

УДК 514.18

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ МАССИВА ТОЧЕК

ГАВРИЛЕНКО Е. А. ^{1*}, к.т.н, доц.,
НАЙДЫШ А. В. ^{2*}, д.т.н., проф.,
ХОЛОДНЯК Ю. В. ^{3*}, к.т.н.

^{1*} Кафедра информационных технологий проектирования им. В. М. Найдыша, Таврический государственный агротехнологический университет, пр. Б. Хмельницкого, 18, 72310, Мелитополь, Запорожская обл., Украина, ORCID ID: 0000-0003-4501-445X

² Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Мелитопольский государственный педагогический университет имени Богдана Хмельницкого, ул. Гетманская, 20, 72312, Мелитополь, Запорожская обл., Украина, ORCID ID: 0000-0003-4057-7085

^{3*} Кафедра информационных технологий проектирования им. В. М. Найдыша, Таврический государственный агротехнологический университет, пр. Б. Хмельницкого, 18, 72310, Мелитополь, Запорожская обл., Украина, тел. +38 (0619) 42-68-62, e-mail: yuliya_holodnyak@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8966-9269

Аннотация. *Цель.* Разработка технологии проектирования компьютерных моделей поверхностей, заданных массивом точек, и программ их обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). *Методика.* Основное требование к поверхностям изделий, взаимодействующих со средой, – обеспечение заданного характера их обтекания. Функциональные качества поверхности обеспечиваются ее геометрическими характеристиками. Ламинарный характер обтекания поверхностей можно обеспечить за счет монотонного изменения значений кривизны, кручения, радиусов соприкасающихся сфер вдоль линий, входящих в определитель поверхности. Исходными данными для формирования линейных элементов каркаса поверхности является исходный точечный ряд и геометрические свойства кривой. Разработаны методы формирования плоских и пространственных кривых с закономерным изменением характеристик на основе произвольного точечного ряда. На каждом участке, ограниченном последовательными точками, определяется область, внутри которой расположены все кривые линии, отвечающие условиям задачи. Полученная кривая, представленная новым точечным рядом, состоящим из сколь угодно большого числа точек, считается сформированной в случае, когда область ее возможного расположения не превышает заданной величины. Практическое применение предложенной технологии продемонстрировано на примере проектирования поверхностей межлопаточного канала рабочего колеса турбокомпрессора и рабочей поверхности дисковой фрезы для рыхления почвы. *Результаты.* Разработанная технология проектирования поверхностей сложных технических изделий включает в себя создание геометрических моделей поверхностей и управляющих программ для их обработки на станках с ЧПУ. Из исходного массива точек выделяются подмножества – точечные ряды, на основе которых формируются линейные элементы каркаса поверхности. Компьютерная модель поверхности создается на основе дискретного линейчатого каркаса, представленного семействами образующих и направляющих кривых линий. Управляющая программа создается в автоматизированном режиме с использованием САМ-пакетов на основе трехмерной компьютерной модели, сформированной в пакете трехмерного параметрического моделирования SolidWorks. *Научная новизна.* Разработана технология создания с заданной точностью компьютерных моделей поверхностей, представленных массивом точек. Функциональные качества поверхности обеспечивают заданные геометрические характеристики линейных элементов модели. *Практическая значимость.* Использование разработанной технологии позволяет уменьшить время создания компьютерной модели изделия и программы для обработки на станках с ЧПУ, улучшить функциональные качества поверхностей, которые ограничивают изделие.

Ключевые слова: динамическая поверхность; каркас поверхности; линейный элемент модели; дискретно представленная кривая; закономерное изменение дифференциально-геометрических характеристик

ТЕХНОЛОГІЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ МАСИВУ ТОЧОК

ГАВРИЛЕНКО Є. А. ^{1*}, к.т.н, доц.,
НАЙДИШ А. В. ^{2*}, д.т.н., проф.,
ХОЛОДНЯК Ю. В. ^{3*}, к.т.н.

