

УДК 004.896:681.518.24

І.Ш. НЕВЛЮДОВ, С.С. ВЕЛИКОДНИЙ

Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

## СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ДУГИ КОЛА ДЛЯ СИСТЕМ ПРОГРАМНОГО ВІДТВОРЕННЯ РУХІВ

У статті розглянуто синтез програмного засобу, призначеного для автоматизованого проектування та формування траєкторії руху автоматичних електромеханічних систем програмного відтворення рухів, що забезпечує планування багатокординатного погодженого руху одного або декількох виконавчих органів. Засіб створено на підставі відповідних методу та алгоритму інтерполяції плоскої дуги кола, що визначена мінімальною кількістю точок у просторі абсолютної системи координат. Обвід руху робочого органу відображується за чотирма основними проекціями, надаючи усі загальноприйнятні точки огляду, до яких звикли конструктори й технологи.

**Ключові слова:** система автоматизованого проектування, система програмного відтворення рухів, робочий орган, інтерполяція, траєкторія руху, дуга кола, формоутворення, абсолютна та відносна системи координат, програмний засіб.

### Вступ

На сучасному етапі становлення України важливим напрямком науково-технічного розвитку є розробка нових технологій автоматизованого проектування із підвищеними вимогами відносно ступеня складності конструкцій, скорочення термінів виконання замовлень, підсилення конкурентної боротьби на ринку. Ці складові примушують здійснювати роботи на найсучаснішому технічному рівні, тому сьогодні конструювання, аналіз і технологічна підготовка виробництва виконуються із використанням так званих «важких САПР», вибір та організація роботи яких проходить у рамках єдиної концепції розвитку засобів проектування та технологічної підготовки виробництв, що спроможні вирішувати задачі, які були поставлені замовником перед виконавцем.

### 1. Постановка проблеми

У більшості випадків елементи, що проектуються, та для яких необхідно вирішувати задачу формоутворення – це тонкостінні конструкції, що складаються із великого набору криволінійних поверхонь, з'єднання яких повинно виконуватись дуже гладко та мати плавну зміну другої похідної. У місцях цих з'єднань доводиться вирішувати досить нетипові задачі сполучення за визначеним законом поверхонь, тому до процесу проектування висунуті найвищі вимоги відносно САПР-системи.

Технологічний процес формоутворення складного геометричного обводу, що виконується систе-

мою програмного відтворення рухів (СПВР) (серед яких промислові роботи (ПР), автоматичні маніпулятори, верстати із ЧПК, графобудівники та інші системи програмного відтворення рухів й складні динамічні об'єкти [1], що виконують зварювальні, фарбувальні, механообробні роботи, а також різання, паяння, нанесення покриттів, розкрій та інші технологічні операції, які виконуються електричною дугою, лазерним променем, плазмою, пульверизатором, різцем тощо), передбачає проходження робочим органом (РО) заданої просторової (чи площинної) траєкторії з необхідною точністю.

Досить часто виникає потреба у здійсненні програмного руху РО СПВР за обводами, котрі найдоцільніше описати плоскою дугою кола, тому що лінійна інтерполяція не витримує підвищених вимог складного формоутворення щодо зменшення точності проведених розрахунків, значної кількості похибок різного роду, великої кількості розбивань на графічні примітиви та інших факторів, які унеможливають виконання конкретного високоточного технологічного завдання, що пов'язане із якістю відтворення обводу.

Для реалізації найвищої точності опису округлених профілів елементів, що проектуються, програмне забезпечення сучасних САПР повинно містити ефективні алгоритми автоматичної інтерполяції, що легко стикуються із пристроями керування СПВР, котрі, відповідно, реалізують просторовий рух РО за заданими траєкторіями. Це призводить до необхідності вдосконалення існуючих методів інтерполяції [2] та формування нових методів проекту-

вання складних геометричних обводів рухів РО СПВР, які б забезпечили високу швидкість та надали б простий аналітичний підхід до побудови програмних траєкторій у рамках цих методів.

Із розгляду поставленої проблеми, можна сформулювати мету статті, яка полягає в розробці зручного інтерактивного програмного засобу, що буде інструментом, за допомогою якого виконуються інтерполяції дуги кола СПВР, стосовно до завдань автоматизації проектування формоутворення складних геометричних обводів.

Виконання означеної мети статті забезпечується вирішенням конкретних *практичних задач*:

- 1) розробити обчислювальні засоби побудови складних геометричних обводів;
- 2) виконати програмну реалізацію обчислювальних алгоритмів;
- 3) створити інтерактивну графічну систему одержання зображення формоутворення.

