

Н. С. Ащепкова, О. В. Кубрак

*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара***МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ РОБОТА**

Проведені дослідження приводу механізму повороту маніпулятора з використанням пакету прикладних програм MathCad. Аналіз кінематичної схеми дозволяє скласти математичну модель, що описує процес повороту робота під час розгону. Метою математичного моделювання є контроль та забезпечення якісних характеристик (обертальний момент, кутова швидкість, час перехідного процесу, швидкість і т. ін.).

Під час дослідження приводу механізму обертання робота можна визначити зв'язок між кутовими швидкостями вала двигуна та обертання колони (стійки) робота, між кутовими швидкостями та моментами збурень, або між кутовими швидкостями та моментами тертя.

Ключові слова: електромеханічна система, кінематична схема маніпулятора, структурна схема, передавальна функція, математична модель.

Проведено исследование привода механизма поворота манипулятора с использованием пакета прикладных программ MathCad. Анализ кинематической схемы позволяет составить математическую модель для описания процесса поворота робота во время разгона. Целью математического моделирования является контроль и обеспечение качественных показателей (вращающий момент, угловая скорость, время переходных процессов, быстрдействие и другие).

Во время исследования привода поворота робота можно установить связь между угловыми скоростями вала двигателя и вращения колонны (стойки) робота, между угловыми скоростями и возмущающими моментами, или между угловыми скоростями и моментами трения.

Ключевые слова: электромеханическая система, кинематическая схема манипулятора, структурная схема, передаточная функция, математическая модель.

The research of a drive of the mechanism of turn of the manipulator with use of a package of the applied programs MathCad is carried out (spent). The analysis of kinematics chart allows to make mathematical model for the description of process of turn of the robot during dispersal. The purpose of mathematical modeling is the control and maintenance of qualitative parameters (rotating moment, angular speed, time of transients, speed and others).

During research of a drive of turn of the robot it is possible to establish communication(connection) between angular speeds of the shaft of the engine and rotation of a column (rack) of the robot, between angular speeds and revolting moments, or between angular speeds and moments of friction.

Key words: electromechanical system, kinematics chart the circuit of the manipulator, block diagram, transfer function, mathematical model.

Вступ. Застосування виробничих роботів є основою подальшого розвитку науково-технічного прогресу. Для забезпечення якісних характеристик (точність позиціювання, швидкість, коефіцієнт використання робочого часу, коефіцієнт закріплення операцій) необхідне попереднє моделювання руху робота. Таким чином математичне моделювання приводу робота є актуальною науковою задачею.

Постановка задачі. Розглянемо привід механізму повороту робота довкола вертикальної осі. Верхня рухлива платформа отримує обертання від приводу повороту, встановленого на нижній нерухомій опорі. Привід повороту включає електродвигун постійного струму, датчик швидкості (тахогенератор), пов'язаний

з двигуном через вал черв'ячного редуктора. Рушійний момент передається на рухливу платформу через редуктор і циліндричну зубчасту передачу. Одне з зубчастих коліс закріплено на вихідному валу черв'ячного редуктора, а друге – на поворотній платформі робота. На нерухомій опорі встановлений датчик положення, з'єднаний з рухомою платформою через зубчасту передачу. Відомо, що єдиною координатою, доступною вимірюванню, є швидкість обертання двигуна, яка визначається за допомогою тахогенератора. Вхідним впливом для даної електромеханічної системи при наявності електродвигуна постійного струму буде напруга $U(t)$, що подається на якір електродвигуна.

Потрібно визначити основні характеристики приводу механізму повороту робота в режимі пуску:

- $i(t)$ – струм якірного кола електродвигуна постійного струму;
- φ_1 – кут повороту якоря двигуна;
- ω_1 – кутову швидкість обертання якоря електродвигуна постійного струму;
- φ_2 – кут повороту робота;
- ω_2 – кутову швидкість обертання робота.

