Оригинальная статья / Original article
УДК 621.3
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-710-722

Анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов

© В.Д. Сартаков
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование свойств и параметров интерполяторов и анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов. Рассмотрен и применяется метод оценочной функции для синтеза интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов. Интерполятор предназначается для реализации траекторий движения рабочего органа станка или промышленных роботов, заданных в управляющей программе системы числового программного управления. При работе интерполятор использует входную информацию, которая поступает из управляющей программы системы числового программного управления. При решении задачи разработаны алгоритмы моделирования линейного и кругового интерполяторов системы числового программного управления станка или промышленных роботов по методу оценочной функции. На основе этих алгоритмов предложены варианты программ, которые реализуют математические модели интерполяторов на языке М-файлов Matlab. Приведены результаты моделирования линейных и круговых интерполяторов системы числового программного управления станка или промышленных роботов. Показана работоспособность разработанных моделей и алгоритмов работы интерполяторов системы числового программного управления станка или промышленных роботов. Также появилась возможность детального исследования показателей интерполятора и путей его совершенствования. Анализ результатов моделирования линейного и кругового интерполяторов позволяет сделать вывод о том, что математические модели интерполяторов корректно отражают его свойства.

Ключевые слова: система числового программного управления станка и промышленного робота, алгоритм, управляющая программа, интерполятор системы числового программного управления

Информация о статье: Дата поступления 20 марта 2019 г.; дата принятия к печати 09 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Сартаков В.Д. Анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):710–722. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-710-722

Analysis of interpolator modeling methods for computer numerical control system of metal cutting machines and industrial robots

Valeriy D. Sartakov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to study interpolator properties and parameters and analyze modeling methods of interpolators for the numerical control system of metal cutting machines and industrial robots. The method of evaluation function is considered and applied for the synthesis of numerical control system interpolators for metal cutting machines and industrial robots. The interpolator is designed for the implementation of trajectories of a working body of a machine-tool or industrial robots set in the control program of the numerical control system. When in operation, the interpolator uses input information that comes from the control program of the numerical control system. Solution of the problem included the development of the simulation algorithms of linear and circular interpolators of the numerical control system of machine-tools or industrial robots by the method of evaluation function. The variants of programs implementing interpolator mathematical models in the language of Matlab M-files are proposed on the basis of these algorithms. The simulation results of linear and circular interpolators of numerical control system of a machine-tool or industrial robots are presented. The efficiency of the developed models and operation algorithms of numerical control system interpolators of a machine-tool or industrial robots is shown. The article outlines the possibility for the detailed study of indicators of the interpolator and ways to improve the latter. Analysis of the simulation results of linear and circular interpolators leads to the conclusion that mathematical models of interpolators correctly reflect their properties.

Keywords: numerical control system of a machine-tool and an industrial robot, algorithm, control program, numerical control system interpolator

Information about the article: Received March 20, 2019; accepted for publication July 09, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Sartakov V.D. Analysis of interpolator modeling methods for computer numerical control system of metal cutting machines and industrial robots. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2019;23(4):710–722. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-710-722

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы числового программного управления станками и промышленными роботами (ПР), как правило, построены с использованием средств микропроцессорной техники. При этом функции элементов современных систем числового программного управления (СЧПУ) реализуются программно. К таким элементам относится интерполятор (И) представляющий вычислительное устройство[1] [1, 2] и блок задания скорости. Интерполятор предназначается для реализации траекторий движения рабочего органа (РО) станка или ПР, заданных в управляющей программе СЧПУ [1, 3–5]. Интерполятор – это устройство, которое в каждый момент времени производит проверку и коррекцию соотношения скоростей рабочего органа по координатам в соответствии с траекторией движения рабочего органа, заданной в управляющей программе (УП) [1]. В каждый момент времени интерполятор обеспечивает согласование скоростей по каждой координате, что и является основой воспроизведения заданной траектории.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В каждый момент времени интерполятор обеспечивает согласование скоростей РО по каждой координате станка или ПР (резец, фреза, шлифовальный круг и схват ПР), что и является основой воспроизведения заданной траектории [1]. На рис. 1 представлено изображение информационной модели интерполятора. Информационная модель интерполятора показывает, какие сигналы следует подать в каждом кадре УП на вход интерполятора для того, чтобы получить необходимую информацию на его выходе. Входная информация интерполятора – это информация, содержащая данные о величинах перемещений рабочего органа по координатам станка или ПР и значения начальных координат, определяемых по этим же осям, а также о скорости перемещения рабочего органа (линейная V или угловая скорость рабочего органа). Входная информация И содержит следующие данные: величину перемещений РО по координатам, допустим, X, Y, Z прямоугольной системы координат; значения начальных координат по этим же осям Xнач, Yнач, Zнач; скорость перемещения РО (линейная V или угловая скорость РО) [6–9].

Выходная информация интерполятора – это сигналы задания на системы электроприводов (ЭП) станка, допустим, по осям X, Y, Z, представляющие собой три унитарных последовательности импульсов по трем осям координат: задание на электропривод по оси X – ЭПx; задание на электропривод по оси Y – ЭПy; задание на электропривод по оси Z – ЭПz [10–12].

Исследование свойств и параметров интерполяторов, а также анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления являются актуальной задачей [13–17].

[1]Иванов В.М. Электроприводы с системами числового программного управления: учеб. пособ. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. 152 с. / Ivanov V.M. Electric drives with numerical control systems: Learning aids. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University Publishing House, 2006.152 p.