## 2. Розв'язання проблеми

### 2.1. Аналіз публікацій за темою

У процесі підготовки поданої статті, насамперед, були піддані аналізу системи та засоби автоматизованого проектування формоутворення й підготовки керуючих програм до СПВР, що використовуються на профільних підприємствах СНД. Це системи від провідних пострадянських і західних розробників: САТІА, Unigraphics, Pro/Engineer, Duct, PowerMill, ProCAM, CADD5, Euclid, Anvill, КРЕДО, ГЕМА-3D, САП-УФА, АРТ, БАПТ, MODART, а також пакети Anvil, AutoCAD, «Компас» і багато інших [3 – 5]. Із проведеного аналізу можна зробити висновок, що найбільш складні проблеми при створенні САПР-систем пов'язані з одержанням математичних моделей, що можуть адекватно описати в аналітичному вигляді просторове розміщення досліджуваних об'єктів, апаратно-орієнтованих алгоритмів одержання зображення та методів оптимізації його параметрів [6].

Слід зазначити, що проблеми одержання вищезгаданих математичних моделей та алгоритмів для конкретного випадку інтерполяції дуги кола вже зведені авторами в метод та відповідний йому алгоритм, і розглянуті в публікаціях [2, 7].

Невирішеною залишається проблема, що є метою даної статті, реалізація якої передбачає додавання до вже існуючого програмного забезпечення СПВР засобу тривимірного проектування, інтерполяції та аналізу, здатного функціонувати у розподіленій комп'ютерній мережі й задовольняти основним вимогам, котрі висовуються при розв'язанні траєкторних задач стосовно до СПВР.

### 2.2. Загальні принципи роботи програмного засобу

Одним з підходів до вирішення поставлених завдань є використання інтерактивних методів одержання векторної моделі, при яких технолог задає три точки, що належать досліджуваній дузі кола, та ряд інших параметрів, котрі дозволяють керувати процесом інтерполяції одержуваного геометричного обводу, а, значить, і впливати на точність результату.

Апроксимація контуру дугами кіл знадобиться у випадку, коли геометрична модель містить велику кількість округлених ділянок. Виникаюча необхідність у даній делінеаризації викликана особливостями технологій (наприклад, різання металу) та проблемами із керуванням рухом інструмента на коротких відрізках, при яких вирізка складних обводів, котрі описуються тільки відрізками прямих, призводила до істотного погіршення якості поверхні розрізу [4].

### 2.3. Написання програмного засобу «ARC»

Розглянутий у [7] алгоритм формування траєкторії руху РО СПВР за дугою кола реалізовано у вигляді машинної програми «ARC». Скрипт програми написано із використанням текстового режиму програмної системи MATLAB (рис. 1).

Програма повністю готова до застосування, вона дозволяє виконувати інтерполяцію дуги кола та практично реалізовувати програмне керування рухом за кожною прямокутною координатою переміщення РО СПВР.

### 2.4. Створення графічного інтерфейсу користувача програмного засобу «ARC»

За допомогою вбудованого у MATLAB редактора графічних інтерфейсів «GUI», було виконано графічну обробку розрахованих результатів роботи програмного засобу (ПЗ) «ARC». При створенні графічного вікна відображення результатів було сформовано, за допомогою внутрішніх функцій «GUI», вікно вводу початкових даних (рис. 2).

Після заповнення полів вікна вводу, відбувається побудова аксонометричної проекції дуги кола, що інтерполюється, у абсолютній системі координат (АСК) (для неї сформовано основне вікно, позначене «plot\_mov» на рис. 3); проекції дуги на три Декартові площини (три вікна праворуч, позначені «ХОУ», «YOZ» та «ZOX») та вигляду дуги у відносній системі координат (ВСК) (найменше вікно на рис. 3 – «plot\_o»).