Поворот проводиться з повністю обраним зазором при подачі на затискачі якоря електродвигуна напруги з вказаним законом зміни його в часі.

Виявлення основних особливостей, взаємозв'язків і кількісних закономірностей. Аналіз кінематичної схеми механізму повороту з урахуванням структури механічної передачі, числа і місця встановлених датчиків дозволяє представити об'єкт у вигляді двохмасової електромеханічної системи з пружними зв'язками [3]. Механічна розрахункова схема цієї системи наведена на рис. 1.

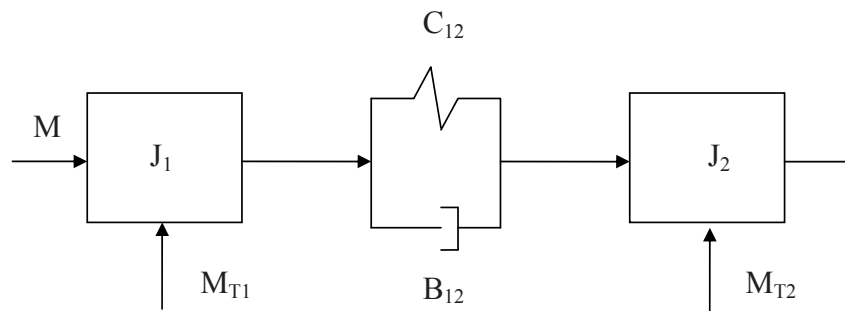


Рис. 1. Розрахункова схема механізму повороту робота

Будемо вважати, що моменти зовнішніх сил тертя, прикладені до першої та другої маси, мало залежать від швидкості і можуть бути представлені як постійні величини.

Вихідні параметри електродвигуна постійного струму відповідно рівні:

- $R = 4,54$ Ом – активний опір якірного кола електродвигуна;
- $L = 0,0634$ Гн – індуктивність якірного кола електродвигуна;
- $C_d = 0,0954$ В·с/рад – конструктивний коефіцієнт електродвигуна.

Вихідні параметри механічної частини приводу відповідно рівні:

- $C_{12} = 133,67$ Н·м/рад – коефіцієнт пружності;
- $B_{12} = 0,0211$ Н·м·с/рад – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя;
- $M_{T1} = 0,047$ Н·м – момент зовнішніх сил тертя, прикладений до першої маси;
- $M_{T2} = 0,0005$ Н·м – момент зовнішніх сил тертя, прикладений до другої маси;

- $J_1 = 0,000116$ кг·м² – момент інерції першої маси;

- $J_2 = 0,00534$ кг·м² – момент інерції другої маси.

Математична модель двохмасової електромеханічної системи. На рис. 2 представлена деталізована структурна схема механізму повороту робота, яка

складається з інтегруючих, диференціальних і масштабуючих ланок, а також нелінійних статичних характеристик [1].

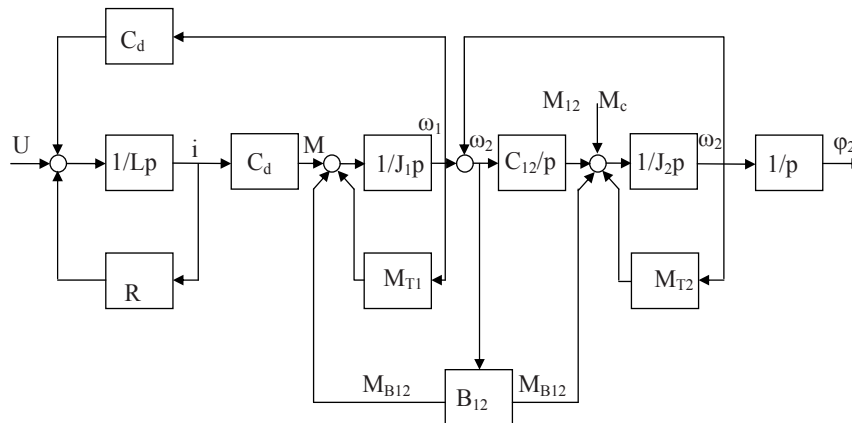


Рис. 2. Структурна схема механізму повороту робота

Використовуючи деталізовану структурну схему, складемо систему рівнянь, що описує її функціонування [2, 4]:

