



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Исследование сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств мехатронным профилографом

Сергей Васильев<sup>a, \*</sup>, Виктор Алексеев<sup>b</sup>, Алена Федорова<sup>c</sup>, Дмитрий Лобанов<sup>d</sup>

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>,  [vsa\\_21@mail.ru](mailto:vsa_21@mail.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>,  [av77@list.ru](mailto:av77@list.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>,  [e\\_a\\_a@mail.ru](mailto:e_a_a@mail.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.1.08

#### История статьи:

Поступила: 09 сентября 2021  
 Рецензирование: 02 октября 2021  
 Принята к печати: 16 октября 2021  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

#### Ключевые слова:

Мехатронный профилограф  
 Сложные поверхности  
 Обратное проектирование  
 Винтовые движители  
 Транспортные средства

#### Финансирование:

Результаты были получены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-1198.2020.8, соглашение № 075-15-2020-228.

#### Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

**Для цитирования:** Исследование сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств мехатронным профилографом / С.А. Васильев, В.В. Алексеев, А.А. Федорова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 65–78. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-65-78.

### Введение

В производственном процессе важным этапом является контроль качества изделий. В последнее время существенно повысились

качество выпускаемой продукции и производительность труда особенно изделий со сложными поверхностями, например, винтовых движителей транспортных средств. Проектирование таких сложных деталей и узлов проводится на этапе разработки модели в системе автоматизированного проектирования в виртуальной среде с целью обеспечения точности и технологичности изделия. Довольно сложно сразу найти и обеспечить весогеометрические характеристики

#### \*Адрес для переписки

Васильев Сергей Анатольевич, д.т.н., доцент  
 Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,  
 пр. Московский, 15,  
 428015, г. Чебоксары, Россия  
 Тел. +7-927-843-22-90, e-mail: [vsa\\_21@mail.ru](mailto:vsa_21@mail.ru)

фасонных поверхностей изделий даже в системе автоматизированного проектирования. В то же время возникает вопрос о надежности и диагностике этих деталей и узлов в процессе эксплуатации, например, возможны поломки и отказы, связанные с нарушением геометрии винтов при контакте с инородными предметами в воздушной и водной среде.

Для исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств предлагается обратное проектирование с применением мехатронного профилографа [1]. Обратный инжиниринг позволяет представить в цифровом виде облако точек физической детали или узла машины. Как правило, облако точек представляет собой топологическую информацию о геометрии сложной поверхности изделия, которую можно использовать для создания его цифровой модели. Этот метод используется довольно часто при копировании деталей машин при условии отсутствия проектной документации или 3D-модели, при совершенствовании и модернизации узлов со сложными поверхностями, а также для создания непосредственно цифровых моделей изделий для виртуальных исследований в жидких средах расчетных программ.

Актуальность применения технологий обратного инжиниринга проявляется в различных отраслях народного хозяйства: машиностроении, сельском хозяйстве, медицине и других. Поэтому вопрос о создании Центра обратного инжиниринга в Фонде развития промышленности РФ был поднят на заседании Правительственной комиссии по импортозамещению министром промышленности торговли РФ Д.В. Мантуровым.

Поверхность сложной детали не всегда является идеально ровной, гладкой и геометрически правильной, на ней можно выделить определенные микро- и макрогеометрические отклонения. К макрогеометрическим отклонениям относят волнистость и отклонения формы поверхности сложной детали. Для этого используют соотношение отклонения шага к значению отклонения от номинального контура. Например, отклонением от формы считается отношение шага к значению отклонения больше 1000.

Для определения этих параметров в металлообработке используют профилографы (от профиль и ...граф), позволяющие измерить неровности поверхности и представить результаты в

виде профилограммы, характеризующей волнистость, шероховатость и форму поверхности.

ГОСТ Р ИСО 4287–2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности» нормирует не только показатели шероховатости, но и волнистости, а также показатели первичного профиля. Поэтому уже сегодня переход машиностроительных предприятий на ГОСТ Р ИСО 4287–2014 несет в себе ряд сложностей, в том числе понадобится новое и современное измерительное оборудование, обеспечивающее построение профилограмм для реализации профильного метода.

Сегодня известны различные методы получения информации о физическом объекте с применением разных устройств для сбора данных. Условно их можно разделить на две группы: контактные способы – атомно-силовая микроскопия, стилусная профилометрия и прочее [2, 3] и бесконтактные способы – методы, реализуемые с помощью лазерных приборов, обработкой изображений и другие [4–8]. Например, определение морфологических параметров и форм сложных поверхностей проводилось бесконтактным методом в работах [9–11] по машиностроению, в трудах [12–15] для сельского хозяйства. Васильевым С.А. разработан профилограф, сканирующий поверхность цилиндрическим методом [16–17]. К числу основных преимуществ этой группы способов можно отнести время получения информации, ее точность, удобство и простоту применения приборов. Есть и недостатки, которые проявляются при исследовании поверхностей, связанные с явлением дифракции лучей лазера на гладких участках, но эти ошибки можно программно устранить в процессе обработки информации [18].

С учетом вышесказанного сформулируем цель исследований – разработка новой технологии исследования сложных поверхностей винтовых движителей, к которым относят гребневые и воздушные винты транспортных средств, мехатронным профилографом для реализации обратного инжиниринга.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– на основе обзора методов обратного проектирования и измерительных приборов пред-

ложить технологию исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств и конструкцию мехатронного профилографа;

– разработать мехатронный профилограф, с помощью его применения провести теоретические и экспериментальные исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств, получить и обработать информацию об их профиле;

– провести экспресс-анализ сложных поверхностей изделий, имеющих поворотную симметрию, и установить различия форм поверхностей лопастей по величинам отклонений в продольном и поперечном направлении.

### Методика исследований

В качестве устройства для исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств предлагается разработанный мехатронный профилограф (рис. 1). Про-

филограф предназначен для измерения профиля и исследования формы сложных поверхностей различных изделий, а также определения геометрических и морфологических параметров этих поверхностей. Устройство позволяет получить профилограмму, характеризующую волнистость, шероховатость и форму поверхности по круговой траектории. Он может использоваться в машиностроении, в том числе для обратного инжиниринга.