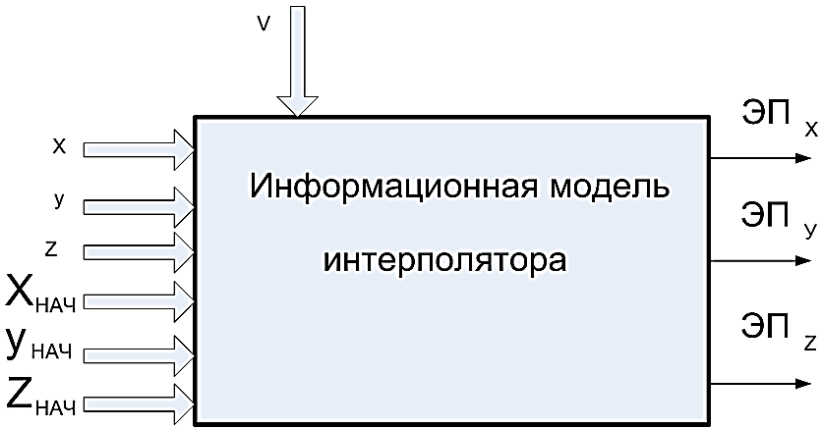


Рис. 1. Информационная модель интерполятора
Fig. 1. Information model of the interpolator

3. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интерполяторы можно разделить на несколько групп. Для этого используются следующие классификационные признаки: метод построения интерполяторов; математический метод, используемый для синтеза интерполяторов; тип линий (траекторий), реализуемых интерполяторами [1].

Среди математических методов, используемых в интерполяторах, различают следующие: метод цифровых дискретных анализаторов цифровых интеграторов (ЦИ) и метод оценочной функции [1, 13, 15, 16].

Классификация интерполяторов по типу линий, реализуемых интерполяторами, делит их на следующие группы: линейные интерполяторы и круговые интерполяторы. Виды траекторий, выполняемых интерполяторами промышленных СЧПУ – прямая линия и окружность (дуга окружности) [1, 10, 12, 18].

Функционирование интерполяторов основывается на использовании математической модели интерполяторов (ММИ) [1, 18–23]. Выбор ММИ зависит от следующих критериев: вида заданной траектории РО станка, квадранта, в котором эта траектория представлена, и метода, который положен в основу реализации интерполятора [1, 18]. Структуры математических моделей интерполяторов в разных квадрантах похожи, но не совпадают [1]. При использовании метода цифровых дискретных анализаторов (цифровых интеграторов) различают две традиционных формы представления математических моделей интерполяторов: форма уравнений состояния и форма структурной схемы [1, 16].

В данной работе применяется метод оценочной функции, при котором синтез интерполятора осуществляется по моделям, использующих рекуррентные соотношения [1]. Оценочная функция (ОФ) – это особым образом сформированная функция, знак которой определяет координату (X или У), для которой интерполятор в текущий момент времени выдает команду (импульс) на перемещение. Например, если знак оценочной функции положительный, то импульс, соответствующий перемещению на 1 шаг, выдается по оси X, а если отрицательный, то по оси У.

В статье [1] приведено выражение для оценочной функции, полученной для линейного интерполятора (ЛИ) при реализации траектории в виде прямой линии в первом квадранте системы координат.

$$F_{ij} = (x_k \cdot y_j - x_i \cdot y_k), \quad (1)$$

где i и j – число шагов по оси X и У; x_i – проекция «реального» отрезка прямой на ось X, y_j – проекция отрезка этой прямой на ось У; x_k и y_k – проекции «заданного» отрезка прямой на оси X и У (координаты конечной точки отрезка ОА при нулевых координатах начальной точки).

Для синтеза структуры ЛИ по рассматриваемому методу используются рекуррентные выражения для оценочной функции при увеличении числа шагов на единицу по оси X (т.е. i + 1) и по оси У (т.е. j + 1) в первом квадранте:

$$F_{(i+1)j} = F_{ij} - y_k; \quad (2)$$

$$F_{i(j+1)} = F_{ij} + x_k \quad (3)$$

при дополнении уравнений (2) и (3) следующими условиями:

1) если $F_{ij} \le 0$, то подается команда на перемещение привода по оси X;

2) если $F_{ij} \le 0$, то подается команда на перемещение привода по оси У.

Получаем математическую модель линейного интерполятора, работающего по методу оценочной функции (МОФ) для первого квадранта.

Для других квадрантов декартовой системы координат математическая модель линейного интерполятора, работающего по методу МОФ, составляется аналогично, но будет отличаться знаками и значениями членов выражений (2) и (3). Станут модифицироваться также условия для подачи команд на приводы СЧПУ.

Математическая модель кругового интерполятора (КИ) по методу оценочной функции разрабатывается по аналогичной методике. Оценочная функция для кругового интерполятора выглядит следующим образом:

$$F_{ij} = (x_i)^2 + (y_j)^2 - R^2, \quad (4)$$

где x_i и y_j – текущие координаты движущейся по окружности точки РО; R – радиус окружности.

Для синтеза структуры КИ по методу оценочной функции необходимо проанализировать его работу при увеличении числа шагов на единицу по оси X (т.е. i+1) и по оси У (т.е. j+1). Учтем, что при реализации траектории в виде дуги окружности в первом квадранте

$$x_{i+1} = x_i + 1, \quad (5)$$

$$y_{j+1} = y_j - 1. \quad (6)$$

Тогда рекуррентные выражения для ОФ для кругового интерполятора в первом квадранте при увеличении числа шагов на единицу по оси X (т.е. i+1) и по оси У (т.е. j+1) выглядят следующим образом.

$$F_{(i+1)}\text{j} = F_{ij} + 2 \cdot x_i + 1. \quad (7)$$

$$F_{i(j+1)} = F_{ij} - 2 \cdot y_j + 1. \quad (8)$$

Для других квадрантов системы координат математическая модель КИ, работающего по методу МОФ, составляется аналогично, но будет отличаться знаками и значениями членов выражений (7) и (9). Будут модифицироваться также условия для подачи команд на приводы СЧПУ.

На рис. 2. представлен алгоритм программной реализации линейного интерполятора по методу ОФ, в котором использованы элементы команд пятого поколения СЧПУ (ПП – программный продукт).

На рис. 3. представлен алгоритм программной реализации КИ по методу ОФ при движении РО по часовой стрелке.

В представленной блок-схеме алгоритма программной реализации КИ по методу ОФ можно выделить следующие части:

- определение типа интерполятора и направления движения рабочего органа;
- определения номера квадранта;
- программная реализация математической модели кругового интерполятора при движении рабочего органа в первом квадранте по часовой стрелке.