Наведену вище структуру інтерфейсу, з усіма необхідними зв'язками між вікнами та командами побудовами зображень необхідних проекцій, було зведено до файлу *Arc.fig*.

```

C:\MATLAB6p5\work\Arc.m
Файл  Правка  Вид  Текст  Отладка  Точки останова  Web  Окно  Помощь
function varargout = arc(varargin)
% Arc M-file for arc.fig
%   Arc, by itself, creates a new Arc or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = Arc returns the handle to a new Arc or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   Arc('Property','Value',...) creates a new Arc using the
%   given property value pairs. Unrecognized properties are passed via
%   varargin to arc_OpeningFcn. This calling syntax produces a
%   warning when there is an existing singleton*.
%
%   Arc('CALLBACK') and Arc('CALLBACK',hObject,...) call the
%   local function named CALLBACK in Arc.M with the given input
%   arguments.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
%
% Edit the above text to modify the response to help arc
%
%   Author : S.S. Velykodniy, 23-01-08
%
%   Copyright 2008 KhMURE. TAPR.
    
```

Рис. 1. Початок скрипта «ARC», що створено у системі MATLAB

**2.5. Вказівки користувачеві програмного засобу «ARC»**

Скрипт ПЗ «ARC» записано у вигляді файлу *Arc.m*, що запускається командою «arc», у режимі командного рядка MATLAB.

Безпосередня робота з ПЗ «ARC» починається із уведення початкових даних. Для цього на екрані монітора з'являється вікно із запитом на уведення початкових даних (рис. 2), до яких відносяться:

ВВІВ ДАННИХ

	r1	r2	r3	постановка задачі	1
x	15	10	10		
y	16	11	12	вид движения	1
z	13	18	17	1-по дуге	
				2-по окружности	
w=	0.5	T=	12.56	N=	50
					Запуск

Рис. 2. Сформоване вікно вводу початкових даних

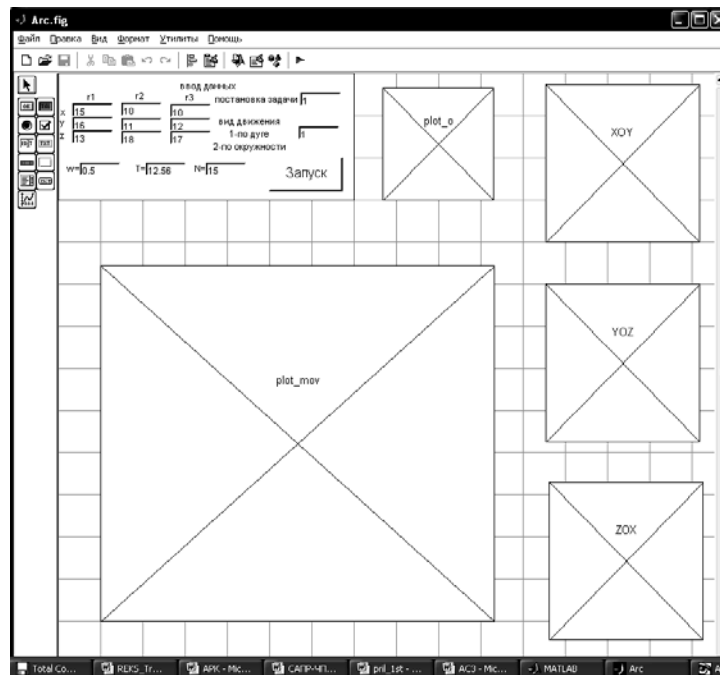


Рис. 3. Структура інтерфейсу виводу графічних результатів

- 1) номер варіанта постановки задачі (1 або 2 [2]);
- 2) номер варіанта виду руху (1 або 2 [7]);
- 3) абсолютні координати трьох вихідних точок дуги кола:  $\vec{r}_1 = \{x_1, y_1, z_1\}$ ,  $\vec{r}_2 = \{x_2, y_2, z_2\}$ ,

$\vec{r}_3 = \{x_3, y_3, z_3\}$ , що виражені в ум. лін. од., але на які існують кадрові обмеження відпрацювання:

$$\vec{r}_1 = \{x_1, y_1, z_1\}, \quad \vec{r}_2 = \{x_2, y_2, z_2\},$$

$\vec{r}_3 = \{x_3, y_3, z_3\}$ , що виражені в ум. лін. од., але на які існують кадрові обмеження відпрацювання:

$$1 \leq x_i \leq 5000, \quad (1)$$

$$1 \leq y_i \leq 5000, \quad (2)$$

$$1 \leq z_i \leq 5000, \quad i = 1, 2, 3; \quad (3)$$

4) необхідна кутова швидкість руху за дугою кола –  $\omega_{\text{цаä}}$  (якщо постановка задачі: 1), виражена у рад/с, при обмеженні:

$$0 \leq \omega_{\text{цаä}} \leq 10; \quad (4)$$

5) необхідний час руху за дугою кола –  $t_{\text{цаä}}$  (якщо постановка задачі: 2), що виражений у секундах, із обмеженням тривалості відпрацювання:

$$0 \leq t_{\text{цаä}} \leq 1000; \quad (5)$$

6) кількість інтервалів дискретизації (що пов'язане із точністю інтерполяції) дуги кола –  $N$ , знаходиться у межах:

$$2 \leq N \leq 360. \quad (6)$$

Усі початкові дані можуть бути задані довільно (із урахуванням обмежень) або прийняті відповідно до технологічного креслення або САПР-моделі.