Мехатронный профилограф содержит: основание; стойку, на которой установлены угловой датчик и с помощью подшипников качения корпус с размещенными в нем блоком питания и блоком управления; неподвижное опорное колесо и взаимодействующий с ним спутник; ноутбук, оснащенный информационной системой измерения и компьютерным управлением для согласованной работы электродвигателей в процессе измерения, а также программой приема и обработки; показателей датчиков и приборов; направляющую; каретку; лазерный датчик

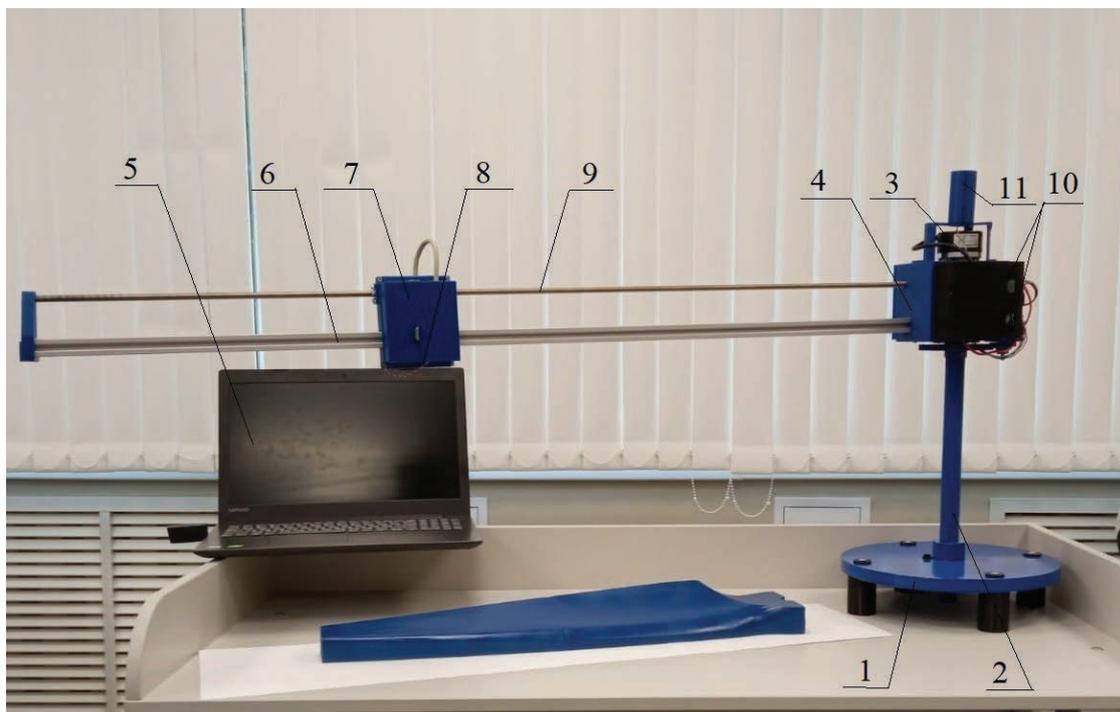


Рис. 1. Общий вид мехатронного профилографа:

1 – основание; 2 – стойка; 3 – угловой датчик; 4 – корпус; 5 – ноутбук; 6 – направляющая; 7 – каретка; 8 – лазерный датчик положения; 9 – винт; 10 – электродвигатели; 11 – акселерометр и гироскоп

Fig. 1. General view of the profiler:

1 – base; 2 – rack; 3 – angle sensor; 4 – housing; 5 – laptop; 6 – guide; 7 – carriage; 8 – laser position sensor; 9 – screw; 10 – electric motors; 11 – accelerometer and gyroscope

положения; винт; электродвигатели [использовался щеточный двигатель TETRIX® MAX TorqueNADO® Motor W44260 (12 В постоянного тока с частотой вращения 100 об/мин и крутящим моментом 4,9 Н · м) и шаговый двигатель NEMA 17 42HS48-1684-08AF (номинальный ток: 1,68 А, крутящий момент: 5,0 кг/см, номинальное напряжение: 2,8 В, угол поворота/шаг: 1,8°)]; акселерометр и гироскоп. Для перемещения каретки выбран шаговый двигатель, так как не требуется высокий крутящий момент, а для вращения консоли он необходим.

Корпус установлен на стойке с помощью подшипников качения, для привода вращения которого используется неподвижное опорное колесо, сателлит и электродвигатель, расположенный на подвижном корпусе. Связь ноутбука с блоком управления, датчиками, электродвигателями и измерительными приборами обеспечивается через Bluetooth-соединение при помощи Bluetooth-радиомодулей, встроенных в лазерный датчик, блок управления и ноутбук.

Для создания конструкции, состоящей из каретки с лазерным датчиком положения, направляющей и винта, использовалась безлюфтовая бронзовая гайка с точностью изготовления Н7 и трапецеидальный винт диаметром 8 мм. Причем гайка состоит из двух частей, между которыми устанавливается пружина. Сила упругости пружины отталкивает части гайки друг от друга, что позволяет уменьшить люфт и снизить погрешность вращательно-поступательного движения. Направляющая, изготовленная из Т-образных пазов в алюминиевом профиле, позволяет легко фиксировать подвижную каретку при поступательном перемещении. Предварительные расчеты на прочность конструкции показали, что на расстоянии одного метра при консольном расположении направляющей величина деформации от собственного веса составляет 1,12 мм, а при воздействии каретки с датчиком весом 0,15 кг в целом вызывает линейную деформацию 1,79 мм.

При проверке мехатронного профилографа учтены эти погрешности, причем проведен внешний осмотр, опробование, подтверждение программного обеспечения, определение метрологических характеристик. Опробование мехатронного профилографа проводили при помощи поверочной плиты.

В лазерном датчике за основу взят принцип оптической триангуляции (максимальная частота обновления данных составляет 2 кГц, разрешение – 0,01 % от диапазона), а в угловом энкодере фиксируется цикл прохождения магнитного полюса вращающегося магнита, расположенного поблизости от чувствительного элемента. Установлены метрологические характеристики информационно-измерительной системы: диапазон измерения расстояния от датчика до поверхности от 100 до 500 мм, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений  $\pm 0,05$  % от диапазона, диапазон измерения по окружности от 0 до 360°, пределы допускаемой погрешности углового энкодера  $\pm 30''$ . При проверке мехатронного профилографа проведен внешний осмотр, опробование, подтверждение программного обеспечения, определение метрологических характеристик.

Техническая характеристика мехатронного профилографа: габаритные размеры – 1450×25×550 мм, диапазон изменения угловой скорости перемещения датчика – 0,1...2,5 рад/с, диапазон изменения радиальной скорости перемещения датчика – 0,0001...0,01 м/с, напряжение сети углового энкодера серии E60H – 5 В DC, потребляемый ток –  $\leq 80$  мА; количество импульсов на один оборот – от 1024 до 8192, диапазон рабочих температур – от –10 до +70 °С, частота ответа – до 300 кГц.

Для реализации профилирования сложной поверхности используют мехатронную систему измерения в виде мехатронного профилографа, оснащенного информационной системой измерения.