$$U(t) = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + C_d \cdot \omega_1;$$

$$M = C_d \cdot i;$$

$$M_{T1} = M_{T10};$$

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\phi_1 - \phi_2);$$

$$M_{B12} = B_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2);$$

$$M = M_{12} + M_{B12} + M_{T1} + J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt};$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \omega_1;$$

$$M_{T2} = M_{T20};$$

$$M_{12} + M_{B12} = M_{T2} + J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt};$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \omega_2.$$

Тепер сформуємо математичну модель у вигляді системи диференціальних рівнянь з виділенням похідних шуканих параметрів, для чого їх похідні перенесемо в ліву частину системи, а інші складові рівняння – в праву. У цьому випадку вихідна математична модель, що описує процес повороту робота під час розгону, може бути представлена в такому вигляді:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U(t) - R \cdot i - C_d \cdot \omega_1}{L};$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \omega_1;$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_d \cdot i - C_{12} \cdot (\phi_1 - \phi_2) - B_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) - M_{T10}}{J_1};$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \omega_2;$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{C_d \cdot i - C_{12} \cdot (\phi_1 - \phi_2) - B_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) - M_{T20}}{J_2}.$$

Момент статичних опорів $M_c = 0$. Будемо вважати, що на вхід системи (якір електродвигуна) подається напруга, що описується рівнянням: $U(t) = 6,4 - 1,25 \cdot t$ при $0 < t < 1,2$ с.

Моделювання розглянутої електромеханічної системи може бути зроблено на основі чисельного рішення задачі Коші [5]. При цьому математична модель системи має бути представлена у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь. Для спрощення запису математичної моделі зробимо заміну шуканих змінних: позначимо i через x_1 , φ_1 через x_2 , ω_1 через x_3 , φ_2 через x_4 , ω_2 через x_5 . Тоді математична модель механізму повороту робота буде виглядати так:

$$\begin{aligned}x_1' &= \frac{U(t) - R \cdot x_1 - C_d \cdot x_3}{L}; \\x_2' &= x_3; \\x_3' &= \frac{C_d \cdot x_1 - C_{12} \cdot (x_2 - x_4) - B_{12} \cdot (x_3 - x_5) - M_{T10}}{J_1}; \\x_4' &= x_5; \\x_5' &= \frac{C_d \cdot x_1 - C_{12} \cdot (x_2 - x_4) - B_{12} \cdot (x_3 - x_5) - M_{T20}}{J_2}.\end{aligned}$$

Математичне моделювання механізму повороту робота. Тепер розглянемо процес моделювання механізму повороту робота в системі MathCad, що складається з наступних етапів [5, 6]:

- визначення значень вихідних даних;
- формування вектора початкових значень шуканих параметрів, інтервалу часу функціонування досліджуваної системи і числа розрахунків;
- формування вектора-стовпця правих частин системи диференціальних рівнянь;
- вибір методу і відповідної функції для вирішення системи диференціальних рівнянь;
- табличне і графічне представлення результатів моделювання системи.

Спочатку наведемо значення вихідних даних для моделювання приводу механізму повороту робота (додаток 1). Далі перейдемо до формування вектора початкових значень шуканих параметрів механізму повороту і вихідних параметрів інтегрування. В додатку 2 представлено формування вектора початкових значень шуканих параметрів і вихідних параметрів інтегрування. У нашому прикладі ці значення дорівнюють 0. За допомогою системної змінної ORIGIN (додаток 2) введено початкове значення індексу шуканих параметрів рівне 1. За замовчуванням початкове значення індексу дорівнює 0.