Определение типа интерполятора осуществляется с помощью двух условных блоков (1 и 2). При этом производится сравнение подготовительной команды УП с кодом команды, при которой реализуется КИ при движении рабочего органа по часовой стрелке. Блоки 3 и 4 алгоритма «отвечают» за определение номера квадранта, в

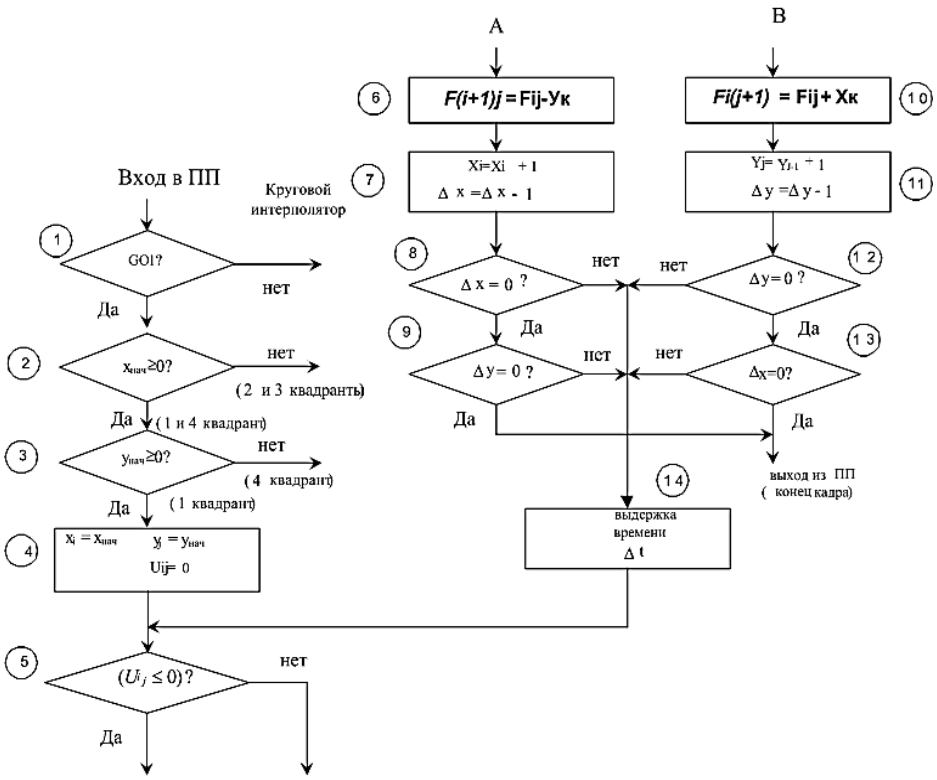


Рис. 2. Алгоритм программной реализации линейного интерполятора по методу оценочной функции
Fig. 2. Algorithm of linear interpolator software implementation by the method of evaluation function

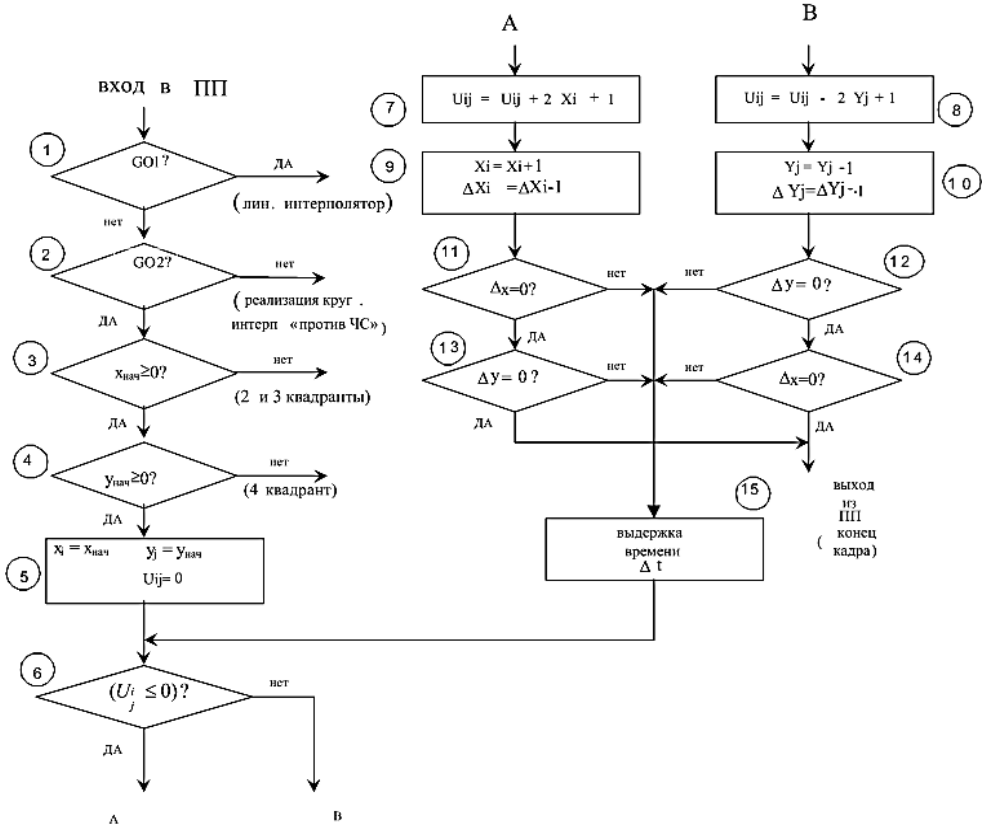


Рис. 3. Алгоритм программной реализации кругового интерполятора по методу оценочной функции
Fig. 3. Algorithm of circular interpolator software implementation by the method of evaluation function

котором будет двигаться рабочий орган. В 5 блоке текущим значениям координат X_i и Yj присваиваются начальные значения этих же координат, а текущее значение оценочной функции F_{ij} приравнивается нулю.

В условном блоке 6 проверяется существование неравенства $F_{ij} < 0$. Если неравенство выполняется, то алгоритм «ветвится» на электропривод по оси X. Если F_{ij} положительная, то работа алгоритма направляется по ветви электропривода по оси Y. Блоки 7–10 непосредственно реализуют математическую модель КИ при движении рабочего органа в первом квадранте по часовой стрелке. В блоках 11–14 проверяется окончание отработки кадра. Блок 15 осуществляет временную задержку, имитирующую работу блока задания скорости.