При профилировании сложной поверхности деталей вначале размещают мехатронный профилограф на исследуемую поверхность или около нее на горизонтально расположенном столе, если деталь имеет небольшие размеры. Для точного определения горизонтальной поверхности, в которой перемещается лазерный датчик в процессе исследования, используют акселерометр и гироскоп. Акселерометр и гироскоп – устройства, которые частично дублируют себя, дополняя друг друга, повышают точность получаемых данных. Гироскоп служит для отслеживания положения лазерного датчика в пространстве путем определения собственного угла наклона относительно земной поверхности. Акселерометр

в состоянии покоя позволяет вычислить угол наклона относительно вектора силы тяготения земли. На экране монитора отображается отклонение поверхности вращения лазерного датчика от уровня в цифровом виде в двух перпендикулярных направлениях. Для корректировки горизонтального положения отклоняют стойку, добиваясь нулевых отклонений от горизонтали в продольном и поперечном направлении. Для этого используют, например MPU6050, который представляет собой трехосевой гироскоп, а также трехосевой акселерометр в одном корпусе.

Вначале определяют профиль сложной поверхности детали по окружности, ограничивающей измеряемую площадку, профилографом, оснащенный информационной системой. Для этого запускают программу на ноутбуке и включают профилограф. Через блок управления верхний двигатель перемещает с помощью винта на периферию измеряемой площадки лазерный датчик положения по направляющей, а нижний двигатель через блок управления поворачивает на необходимый угол направляющую в нулевое положение, перекачивая сателлит по неподвижному опорному колесу. Далее программа с ноутбука запускает только нижний двигатель, сканируется поверхность по периферии площадки. С помощью Bluetooth-соединения информация с датчика с радиомодулем Bluetooth передается на радиомодуль Bluetooth блока управления и далее в ноутбук, где также имеется встроенный модуль Bluetooth. Компьютерная программа по полученной информации изображает построение профиля по окружности в полярных координатах по двум параметрам: расстояние между датчиком положения и сложной поверхностью детали, а также соответствующий этому положению угол поворота от нулевой отметки по угловому датчику. Информационная система измерения мехатронного профилографа – это совокупность функционально - объединенных измерительных (датчики), контрольных (контроль и сравнение с моделями различных профилей), диагностических (акселерометр, гироскоп), вычислительных (ноутбук), управляющих (ноутбук, электродвигатели), регистрирующих (ноутбук), отображающих (ноутбук), телекоммуникационных (ноутбук) и других вспомогательных технических средств, сформированная для получения измерительной информации, ее преобразования и об-

работки, передачи измерительной информации по назначению. Она формирует по признакам, характеризующим свойства профилей сложных поверхностей (наклон, кривизну, волнистость, шероховатость), решение о принадлежности распознаваемого профиля к той или иной модели (гладкая, шероховатая, волнистая, фасонная поверхность). Причем для каждой модели применяется соответствующая траектория перемещения датчика, например спираль Архимеда с заданным шагом.

Рассмотрим траекторию движения лазерного датчика, которая представляет собой кривую в виде спирали Архимеда (рис. 2), координаты которой определяются в полярных координатах точкой лазерного датчика  $M(r_i, \varphi_i, z_i)$ :

$$\begin{cases} r_i = k \cdot i \\ z_i = H_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_i$  – смещение т.  $M$  на угле  $\varphi_i$  от центра вращения, м;  $\varphi_i$  – угол поворота т.  $M$  в  $i$ -м положении, рад;  $z_i$  – значение аппликаты т.  $M$  в  $i$ -м положении, м;  $H_i$  – значение расстояния до поверхности, м;  $k$  – смещение т.  $M$  на угле, равном одному рад, определяемое по формуле

$$k = \frac{S_{\text{рад}}}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{рад}}$  – радиальный шаг спирали.

Радиальный шаг спирали  $S_{\text{рад}}$  вычисляется по формуле

$$S_{\text{рад}} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_5}{Z_4} S_{\text{винт}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{винт}}$  – шаг ходового винта;  $Z_1$  – количество зубьев сателлита 1;  $Z_2$  – количество зубьев опорного колеса 2;  $Z_4$  – количество зубьев опорного колеса 4;  $Z_5$  – количество зубьев сателлита 5.

Окончательно уравнение спирали Архимеда (1) с учетом уравнений (2) и (3) примет вид

$$\begin{cases} r_i = \frac{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \frac{Z_5}{Z_4} S_{\text{винт}}}{2\pi} \varphi_i, \\ z_i = H_i = 0. \end{cases} \quad (4)$$

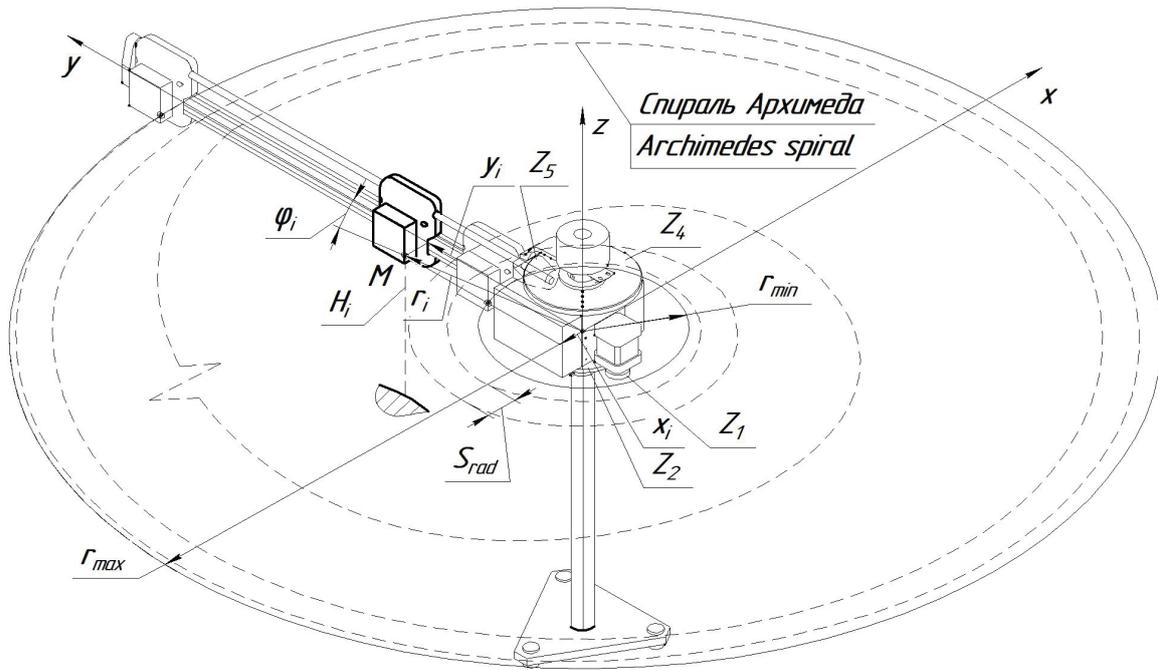


Рис. 2. Траектория движения т. М лазерного датчика

Fig. 2. The trajectory of the M point of the laser sensor

Координаты  $x_i, y_i$  связаны с углом  $\varphi_i$  в полярных координатах формулами

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \varphi_i, \\ y_i = r_i \sin \varphi_i. \end{cases} \quad (5)$$

При небольших значениях радиального шага  $S_{\text{рад}}$  и больших значениях радиусов сканирования  $r_i$  можно условно представить спираль Архимеда совокупностью окружностей с шагом  $S_{\text{рад}}$ . Тогда радиус  $i$ -й окружности  $r_i$  можно определить по формуле

$$r_i = r_{i-1} + S_{\text{рад}}, \quad (6)$$

где  $r_i$  – радиус  $i$ -й окружности на  $i$ -м обороте, равный максимальному значению  $r_i$ ;  $r_{i-1}$  – радиус  $(i-1)$  окружности на  $(i-1)$ -м обороте, равный максимальному значению  $r_{i-1}$ .