У залежності від варіанта постановки задачі, вводиться один з технологічних параметрів:  $\omega_{\text{цаä}}$  або  $t_{\text{цаä}}$ . Значення параметра, що залишився, вводять рівним 0. На практиці цілком достатньо вибрати кількість інтервалів дискретизації  $N$  у межах  $10 \leq N \leq 50$ .

Особливу увагу необхідно приділяти значенням координат вихідних точок  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  і  $\vec{r}_3$ : точки не повинні належати одній прямій та координати навіть двох точок – не повинні збігатися! У протилежному випадку, програма не буде запускатися на розрахунок (бо не буде виконана умова кругової інтерполяції) – необхідно повторити введення даних і увести припустимі значення координат початкових точок.

Після закінчення введення початкових даних, необхідно у тому ж вікні (рис. 2), натиснути кнопку «ЗАПУСК», що пустить програму на розрахунок. Увесь розрахунок траєкторії виконується автоматично – без втручання користувача.

## 2.6. Організація виводу результатів розрахунків

Після виконання розрахунків на екрані з'явиться «вікно результатів» (командне вікно MATLAB (рис. 4)).

У цьому вікні, якщо скористатися «прокрут-

кою», то можна вивести всю інформацію, щодо проведених розрахунків, а саме:

1) абсолютні координати трьох вихідних точок  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  і  $\vec{r}_3$  – для контролю правильності введення;

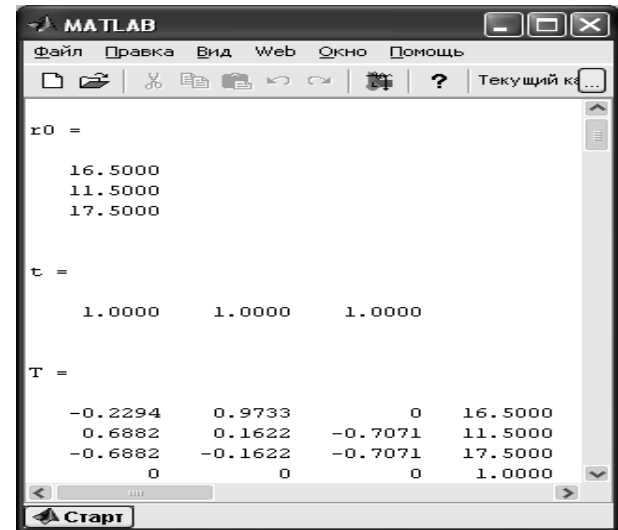


Рис. 4. Загальний вигляд вікна MATLAB, що містить розраховані дані

2) абсолютні координати точки  $\vec{r}_0$  – початку ВСК (центра кола);

3) значення елементів матриці  $T$  – перетворення прямокутних координат ВСК у прямокутні координати АСК;

4) значення елементів матриці  $T^{-1}$  – перетворення прямокутних координат АСК у прямокутні координати ВСК;

5) відносні координати трьох вихідних точок  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$ ,  $\vec{r}_3$ , і  $\vec{r}_0$ ;

6) відносні координати трьох спрямованих відрізків  $\vec{r}_0\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_0\vec{r}_2$  і  $\vec{r}_0\vec{r}_3$ ;

7) значення модулів спрямованих відрізків  $|\vec{r}_0\vec{r}_1|$ ,  $|\vec{r}_0\vec{r}_2|$  і  $|\vec{r}_0\vec{r}_3|$ ;

8) значення косинусів центральних кутів:  $\cos n_{12}$  і  $\cos n_{13}$ ;

9) напрямок руху РО за дугою кола, номер «ілки» алгоритму [7], а також значення центральних кутів  $n_{12}$ ,  $n_{13}$ , обчислені за формулами та виражені у радіанах або кутових градусах.