Для моделювання механізму повороту робота в системі MathCad необхідно попередньо сформулювати вектор-стовпчик правих частин системи диференціальних рівнянь (додаток 3).

Для вирішення системи диференціальних рівнянь попередньо необхідно вибрати метод її рішення, при цьому результати рішення системи рівнянь можна представити в табличному або графічному вигляді. Щоб вирішити цю систему, скористаємося методом Рунге-Кутта четвертого порядку, для реалізації якого в системі MathCad є відповідна вбудована функція $rkfixed(x, t1, t2, n, F)$. В додатку 4 представлені результати рішення систем диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта в табличному вигляді.

У додатку 5 за замовчуванням відображаються лише 18 результатів розрахунку з множини розрахованих. Для перегляду інших результатів клацніть «мишею» по таблиці, в її правій частині з'явиться бігунок. Встановіть вказівник «миші» на бігунці списку результатів розрахунку. Натисніть ліву кнопку «миші» і, утримуючи натиснутою, пересувайте повзунок списку вниз-вгору для перегляду інших значень розрахунку. При необхідності фіксації знайдених результатів розрахунку відпустіть ліву кнопку «миші».

Mathcad - [МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА РОБОТА.xmcd]

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

MODELYVANNYA PRIVODA MEKHAНИЗМУ ПОВОРОТА РОБОТА

1. Вихідні дані для розрахунку привода механізму поворота робота:

| | |
|---------------------|--|
| $R_d := 4.53835$ | - активний опір роторного кола електродвигуна, Ом; |
| $L := 0.063368$ | - індуктивність, Гн; |
| $C_d := 0.09539$ | - конструктивний коефіцієнт двигуна, В*с/рад; |
| $B_{12} := 0.02109$ | - конструктивний коефіцієнт двигуна, Н*м*с/рад; |
| $J_1 := 0.0001157$ | - момент інерції першої маси, кг*м. кв; |
| $J_2 := 0.005345$ | - момент інерції другої маси, кг*м. кв; |
| $M_{T10} := 0.047$ | - момент зовнішньої сили тертя, Н*м; |
| $M_{T20} := 0.0005$ | - момент зовнішньої сили тертя, Н*м; |
| $C_{12} := 133.67$ | - конструктивний коефіцієнт двигуна, Н*м*с/рад; |
| $M_C := 0.0$ | - момент статичного опору, Н*м; |
| $U := 6.4 - 1.25$ | - момент зовнішньої сили тертя, Н*м |

Нажмите F1 для справки. Авто | | Страница 5

Mathcad - [МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА РОБОТА.xmcd]

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

2. Формування вектора початкових значень шуканих параметрів x , проміжку часу $[t1, t2]$, числа розрахунків n і шуканих параметрів.

ORIGIN := 1 - значення початкового індекса шуканих параметрів інтегрування.

Початкове значення шуканих параметрів системи що досліджується.

Шукані параметри в функції часу:

- x_0 час плиння процесу керування;
- x_1 струм в роторному колі електродвигуна, А;
- x_3 кутова швидкість електродвигуна, рад/с;
- x_4 вихідна координата - кут повороту робота, рад;

Вихідні дані для виконання процесу інтегрування:

- $t1 := 0$ початковий час інтегрування;
- $t2 := 1.2$ кінцевий час інтегрування;
- $n := 500$ кількість кроків інтегрування;

$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

Нажмите F1 для справки. Авто | | Страница 2

Mathcad - [МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА РОБОТА.xmcd]

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

3. Формування вектора-стовбця правої частини системи рівнянь - F.