В то же время длина окружности будет меняться:

$$L_{\text{окр } i} = 2\pi r_i = 2\pi(r_{i-1} + S_{\text{рад}}). \quad (7)$$

Лазерный датчик имеет фиксированную частоту измерения, поэтому окружной шаг  $S_{\text{окр } i}$

$i$ -й окружности на  $i$ -м обороте при постоянной частоте вращения двигателя можно определить по формуле

$$S_{\text{окр } i} = \frac{L_{\text{окр } i} \omega}{2\pi\nu} = \frac{2\pi r_i \omega}{2\pi\nu} = \frac{r_i \omega}{\nu} = \frac{r_i \pi i}{30\nu} i_{13}^2, \quad (8)$$

где  $\nu$  – частота обновления данных лазерного датчика, Гц;  $\omega$  – постоянная угловая скорость водила  $b$ , рад/с;  $i_{13}^2$  – передаточное отношение цилиндрической передачи от сателлита  $1$  к водилу  $3$  при опорном колесе  $2$ ;  $L_{\text{окр } i}$  – длина  $i$ -й окружности, мм.

Из формулы (8) видно, что при равномерном вращении двигателя с удалением лазерного датчика от центра профилографа окружной шаг  $S_{\text{окр } i}$  будет увеличиваться.

Следовательно, для сохранения постоянства окружного шага на любой окружности движение должно быть замедленным при вращении с удалением лазерного датчика от центра. Тогда формулу (8) можно переписать в следующем виде:

$$S_{\text{окр } i} = \frac{r_i \omega_{\text{ср } i}}{\nu}, \quad (9)$$

где  $\omega_{\text{ср } i}$  – средняя угловая скорость водила  $b$  на  $i$ -м обороте, рад/с.

Для определения угловой скорости приравняем окружные шаги на разных оборотах:

$$S_{\text{окр } i} = S_{\text{окр } (i-1)}. \quad (10)$$

С учетом уравнения (8) уравнение (10) примет вид

$$\frac{r_i \omega_i}{v} = \frac{r_{i-1} \omega_{i-1}}{v} = \text{const}, \quad (11)$$

$$\omega_i = \frac{S_{\text{окр } v}}{r_i}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видим, что в числителе величина постоянная, которая зависит от выбранных параметров: частоты обновления данных лазерного датчика, задаваемой при программировании, а также от выбранного окружного шага, задаваемого пользователем и зависящим от различных измеряемых параметров поверхности. В знаменателе – величина переменная, находящаяся в диапазоне

$$r_i \in (r_{\text{min}}, r_{\text{max}}), \quad (13)$$

где  $r_{\text{min}}$  – минимальный радиус сканирования, равный наружному радиусу основания профилографа, м;  $r_{\text{max}}$  – максимальный радиус сканирования, равный максимальному радиусу плеча профилографа, м.

График зависимости угловой скорости  $\omega_i$  от радиуса сканирования  $r_i$  представляет собой гиперболу (рис. 3, а).

Формула (12) для определения угловой скорости  $\omega_i$  в зависимости от радиуса сканирования  $r_i$  при выбранном окружном шаге  $S_{\text{окр}}$ , например равном 2 мм, и заданной частоте обновления данных лазерного датчика  $v = 100$  Гц примет вид

$$\omega_i = \frac{S_{\text{окр } v}}{r_i} = \frac{0,002 \cdot 100}{r_i} = \frac{0,2}{r_i}. \quad (14)$$

После обработки полученных данных в Excel был получен график зависимости угловой скорости  $\omega_i$  от радиуса сканирования  $r_i$  или от количества оборотов  $N$  для экспериментальной установки профилографа (рис. 3, б).

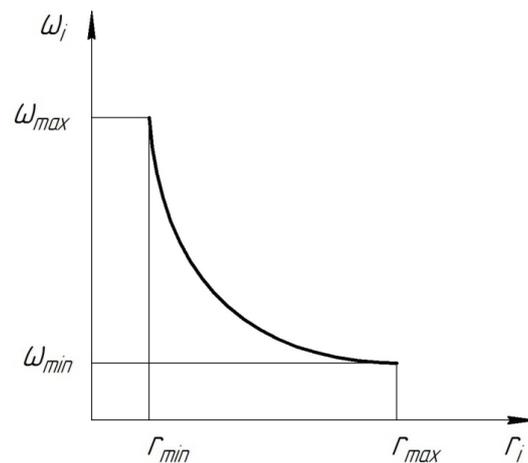
Судя по графику, полученному при заданных технологических параметрах мехатронного профилографа (рис. 3, б), можно сделать вывод, что для постоянного шага спирали величиной 2 мм значение угловой скорости должно плавно уменьшаться от максимального значения 2 рад/с до минимального значения 0,574 рад/с. Таким образом, технологическая скорость выполнения операции замера уменьшилась в 3,484 раза.

Выбор электродвигателей не зависел от графика угловой скорости, а сделан по крутящему моменту. Полученная зависимость угловой скорости от радиуса сканирования позволила установить, как эффективнее управлять двигателем в составе привода при сканировании поверхности по спирали Архимеда.