Аналогичным образом можно провести анализ алгоритма программной реализации линейного интерполятора по методу ОФ (см. рис. 2).

Рассмотрим методику моделирования интерполяторов системы числового программного управления в ядре Matlab на языке М-файлов. Для ввода исходных данных из управляющей программы СЧПУ в программе «Интерполятор» используется следующий фрагмент, поясняющий подготовку к реализации интерполятора в первом квадранте.

1% Программа для реализации интерполятора в первом квадранте по часовой стрелке.

2 G01 = 1; % Для подготовительной функции «G01» установлен числовой код, равный «1».

3 G02 = 2; % Для подготовительной функции «G02» установлен числовой код, равный «2».

4 G02 = 3; % Для подготовительной функции «G03» установлен числовой код, равный «3».

5 g = G02; % Для подготовительной функции, которая определяет тип кругового

6%-го интерполятора по часовой стрелке, в данной программе принята переменная «g».

7 x1nach = 90; % Начальное значение «x1nach» по координате «X» принято равным «90».

8 y1nach = 100; % Начальное значение «y1nach» по координате «Y» принято равным «100».

9 x1kon = 101; % Конечное значение «x1kon» по координате «X» принято равным «101».

10 y1kon = 70; % Конечное значение «y1kon» по координате «Y» принято равным «70».

11 deltax = x1kon-x1nach; % Приращение «deltax» по координате «X» принято равным

12% «x1kon-x1nach».

13 deltay = y1kon-y1nach; % Приращение «deltay» по координате «Y» принято равным

14% «y1kon-y1nach».

Далее представлен фрагмент программы, поясняющий выполнение блоков 1 и 2 алгоритма реализации КИ по часовой стрелке в первом квадранте по методу ОФ (см. рис. 3).

15 if g==G01

16% Если «g==G01», то выбирается реализация линейного интерполятора «G01»

17 if g==G02

18% Если «g==G02», то выбирается реализация кругового интерполятора по часовой

19 % стрелке «G02»

20 if g==G03

21 % Если «g==G03», то выбирается реализация кругового интерполятора против часовой

22% стрелки «G03»

……

nm end

n(m+1) end

n(m+2) end

После определения типа интерполятора в алгоритме необходимо установить квадрант его реализации. Далее приводится фрагмент программы, поясняющий выполнение блоков 3 и 4 алгоритма реализации КИ по часовой стрелке в первом квадранте по методу ОФ (см. рис. 3).

23 if x1nach>=0

24% Если начальное значение

«x1nach» больше или равно нулю («x1nach>=0»),

25% то для реализации кругового интерполятора по часовой стрелке выбирается

26% правая полуплоскость «x-y»

27 if y1nach>=0

28% Если начальное значение «y1nach» больше или равно нулю («y1nach>=0»),

29% то для реализации кругового интерполятора по часовой стрелке выбирается

30% первый квадрант плоскости «x-y»

После этих действий в алгоритме производится задание начальных значений координат по осям X и Y. Фрагмент программы, поясняющий выполнение блока 5 алгоритма реализации КИ по часовой стрелке в первом квадранте по методу ОФ (см. рис. 3), представлен в следующем виде.

31 xi=x1nach; % Текущее значение «xi» по координате «X» в первом квадранте

32% приравнивается начальному значению «x1nach», т.е. «xi=x1nach»

33 yj=y1nach; % Текущее значение «yj» по координате «Y» в первом квадранте

34% приравнивается начальному значению «y1nach», т.е. «yj=y1nach»

35 Fij=0; % «Fij» – начальное значение оценочной функции приравнивается нулю

36 xii = [x1nach]; % Создание матрицы результатов вычислений координаты X для вывода на

37% график

38 yjj = [y1nach]; % Создание матрицы результатов вычислений координаты Y для вывода на 39 % график

40 while xi<x1kon || yj>y1kon % Начало оператора цикла

Оператор в строке 40 управляющей программы реализует начало выполнения группы блоков 11–14 алгоритма (см. рис. 3), в котором выполняется цикл при синтезе кругового интерполятора в первом квадранте по часовой стрелке. На следующем фрагменте программы приведена реализация блока 6 алгоритма.

41 if Fij <= 0

42% На этом шаге реализуется движение по «X» в первом квадранте по часовой стрелке

43% Выдать по координате «X» сигнал логической «1»

На следующем фрагменте программы поясняется выполнение блоков 7 и 9.

44 Fij=Fij+2*xi+1; % Новое значение оценочной функции после шага по оси «X»

45 xi=xi+1 % новое значение текущей координаты «X» после 1 шага по оси X

46 deltax=deltax-1; % сколько осталось сделать шагов по оси «X»

47% Выдается на систему электропривода по оси «X» сигнал, который

48% вызывает перемещение механизма по оси «X» на расстояние,

49% соответствующее одной дискрете (допустим, 0,010 мм)

Так как производится изменение значения координаты по оси X, то в строках 50–53 программы осуществляется коррекция матриц «X» и «Y» для правильного представления результатов вычислений координаты X при выводе графика Y=f(X) на графопостроитель Matlab.

50 xii = [xii, xi]; % Коррекция матрицы результатов вычислений координаты X для вывода на 51 % график

52 yjj = [yjj, yj]; % Коррекция матрицы результатов вычислений координаты Y для вывода на 53% график

В следующем фрагменте программы поясняется выполнение блоков 8 и 10.