Перед формуванням вектора-стовбця правих частин системи диференціальних рівнянь необхідно надати йому назву, наприклад F(t,x). Далі слід ввести знак присвоювання, натиснувши комбінацію клавіш Shift+: (двокрапка). Всі параметри, вхідні в диференціальне рівняння, мають бути попередньо знайдені. Після цього можна перейти до формування вектора-стовбця правих частин системи рівнянь.

$$F(t,x) := \begin{bmatrix} \frac{6.4 - 1.25 \cdot t - R_d \cdot x_1 - C_d \cdot x_3}{L} \\ x_3 \\ \frac{[C_d \cdot x_1 - C_{12} \cdot (x_2 - x_4) - B_{12} \cdot (x_3 - x_5) - MT_{10}]}{J_1} \\ x_5 \\ \frac{C_{12} \cdot (x_2 - x_4) + B_{12} \cdot (x_3 - x_5) - MT_{20}}{J_2} \end{bmatrix}$$

Нажмите F1 для справки. Авто | | Страница 3

Mathcad - [МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА РОБОТА.xmcd]

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

3. Формування вектора-стовбця правої частини системи рівнянь - F.

Перед формуванням вектора-стовбця правих частин системи диференціальних рівнянь необхідно надати йому назву, наприклад F(t,x). Далі слід ввести знак присвоєння, натиснувши комбінацію клавіш Shift+: (двокрапка). Всі параметри, вхідні в диференціальне рівняння, мають бути попередньо знайдені. Після цього можна перейти до формування вектора-стовбця правих частин системи рівнянь.

$$F(t,x) := \begin{bmatrix} \frac{6.4 - 1.25 \cdot t - R_d \cdot x_1 - C_d \cdot x_3}{L} \\ x_3 \\ \frac{C_d \cdot x_1 - C_{12} \cdot (x_2 - x_4) - B_{12} \cdot (x_3 - x_5) - MT_{10}}{J_1} \\ x_5 \\ \frac{C_{12} \cdot (x_2 - x_4) + B_{12} \cdot (x_3 - x_5) - MT_{20}}{J_2} \end{bmatrix}$$

Нажмите F1 для справки. Авто | | Страница 3

Mathcad - [МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА РОБОТА.xmcd]