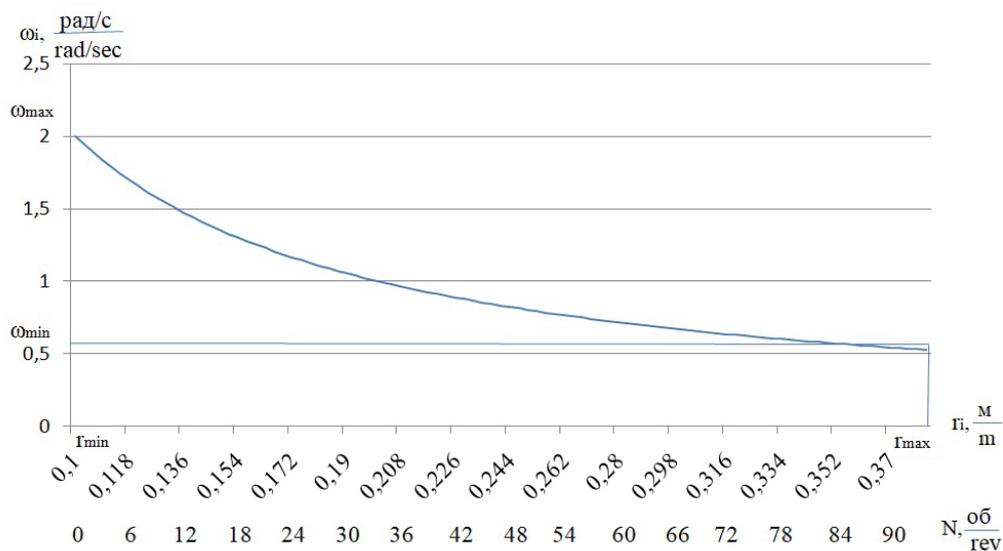
При сканировании по спирали Ферма сначала первый шаг выполняется по окружности, а второй шаг – по спирали, которая представляет собой плоскую кривую – траекторию точки, равномерно движущейся вдоль радиуса-вектора с началом в точке  $O$  (рис. 4). Траектория движения датчика по параболической спирали Ферма обеспечивает оптимальный охват площади участков заданным количеством точек замера, которые равномерно распределяются по всей исследуемой площади. Например, площадь участка между первым и вторым витком будет равна площади участка между вторым и третьим витком, равна площади участка между третьим и четвертым витком и т. д.

Затем определяют профиль сложной поверхности детали (в нашем случае модель лопасти винтового движителя транспортного средства) по этой спирали или по кривой путем перемещения лазерного датчика положения от нулевой отметки и далее по заданной траектории. На рис. 1 представлен один из этапов обратного инжиниринга, получение и проверка 3D-модели винта из дюралюминия.

Контролируемый винт располагается так, чтобы он находился в зоне рабочего диапазона датчика. Кроме того, в области прохождения падающего на винт и отраженного от него излучения не должно находиться посторонних предметов. При контроле винтов сложной формы и текстуры должно быть минимизировано попадание зеркальной составляющей отраженного излучения во входное окно датчика.



a



б

Рис. 3. График зависимости угловой скорости  $\omega_i$  от радиуса сканирования  $r_i$ :  
 а – теоретический; б – экспериментальный

Fig. 3. Graph of the dependence of the angular velocity  $\omega_i$  on the scanning radius  $r_i$ :  
 а – theoretical; б – experimental

Винт укладывают на плоскую поверхность длиной не менее длины самого объекта, предназначенного для проведения измерений, например поворачивающую плиту или стеллаж. Винт на плоской поверхности должен лежать свободно без воздействия каких-либо внешних сил, например нажима, натяжения, кручения.

При подаче сигнала от ноутбука через блок управления начинают работать два двигателя, которые с помощью приводов перемещают датчик положения по направляющей, которая, в свою очередь, вместе с корпусом поворачивается по опорному колесу. Информационная система измерения позволяет представить информацию

в полярных координатах по двум параметрам для заданной спирали: расстояние между датчиком положения и поверхностью почвы, а также соответствующий этому положению угол поворота от нулевой отметки по угловому датчику. Рассматриваем двумерную систему координат как систему, в которой каждая точка на плоскости определяется двумя числами – полярным углом (угол поворота по угловому датчику) и полярным радиусом (расстояние от датчика положения до поверхности детали). Эта система координат в нашем случае удобна, так как отношения между точками проще изобразить в виде радиусов и углов.

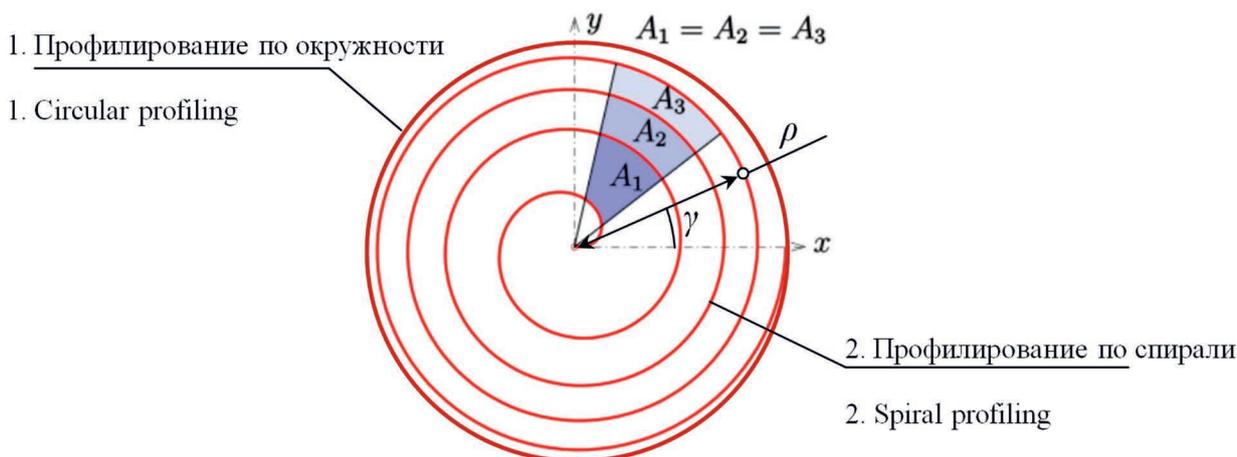


Рис. 4. Траектория движения датчика по окружности и спирали

Fig. 4. Trajectory of the sensor movement in a circle and a spiral

Вследствие того что информация с датчика передается с каждого витка спирали, может происходить наложение кривых в полярных координатах.

Полученную информацию представляют при известном полярном уравнении спирали, заложенном в информационную систему измерения, например, для спирали Ферма:

$$r = \sqrt{a^2 \varphi}, \quad (15)$$

где  $r$  – радиус-вектор, м;  $a$  – коэффициент спирали;  $\varphi$  – угол положения радиуса-вектора от нулевой отметки в градусах.

Для перевода в декартову систему координат используют уравнения

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi, \\ y = r \sin \varphi, \\ z = z, \end{cases} \quad (16)$$

где  $x$  – продольная координата, м;  $y$  – поперечная координата, м;  $z$  – вертикальная координата поверхности детали на заданной точке, м.

## Результаты и их обсуждение

Предлагаемый подход значительно упрощает исследования даже в случае сложной формы поверхности, описание которой предполагает использование специальных функций (например, Риккати, Бесселя или Якоби), а также их комбинаций. Сканирование позволяет получить

большой массив достаточно точных цифровых данных. Это делает возможным составление, анализ и выбор наиболее адекватных цифровых моделей поверхности [19–21].