54 elseif Fij>0

55% На этом шаге реализуется движение по «Y» в первом квадранте

56% Выдать по координате «Y» сигнал логической «1»

57 Fij=Fij-2*yj+1; % Новое значение оценочной функции после шага по «y»

58 yj=yj-1 % Новое значение текущей координаты «Y» после 1 шага по Y

59 deltay=deltay+1; % сколько осталось сделать шагов по «y»

60% Выдается на систему электропривода по оси «Y» сигнал, который

61% вызывает перемещение механизма по оси «Y» на расстояние,

62% соответствующее одной дискрете

В «теле» оператора цикла «while» находится блок 15, с помощью которого выполняется задержка на интервал времени Δt (пауза), зависящий от величины скорости движения РО станка или промышленного робота, заданных в управляющей программе СЧПУ. Сначала в этом блоке устанавливаются величина, интервал времени Δt, а затем производится запуск оператора «пауза». Чем больше величина скорости движения РО станка или ПР, заданных в управляющей программе СЧПУ, тем меньше интервал времени Δt. В следующем фрагменте программы приведены операторы завершения УП.

63 pause(0.1) % Указание выбора интервала паузы в секундах

64 pause on % Запуск оператора «пауза»

65 end % Завершение оператора цикла «while»

В следующем фрагменте программы приведены операторы завершения управляющей программы.

66 end

67 end

68 end

69 end

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4. представлен результат моделирования работы программного кругового интерполятора (фрезерного станка) по часовой стрелке в первом квадранте при следующих исходных данных дуги окружности: x1nach=90; y1nach=100; x1kon=101; y1kon=70. Величина одного шага (дискреты) равна $\Delta L1$. Время моделирования при интервале паузы $\Delta t = 0.1$ с равно 6 с. На рис. 5 приведен результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке в первом квадранте при следующих исходных данных: x1nach=900; y1nach=1000; x1kon=1010; y1kon=700. Радиус дуги окружности для этого случая больше примерно в 10 раз, а величина одной дискреты $\Delta L2$ меньше в 10 раз: ($\Delta L2 = \frac{\Delta L}{10}$). Время моделирования при интервале паузы $\Delta t = 0.1$ с – равно 60 с.

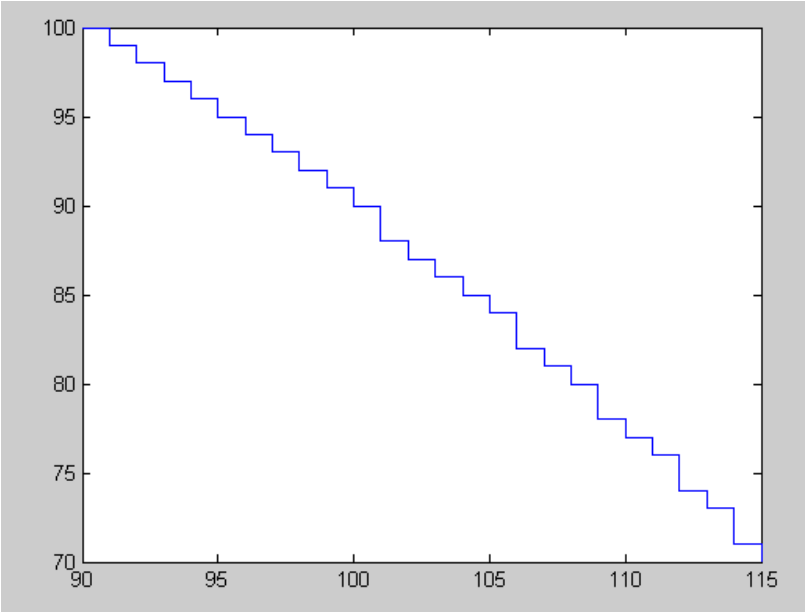


Рис. 4. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке в первом квадранте для исходных данных: x1nach = 90; y1nach = 100; x1kon = 101; y1kon = 70
Fig. 4. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation in the first quadrant for the input data: x1nach = 90; y1nach = 100; x1kon = 101; y1kon = 70

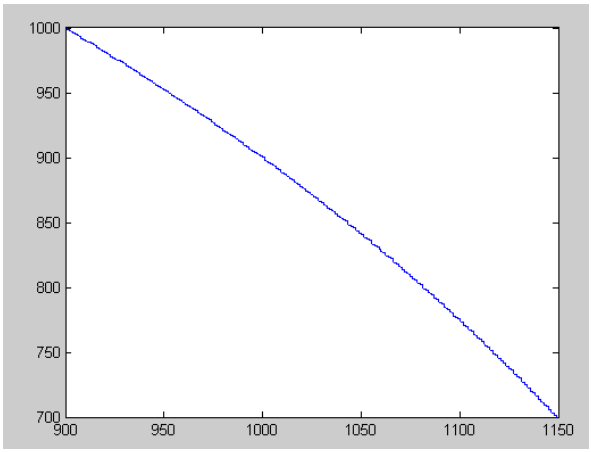


Рис. 5. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке в первом квадранте для исходных данных: x1nach = 900; y1nach = 1000; x1kon = 1010; y1kon = 700
Fig. 5. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation in the first quadrant for the input data: x1nach = 900; y1nach = 1000; x1kon = 1010; y1kon = 700

Результат моделирования по часовой стрелке для четверти окружности, расположенной в первом квадранте, приведен на рис. 6. Величина одного шага (дискреты) равна $\Delta L2$.

На рис. 7 представлены результаты моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке, соответственно, во втором, третьем и четвертом квадрантах для четверти окружности. Величина одной дискреты $\Delta L3$ примерно равна $\Delta L3 = 2 \cdot L2$.

В процессе выполнения работы были исследованы модели программного кругового интерполятора по часовой стрелке в четырех квадрантах.

Анализ результатов моделирования программного кругового интерполятора по часовой стрелке показал работоспособности разработанной модели и алгоритма работы. Также появилась возможность детального исследования показателей интерполятора и путей его совершенствования.

На рис. 8 приведены результаты моделирования работы программного линейного интерполятора в первом, во втором, третьем и четвертом квадрантах. Величина одного шага примерно равна $\Delta L4 = 20 \cdot \Delta L2$.

