящие в эту систему уравнений имеют аналитические выражения :

$$F_1=\int_0^\infty[1-y(t)]dt \tag{4}$$

$$F_2=F_1^2\int_0^\infty[1-y(t)]\cdot[1-\theta(t)]d\theta \tag{5}$$

$$F_3=F_1^3\int_0^\infty[1-y(t)]\cdot(1-2\theta+\frac{\theta^2}{2})d\theta \tag{6}$$

где $\theta=\frac{t}{F_1}$ – измененный масштаб по времени.

Определим параметры (2) методом Симою, выполняя следующие действия:

1. Ось абсцисс реализации переходного процесса в технологической системе разделим на отрезки с интервалами времени Δt=0.01с (поскольку длительность переходного

процесса в системе составляет 0,3 с), исходя из условия, что на протяжении всей реализации процесса параметр силы резания $y_{вых}$ не имеет резких изменений, так, что в пределах $2\Delta t$ мало отличается от прямой.

2. Значение $y_{вых}$ в конце каждого интервала Δt разделим на $y(\infty)$, полученные значения

$\sigma = y_{вых} / y(\infty)$ занесем в табл. 1. Таким образом, приведем функцию к безразмерному виду.

Таблица 1 – Результаты вычислений передаточной функции системы методом площадей Симою

t,c	y	σ	1-σ	θ	1- θ	(1-σ)*(1- θ)	1- 2θ+ θ^2/2	(1-σ)(1-2θ+ θ^2/2)
0	1466,15	0	1.0	0	1	1	1	1
0.01	1464,085	0.0026	0.9974	0.562	0.9438	0.9414	0.8893	0.887
0.02	1462,02	0.0051	0.9949	0.1123	0.8877	0.8831	0.7817	0.7777
0.03	1453,73	0.0154	0.9846	0.1685	0.8315	0.8187	0.6773	0.6668
0.04	1445,5	0.0256	0.9744	0.2246	0.7754	0.7555	0.5760	0.5612
0.05	1437,24	0.0359	0.9641	0.2808	0.7192	0.6934	0.4779	0.4607
0.06	1424,85	0.0513	0.9487	0.3369	0.6631	0.6291	0.3829	0.3633
0.07	1412,46	0.0667	0.9333	0.3931	0.6069	0.5665	0.2911	0.2717
0.08	1400,07	0.0821	0.9179	0.4492	0.5508	0.5056	0.2024	0.1858
0.09	1383,55	0.1026	0.8974	0.5054	0.4946	0.4439	0.1169	0.1049
0.1	1354,64	0.1385	0.8615	0.5616	0.4384	0.3777	0.346	0.0298
0.11	1300,95	0.2051	0.7949	0.6177	0.3823	0.3039	-0.0446	-0.0355
0.12	1280,3	0.2308	0.7692	0.6739	0.3261	0.2509	-0.1207	-0.0928
0.13	1239	0.2821	0.7179	0.73	0.27	0.1938	-0.1936	-0.1390
0.14	1214,22	0.3128	0.6872	0.7862	0.2138	0.1469	-0.2633	-0.1809
0.15	1160,53	0.3795	0.6205	0.8423	0.1577	0.0978	-0.3299	-0.2047
0.16	1123,36	0.4256	0.5744	0.8985	0.1015	0.0583	-0.3933	-0.2256
0.17	1073,8	0.4872	0.5128	0.9546	0.0454	0.0233	-0.4536	-0.2326
0.18	1027,28	0.5077	0.4923	1.0108	-0.0108	-0.0053	-0.5177	-0.2514
0.19	1003,59	0.5744	0.4256	1.0670	-0.067	-0.0285	-0.5647	-0.2404
0.2	982,94	0.6	0.4	1.1231	-0.1231	-0.0492	-0.6155	-0.2462
0.21	949,9	0.6410	0.3590	1.1793	-0.1793	-0.0644	-0.6632	-0.2381
0.22	908,8	0.6923	0.3077	1.2354	-0.2354	-0.0724	-0.7077	-0.2178
0.23	879,69	0.7282	0.2718	1.2916	-0.2916	-0.0792	-0.7491	-0.2036
0.24	863,17	0.7487	0.2513	1.3477	-0.3477	-0.0874	-0.7873	-0.1978
0.25	821,87	0.8	0.2	1.4039	-0.4039	-0.0808	-0.8223	-0.1645
0.26	784,7	0.8462	0.1538	1.4600	-0.46	-0.0708	-0.8542	-0.1314
0.27	751,66	0.8872	0.1128	1.5162	-0.5162	-0.0582	-0.883	-0.0996
0.28	722,75	0.9231	0.0769	1.5724	-0.5724	-0.0440	-0.9086	-0.0699
0.29	697,97	0.9538	0.0462	1.6285	-0.6285	-0.029	-0.9310	-0.043
0.3	681,45	0.9744	0.0256		-0.6847	-0.0176	-0.9503	-0.0244
Сумма			18.3077			7.9767		2.0369