В случае сканирования объектов, когда датчик движется над исследуемой поверхностью по спирали Архимеда  $r = \alpha \varphi$  (или Ферма  $r^2 = \alpha^2 \varphi$ ), имеется относительно высокая скорость обработки площади поверхности, поскольку процесс непрерывный и нет необходимости в снижении скорости из-за остановок, сопутствующих челночному сканированию. Шаг спирали выбирается из каждого конкретного условия задачи и в разработанном устройстве может быть достаточно малым. Поэтому для соседних точек изучаемой поверхности даже линейная модель позволяет добиться высокой точности описания, не говоря уже о нелинейных вариантах. Практика показывает, что относительно быстро и нетрудоемко подбираются модели с  $R^2 > 0,99$ , т. е. менее 1 % статистических данных не описывается подобранными формулами. Приведенные цифры необходимо рассматривать на фоне того, что дефекты самих объектов, такие как различного рода сколы, изгибы и прочее приводят как минимум к 5...10 %-м расхождениям в данных. Обозначенный факт дает возможность с помощью экстраполяции данных получать функции, описывающие поверхность исходя из интересующих условий. Это могут быть данные как в декартовой системе координат, так и данные с постоянным полярным углом, постоянным радиусом или какими-либо другими условиями.

В случае необходимости внесения корректив значения, получаемые из функций расчетным образом, можно сравнивать с непосредственно отсканированными, поскольку разработанное устройство может осуществлять сканирование по любой заданной траектории.

Одним из вариантов практического использования может выступать экспресс-анализ состояния поверхности объектов, имеющих поворотную симметрию. Использование цилиндрических координат в данном случае логично и имеет следующие преимущества:

- отслеживание динамики изменения расстояния  $H$  вдоль полярного радиуса  $r$  при неизменном полярном угле  $\varphi$  в виде функций  $\zeta_\varphi(r)$ . Их получают выделением из массива данных значений, соответствующих определенным полярным углам. Шаг  $\Delta\varphi$  между полярными углами выбирается исходя из конкретных целей исследования;

- отслеживание динамики изменения формы расстояния  $H$  вдоль полярного угла  $\varphi$  при неизменном полярном радиусе  $r$  в виде функций  $\xi_r(\varphi)$ . Их получают выделением из массива данных значений, соответствующих определенным значениям радиуса, с интересующим шагом  $\Delta r$ .

Одновременное использование  $\zeta_\varphi(r)$  и  $\xi_r(\varphi)$  для анализа поверхности дает возможность изучить «эволюцию» формы поверхности при радиальном или угловом смещении вдоль каждой лопасти винта. Таким образом, достаточно быстро и нетрудоемко могут быть оценены дефекты нагнетающей и засасывающей поверхностей каждой лопасти, входящей и выходящей кромок: количество сколов, их площадь, максимальная глубина, средний объем. Далее производится как оценка дефектов формы лопастей, так и сравнение форм различных лопастей между собой, при которой исследуются: отклонения, изгибы или деформации в радиальном и перпендикулярном ему направлении, различия в площадях лопастей.

Как уже было указано, высокие значения коэффициентов детерминации моделей, описывающих поверхность, позволяют эффективно экстраполировать данные и переходить из одной системы координат  $(r_i, \varphi_i, H_i)$  в другую  $(x_k, y_k, z_k)$ .

Кроме формулы (16), при пересчетах площадей и объемов следует помнить, что Якобиан перехода

$$J(r, \varphi, H) = \begin{vmatrix} x'_r & x'_\varphi & x'_H \\ y'_r & y'_\varphi & y'_H \\ z'_r & z'_\varphi & z'_H \end{vmatrix} = r, \quad (17)$$

т. е.  $dS_{xyz} = r dS_{r\varphi H}$ , а  $dV_{xyz} = r dV_{r\varphi H}$

После того как получены экспериментальные данные, они разделяются на массивы. Для каждой лопасти производится оценка формы поверхности путем анализа  $\Delta H_i$  – отклонений экспериментальных значений от значений, рассчитанных по регрессионным зависимостям. По значениям, статистически значимо превышающим среднее отклонение на поверхности, определяются границы сколов и прочих дефектов, а затем рассчитываются их параметры: площадь, максимальная глубина, средний объем исходя из приближения.

Следующий этап – изучение различия форм поверхностей лопастей. Для его реализации сравниваются данные, соответствующие одним и тем же значениям радиуса  $r$  при изменении угла  $\varphi$  вдоль каждой лопасти и, наоборот, сравниваются данные, соответствующие одним и тем же значениям угла  $\varphi$  при изменении полярного радиуса  $r$  вдоль каждой лопасти, т. е. используются функции  $\zeta_\varphi(r)$  и  $\xi_r(\varphi)$ . Обозначив через  $\Delta z_{jk}$  отклонения в значениях между  $j$ - и  $k$ -лопастями, получим возможность определить как величину отклонения вдоль радиуса  $\gamma$ , так и  $\delta$  – угла отклонения в перпендикулярном радиусу направлении.

Для винтовых движителей с осерадиально-переменным шагом (шаг винтовых линий изменяется как вдоль оси, так и по радиусу) угол между кривыми поверхностями соседних лопастей, соответствующими одним и тем же значениям радиусов, меняется, причем расстояния между кривыми также возрастают.

По результатам экспериментальных исследований после рассмотрения массива величин отклонений  $\Delta H_i$  для соответствующих точек разных лопастей винта была получена зависимость нарастания отклонений от полярных радиуса и угла (рис. 5).

Двухфакторная степенная модель, описывающая отклонения формы лопасти с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,967$ , имеет вид  $H = 1,071 \cdot 10^{-4} r^{5,487} \varphi^{9,017}$ , т. е. в среднем угол отклонения в перпендикулярном радиусу направ-