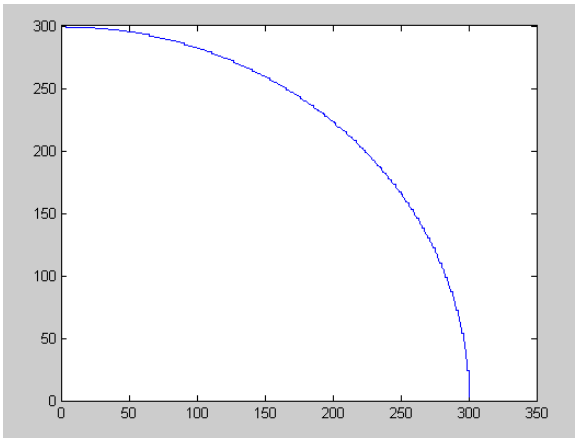


Рис. 6. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора (фрезерного станка) по часовой стрелке в первом квадранте для четверти окружности
Fig. 6. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation (milling machine) in the first quadrant for the quarter of the circle

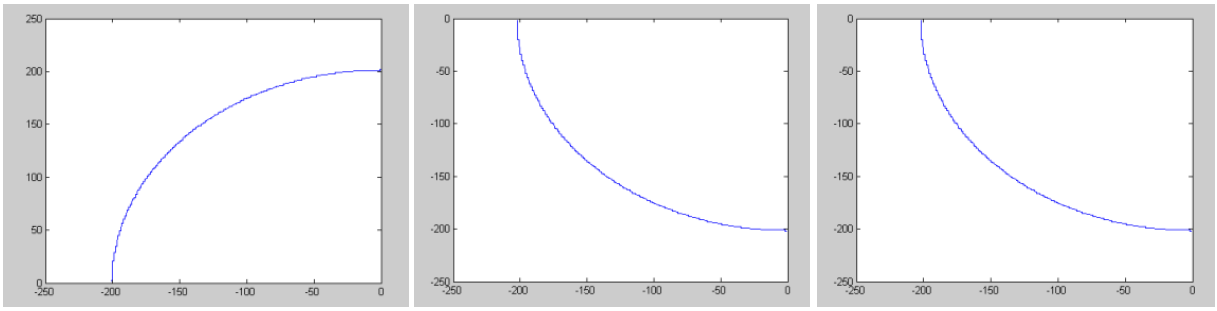


Рис. 7. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке во втором, третьем и четвертом квадрантах для четверти окружности
Fig. 7. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation in the second, third and fourth quadrants for the quarter of the circle

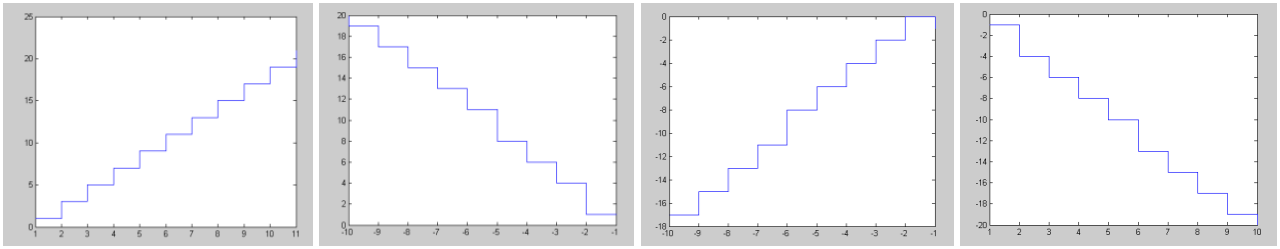


Рис. 8. Результат моделирования работы программного линейного интерполятора в первом, втором, третьем и четвертом квадрантах
Fig. 8. Simulation result of software linear interpolator operation in the first, second, third and fourth quadrants

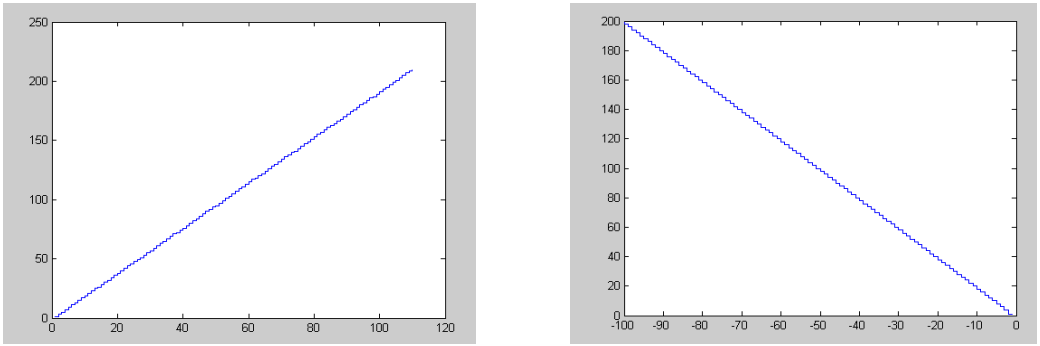


Рис. 9. Результат моделирования работы программного линейного интерполятора в первом и во втором квадрантах при $\Delta L5 = \dfrac{\Delta L4}{10}$

Fig. 9. Simulation result of software linear interpolator operation in the first and second quadrants at $\Delta L5 = \dfrac{\Delta L4}{10}$

Анализ результатов моделирования линейного интерполятора позволяет сделать вывод о том, что математические модели интерполятора корректно отражают его свойства. Проведенные исследования дают возможность определить пути программного изменения величины интервала паузы Δt. При уменьшении шага, соответствующего одной дискрете задания, в 10 раз ($\Delta L5 = \dfrac{\Delta L4}{10}$) изменяется вид траектории движения РО (рис. 9).

5. ВЫВОДЫ

Анализ результатов моделирования программного кругового интерполятора (фрезерного станка) по часовой стрелке

показал работоспособность разработанной модели и алгоритма работы. Также появилась возможность детального исследования показателей интерполятора и путей его совершенствования.

Анализ результатов моделирования линейного интерполятора (фрезерного станка) позволяет сделать вывод о том, что математические модели интерполятора корректно отражают его свойства. Проведенные исследования дают возможность определить пути программного изменения величины интервала паузы Δt. При уменьшении шага, соответствующего одной дискрете задания, в 10 раз изменяется вид траектории движения РО.

Результаты работы можно также применить для образовательных целей.