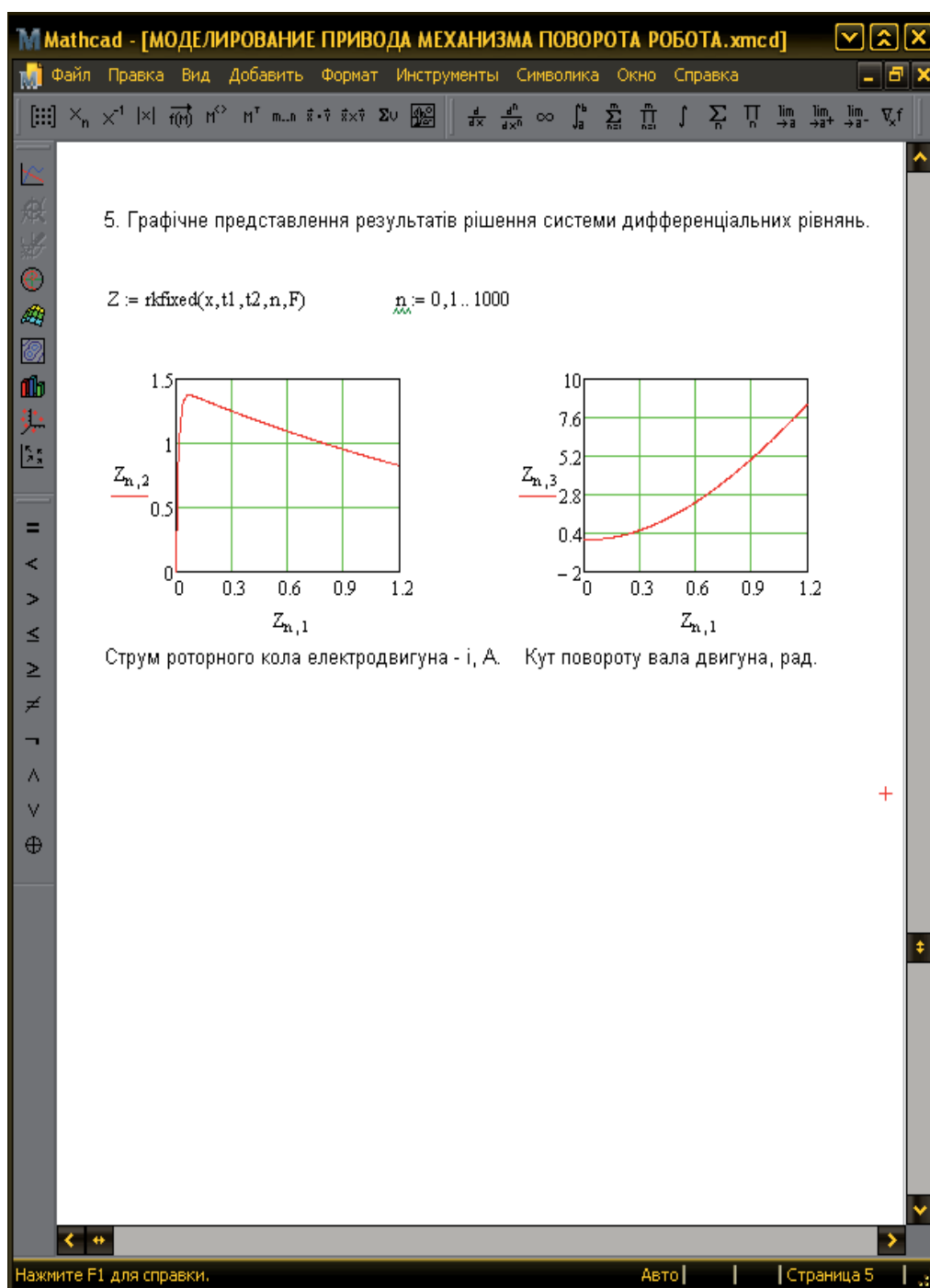
Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