^{1*} Кафедра інформаційних технологій проектування ім. В. М. Найдиша, Таврійський державний агротехнологічний університет, пр. Б. Хмельницького, 18, 72310, Мелітополь, Запорізька обл., Україна, ORCID ID: 0000-0003-4501-445X

² Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, вул. Гетьманська, 20, 72312, Мелітополь, Запорізька обл., Україна, ORCID ID: 0000-0003-4057-7085

^{3*} Кафедра інформаційних технологій проектування ім. В. М. Найдиша, Таврійський державний агротехнологічний університет, пр. Б. Хмельницького, 18, 72310, Мелітополь, Запорізька обл., Україна, тел. +38 (0619) 42-68-62, e-mail: yuliya_holodnyak@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8966-9269

Анотація. Мета. Розробка технології проектування комп'ютерних моделей поверхонь, заданих масивом точок, та програм їх обробки на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ). **Методика.** Основна вимога до поверхонь виробів, які взаємодіють із середовищем, - забезпечення заданого характеру їх обтікання. Функціональні якості поверхні забезпечуються її геометричними характеристиками. Ламінарний характер обтікання поверхонь можна забезпечити за рахунок монотонної зміни значень кривини, скруту, радіусів стичних сфер уздовж ліній, що входять у визначник поверхні. Вихідними даними для формування лінійних елементів каркасу поверхні є вихідний точковий ряд і геометричні властивості кривої. Розроблено методи формування плоских і просторових кривих із закономірною зміною характеристик на основі довільного точкового ряду. На кожній ділянці, обмеженій послідовними точками, визначається область, усередині якої розташовані всі криві лінії, що відповідають умовам задачі. Отримана крива, яка представлена новим точковим рядом, що складається з будь-якої кількості точок, вважається сформованою, якщо область її можливого розташування не перевищує заданої величини. Практичне застосування запропонованої технології продемонстровано на прикладі проектування поверхонь міжлопаткового каналу робочого колеса турбокомпресора та робочої поверхні дискової фрези для розпушування ґрунту. **Результати.** Розроблена технологія проектування поверхонь складних технічних виробів включає створення геометричних моделей поверхонь та керуючих програм для їх обробки на верстатах з ЧПУ. Із вихідного масиву точок виділяються підмножини – точкові ряди, на основі яких формуються лінійні елементи каркасу поверхні. Комп'ютерна модель поверхні створюється на основі дискретного лінійного каркасу, представленого сімействами твірних та напрямних кривих ліній. Управляюча програма створюється в автоматизованому режимі з використанням САМ-пакетів на основі тривимірної комп'ютерної моделі, сформованої в пакеті тривимірного параметричного моделювання SolidWorks. **Наукова новизна.** Розроблено технологію створення з заданою точністю комп'ютерних моделей поверхонь, представлених масивом точок. Функціональні якості поверхні забезпечуються заданими геометричними характеристиками лінійних елементів моделі. **Практична значимість.** Використання розробленої технології дозволяє зменшити час створення комп'ютерної моделі виробу та програми для обробки на верстатах з ЧПУ, поліпшити функціональні якості поверхонь, які обмежують виріб.

Ключові слова: динамічна поверхня; каркас поверхні; лінійний елемент моделі; дискретно представлена крива; закономірна зміна диференціально-геометричних характеристик

TECHNOLOGY OF COMPUTER DESIGN OF FUNCTIONAL SURFACES OF TECHNICAL PRODUCTS BASED ON THE ARRAY OF POINTS

GAVRYLENKO YE. A. ^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Co-Prof.*

NAIDYSH A. V. ^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

KHOLODNYAK YU. V. ^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*} Department of Information Technology of Design named after V. M. Naidysh, Tavria State Agrotechnological University, B. Khmelnytsky Avenue, 18, 72310, Melitopol, Zaporizhia region, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-4501-445X

^{2*} Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky, Hetmanska str., 20, 72312, Melitopol, Zaporizhia region, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-4057-7085

^{3*} Department of Information Technology of Design named after V. M. Naidysh, Tavria State Agrotechnological University, B. Khmelnytsky Avenue, 18, 72310, Melitopol, Zaporizhia region, Ukraine, tel. +38 (0619) 42-68-62, e-mail: yuliya_holodnyak@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8966-9269