3. Определим коэффициенты площадей F_1 ,F_2, F_3 :
4.

$$F_1 = \Delta t\left[\sum_{i=0}^{n}[1-\sigma(i\Delta t)] - 0{,}5[1-\sigma(0)]\right] \qquad (7)$$

$$F_2 = F_1^2\ \Delta\theta\left[\sum_{i=0}^{n}[1-\sigma(i\Delta\theta)][1-i\Delta\theta]-0{,}5[1-\sigma(0)]\right] \tag{8}$$

$$F_3 = F_1^3\ \Delta\theta\left[\sum_{i=0}^{n}[1-\sigma(i\Delta\theta)][1-2i\Delta\theta+\frac{(i\Delta\theta)^2}{2}]-0{,}5[1-\sigma(0)]\right] \tag{9}$$

Статический коэффициент передачи k определим из соотношения:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \tag{10}$$

Реализовав приведенное в программной среде Matlab [3], были получены следующие значения параметров:

$a_1 = F_1 = 0.1781$; $a_2 = F_2 = 0.0133$; $a_3 = F_3 = 4.8736*10^{-4}$.

где Δy – установившееся значение выходной величины:

$$\Delta y = \lim_{t\to\infty} y_{вых}(t) = 805.4, \tag{11}$$

где Δx – величина входного скачка, по заданию.

Тогда искомая передаточная функция будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{805.4}{4.874*10^{-4}p^3 + 1.331*10^{-2}p^2 + 0.1781p + 1} \tag{12}$$

Используя средства Matlab, по полученной передаточной функции был построен график переходной функции, рис.1 (совмещен с исходной кривой разгона, приведенной к безразмерному виду , которая изображена пунктирной линией).