Цей пункт результатів є перевірочним: якщо побудувати ВСК  $\hat{O}\hat{X}\hat{Y}$  та відкласти у ній точки  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  і  $\vec{r}_3$ , відповідно до початкових даних, а потім виміряти центральні кути  $n_{12}$ , і  $n_{13}$ , то отримані значення повинні збігатися із розрахунковими, що виконані за допомогою ПЗ «ARC»;

10) приводяться значення розрахункових параметрів для визначення координат поточної рухливої точки дуги кола: кутова швидкість  $\omega$  [рад/с] та час руху  $t$  [с], кількість інтервалів дискретизації  $N$ , лінійна швидкість  $\vec{v}$  [ум. лін. од. / с], дискретний крок за часом  $\Delta t$  [с] і збільшення кута  $\Delta\varphi$  [рад];

11) номери варіантів постановки задачі і виду руху задані користувачем;

12) таблиця із розрахунковими даними поточної точки дуги кола, у кожний дискретний момент

часу  $t_i$  ( $i = 0, N$ ) (координати поточної точки приведені послідовно у АСК та ВСК).

На рис. 5 наведено наочний приклад графічної побудови траєкторії руху РО СПВР у вікні відображення результатів роботи ПЗ «ARC».

Слід додати, що під час перевірки та тестування даного програмного продукту було розраховано та проаналізовано на вірність побудови більш ніж 80 різноманітних варіантів розташувань початкових точок.

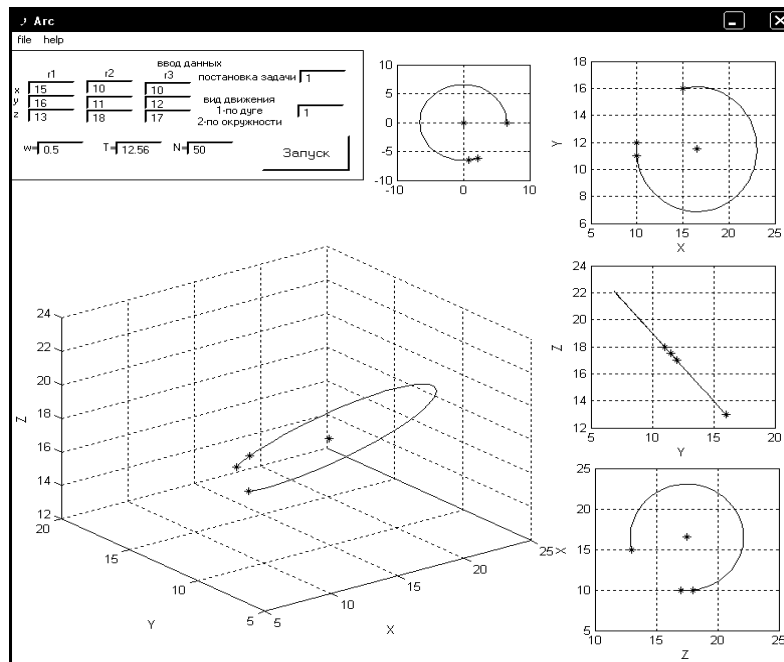


Рис. 5. Наочний приклад побудови траєкторії руху РО СПВР у вікні графічного відображення результатів роботи ПЗ «ARC»

## Висновки

Таким чином, при вирішенні практичних задач дослідження, що ставилися безпосередньо перед виконанням роботи, була досягнута мета статті: розробити зручний інтерактивний програмний засіб, за допомогою якого виконуються інтерполяції дуги кола СПВР, стосовно до завдань автоматизації проектування формоутворення складних геометричних об'єктів.

У результаті досліджень розглянуто: загальні принципи роботи ПЗ «ARC», сам процес його написання, створення графічного інтерфейсу користувача ПЗ, організацію виводу результатів розрахунків, а також подано стислі вказівки користувачеві ПЗ «ARC».

Сам ПЗ, створений на підставі методу й відповідного йому алгоритму інтерполяції дуги кола, що описані в [2, 7], доповнений необхідним сервісним математичним забезпеченням та реалізований із застосуванням програмної системи MATLAB, у вигляді інтерактивного програмного засобу для ПК,

що працює в діалоговому режимі. ПЗ «ARC» розроблено стосовно до реальних задач інтерполяції на різних ділянках зони обслуговування СПВР, що працюють у прямокутній системі координат. Засіб точно розраховує та наглядно відображує у просторі траєкторію руху РО та її проєкції на кожен робочу площину. Також інтерфейс ПЗ повністю відповідає сучасним пристроям вводу інформації у СПВР.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена інтерактивна графічна система одержання зображення формоутворення відрізняється від існуючих програмних засобів побудови геометричних моделей об'єктів тим, що траєкторія руху РО СПВР інтерполюється відразу колом (без наближень, які викликані лінійною інтерполяцією), що гарантує підвищену точність розрахунків, зменшення різноманітних похибок, скорочення довжини керуючої програми та термінів самої обробки. Також вдосконалено процес формування вихідних даних для сполучення ПК із пристроєм керування СПВР: траєкторія руху формується у вигляді масивів точок, які задані в абсолютній та від-

носній системах координат, у залежності від дискретних можливостей конкретної СПВР та технологічних особливостей виготовлення, що враховуються у створеному програмному засобі.