Abstract. Purpose. The development of technology of design of computer models of surfaces defined by points array, and programs of their processing on the machines with computer numerical control (CNC). **Methodology.** The main requirement to the surface of products which interact with the environment, is to ensure a given character of their flow. Functional quality of the surface is ensure by its geometric characteristics. Laminar nature of flow of surfaces can be provided by monotonous change of curvature values, torsion, radiuses of adjoining spheres along the curves that are part of the determinant of the surface. The initial points set and geometrical characteristics of the curve are the initial data for the formation of linear elements of carcass of surface. The methods of formation of plane and spatial curves with regular change of characteristics on the basis of an arbitrary points set is developed. At each site, which is bounded by successive points the area within which are all the curves corresponding to the conditions of the problem is determined. The resulting curve, which is represented by a new point series consisting of an arbitrarily large number of points, it is considered formed when the area of its possible location is less than a predetermined value. Practical application of the proposed technology is demonstrated by the example of designing of surfaces inter scapular channel of impeller of the turbocharger and the working surface of the disk cutter for loosening the soil. **Findings.** The developed technology for the design of surfaces of complex technical products includes the creation of geometric models of surfaces and control programs for their processing on CNC machines. From the initial array of points allocated subset - point sets, on the basis of which the linear elements of the carcass of surface are formed. A computer model of the surface is created on the basis of discretely carcass the line represented by the families of longitudinal and transversal curves. The control program is created in the automated mode using the CAM-packets based on three-

dimensional computer model which is formed in a package of three-dimensional parametric modeling SolidWorks. **Originality.** The technology for creating with given accuracy of computer models of surfaces which represented by array of points is developed. Functional qualities of surfaces provide defined geometrical characteristics of linear elements of model. **Practical value.** The use of the developed technology makes it possible to reduce the time of creating a computer model of the products and software for processing on CNC machines, to improve the functional properties of surfaces that restrict the product.

Keywords: dynamic surface; carcass of surface; linear element of model; discretely represented curve; regular change of curvature and torsion

Введение

На современном этапе развития машиностроения актуальна задача моделирования поверхностей на основе массива точек. Координаты точек получают в результате замеров на физических образцах или рассчитаны исходя из условий работы изделия.

Процесс моделирования поверхности включает следующие этапы:

- на основе исходного точечного массива формируется дискретный линейчатый каркас поверхности, линейные элементы которого представлены точечным рядом;

- формируются непрерывные обводы, интерполирующие точечные ряды;

- на основе линейчатого каркаса создается модель поверхности изделия;

- компьютерная модель используется в качестве исходных данных для создания управляющей программы по обработке изделия на станке с числовым программным управлением (ЧПУ).

Основное требование к поверхностям изделий, взаимодействующих со средой, – обеспечение заданного характера их обтекания [7,8]. Функциональные качества поверхности обеспечиваются ее геометрическими характеристиками. Ламинарный характер обтекания поверхностей можно обеспечить за счет монотонного изменения значений кривизны, кручения, радиусов соприкасающихся сфер вдоль линий, входящих в определитель поверхности.

Существующие методы [9] интерполяции (метод кусочно-гладких приближений, кривых Безье, В-сплайнов) не обеспечивают заданный характер изменения характеристик вдоль кривой.

Методы формирования кривых линий с закономерным изменением дифференциально-геометрических характеристик предложены в работах [1,2,5,6]. Исходными данными для формирования кривой является точечный ряд и ее геометрические свойства. Такую кривую будем называть дискретно представленной кривой (ДПК).

Исходный точечный ряд разбивается на участки, которые возможно интерполировать ДПК постоянного хода, вдоль которой радиусы кривизны и соприкасающихся сфер монотонно изменяются. Такие участки кривых будем называть монотонными.

Рассмотрим точечный ряд, расположенный на

монотонной кривой линии l . Каждые четыре последовательные точки определяют сферу – $S\phi_i(i-1, i, i+1, i+2)$ и две принадлежащие ей окружности – $Окр_i(i-1, i, i+1)$ и $Окр_{i+1}(i, i+1, i+2)$ (рис. 1).