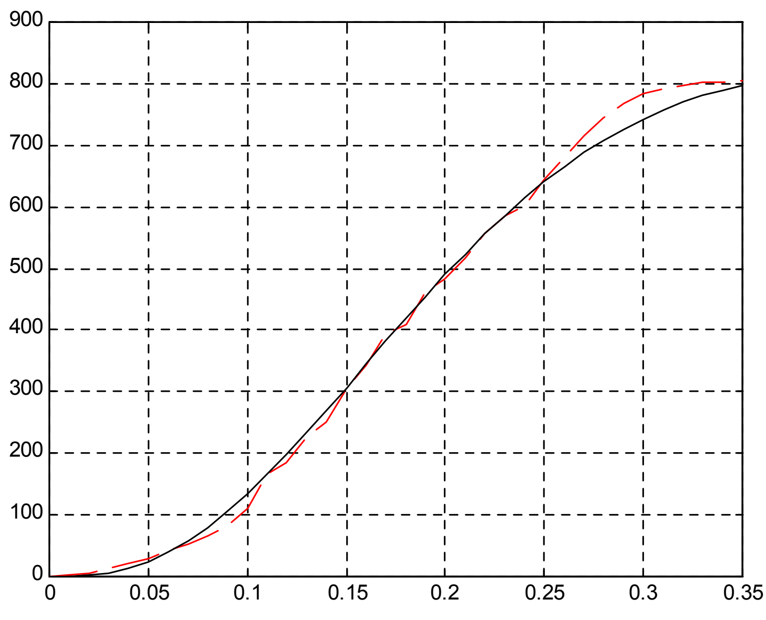


Рис. 1. График исходной кривой разгона и переходной функции

Ниже приведена разработанная программа метода Симою в Matlab:

```
delt=0.01; tfin=0.35;
t=0:delt:tfin;
p2=[1466.15 1464.085 1462.02 1453.76 1445.5 1437.24 1424.85
1412.46 1400.07 1383.55 1354.64 1300.95 1280.3 1239 1214.22
1160.53 1123.36 1073.8 1057.28 1003.59 982.94 949.9 908.6
879.69 863.17 821.87 784.7 751.66 722.75 697.97 681.45 673.19
669.06 664.93 662.865 660.8];
yd=p2(1)-p2;
k=yd(36)
y=yd./k;
col3=1-y;
s3=sum(col3);
f1=delt*(s3-0.5*(1-y(1)))
delth=t(2)/f1
col4=t./f1;
col5=1-col4;
col6=col3.*col5;
col7=1-2.*col4+(col4.^2)./2;
col8=col3.*col7;
s6=sum(col6)
s8=sum(col8)
f2=f1^2*delth*(s6-0.5*(1-y(1)))
f3=f1^3*delth*(s8-0.5*(1-y(1)))
num1=k; den1=[f3 f2 f1 1]; %num1=yd(31);
sys1=tf(num1,den1)
[yp1,t,x]=step(sys1,t);
plot(t,yd,'r--',t,yp1,'k-'),grid;
```

Список литературы*:* 1. Gorobez I., Golubov N. Adaptronsysteme in der Werkzeugmaschine für die spanabhebende Formung – Entwicklungsmethoden und Entwicklungsprozesse im Maschinenbau. 5 Magdeburger Maschinenbau-Tage.- Berlin, Logos-Verl.,2001,-S.45-51. **2.** Горобец И.А., Голубов Н.В., Борель О.А. Разработка конструкции мехатронных систем фрезерных станков – Сб.трудов Междунар. науч.-техн.конференции «Современные технологии, качество, реструктуризация» TMCR-2001 в г.Кишиневе 23-25 мая 2001 – Кишинев, 2001, Вып.1, с.382-386. **3.** MATLAB 5 für Ingenieure/ Szstematische und praktische Einführung/ *Adrian Biran, Moshe Breiner*.- 3. Auflage – Bonn, Addison-Wesley-Longman, 1999 – 541.

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ РЕКУРСИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗА МЕТОДОМ ЗАВБАЧЕНОЇ ПОХИБКИ НА МОВІ ПРОГРАМУВАННЯ С

Шумахер В. *(Технічний університет Брауншвейг, Германія)*
Кельганкін М.В. *(каф.СПУ, ДонНТУ, м.Донецьк, Україна)*

Вирішуючи задачі розробки, експлуатації, автоматизації технічної системи, дуже часто ми не можемо обійтися без точної математичної моделі цієї системи, яка б описувала її динамічні властивості. В області природничих наук, особливо у фізиці, хімії, біології, медицині, навіть в економіці інтерес до математичних моделей, що описують досліджувану систему, сильно зріс. Основні динамічні властивості системи можуть бути знайдені теоретичною побудовою моделі, якщо відомі закони, що описують її в аналітичній формі. Якщо ці закони невідомі взагалі, відомі частково чи вимагаються точні значення деяких істотних параметрів, проводиться експериментальна побудова моделі, яка називається ідентифікацією. При цьому використовуються обмірювані сигнали і шукаються залежності від часу в межах обраного класу математичних моделей.

Ідентифікація систем (процесів) є новою дисципліною, що розвивалася, насамперед, у рамках теорії регулювання з 1960 року. У ній використовуються знання й методи з теорії імовірностей, теорії автоматичного регулювання, теорії вимірів. Для одержання й обробки інформації використовується сучасна вимірювальна й цифрова обчислювальна техніка

У рамках ідентифікації не розглядаються фізичні закони й процеси, що відбуваються усередині системи. Навпаки, система розглядається як деяка чорна шухляда (black box), що має вхід і вихід, причому користувач може керуватися деякими апріорними знаннями про структуру й порядки поліномів, що описують систему. Але ці знання не є необхідними. Ідентифікація означає пошук моделі, розглянутої системи, у формі математичної функції. Значення виходу моделі повинне якнайбільше відповідати значенню виходу реальної системи, а в ідеальному випадку – дорівнювати. При цьому враховується, що значення виходу реальної системи містить у собі небажані перешкоди, і не може бути точно обмірюване.

На рис.1 представлено принцип ідентифікації. Як говорилося вище, ідентифікація означає пошук математичної моделі реальної фізичної системи.