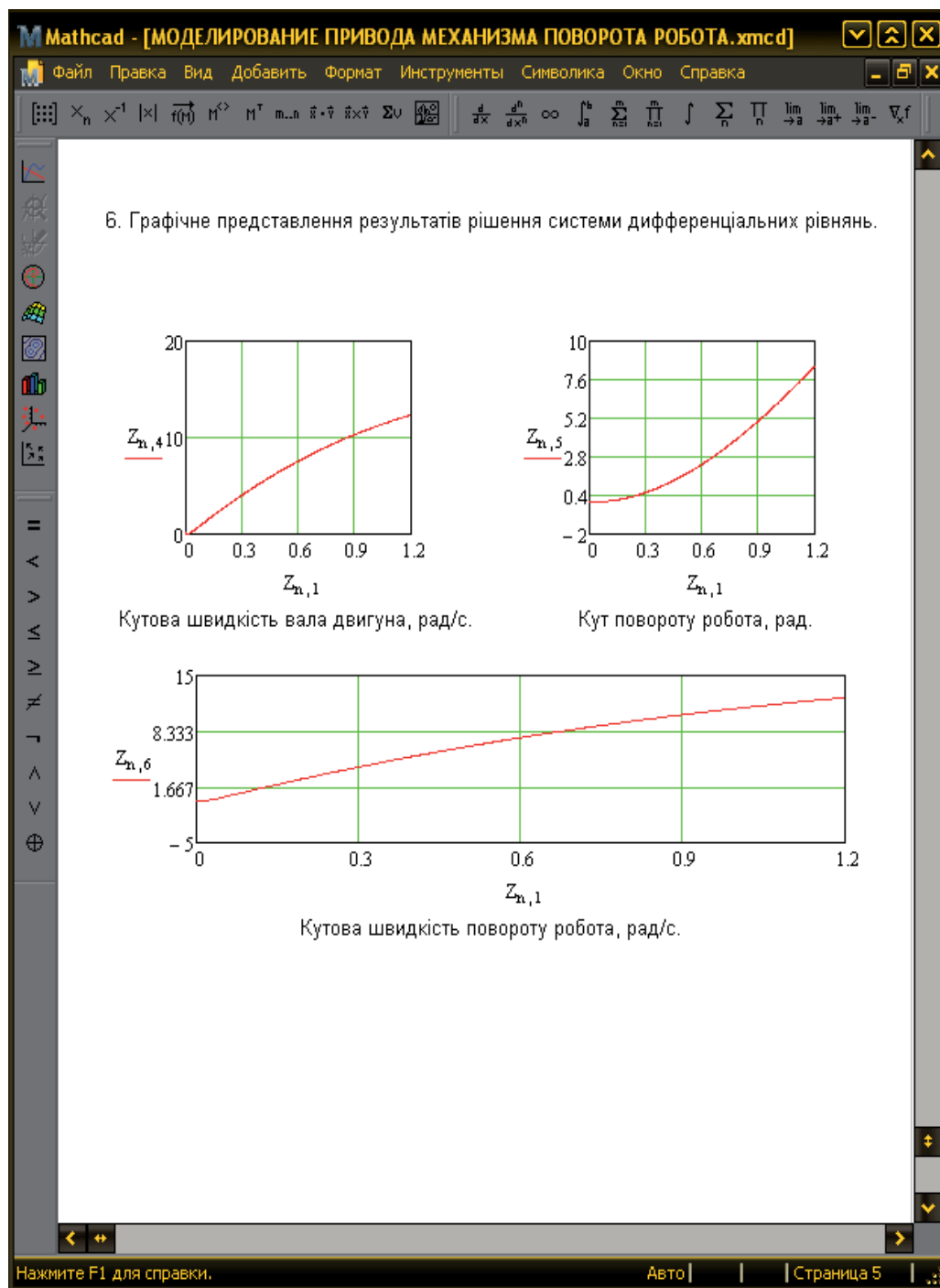
4. Застосування функції rkfixed(x,t1,t2,n,F) (Рунге-Кутта) для знаходження рішення системи диференціальних рівнянь.

rkfixed(x,t1,t2,n,F) =

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | $2.4 \cdot 10^{-3}$ | 0.223 | $-2.065 \cdot 10^{-4}$ | 0.114 | $-1.714 \cdot 10^{-5}$ |
| 3 | $4.8 \cdot 10^{-3}$ | 0.41 | $-1.444 \cdot 10^{-4}$ | 0.027 | $-6.865 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | $7.2 \cdot 10^{-3}$ | 0.568 | $-8.111 \cdot 10^{-5}$ | 0.015 | $-1.295 \cdot 10^{-4}$ |
| 5 | $9.6 \cdot 10^{-3}$ | 0.7 | $-4.066 \cdot 10^{-5}$ | 0.017 | $-1.828 \cdot 10^{-4}$ |
| 6 | 0.012 | 0.812 | $4.482 \cdot 10^{-6}$ | 0.022 | $-2.157 \cdot 10^{-4}$ |
| 7 | 0.014 | 0.906 | $6.932 \cdot 10^{-5}$ | 0.033 | $-2.168 \cdot 10^{-4}$ |
| 8 | 0.017 | 0.985 | $1.648 \cdot 10^{-4}$ | 0.048 | $-1.768 \cdot 10^{-4}$ |
| 9 | 0.019 | 1.051 | $3.004 \cdot 10^{-4}$ | 0.066 | $-8.778 \cdot 10^{-5}$ |
| 10 | 0.022 | 1.106 | $4.843 \cdot 10^{-4}$ | 0.088 | $5.695 \cdot 10^{-5}$ |
| 11 | 0.024 | 1.153 | $7.231 \cdot 10^{-4}$ | 0.112 | $2.63 \cdot 10^{-4}$ |
| 12 | 0.026 | 1.192 | $1.023 \cdot 10^{-3}$ | 0.138 | $5.35 \cdot 10^{-4}$ |
| 13 | 0.029 | 1.225 | $1.388 \cdot 10^{-3}$ | 0.166 | $8.768 \cdot 10^{-4}$ |
| 14 | 0.031 | 1.252 | $1.822 \cdot 10^{-3}$ | 0.196 | $1.292 \cdot 10^{-3}$ |
| 15 | 0.034 | 1.275 | $2.329 \cdot 10^{-3}$ | 0.227 | $1.783 \cdot 10^{-3}$ |
| 16 | 0.036 | 1.294 | $2.911 \cdot 10^{-3}$ | 0.259 | $2.352 \cdot 10^{-3}$ |
| 17 | 0.038 | 1.31 | $3.572 \cdot 10^{-3}$ | 0.292 | $3.001 \cdot 10^{-3}$ |
| 18 | 0.041 | 1.323 | $4.312 \cdot 10^{-3}$ | 0.325 | $3.733 \cdot 10^{-3}$ |