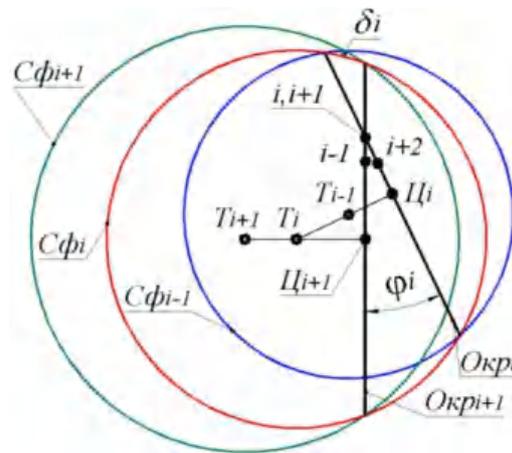


Рис.1. Формирование характеристик пространственной кривой / The formation of characteristics of spatial curve

На рис. 1 кривая l расположена таким образом, что взгляд наблюдателя направлен вдоль прямой $(i, i+1)$. Контуры $S\phi_{i-1}$, $S\phi_i$, $S\phi_{i+1}$ – окружности максимального радиуса, расположенные в плоскости P_i , проходящей перпендикулярно хорде $[i, i+1]$ через ее середину. $Окр_i$ и $Окр_{i+1}$ проецируются в хорды контура $S\phi_i$. Когда расстояние между точками бесконечно мало, то они определяют соприкасающуюся сферу и две соприкасающиеся окружности. При увеличении расстояний между последовательными точками, принадлежащими l , определяемые этими точками окружности и сферы будут пересекать кривую. $S\phi_i$ пересекает l в точках $i-1, i, i+1, i+2$. Участки кривой $...i-1, i-1, i+2...$ расположены за пределами $S\phi_i$, а участки $i-1-i$ и $i+1-i+2$ – внутри нее. Из этого следует, что последовательные $S\phi_{i-1}$, $S\phi_i$, $S\phi_{i+1}$ ограничивают область (δ_i) , внутри которой расположен участок $i-1-i+1$ кривой l . На рис. 1 показано сечение δ_i плоскостью P_i .

Монотонные участки ДПК формируются назначением точек сгущения внутри области возможного по условиям задачи решения δ_i .

Аналогичные области, определенные на остальных участках, составляют область возможного расположения ДПК. Все кривые линии, интерполирующие точечный ряд, характеристики

которых соответствуют характеристикам l , находятся внутри этой области.

В случае формирования плоской ДПК монотонным будем называть участок гладкой кривой, вдоль которого значения радиусов кривизны монотонно возрастают или убывают.

Кривая формируется внутри цепочки базисных треугольников (БТ), ограниченных касательными, проходящими через соседние точки, и хордами, соединяющими эти точки. После назначения точки сгущения (i_{cz}) и касательной в этой точке (t_{cz}) внутри исходного БТ получается два новых треугольника (рис. 2). Положение касательных назначается таким образом, чтобы параметры последовательных БТ обеспечивали возможность интерполяции точечного ряда монотонной кривой [5].

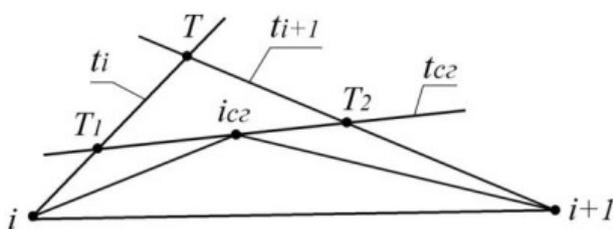


Рис. 2. Схема сгущения плоской ДПК / The scheme of thickening a plane DPC

Определение области возможного расположения кривой позволяет оценивать максимальную абсолютную погрешность, с которой ДПК представляет формируемый обвод. ДПК считается сформированной, когда область ее возможного расположения не превышает заданной величины.

После этого обвод формируется участками непрерывных кривых. На основе предложенных методов разработано программное обеспечение, которое позволяет формировать ДПК, состоящую из сколь угодно большого числа точек [4]. Полученный точечный ряд интерполируется В-сплайном или обводом из дуг кривых второго порядка, который располагается внутри области возможного расположения монотонных кривых.