Библиографический список

1. Сусоев Е.О., Сартаков В.Д. Анализ структуры интерполятора системы числового программного управления // Повышение эффективности производства и использования электрической энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием: в 2 т. (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 71–75.
2. Başer O., Çetin L., Uyar E. Trajectory control of a bipedal robot using feed forward compensation methodology // International journal of mechatronics and manufacturing systems. 2011. Vol. 4. No. 2. P. 185–198.
3. Юмаев Р.А. История развития оборудования с числовым программным управлением и их использование в образовательном процессе // Отечественное образование: современное состояние и перспективы развития: сб. статей VII Всерос. Шаховских педагогических чтений научной школы Управления образовательными системами (г. Москва, 23 января 2015 г.). Москва, 2015. С. 545–547.
4. Красильникъянц Е.В., Бурков, А.П., Иванков В.А., Булдукян Г.А., Ельниковский Е.В., Варков А.А. Системы управления движением технологических объектов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. Вып. 4. 2007. С. 42–46.
5. Обухов А.И., Любимов А.Б., Григорьев Н.С. Структура и особенности реализации интерполятора траектории в системе ЧПУ "АКСИОМА КОНТРОЛ" // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: сб. тр. XVI Междунар. молодежной конф. (г. Москва, 15 сентября 2016 г). Москва, 2016. С. 173–174.
6. Зеленский А. А., Подураев Ю. В., Бондарь Д. В. Способ повышения точности интерполяции сложного контура для мехатронных модулей и промышленных роботов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 44–48.
7. Шахнин В.А. Адаптивный интерполятор для гибких мехатронных модулей неразрушающего контроля // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 3. С. 11–14.
8. Пат. № 2667658, Российская Федерация, G05B19/4103, A47L 15/46. Многокоординатный цифровой интерполятор / И.Н Булатникова, Н.Н. Гершунина; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный технологический университет; опубл. 03.10.2017.
9. Гречишников В.М., Теряева О.В. Трехфазный интерполятор канала точного отсчета цифровых преобразователей перемещений // Труды международного симпозиума. Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 157–160.
10. Чикуров Н.Г., Мавлютов М.С. Высокоскоростной сплайновый интерполятор повышенной точности для компьютерных устройств ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 51–55.
11. Зеленский А.А., Бондарь Д.В., Валюкевич В.А. Способ формирования траектории перемещения рабочего инструмента для цифровых систем управления промышленными роботами // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 77–80.
12. Зеленский А.А., Подураев Ю.В., Бондарь Д.В. Подход к исследованию неравномерно распределенного множества интерполяционных узлов для неортогональных мехатронных модулей контурной обработки материалов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 11. С. 33–35.
13. Рентюк В.А. Линейный интерполятор на устройствах выборки/ хранения с потерями: модель и практическая реализация // Компоненты и технологии. 2014. № 6 (155). С. 116–121.
14. Гаврилов С.В., До Тхань Занг. Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2016. Т. 1. С. 72–76.
15. Антоненко А.В. Модель обучаемой структуры интерполятора на основе радиально-базисной сети // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Тамбов, 15–17 ноября 2017 г.). Тамбов, 2017. С. 384–388.
16. Валюкевич Ю.А., Наумов И.И. Кинематическая модель двухзвенного механизма на основе цифровых дифференциальных анализаторов и планирование траектории в прямоугольной системе координат // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. Т. 7. № 3. С. 3–9.
17. Горлин О.А., Дугин Ю.А., Подоров С.В., Скрипкин Д.В., Наумов И.И. Синтез алгоритма интерполяции отрезка прямой для планирования траектории движения вырожденного двухзвенного механизма // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-2 (23). С. 69.
18. Мусиенко М.П., Крайнык Я.М., Денисов А.О., Бугаев В.И. К вопросу построения геометрических примитивов в интерполяторе 3D-принтера с управ-

лением на основе FPGA // Universum: технические науки. 2014. № 4 (5). С. 3–10.
19. Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Структура системы управления шестиногого шагающего робота Гексабот [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 5. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN516.pdf (дата обращения: 10.11.2017).
20. Ермаков Р.В., Кондратов Д.В., Львов А.А., Афанасьев М.Ю. Оценка параметров интерполятора бесконтактного оптического датчика угла // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2015. № 6 (76). С. 83–86.
21. Петров С.С. Некоторые методы борьбы с немерным остатком при интерполяции в системе числового программного управления // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2013): сб. тр. VI Междунар. конф. (г. Пермь, 25 октября 2013 г.). Пермь, 2013. С. 188–190.
22. Подачников А.В. Интерполятор траекторного перемещения диагностического датчика // ЭНЕРГИЯ-2018: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Иваново, 3–5 апреля 2018 г.). Иваново, 2018. С. 11-15.
23. Гречишников В.М., Теряева О.В. Перемещения с трехфазным интерполятором в канале точного отсчета // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2016: труды XIII Междунар. науч.-техн. конф.: в 12 т. (г. Новосибирск, 3–6 октября 2016 г.). Новосибирск, 2016. С. 107–109.