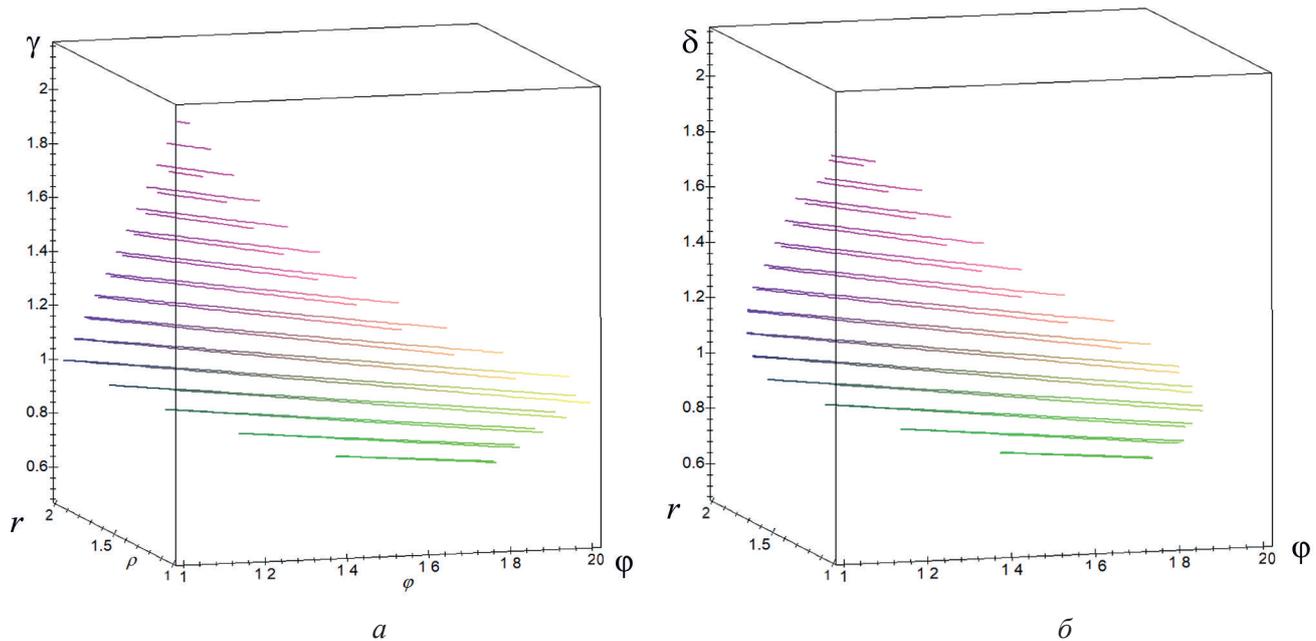


Рис. 5. Определение величин отклонений:

$$a - \gamma; \bar{b} - \delta$$

Fig. 5. Determination of deviation values:

$$a - \gamma; \bar{b} - \delta$$

лении  $\delta$  возрастает от 0 до  $0,3^\circ$ , а угол отклонения вдоль радиуса  $\gamma$  возрастает от 0 до  $5,4^\circ$ .

Таким образом, в процессе исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств путем обратного инжиниринга с применением разработанного мехатронного профилографа установлены его конструктивно-технологические параметры, проведен экспресс-анализ поверхностей винтов, имеющих поворотную симметрию и установлены различия форм поверхностей лопастей винта по величинам отклонений в продольном и поперечном направлении для разных радиусов.

## Выводы

1. Предложены новый метод исследования сложных поверхностей винтовых движителей транспортных средств и конструкция мехатронного профилографа на основе обзора методов обратного проектирования.

2. Для разработанного мехатронного профилографа на основании теоретических и экспериментальных исследований выявлены основные конструктивно-технологические параметры и установлена гиперболическая зависимость угловой скорости перемещения лазерного датчика

от радиуса сканирования. Например, для постоянного шага траектории по спирали Архимеда величиной 2 мм значение угловой скорости датчика должно плавно уменьшаться от максимального значения в 2 рад/с до минимального значения  $0,574$  рад/с, т.е. в 3,484 раза.

3. Проведен экспресс-анализ поверхностей винтовых движителей транспортных средств, имеющих поворотную симметрию и установлены различия форм поверхностей лопастей винта по величинам отклонений в продольном и поперечном направлении для разных радиусов. На основании экспериментальных данных получена двухфакторная степенная модель, описывающая отклонения с коэффициентом детерминации  $0,967$ , по анализу которой видно, что в среднем угол отклонения в перпендикулярном радиусу направлении  $\delta$  возрастает от 0 до  $0,3^\circ$ , а угол отклонения вдоль радиуса  $\gamma$  возрастает от 0 до  $5,4^\circ$ .

## Список литературы

1. Feature-based reverse modeling strategies / Y. Ke, S. Fan, W. Zhu, A. Li, F. Liu, X. Shi // Computer-Aided Design. – 2006. – Vol. 38, iss. 5. – P. 485–506. – DOI: 10.1016/j.cad.2005.12.002.
2. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing // Measurement. – 2013. – Vol. 46 (7). – P. 2065–2072. – DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.

3. *Lushnikov N., Lushnikov P.* Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Vol. 20. – P. 425–429. – DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.
4. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser / V.V. Alexander, H. Deng, M.N. Islam, F.L. Terry // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*. – San Jose, CA, 2010. – P. AFA3. – DOI: 10.1364/CLEO\_APPS.2010.AFA3.
5. *Rao C.B., Raj B.* Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques // *Sadhana*. – 2003. – Vol. 28, pt. 3–4. – P. 739–761. – DOI: 10.1007/BF02706457.
6. *Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N.* Portable non-contact surface roughness measuring device // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 469. – P. 012074. – DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
7. *Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S.* Vision system in quality control automation // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 144. – P. 03008. – DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
8. *Shih F.Y.* Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. – Piscataway, NJ: IEEE Press; Hoboken, NJ: Wiley, 2010. – 537 p. – ISBN 978-0-470-40461-4.
9. *Wang T., Groche P.* Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (1). – P. 19. – DOI: 10.3390/jmmp3010019.
10. *Stoudt M., Hubbard J.B.* Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53 (16). – P. 4293–4304. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
11. Разработка и исследование профилографа для измерения отклонений формы поверхности изделий методом лазерного спиралевидного сканирования / С.А. Васильев, В.В. Алексеев, М.А. Васильев, А.А. Федорова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 71–81. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81.
12. Simulation of channel development on the surface of agrolandscapes on slopes / I.I. Maksimov, V.I. Maksimov, S.A. Vasil'ev, V.V. Alekseev // *Eurasian Soil Science*. – 2016. – Vol. 49, iss. 4. – P. 475–480. – DOI: 10.1134/S1064229316040074.
13. *Васильев С.А., Алексеев В.В., Речнов А.В.* Экспресс-метод количественной оценки пожнивных остатков на поверхности почвы // *Аграрный научный журнал*. – 2015. – № 9. – С. 11–13.
14. *Hockauf R., Grove T., Denkena B.* Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3 (2). – P. 40. – DOI: 10.3390/jmmp3020040.
15. *Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I.* Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer // *Engineering for Rural Development. Proceedings*. – 2018. – Vol. 17. – P. 537–542.
16. *Васильев С.А.* Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2016. – № 3. – С. 220–226.
17. *Васильев С.А.* Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2016. – № 4. – С. 40–54.
18. *Campana C., Moslehpour S.* Non contact surface roughness measurement instrumentation // *American Society for Engineering Education*. – 2007. – AC 2007-2557. – P. 12.1107.
19. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts / P. Groche, A. Zettler, S. Berner, G. Schneider // *International Journal of Material Forming*. – 2010. – Vol. 4 (4). – DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
20. *Schilling R.J.* Fundamentals of robotics: analysis and control. – New Delhi: Prentice Hall, 2005. – ISBN 81-203-1047-0.
21. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V.* Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Investigation of complex surfaces of propellers of vehicles by a mechatronic profilograph

Sergey Vasiliev<sup>a, \*</sup>, Viktor Alekseev<sup>b</sup>, Alyona Fedorova<sup>c</sup>, Dmitry Lobanov<sup>d</sup>

I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospect, Cheboksary, 428015, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>,  [vsa\\_21@mail.ru](mailto:vsa_21@mail.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>,  [av77@list.ru](mailto:av77@list.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0257-9197>,  [e\\_a\\_a@mail.ru](mailto:e_a_a@mail.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 09 September 2021