Цель

Целью данной работы является разработка технологии проектирования компьютерных моделей поверхностей, заданных массивом точек, и программ их обработки на станках с ЧПУ.

Методика

Практическое применение разработанных методов [2,3,6,8] рассмотрим на примере проектирования поверхностей межлопаточного канала рабочего колеса турбокомпрессора и рабочей поверхности дисковой фрезы для рыхления почвы.

Межлопаточный канал рабочего колеса турбокомпрессора ограничен поверхностями ступицы, крышки и соседних лопаток.

Исходными данными для моделирования рабочей поверхности лопатки является упорядоченный массив точек, принадлежащих семейству горизонтальных плоскостей. На основе исходного точечного массива формируется семейство плоских ДПК (рис. 3). В результате сгущений исходных ДПК получены точечные ряды, определяющие кривые с монотонным изменением радиусов кривизны. Максимальная абсолютная погрешность формирования монотонных кривых составляет 10^{-4} .

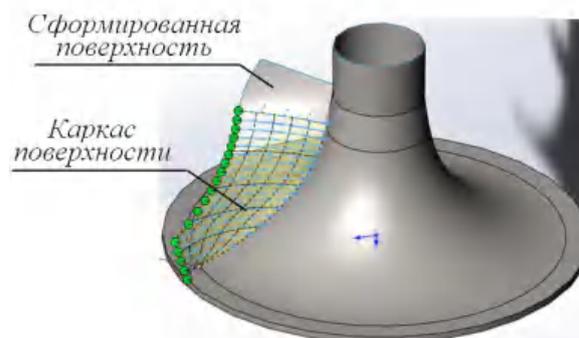


Рис. 3. Формирование каркаса поверхности лопатки / Design the carcass of the surface of blade

Направляющие линии каркаса сформированы на основе точечных рядов, расположенных на ступице и кромке лопатки. На основе исходного точечного ряда сформированы пространственные ДПК правого хода, вдоль которых радиусы соприкасающихся сфер и окружностей монотонно возрастают.

Полученные ДПК интерполированы неоднородным неперiodическим кубическим В-сплайном [3]. После этого элементы каркаса импортированы в пакет трехмерного параметрического моделирования SolidWorks и с помощью стандартных функций сформирована модель рабочей поверхности лопатки.

Разработанная методика проектирования рабочих колес принята к внедрению на ЧП «Гаврия Турбо Плюс» и ООО «Мелитопольский завод турбокомпрессоров» (г. Мелитополь) и используется при изготовлении рабочих колес турбокомпрессоров типа ТРК ЯМЗ, ТКР-11Н1, ТКР-11Н2, ТКР-11Н3.

Инструмент для рыхления почвы представляет собой фрезу, состоящую из диска с тремя почвообрабатывающими элементами (ножами) (рис. 4). В процессе работы ножи осуществляют поступательно-вращательное движение.

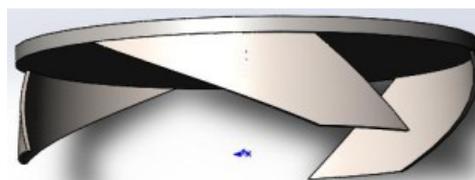


Рис. 4. Модель почвообрабатывающего инструмента / The model of tillage tool

Модель поверхности ножа сформирована на основе каркаса, состоящего из направляющей линии

и 4 горизонтальных образующих. В качестве направляющей линии используется режущая кромка ножа – цилиндрическая винтовая линия.

Образующие линии модели созданы на основе ДПК, исходные точки которых определены исходя из траектории движения режущей кромки. При этом обеспечивается минимальное отклонение траектории движения точек, задающих горизонтальное сечение ножа, от траектории движения точки этого сечения, расположенной на режущей кромке. Это способствует минимальному уплотнению почвы в процессе обработки [4,8].

На основе исходных точечных рядов формируются плоские монотонные ДПК, которые с заданной точностью аппроксимируются B-сплайном.

Результаты

Разработанная технология формирования компьютерной модели поверхности, заданной упорядоченным массивом точек, включает в себя следующие этапы.