References

1. Susoev E.O., Sartakov V.D. *Analiz struktury interpolyatora sistemy chislovogo programmnogo upravleniya* [Interpolator structure analysis of the numerical control system]. *Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya elektricheskoj energii v usloviyah Sibiri*" [Proceedings of All-Russian scientific and practical conference with international participation "Improving efficiency of electric energy production and use in Siberia", Irkutsk, 24–28 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 71–75. (In Russ.).
2. Başer O., Çetin L., Uyar E. Trajectory control of a bipedal robot using feed forward compensation methodology // International journal of mechatronics and manufacturing systems, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 185–198.
3. Yumaev R.A. *Istoriya razvitiya oborudovaniya s chislovym programmnym upravleniem i ih ispol'zovanie v obrazovatel'nom processe* [Development history of CNC equipment and its use in educational process]. *Sbornik statej VII Vserossijskih Shahovskih pedagogicheskih chtenij nauchnoj shkoly Upravleniya obrazovatel'nymi sistemami "Otechestvennoe obrazovanie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya"* [Collected works of VII All-Russian Shanovsky pedagogical readings of the scientific school of Educational System Management "Domestic education: current status and development prospects", Moscow, 23 January 2015]. Moscow, 2015, pp. 545–547. (In Russ.).
4. Krasil'nik"yanc E.V., Burkov, A.P., Ivankov V.A., Buldukyan G.A., El'nikovskij E.V., Varkov A.A. Technological objects traffic control systems. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2007, Issue. 4, pp. 42–46. (In Russ.).
5. Obukhov A.I., Lyubimov A.B., Grigoriev N.S. *Struktura i osobennosti realizacii interpolyatora traektorii v sisteme ChPU "AKSIOMA KONTROL"* [Structure and implementation features of the interpolator trajectory in the CNC system "AXIOMA CONTROL"]. *Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj molodezhnoj konferencii "Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoj podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo cikla promyshlennogo produkta*" [Collected works of XVI International Youth Conference "Systems for design, technological preparation of production and management of industrial product life cycle stages", Moscow, September 15th 2016]. Moscow, 2016, pp. 173–174. (In Russ.).
6. Zelensky A.A., Poduraev Yu.V., Bondar D.V. A method to improve interpolation accuracy of a complex contour for mechatronic modules and industrial robots. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 9, pp. 44–48. (In Russ.).
7. Shakhnin V.A. Adaptive interpolator for flexible mechatronic modules of nondestructive testing. *Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technology], 2009, no. 3, pp. 11–14. (In Russ.).
8. Bulatnikova I.N., Gershunina N.N. *Mnogokoordinatnyj cifrovoj interpolyator* [Multicoordinate digital interpolator]. Patent RF, no. 2667658, 2017.
9. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. Three phase interpolator of the channel of accurate reading of digital movement converters. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma. Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium. Reliability and quality.], 2016, vol. 2, pp. 157–160. (In Russ.).
10. Chikurov N.G., Mavlyutov M.S. High-speed spline interpolator for high precision CNC devices. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, no. 12, pp. 51–55. (In Russ.).
11. Zelensky A.A., Bondar D.V., Valyukevich V.A. Interpolation method for digital control systems of industrial robots. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki* [Achievements of Modern Radio Electronics], 2011, no. 9, pp. 77–80. (In Russ.).
12. Zelensky A A., Poduraev Yu. V., Bondar D.V. The method for determining non-uniformly distributed set of interpolation nodes for nonorthogonal mechatronic modules contouring materials. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, no. 11. pp. 33–35. (In Russ.).
13. Rentiuk V.A. Linear interpolator on sample and hold unit with losses: model and practical implementation.

Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies], 2014, no. 6 (155), pp. 116–121. (In Russ.).
14. Gavrilov SV, Do Thanh Zang. Computer simulation of movement dynamics of a five-degree walking robot. *Avtomatizaciya v elektroenergetike i elektrotekhnike* [Automation in Electric Power Industry and Electrical Engineering], 2016, vol. 1, pp. 72–76. (In Russ.).
15. Antonenko A.V. *Model' obuchaemoj struktury interpolyatora na osnove radial'no-bazisnoj seti* [Model of an interpolator learning structure based on a radial basis network]. *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn"* [Proceedings of IV International scientific and practical conference "Virtual Modeling, Prototyping and Industrial Design", Tambov, 15–17 November 2017]. Tambov, 2017, pp. 384–388. (In Russ.).
16. Valyukevich Yu.A., Naumov I.I. Kinematic model of a two-link mechanism based on digital differential analyzers and trajectory planning in a rectangular coordinate system. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2011, vol. 7, no. 3, pp. 3–9. (In Russ.).
17. Gorlin O.A., Dugin Yu.A., Podorov S.V., Skripkin D.V., Naumov I.I. Synthesis of the interpolation algorithm of a straight line segment for planning degenerate two-link mechanism trajectory. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, no. 4–2 (23), p. 69. (In Russ.).
18. Musienko M.P., Kraynyk Y.M., Denisov A.O., Bugaev V.I. On geometric primitives construction in interpolator of 3D-printer with control based on FPGA. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Engineering Sciences], 2014, no. 4 (5), p. 3.
19. Fokin V.G., Shanygin S.V. The structure of the control system of a six-legged walking robot Hexabot. Online journal "SCIENCE". 2016, vol. 8, no. 5. Available at: http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN516.pdf (accessed 10 November 2017).
20. Ermakov R.V., Kondratov D.V., Lvov A.A., Afanasyev M.Yu. Parameter estimation of an interpolator of a contactless optical angle sensor. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMET], 2015, no. 6 (76), pp. 83–86. (In Russ.).
21. Petrov S.S. *Nekotorye metody bor'by s nemernym ostatkom pri interpolyacii v sisteme chislovogo programmnogo upravleniya* [Some methods of dealing with the unmeasured remainder at interpolation in the numerical program control system]. *Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye metody prikladnoj matematiki, teorii upravleniya i komp'yuternyh tekhnologij (PMTUKT-2013)"* [Proceedings of VI International Conference "Modern methods of applied mathematics, control theory and computer technology (AMCTCT-2013)", Perm, 25–26 October 2013). Perm, 2013, pp. 188–190.
22. Podachnikov A.V. *Interpolyator traektornogo peremeshcheniya diagnosticheskogo datchika* [Interpolator of the diagnostic sensor trajectory]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "ENERGIYa-2018"* [Proceedings of XIII International scientific and technical Conference of students, postgraduates and young scientists "Energy-2018", Ivanovo, 3–5 April 2018]. Ivanovo, 2018, pp. 11–15.
23. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. *Peremeshcheniya s trekhfaznym interpolyatorom v kanale tochnogo otscheta* [Movements with a three-phase interpolator in the exact reference channel]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* "*Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniya APEP – 2016"* [Proceedings of XIII International scientific and technical Conference "Actual problems of electronic instrument making APEIM - 2016", Novosibirsk, 3–6 October 2016]. Novosibirsk, 2016, pp. 107–109. (In Russ.).

Критерии авторства

Сартаков В.Д. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Sartakov V. D. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Сартаков Валерий Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электропривода
и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: valery_41@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valeriy D. Sartakov,
Cand. Sci.(Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electric Drive
and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: valery_41@mail.ru