Revised: 02 October 2021

Accepted: 16 October 2021

Available online: 15 December 2021

#### Keywords:

Mechatronic profilograph

Complex surfaces

Reverse engineering

Propellers

Vehicles

#### Funding

The results were obtained under the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MD-1198.2020.8, agreement No. 075-15-2020-228

#### Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

### ABSTRACT

**Introduction.** The technology of investigation of screw propellers complex surfaces, which include the marine and aircraft propellers of vehicles, mechatronic profilers for the implementation of reverse engineering, is considered. A review of the scientific literature shows that at present the problem of monitoring complex surfaces of products at various stages of its life cycle requires further research, since the use of available devices and methods does not always provide the necessary accuracy, technological effectiveness and sufficient information on measurements. **The purpose of the work** is to develop a new technology for studying complex surfaces of propellers, which include marine and aircraft propellers of vehicles by means of a mechatronic profilograph to implement reverse engineering. **Methods.** The paper considers the implementation of the innovative technology for studying complex surfaces of propellers using the developed mechatronic profilograph. This ingenious mechatronic profilograph is designed to measure the profile and study the shape of complex surfaces of various products, as well as to determine the geometric and morphological parameters of these surfaces. On the basis of theoretical studies the main design and technological parameters are found and the hyperbolic dependence of the angular rate of the laser sensor movement on the scanning radius is determined for the developed mechatronic profilograph. For example, if a constant pitch of the trajectory along the Archimedes spiral is 2 mm, the value of the sensor angular rate should gradually decrease from the maximum value of 2 rad/s to the minimum value of 0.574 rad/s, i.e. by 3.484 times. **Results and discussion.** It is revealed that the use of cylindrical coordinates for processing the obtained data by a profilograph is logical and has a number of advantages. An express analysis of the propeller surfaces with rotary symmetry is carried out and differences in the shapes of the surfaces of the propeller blades by deviation values in the longitudinal and transverse directions for different radii are established. On the basis of the experimental data, a two-factor power model describing deviations with a determination coefficient of 0.967 is obtained, according to its analysis, it is clear that on average the angle of deviation in the perpendicular direction to the radius  $\delta$  – increases from 0 to 0.3°, and the angle of deviation along the radius  $\gamma$  increases from 0 to 5.4°.

**For citation:** Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Fedorova A.A., Lobanov D.V. Investigation of complex surfaces of propellers of vehicles by a mechatronic profilograph. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 65–78. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-65-78. (In Russian).

### References

1. Ke Y., Fan S., Zhu W., Li A., Liu F., Shi X. Feature-based reverse modeling strategies. *Computer-Aided Design*, 2006, vol. 38, iss. 5, pp. 485–506. DOI: 10.1016/j.cad.2005.12.002.
2. Jeyapoovan T., Murugan M. Surface roughness classification using image processing. *Measurement*, 2013, vol. 46 (7), pp. 2065–2072. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.014.
3. Lushnikov N., Lushnikov P. Methods of assessment of accuracy of road surface roughness measurement with profilometer. *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 20, pp. 425–429. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.069.

#### \* Corresponding author

Vasiliev Sergey A., D.Sc. (Engineering), Associate Professor,  
 I. N. Ulianov Chuvash State University,  
 15 Moskovsky Prospect,  
 428015, Cheboksary, Russia  
 Tel.: +7-927-843-22-90, e-mail: [vsa\\_21@mail.ru](mailto:vsa_21@mail.ru)

4. Alexander V.V., Deng H., Islam M.N., Terry F.L. Non-contact surface roughness measurement of crankshaft journals using a super-continuum laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010*, San Jose, CA, 2010, p. AFA3. DOI: 10.1364/CLEO\_APPS.2010.AFA3.
5. Rao C.B., Raj B. Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques. *Sadhana*, 2003, vol. 28, pt. 3–4, pp. 739–761. DOI: 10.1007/BF02706457.
6. Abidin F.Z., Hung J., Zahid M.N. Portable non-contact surface roughness measuring device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, p. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012074.
7. Kiran R., Amarendra H.J., Lingappa S. Vision system in quality control automation. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 144, p. 03008. DOI: 10.1051/mateconf/201814403008.
8. Shih F.Y. *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*. Piscataway, NJ, IEEE Press, Hoboken, NJ, Wiley, 2010. 537 p. ISBN 978-0-470-40461-4.
9. Wang T., Groche P. Sheet metal profiles with variable height: numerical analyses on flexible roller beading. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (1), p. 19. DOI: 10.3390/jmmp3010019.
10. Stoudt M., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53 (16), pp. 4293–4304. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.05.038.
11. Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Vasiliev M.A., Fedorova A.A. Razrabotka i issledovanie profilografa dlya izmereniya otklonenii formy poverkhnosti izdelii metodom lazernogo spiralevidnogo skanirovaniya [Development and research of a profile recorder for measuring deviations in the shape of the surface of products by laser spiral scanning]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 71–81. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-71-81.
12. Maksimov I.I., Maksimov V.I., Vasil'ev S.A., Alekseev V.V. Simulation of channel development on the surface of agrolandscapes on slopes. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, iss. 4, pp. 475–480. DOI: 10.1134/S1064229316040074.
13. Vasiliev S.A., Alekseev V.V., Rechnov A.V. Ekspress-metod kolichestvennoi otsenki pozhnivnykh ostatkov na poverkhnosti pochvy [Express-method of quantitative assessment of crop residues on the soil surface]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2015, no. 9, pp. 11–13.
14. Hockauf R., Grove T., Denkena B. Prediction of ground surfaces by using the actual tool topography. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3 (2), p. 40. DOI: 10.3390/jmmp3020040.
15. Vasiliev S., Kirillov A., Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer. *Engineering for Rural Development. Proceedings*, 2018, vol. 17, pp. 537–542.
16. Vasiliev S.A. Razrabotka metoda i profilografa dlya otsenki meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Development of a method and the profilometer to control reclamation technologies slope agrolandscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*, 2016, no. 3, pp. 220–226.
17. Vasiliev S.A. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov profilografov dlya kontrolya meliorativnykh tekhnologii na sklonovykh agrolandshaftakh [Justification of structural and technological parameters of profilographs for reclamation technologies control on sloping cultivated lands]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*, 2016, no. 4, pp. 40–54.
18. Campana C., Moslehpour S. Non contact surface roughness measurement instrumentation. *American Society for Engineering Education*, 2007, AC 2007-2557, p. 12.1107.
19. Groche P., Zettler A., Berner S., Schneider G. Development and verification of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts. *International Journal of Material Forming*, 2010, vol. 4 (4). DOI: 10.1007/s12289-010-0998-3.
20. Schilling R.J. *Fundamentals of robotics, analysis and control*. New Delhi, Prentice Hall, 2005. ISBN 81-203-1047-0.
21. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).