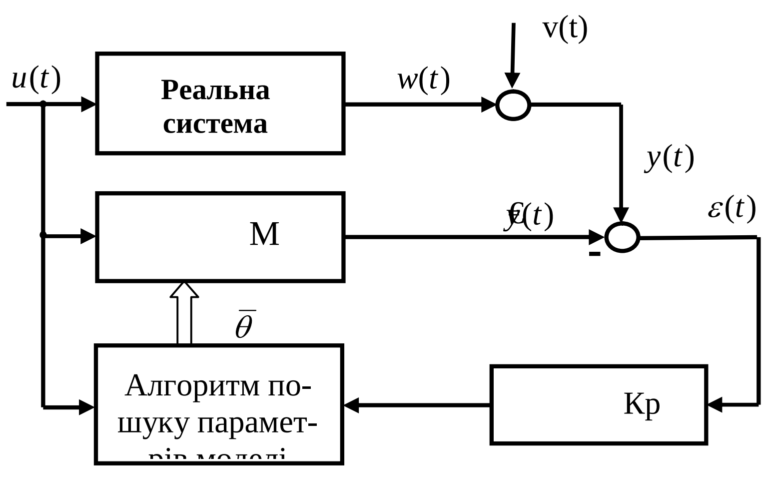


Рис. 1. Принцип ідентифікації.

Ця математична модель визначається через проведений на кожнім кроці дискретності розрахунок завбаченого значення $\hat{y}(t)$ виходу реальної системи. Коефіцієнти поліномів моделі описуються за допомогою вектора параметрів θ. В основі визначеного критерію оцінки лежить різниця між значенням виходу ідентифікуємої системи $y(t)$ і завбаченим значенням виходу системи $\hat{y}(t)$ (значення виходу моделі), що описується як завбачена помилка $\varepsilon(t)$. Ця оцінка веде до зміни вектора θ, поки критерій не буде виконувати чітко визначеної умови.

У багатьох випадках необхідно мати математичну модель досліджуваної системи в on-line-умовах, поки сама система не виключається з робочого режиму [1]. Модель у цьому випадку базується на спостереженнях, що відбуваються в реальному часі. Потреба в такій побудові моделі виявляється при прийнятті рішень щодо майбутньої роботи реальної системи. Наприклад:

який вхідний сигнал потрібно додавати на наступному кроці дискретності?

якими повинні бути параметри задовольняючого умовам оптимального фільтра?

які завбачені значення виходу системи будуть кращими для наступного завдання?

чи мають місце помилки в роботі системи і якщо так, то які?

Час розрахунку параметрів моделі повинен бути обмеженим, тому що обробка вимірів повинна закінчиться протягом одного інтервалу дискретності. Інакше модель не зможе обробити необхідний потік інформації на кожнім кроці. Методи ідентифікації, що відповідають поставленим умовам називаються рекурсивними, тому що вимірювані вхідні-вихідні дані обробляються рекурсивно – на кожнім кроці ітерації.

Програма, розроблена авторами, використовує метод завбаченої похибки для ідентифікації будь-яких стійких ARX, ARMA, ARARX, ARARMAX [1] систем. Далі приведений алгоритм розрахунку коефіцієнтів поліномів, що описують досліджувану систему на кожнім кроці дискретності:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t);$$
$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \gamma(t)R^{-1}\psi(t)\varepsilon(t);$$
$$R(t) = R(t-1) + \gamma(t)[\psi(t)\psi^{T}(t) - R(t-1)];$$
$$\gamma(t) = 1 - \lambda(t),$$

де $\varepsilon(t)$ - завбачена похибка (prediction error);

$y(t)$ - значення виходу досліджуваної системи;

$\hat{y}(t)$ - завбачене значення виходу системи (значення виходу моделі);

$\hat{\theta}(\mathrm{t})$ - вектор-стовпець параметрів моделі;

$\psi(t)$ - вектор-стовпець значень похідних завбаченого значення виходу системи $\hat{y}(t)$ по параметрах $\theta_1 ... \theta_n$ системи;

$\lambda(t)$ - фактор пам’яті (звичайно приймається $\lambda = 0{,}97..0{,}995$).

За допомогою вищеописаної програми була досліджена ARARMAX-система з наступною структурою:

$$y(t) = u(t) + v(t);$$
$$y(t) - 1{,}58359y(t-1) + 0{,}98751y(t-2) = 0{,}001965u(t-1) + 0.001957u(t-2) + v(t);$$
$$v(t) - 0{,}156v(t-1) + 0{,}3v(t-2) = e(t) + e(t-1) + 0{,}2(t-2),$$

де $u(t)$ - зовнішній керуючий сигнал, що може регулюватися користувачем;
$e(t)$ - білий шум.