Перспективи подальших досліджень полягають у створенні аналогічного програмного засобу, але який міг би реалізувати проектування та інтерполяцію еліптичних, гіперболічних і параболічних профілів й поверхонь, адже досить часто виникає потреба у здійсненні програмного руху РО СПВР за обводами, що найдоцільніше описати плоскими або просторовими дугами кривих другого порядку.

## Література

1. Великодний С.С. Аналіз динамічної точності доланкового маніпулятора промислового робота / С.С. Великодний // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х., 2005. – Вып. 130. – С. 82-85.
2. Невлюдов І.Ш. Метод інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів /

І.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // *Радіоелектроніка та інформатика*. – 2007. – № 3. – С. 36-42.

3. Бормалев С. *Практическое применение EDS Unigraphics в авиастроении* / С. Бормалев, С. Червоных // *Открытые системы*. – 1997. – № 2. – С. 43-46.

4. Петунин А.А. *Автоматизация проектирования и изготовления малых архитектурных форм типа «решётка»* / А.А. Петунин // *Архитектон*. – 2006. – № 16. – С. 32-38.

5. Дихл Б. *О подходах к выбору САМ/САМ-системы* / Б. Дихл // *CNC Machining Magazine*. – 2001. – № 3. – С. 18-34.

6. Мартынов С.А. *Модели и методы автоматизации проектирования магнитных систем стеллараторного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12; захищена 25.12.07* / Мартынов Сергей Олексійович. – Х., 2007. – 167 с.

7. Невлюдов І.Ш. Алгоритм інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів / І.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний // *Радіоелектроніка та інформатика*. – 2008. – № 1. – С. 15-18.

Надійшла до редакції 5.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заст. дир. з наук. роботи Харківського науково-дослідного технологічного інституту приладобудування В.Є. Овчаренко, Харків.

## СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДУГИ ОКРУЖНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ ПРОГРАММНОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ

*И.Ш. Невлюдов, С.С. Великодний*

В статье рассмотрен синтез программного средства, предназначенного для автоматизированного проектирования и формирования траектории движения систем программного воспроизведения движений, обеспечивающего планирование многокоординатного согласованного движения одного либо нескольких исполнительных органов. Средство создано на основе соответствующих метода и алгоритма интерполяции плоской дуги окружности, определяемой минимальным количеством точек в пространстве абсолютной системы координат. Контур движения рабочего органа отображается четырьмя основными проекциями, предоставляя все общепринятые точки обзора, к которым привыкли конструкторы и технологи.

**Ключевые слова:** система автоматизированного проектирования, система программного воспроизведения движений, рабочий орган, интерполяция, траектория движения, дуга окружности, формообразование, абсолютная и относительная системы координат, программное средство.

## CREATION OF A SOFTWARE AN AUTOMATED DESIGNING AND INTERPOLATION OF AN ARC A CIRCLE FOR SYSTEMS PROGRAMM REPRODUCTION OF MOVEMENTS

*I.Sh. Nevlyudov, S.S. Velykodniy*

In a paper the synthesis of a software intended for an automated designing and shaping to a trajectory of driving automatic electromechanical systems program reproduction of movements is considered. The software ensures scheduling multicoordinate agreed driving one or several executive organs. It is created because of appropriate a method and algorithm an interpolation of a flat arc a circle, which is defined by a minimum quantity points in space of an absolute frame. The outline of driving a working organ is mapped by four basic projections, submitting all conventional points of the review, to which the designers and technologists have got used.

**Key words:** System of automated design, system of program reproduction movements, working organ, interpolation, trajectory of driving, arc of a circle, formation of form, absolute and relative frame, software.

**Невлюдов Ігор Шакирович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Технології та автоматизація виробництва» Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Великодний Станіслав Сергійович** – аспірант кафедри «Технології та автоматизація виробництва» Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: assistant1981@gmail.com.