1. Из исходного массива точек выделяются точечные ряды, представляющие плоские или пространственные кривые линии – линейные элементы каркаса поверхности. Полученные ДПК разбиваются на участки, на основе которых возможно сформировать монотонные кривые.

2. С помощью программного обеспечения, разработанного в системе компьютерной алгебры Maple, на основе исходных ДПК формируются точечные ряды, состоящие из сколь угодно большого числа узлов, которые возможно интерполировать кривыми с заданными свойствами.

3. В системе трехмерного параметрического моделирования SolidWorks на основе полученных ДПК формируются обводы, состоящие из участков непрерывных кривых с заданными характеристиками. Обводы используются в качестве линейных элементов каркаса поверхности.

4. С помощью стандартных функций SolidWorks на основе каркаса формируется компьютерная модель изделия. На основе полученной модели с помощью функций САМ-пакетов создается управляющая программа для станков с ЧПУ.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана технология создания с заданной точностью компьютерных моделей поверхностей, представленных массивом точек. Функциональные качества поверхности обеспечивают заданные геометрические характеристики линейных элементов модели. Использование разработанной технологии позволяет уменьшить время создания компьютерной модели изделия и программы для обработки на станках с ЧПУ, улучшить функциональные качества поверхностей, которые ограничивают изделие.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана технология проектирования сложных поверхностей технических изделий. Технология включает в себя создание геометрических моделей поверхностей и управляющих программ для их обработки на станках с ЧПУ.

Из исходного массива точек выделяются подмножества – точечные ряды, на основе которых формируются линейные элементы каркаса поверхности. Компьютерная модель поверхности создается на основе дискретного линейчатого каркаса, представленного семействами образующих и направляющих кривых линий. Управляющая программа создается в автоматизированном режиме с использованием САМ-пакетов на основе трехмерной компьютерной модели, сформированной в пакете трехмерного моделирования SolidWorks.

Основной сферой использования методов является моделирование поверхностей с повышенными динамическими качествами, ограничивающих изделия, функциональное назначение которых – взаимодействие со средой. Наибольший эффект может быть получен при решении задач, требующих достижения компромисса между функциональными качествами поверхности и дополнительными требованиями компоновки, эстетики, комфортабельности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гавриленко, Е. А. Вариативное моделирование пространственных одномерных обводов на основе дискретных параметров формообразования / Е. А. Гавриленко // Прикладна геометрія та інженерна графіка: міжвід. наук.-техн. збірник / Київський національний університет будівництва та архітектури. – Київ, 2014. – Вип. 92. – С. 49-54.
2. Гавриленко, Е. А. Дискретное геометрическое моделирование пространственных одномерных обводов по заданным условиям / Е. А. Гавриленко, Ю. А. Дмитриев // Динамика систем, механизмов и машин. – Омск, 2014. – № 3. – С. 150-152.
3. Гавриленко, Е. А. Програмна реалізація алгоритму моделювання одновимірних обводів по заданим геометричним умовам / Е. А. Гавриленко, Ю. В. Холодняк // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво: наук. журнал / Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2013. – Вип. 13. – С.4-9.
4. Гурідова, В. О. Геометрична модель лінійчатої поверхні ґрунтообробного робочого органу змінної кривини / В. О. Гурідова // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць / Мелітопольський державний педагогічний університет ім. Б. Хмельницького. – Мелітополь, 2015. – Вип. 4. – С. 30-35.