Результати досліджень приведені на рис. 2.

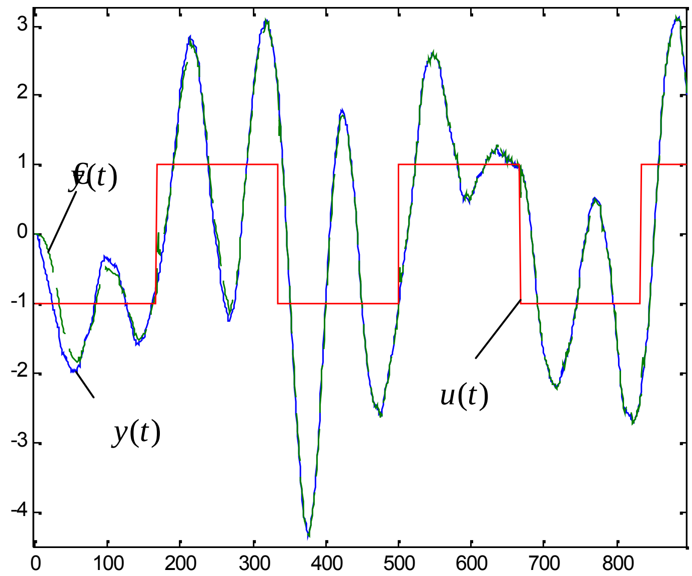


Рис. 2. Ідентифікація ARARMAX-системи

Система передбачується цілком. Незначна відмінність $y(t)$ від $\hat{y}(t)$ на початку процесу ідентифікації у подальшому прагне до нуля. Але ідентифікація в такому виді може бути реалізована тільки в лабораторних умовах. На виробництві завжди є обмежуючі умови, що відбиваються на точності математичної моделі.

Список літератури: 1. Ljung L. System Identifikation. - New Jersy: Prentice-Hall, 1992. **2.** Ljung L. System Identifikation. Toolbox User's Guide for Use with Matlab. - Natick: The MathWorks Inc, 1995. **3.** Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентифи-кации. - М.: Наука, 1984. **4.** Leonard W. Einführung in die Regelungstechnik. - Braun-schweig: Vieweg, 1992. **5.** Leonard W. Digitale Signalverarbeitung in der Meß-und Rege-lungstechnik. - Stuttgart: Teubner, 1973. **6.** Unbehauen H. Regelungstechnik III. - Braun-schweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, 1985. **7.** Isermann R. Identifikation dyna-mischer Systeme. Band I und II. – Berlin: Springer-Verlag, 1988. **8.** Kernighan B., Ritchie D. Programmieren in C. - München: Carl Hanser Verlag, 1983. **9.** Press W. u a. Numerical Reci-pes in C. - Cambridge: University Press, 1999. **10.** www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/00_09/stat_2.htm

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Ченцов Н.А., Сулейманов С.Л., Исаенко В.В. (*ДонНТУ, г. Донецк, Украина*)

Любое производство требует значительных затрат на апробацию, анализ и внедрения новых методов прогнозирования отказа или исследование поведения работы существующих конструкций деталей. Это может быть упрочнение материалов, изменения производственной программы, химический состав материала. Исследованию подвергаются детали, техническое состояние (ТС) которых определяет состоянием рабочего органа [1]. Чтобы учесть все факторы и в кратчайшие сроки провести исследования механизма в нагруженном состоянии была разработана система имитационного моделирования работы детали. Исследование проводилось на основе собранной статистики полученной на основании диагностики или агрегатного журнала по аналогичным деталям.

Известно, что изменение ТС детали носит стохастический характер. Это дает нам право использовать для описания ресурса детали закон распределения, параметризация которого предполагает определение его вида и параметров из статистики, представленной потоком ресурсов. В случае моделирования ТС детали этот поток формируется из данных о сроках отказов и может быть представлен в виде матрицы:

$T_i=[t_1, t_2, \ldots, t_N]$,

где i – количество деталей используемых в моделировании ТС детали;

N – количество измерений по одной детали;

T_i – время работы i-той детали;

t_N – момент времени диагностики i-той детали.