Нажмите F1 для справки. Авто | | Страница 4





Для графічного представлення результатів рішення системи диференціальних рівнянь необхідно попередньо створити матрицю даних результатів розрахунку. У додатку 5 показана матриця даних результатів розрахунку і деякі результати рішення системи диференціальних рівнянь у графічному вигляді, а точніше, залежності струму якірного кола електродвигуна постійного струму й кута повороту якоря електродвигуна від часу.

У додатку 6 представлені інші результати рішення системи диференціальних рівнянь в графічному вигляді: кутова швидкість вала електродвигуна, кут повороту робота φ_2 і кутова швидкість повороту робота ω_2 в залежності від часу повороту робота.

Висновки. У роботі здійснюється математичне моделювання кутового руху на основі математичної моделі, що складається з системи п'яти диференціальних рівнянь. Під час дослідження приводу механізму обертання робота можна визначити зв'язок між кутовими швидкостями вала двигуна та обертання колони (стійки) робота, між кутовими швидкостями та моментами збурень, або між кутовими швидкостями та моментами тертя. Результати моделювання наведені у вигляді таблиці та графіків.

Бібліографічні посилання

1. Бессекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – М., 1975. – 590 с.
2. Бурдаков С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко, А. Н. Тимофеев. – М., 1986. – 264 с.
3. Детали и механизмы роботов: Основы расчёта, конструирования и технологии производства: учеб. пособие / Р. С. Веселков, Т. Н. Гонтаровская, В. П. Гонтаровский и др. / под ред. Б. Б. Самотокина. – К., 1990. – 343 с.
4. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: справочник / Ю. Г. Козырев. – М., 1988. – 392 с.
5. Котлярский Л. Н. MathCad. Решение инженерных и экономических задач / Л. Н. Котлярский. – СПб., 1999. – 388 с.
6. Эйзеншпис А. А. MathCad 2000. Руководство пользователя / А. А. Эйзеншпис. – М., 2000. – 570 с.

Надійшла до редколегії 24.04.2012.

УДК 623.442:519.6

В. Л. Бучарський, П. В. Фролов

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ОЦІНЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНО-РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА МЕТОДОМ СУМІСНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ

У даній роботі розглянуто активно-реактивний тип снаряда, як спосіб підвищення ефективності снайперської стрільби на далекі відстані. Детально було розглянуто газодинамічні процеси в двигуні снаряда. Була проведена оптимізація маси твердого палива, закладеного в двигун снаряда, та обрано оптимальний варіант.

Ключові слова: активно-реактивний снаряд, снайперська стрільба, газодинамічні процеси, чисельне моделювання.