5. Холодняк, Ю. В. Формування геометричних характеристик при моделюванні монотонної дискретно представленої кривої / Ю. В. Холодняк, Є. А. Гавриленко // Прикладна геометрія та інженерна графіка: міжвід. наук.-техн. збірник / Київський національний університет будівництва та архітектури. – Київ, 2013. – Вип. 91. – С. 292-296.
6. Gavrilenko, E.A. Discretely geometrical modelling of one-dimensional contours with a regular change of differential-geometric characteristics / E.A. Gavrilenko, Yu.V. Kholodnyak // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2014. – P. 1-5. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7005654/>
7. Milad, Fooladi Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines / Milad Fooladi, Asghar Akbari Foroud // IET Renewable Power Generation. – 2016. – Vol. 10, Issue 2. – P. 250-259. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7394972/>
8. Ryan, Barrett Comparison of Airfoil Precomputational Analysis Methods for Optimization of Wind Turbine Blades / Ryan Barrett, Andrew Ning // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2016. – Vol. 7, Issue 3. – P. 1081-1088. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7419269/>
9. Shoichi, Okaniwa Uniform B-Spline Curve Interpolation with Prescribed Tangent and Curvature Vectors / Shoichi Okaniwa, Ahmad Nasri, Hongwei Lin, Abdulwahed Abbas, Yuki Kineri, Takashi Maekawa // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2012. – Vol. 18, issue 9. – P. 1474-1487. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6035703/>
10. Wang, Hongli Modeling of the no-tillage planter and simulation of the cutting-stubble knife / Wang Hongli, Zhang Wei // System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization. – Chengdu, China, 2012. – P. 335–338. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6340880/>

REFERENCES

1. Gavrilenko Ye.A. *Variativnoye modelirovaniye prostranstvennykh odnomernykh obvodov na osnove diskretnykh parametrov formoobrazovaniya* [Variative modeling of spatial one-dimensional contours on the basis of discrete parameters of formation]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika* [Applied geometry and engineering graphics]. KNUBA. Kyiv, 2014, no. 92, pp. 49-54. (in Russian).
2. Gavrilenko Ye.A. and Dmitriyev Yu.A. *Diskryetnoe geometricheskoye modelirovaniye prostranstvennykh odnomernykh obvodov po zadannym usloviyam* [Discrete geometric modeling of spatial one-dimensional contours according to the given data]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashyn* [Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines]. Omsk, 2014, № 3, pp. 150-152. (in Russian).
3. Havrylenko Ye.A. and Kholodnyak Yu.V. *Programna realizatsiia alorytmu modeliuвання odnovymirnykh obvodiv po zadanykh heometrychnym umovam* [Development of software for modeling of one-dimensional contours with given geometrical conditions]. *Kompiuterno-integrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo* [Computer-integrated technologies: education, science, production]. LNTU, Lutsk, 2013, no. 13, pp. 4-9. (in Ukrainian).
4. Guridova V.O. *Geometrychna model liniichatoi poverkhni gruntoobrobnoho robochogo organu zminnoi kryvyny* [Geometrical model of a ruled surface of the working body of tillage of variable curvature]. *Suchasni problemy modeliuвання* [Contemporary problems of modeling]. MDPU im. B. Khmelniitskogo. Melitopol, 2015, no. 4, pp. 30-35. (in Ukraine).
5. Kholodnyak Yu.V. and Havrylenko Ye.A. *Formuvannya heometrychnykh kharakterystyk pry modeliuванні monotonnoi dyskretno predstavlenoi kryvoi* [Formation of geometrical characteristics at modeling of the monotonic discretely represented curve]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika* [Applied geometry and engineering graphics]. KNUBA. Kyiv, 2013, no. 91, pp. 292-296. (in Ukrainian).
6. Gavrilenko E.A. and Kholodnyak Yu.V. *Discretely geometrical modelling of one-dimensional contours with a regular change of differential-geometric characteristics*. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. Omsk, 2014, pp. 1-5. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7005654/>.
7. Milad Fooladi and Asghar Akbari Foroud *Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines*. *IET Renewable Power Generation*. 2016, vol. 10, is. 2, pp. 250-259. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7394972/>.
8. Ryan Barrett and Andrew Ning *Comparison of Airfoil Precomputational Analysis Methods for Optimization of Wind Turbine Blades*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2016, vol. 7, is. 3, pp. 1081-1088. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7419269/>.
9. Shoichi Okaniwa, Ahmad Nasri, Hongwei Lin, Abdulwahed Abbas, Yuki Kineri and Takashi Maekawa *Uniform B-Spline Curve Interpolation with Prescribed Tangent and Curvature Vectors*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2012, vol. 18, is. 9, pp. 1474-1487. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6035703/>.
10. Wang Hongli and Zhang Wei *Modeling of the no-tillage planter and simulation of the cutting-stubble knife*. *System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization*. Chengdu, China, 2012, pp. 335–338. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6340880/>.