На основе данных диагностики (таблица 1) для каждой детали можно определить закон изменения ТС в течении времени T и величину износа Y.

Таблица 1 - Исходная информация в виде данных диагностики

№ измерения	T	**Y**
1	12.01.99	0.1
2	15.01.99	3.4
…	…	…
7	31.01.99	6.3

Использование закона распределения для изменения ТС каждой детали позволит получить тренд из закона изменения ТС Y=f(t) (рисунок 1а), на основании которого

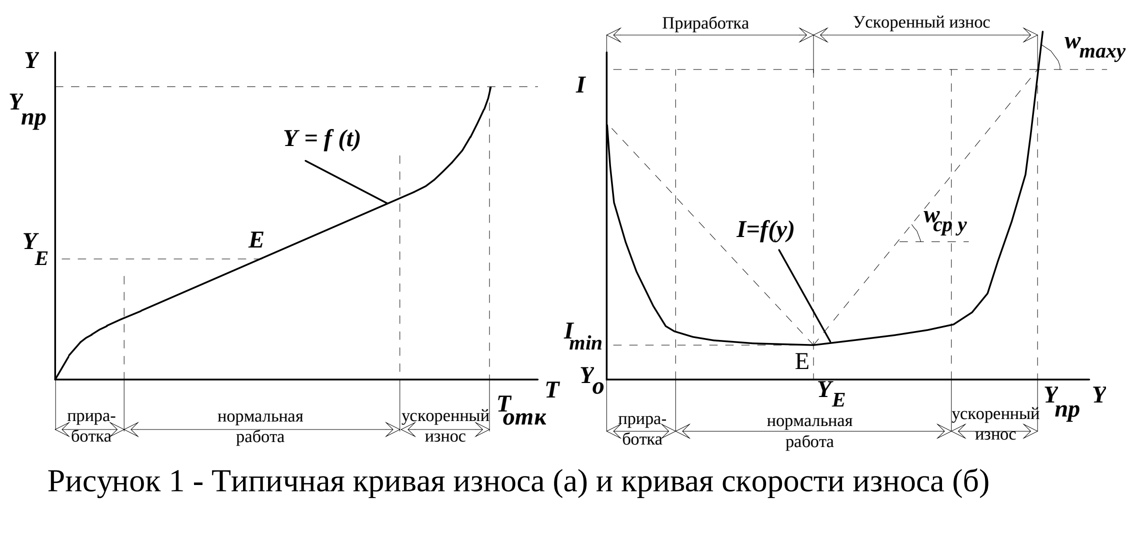


Рисунок 1 - Типичная кривая износа (а) и кривая скорости износа (б) с определенной вероятностью можно моделировать различные законы изменения ТС. В процесс моделирования использовалась кривая скорости износа I=f(Y) (рисунок 1б), при этом для обработки статистических данных преобразование выполнялось численным методом. Для интервала между двумя точками, определяют среднее значение:

технического состояния:

$$Y_j = \frac{Y_{j-1} + Y_j}{2};$$

скорости износа:

$$I_j = \frac{Y_j - Y_{j-1}}{T_j - T_{j-1}}.$$

На деталь оборудования действует значительное число относительно равноправных факторов. Это позволяет использовать нормальный закон распределения для моделирования ТС этой детали. В теории надежности нормальное распределение принимают как распределение наработок на отказ вследствие старения и износа, когда коэффициент вариации ресурса не превышает 1/3.

Для нормального закона дифференциальная функция распределения f(t) определяет для каждого значения t вероятность события, состоящего в том, что случайная величина примет значение меньше t. Она имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_N)^2}{2\sigma_N^2}\right),$$

где □$_N$, t_N – параметры нормального закона распределения, соответственно характеризующие среднее значение ресурса и его разброс.

Коэффициент вариации ν_N определяется отношением параметров закона:

$$\nu_N = \frac{\sigma_N}{t_N}.$$

Процесс моделирования ТС детали можно представить как последовательное решение задач, в виде блок схемы (рисунке 2).

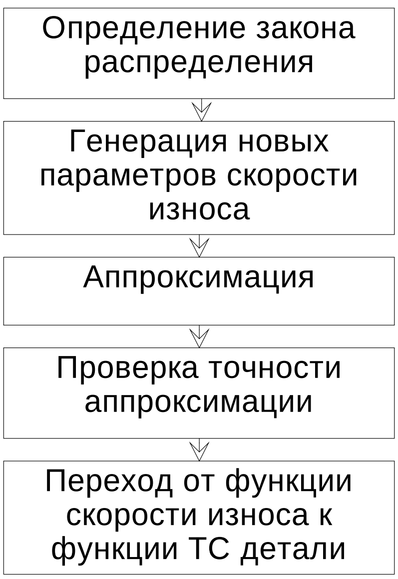


Рис. 2. Блок-схема получения смоделированных кривых ТС

На первоначальном этапе анализируются основные параметры кривой входящих в функцию скорости износа [2]:

$$I = I_{MIN} + \begin{cases} f_П(y), & y \le Y_E \quad \text{(приработка)} \\ f_У(y), & y > Y_E \quad \text{(ускоренный износ)} \end{cases}$$

,

где $f_П(y)$ - модель роста, используемая на участке приработки;

$f_У(y)$ - модель роста используемая на участке ускоренного износа.

Необходимо обеспечить получение математических ожиданий параметров детали, используемых для описания ее ТС. Кроме этого в нем определяется коэффициент вариации по каждому параметру и вид его распределения для нормального закона (рисунок 3). Например, для точки перегиба Y_E определяется закон распределения и коэффициент вариации в двух направлениях. Так относительно оси скорости износа и относительно оси величины износа. Это дает возможность наложить на одну точку две случайные сгенерированные величины, что в свою очередь позволяет получить уникальную кривую ТС детали. Аналогично проводилось нахождение законов распределения и коэффициент вариации для остальных величин входящих в формулу скорости износа.

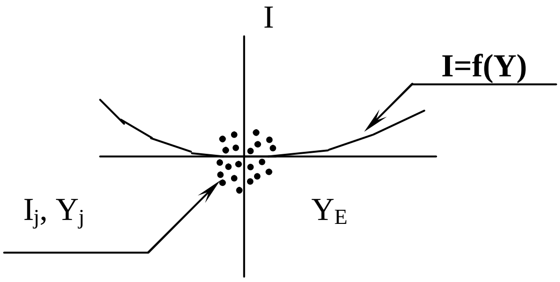


Рис. 3. Анализ закона распределения для точки Y_E

Для определения текущей реализации детали используется блок «Генерация новых параметров для кривой скорости износа». В ходе проведения эксперимента по одной детали может быть получено несколько реализаций изменения ТС. Для этого используются параметры детали, определяемые в процессе анализа ТС деталей. Результатом является сгенерированная функция изменения ТС детали I=f(Y). Полученную кривую аппроксимируем полиномом 6-й степени. В блоке «Проверка точности аппроксимации» выполняется оценка экспериментально полученной функцией и на основе ее аппроксимированной функции с использованием коэффициента корреляции на адекватность повторения кривой скорости износа. Переход от функции I=f(Y) к Y=f(T) выполнен путем простого преобразования в блоке «Переход от функции скорости износа к ТС детали».

Проведение эксперимента с использованием моделирования ТС потребовал выполнить ряд последовательных действий. Первым действием являлось разработка компьютерной программы, реализующей функции исследуемой задачи. Такая программа имеет имя «model» в которой реализованы все свойства исследуемой задачи. В программной реализации принято:

– для каждого нового значения моделируется вся кривая ТС детали;

– количество исходных кривых ТС должно превышать 30. Это ограничение связано с использование нормального закона;

– программа «model» может использовать значения переменных *Y* и *T*, а так же данные агрегатного журнала;

– в программе «model» может моделировать бесконечное множество кривых ТС детали.

Выводы. Разработанная программа моделирования ТС детали при эксплуатации обеспечивает получение данных о изменении ТС по нескольким реализациям детали.

К программе можно подключить для проведения исследований любую задачу использующую данные о текущем ТС детали Например, диагностическая модель.

Имитационное моделирование реализовано на компьютере, что обеспечивает проведение любого эксперимента на виртуальной детали в течении нескольких секунд, это аналогично проведенному эксперименту на физической детали в течение нескольких месяцев, лет.

Список литературы 1. Седуш В.Я. Надежность ремонт и монтаж металлургических машин. К.: НМК ВО, 1992. -368с. **2**. Ченцов Н.А., Сулейманов С.Л., Ручко В.Н. Использование модели роста для аппроксимации функции скорости износа деталей механического оборудования //Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1999, вып.7. – 241с.